



**TURUN  
YLIOPISTO**

# **Vihreän vedyn infrastruktuuri Suomessa**

materiaalitekniikan  
kandidaatintutkielma

Laatija:  
Lotta Liuhamo

22.6.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

**Tutkinto-ohjelma, oppiaine:** Materiaalitekniikka

**Tekijä(t):** tek. yo, Lotta Liuhamo

**Otsikko:** Vihreän vedyn infrastruktuuri Suomessa

**Ohjaaja(t):** FM, DI, TkT, Kimmo Pyyhtiä

**Sivumäärä:** 23 sivua

**Päivämäärä:** 22.6.2026

Tiivistelmän tyyli on **Abstract**.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan vihreän vedyn infrastruktuuria Suomessa ja Pohjois-Euroopassa sekä vetytalouden kehityksen mahdollisuuksia osana energiajärjestelmän muutosta fossiilisista polttoaineista kohti uusiutuvia tuotantomuotoja. Työssä käsitellään Suomen sähköntuotannon rakennetta, sen muutoksia vuosien varrella ja tulevaisuudennäkymiä, uusiutuvien energialähteiden kasvavaa merkitystä sekä sähköverkon toimintaan liittyviä haasteita erityisesti sääriippuvaisen energiantuotannon lisääntyessä. Erityistä huomiota kiinnitetään tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon vaihteluihin ja niiden vaikutukseen energian varastointitarpeeseen.

Työssä esitellään vedyn tuotanto elektrolyysin avulla sekä yleisimmät elektrolyysiteknologiat: alkali-elektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja kiinteäoksidielektrolyysi. Lisäksi tarkastellaan vedyn varastointia paineistettuna ja nesteytettynä, vertaillaan erilaisia ratkaisuja vedyn kuljetukseen ja punnitaan niihin liittyviä turvallisuushaasteita. Erityisesti vedyn pienestä molekyylikoosta aiheutuva, lukuisia materiaaleja haurastuttava vetyhaurastuminen aiheuttaa haasteita vetyinfrastruktuurille.

Ratkaisuna infrastruktuurihaasteisiin pohditaan myös vedyn jatkojalostusta esimerkiksi ammoniakiksi, synteettiseksi polttoaineiksi ja terästeollisuuden käyttöön. Suomen asemaa vetytaloudessa arvioidaan kansallisten tavoitteiden, uusiutuvan energian tuotantopotentiaalın sekä käynnissä olevien infrastruktuurihankkeiden näkökulmasta. Työn perusteella vihreällä vedyllä arvioidaan olevan merkittävä rooli uusiutuvan energian varastoinnissa, teollisuuden päästöjen vähentämisessä ja tulevaisuuden energiajärjestelmässä.

**Avainsanat:** vetytalous, vihreä vety, elektrolyysi, uusiutuva energia, energian varastointi, vetyinfrastruktuuri

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Sähköntuotanto Suomessa</b>	<b>4</b>
2.1	Tuulivoima	6
2.2	Aurinkoenergia	7
2.3	Vesivoima	7
2.4	Ydinenergia	8
2.5	Polttoaineet	8
<b>3</b>	<b>Suomen sähköverkko</b>	<b>8</b>
3.1	Tuotanto ja kulutus	9
3.2	Sähkömarkkinat	9
<b>4</b>	<b>Vedyn tuotanto</b>	<b>10</b>
4.1	<b>Elektrolyysiteknologiat</b>	<b>11</b>
4.1.1	Alkalielektrolyysi	11
4.1.2	PEM-elektrolyysi	12
4.1.3	Kiinteäoksidgelektrolyysi	13
<b>5</b>	<b>Vedyn varastointi</b>	<b>14</b>
5.1	Paineistus	15
5.2	Nesteyttäminen	15
5.3	Jatkojalostus	16
<b>6</b>	<b>Vedyn kuljettaminen</b>	<b>18</b>
6.1	Säiliöt ja rahtaus	18
6.2	Kaasuputket	19
<b>7</b>	<b>Päätelmät / Johtopäätökset</b>	<b>21</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>23</b>

# 1 Johdanto

Uusiutuvien energianlähteiden osuus Suomen sähköntuotannossa kasvaa jatkuvasti. Erityisesti tuulivoiman tuotantomäärä kasvaa nopeasti, ja tuulivoimalla tuotettiin jo 25,0 % kaikesta Suomen sähköstä vuonna 2024. [1] Uusiutuvien tuotantotapojen suurin haaste on niiden sääriippuvuus: esimerkiksi tuulivoiman kohdalla sähköä saadaan tuulisella säällä enemmän kuin kulutus vaatii, ja tyynellä säällä ei tarpeeksi sähköverkon vakauden ylläpitämiseksi. Sähköverkko vaatii, että siinä kulkee jatkuvasti tietty määrä sähköä: ei liikaa eikä liian vähän. Mitä enemmän sähköä siis jatkossa tuotetaan sääriippuvaisilla, uusiutuvilla tuotantomuodoilla, sitä enemmän sen varastointiin ja muuhun hyödyntämiseen on löydettävä ratkaisuja. Yksi ratkaisu edullisen energian hyötykäyttöön ylituotannon aikana voisi olla vihreä vety.

Vetyä voidaan tuottaa vedestä elektrolyysillä, mihin tarvitaan sähköä. Vety on massaansa nähden erittäin energiatiheää, mutta haasteena varastoinnille ja kuljettamiselle on vetykaasun vaatima suuri tilavuus. Varastoinnin ja kuljettamisen onkin tapahduttava joko hyvin kylmässä (-253 °C), jolloin vety on nestemäisessä muodossa, tai hyvin suuressa paineessa (200-700 bar), jolloin tarvitaan kompressoreita. Vedyn nesteytys on energiaintensiivinen prosessi, jonka hyötysuhde riippuu käytetystä teknologiasta ja prosessiolosuhteista. Nesteytys kuluttaa tyypillisesti noin 10–14 kWh energiaa vetykilogrammaa kohden riippuen esimerkiksi käytetystä teknologiasta, paineistustasosta, lämpötilasta ja häviöistä eri vaiheissa, mikä vastaa noin 60–80 % hyötysuhdetta. Nestemäistä vetyä muuntaessa takaisin kaasuksi hyötysuhde on lähellä 100 %. Tyypillinen hyötysuhde paineistuksessa on 85-95 %. [2]

Vedyn kuljettamisessa on omat haasteensa. Perinteiset kaasuputket eivät sovellu vedyn siirtämisen niiden metallikomponenttien haurastumisen vuoksi, joten vedyn siirtämistä varten on rakennettava uutta putki-infrastruktuuria. Vety on haasteista huolimatta toistaiseksi hyvin vartenotettava energian varastointi- ja kuljetusmuoto nyt, kun fossiilisista polttoaineista on pyrittävä eroon, ja uusiutuvat tuotantomuodot ovat tehokkuudestaan huolimatta sääriippuvaisia ja arvaamattomia. Vedyn siirtämiseen liittyviä haasteita voidaan ratkoa myös jatkojalostamalla vetyä esimerkiksi ammoniakiksi, joka ei aiheuta vetyhaurastumista.

## 2 Sähköntuotanto Suomessa

Suomen sähköntuotanto on moneen muuhun Euroopan maahan nähden varsin hajautettua. [1] Sähkön kokonaiskulutus Suomessa 2023 oli 80 TWh, eli se oli vähentynyt 2% vuodesta 2022. [3] Esimerkiksi liikenteen sähköistymisen myötä sähkön kulutuksen oletetaan kuitenkin kasvavan tulevaisuudessa. Vuonna 2024 Suomessa tuotettiin sähköä 80 TWh, eli saman verran kuin vuonna 2023. Sähkön hinta Suomessa on yksi Euroopan halvimista. Suomi on viime vuosina vähentänyt merkittävästi sähkön

tuontia ja lisännyt kotimaista tuotantoa, mikä on parantanut sähköomavaraisuutta. Vuonna 2023 Sähkön nettotuonnilla katettiin sähkön kulutuksesta vain 2 %. [4]

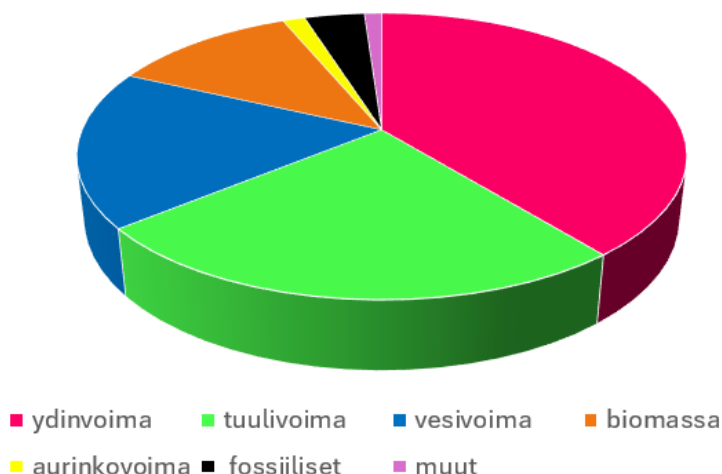
Taulukko 1: Sähkön tuotanto Suomessa 2024, lähde: energiateollisuus [1] ja LCOE-menetelmällä arvioidut hinnat eri tuotantotavoille huomioiden tuotantolaitosten elinkaarikustannukset [5] [6]

tuotantotapa	prosenttiosuus tuotannosta	hinta / kWh
<b>ydinvoima</b>	39,10%	0,05–0,13 €/kWh
<b>tuulivoima</b>	25,00%	0,03–0,06 €/kWh
<b>vesivoima</b>	17,80%	0,02–0,08 €/kWh
<b>biomassa</b>	11,80%	0,06–0,14 €/kWh
<b>hiili</b>	1,60%	0,07–0,17 €/kWh
<b>aurinkovoima</b>	1,40%	0,025–0,07 €/kWh
<b>turve</b>	1,10%	0,10–0,20 €/kWh
<b>muut</b>	1,10%	riippuu tuotantotavasta
<b>maakaasu</b>	0,80%	0,06–0,15 €/kWh
<b>öljy</b>	0,30%	0,12–0,30 €/kWh

Eri sähköntuotantomuotojen kustannuksia vertaillaan usein LCOE-menetelmällä (Levelized Cost of Electricity). LCOE sisältää investointikustannukset, käyttö- ja huoltokustannukset polttoainekustannukset ja laitoksen elinkaaren aikana tuotetun sähkön. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotantokustannukset ovat nykyisin tyypillisesti alhaisimpia, noin 0,03–0,07 €/kWh, kun taas fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien tuotantomuotojen kustannuksia nostavat erityisesti polttoaine- ja päästökustannukset. Ydinvoiman tuotantokustannukset sijoittuvat tyypillisesti välille 0,05–0,13 €/kWh riippuen laitoksen investointikustannuksista ja käyttöasteesta. [5] [6]

Sähköä tuotetaan jatkuvasti entistä vähäpäästöisemmin: Vuonna 2024 sähkön ja kaukolämmön päästöt ovat vähentyneet 59% vuoden 2015 tasosta. Jo nyt 94% Suomen sähköstä tuotetaan ilman fossiilisia polttoaineita [3], kuten taulukosta 1 huomataan, mutta tavoitteena on lisätä uusiutuvan ja vähäpäästöisen energian osuutta entisestään. [1]

## Sähköntuotanto Suomessa 2024



Kuva 1: Lotta Liihamo, Sähkön tuotanto Suomessa 2024, Energiategollisuus [1]

Kuvassa 1 fossiilisiin sisältyviksi on määritelty hiili, turve, maakaasu ja öljy.

### 2.1 Tuulivoima

Tuulivoima perustuu tuulen liike-energian muuntamiseen pyörimisliikkeeksi ja edelleen sähköksi generaattorissa. Se on nopeimmin kasvava sähkön tuotantotapa Suomessa, ja vuonna 2023 18,5 % kaikesta Suomessa tuotetusta sähköstä oli tuulivoimasähköä ja vuonna 2024 jo 25,0 % eli neljäsosa kaikesta tuotannosta, ja tuulivoima ohittikin vuonna 2024 vesivoiman toiseksi suurimpana sähkön tuotantotapana Suomessa. [1] Vuoden 2023 lopussa Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 6 946 MWh, ja vuonna 2023 Tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä kokonaisuudessaan 14,5 TWh. [1] Tuulivoiman tuotanto kasvoi Suomessa 25% vuodesta 2022 vuoteen 2023, ja vuodesta 2013 vuoteen 2023 tuulivoiman tuotantomäärä on Suomessa jopa 18-kertaistunut. [3] Suomessa on edelleen runsaasti tuulivoiman rakentamiseen soveltuvia alueita erityisesti rannikoilla ja merialueilla, joten tuulivoiman osuuden sähköntuotannosta odotetaan kasvavan lähivuosina entisestään. Tuulisähkö on usein erittäin edullista.

Tuulivoiman haaste on aurinkovoiman tavoin sen riippuvuus säästä: jos ei tuule, ei tuulivoimala tuota sähköä. Suomessa tuulee eniten talvisin [7], joten tuulivoiman tuotanto vastaa melko hyvin vaihtelevaan sähkönkysyntään: sähköä kuluu Suomessa kylminä talvikuukausina huomattavasti enemmän kuin kesäisin johtuen lämmittämisen tarpeesta. Tuulivoiman paras puoli vedyn tuotannon kannalta on, että se on ajoittain erittäin halpaa, jolloin vedyn tuottaminen tuulisähköllä on erityisen kannattavaa. Samalla vakautetaan sähköverkkoa, jonka toimivuuden kannalta ylituotanto on yhtä vaarallista kuin liian vähäinen tuotanto.

Vuoden 2024 tuulivoiman tuotantoennätys 6 987 MW saavutettiin 20.11.2024 vuoden 2024 keskiarvotuotannon ollessa 2 284 MWh/h. Huhti-syyskuussa 2023 tuulivoiman keskiarvotuotanto on ollut 1131 MWh/h ja aikavälillä loka-maaliskuussa 2023-2024 se oli 1951 MWh/h. [7] Tuulivoiman tuotanto ja siten myös tuulisuus Suomessa talviaikaan on siis lähes kaksinkertaista verrattuna kesäaikaan, joten se vastaa hyvin talvisin suurempaan kysyntään. Tuulivoiman tuotanto vaihtelee paljon myös päivätasolla: esimerkiksi vain viikon sisällä 13.1.2025-19.1.2025 tuotanto oli pienimmillään 15.1. aamuna, vain 266 MWh, suurimmillaan 6577 MWh ja keskimäärin 5118 MWh. Tuulivoiman suuri osuus energiantuotannosta ja tuotantomäärien suuri vaihtelevuus aiheuttavatkin haasteita.

## 2.2 Aurinkoenergia

Aurinkokennot muuttavat auringon säteilyn energian sähköenergiaksi valosähköisessä ilmiössä. [8] Yhden aurinkokennon jännite on vain noin 0,5 voltia, joten niistä muodostetaan laajempia paneelistoja kytkemällä niitä suuria määriä yleensä sarjaan tai joissakin tapauksissa rinnan. [9]

Aurinkovoima on yksi nopeimmin kasvavista ja kehittyvistä energiantuotantomuodoista maailmalla, mutta sen rooli Suomen sähköntuotannossa ei ole toistaiseksi kovin suuri: vuonna 2023 kaikesta Suomessa tuotetusta sähköstä aurinkovoimalla tuotettiin vain 0,8 %. [1] Suomi on kuitenkin aurinkoenergian tuotantopotentiaaliltaan Keski-Euroopan maiden veroinen maa, ja viileämmän ilmaston takia paneelien hyötysuhde on Suomessa esimerkiksi Keski-Eurooppaa parempi. [1], [10] Suomessa aurinko- ja tuulivoiman tuotanto tukevat toisiaan, sillä aurinkovoimaa saadaan eniten kesällä, jolloin tuulivoiman tuotantomäärät ovat pienemmät. Suomessa voisikin vuoteen 2030 mennessä toimia Fingridin arvion mukaan aurinkovoimaloita seitsemän gigawatin tehon verran. [10]

Huhti-syyskuussa vuonna 2023 aurinkoenergian maksimituotanto Suomessa oli 671 MW ja keskiarvotuotanto 180 MWh/h ja aikavälillä loka-maaliskuussa 2023-2024 maksimituotanto oli 508 MW ja keskiarvotuotanto 32 MWh/h. Keskiarvotuotanto kesäkuukausina on siis moninkertaisesti talvikuukausien tuotantoa suurempi. Aurinkovoiman tuotanto Suomessa on selvästi pienintä marras-tammikuussa. [11]

## 2.3 Vesivoima

Vesivoima hyödyntää kahden eri vesitason välistä korkeuseroa: kun vesi virtaa alas turbiinin kautta, turbiinin pyörittämä generaattori muuntaa veden liike-energiaa sähköksi. Vesivoimalla tuotettiin jopa 17,80% Suomessa tuotetusta sähköstä vuonna 2024. [1] Vesivoiman tuotantomäärä vaihtelee hieman vuosittain johtuen sääolosuhteiden, kuten vesisateiden ja kevättulvien vaikutuksesta vesitilanteeseen.

Vesivoimalla on erityinen asema energiajärjestelmän toimivuuden ja käyttövarmuuden kannalta säättöominaisuuksiensa ansiosta. Suomessa on enää hyvin rajallisesti hyödyntämätöntä vesivoimapotentiaalia, joten suurinta nousua sähkön tuotantokapasiteetissa uusiutuvien osalta on vesivoiman sijaan odotettavissa tuuli- ja aurinkovoimaan. [1]

## 2.4 Ydinenergia

Ydinvoimaloissa tuotetaan sähköä samaan tapaan kuin muissakin lauhdevoimalaitoksissa: kuumentamalla vettä, jolloin syntynyt höyry pyörittää turbiinia ja muuntamalla liike-energia sähköenergiaksi. Ydinvoiman käytöstä ei kuitenkaan aiheudu kasvihuonekaasupäästöjä, koska mitään ei polteta, vaan lämpö luodaan atomiytimien hallitulla halkaisemisella. [1] Vaadittavan uraanin louhiminen kuitenkin aiheuttaa jonkin verran päästöjä. Suomessa tuotettiin vuonna 2024 suurin osuus, jopa 39,1 % eli noin 31,28 TWh ydinvoimalla. Ydinvoimasta saatavan sähkön määrä ei riipu säästä toisin kuin uusiutuvien energialähteiden kodalla, joten sen tuottama sähkö on tarpeellista sähköverkon vakauden kannalta.

Ydinvoiman tuotantomäärä ei riipu tuuli- ja aurinkovoiman tavoin säästä, vaan ydinvoimalla tuotetaan tasaista maksimitehoa lukuun ottamatta huoltoja, polttoainenvaihtoja ja joskus mahdollisia vikoja, joiden vuoksi voimalat sammutetaan väliaikaisesti. Olkiluodon ydinvoimala on kuitenkin hankkinut akkuja sähkön varastointiin kantaverkkoyhtiö Fingridin järjestelmäsuojaukseen mahdollisen toimintahäiriön varalta: tällä tavoin tuotantoa voidaan periaatteessa tasata. [12]

## 2.5 Polttoaineet

Kuten kuvasta 1 huomataan, polttoaineet biomassaa lukuun ottamatta muodostavat hyvin pienen osuuden Suomen sähköntuotannosta, yhteensä vain noin 2,2 % (turve, maakaasu ja öljy). Biomassalla sen sijaan tuotettiin jopa 11,80 % kaikesta sähköstä, eli noin 14,24 TWh. [1] Sähköntuotannossa fossiilisten polttoaineiden käyttö on vähentynyt erityisesti uusiutuvan energiantuotannon kasvun, päästökaupan sekä hiilineutraaliustavoitteiden seurauksena. Fossiilisilla polttoaineilla on kuitenkin edelleen merkittävä rooli erityisesti liikenteessä, teollisuudessa sekä huoltovarmuuden kannalta tärkeissä varavoima- ja säättövoimaratkaisuisissa.

## 3 Suomen sähköverkko

Normaalit mutta ennalta arvaamattomat sähkön tuotannon ja kulutuksen vaihtelut aiheuttavat heiluntaa sähköjärjestelmän taajuudessa. Reservit, kuten säättökykyiset voimalaitokset, kulutuskohteet ja

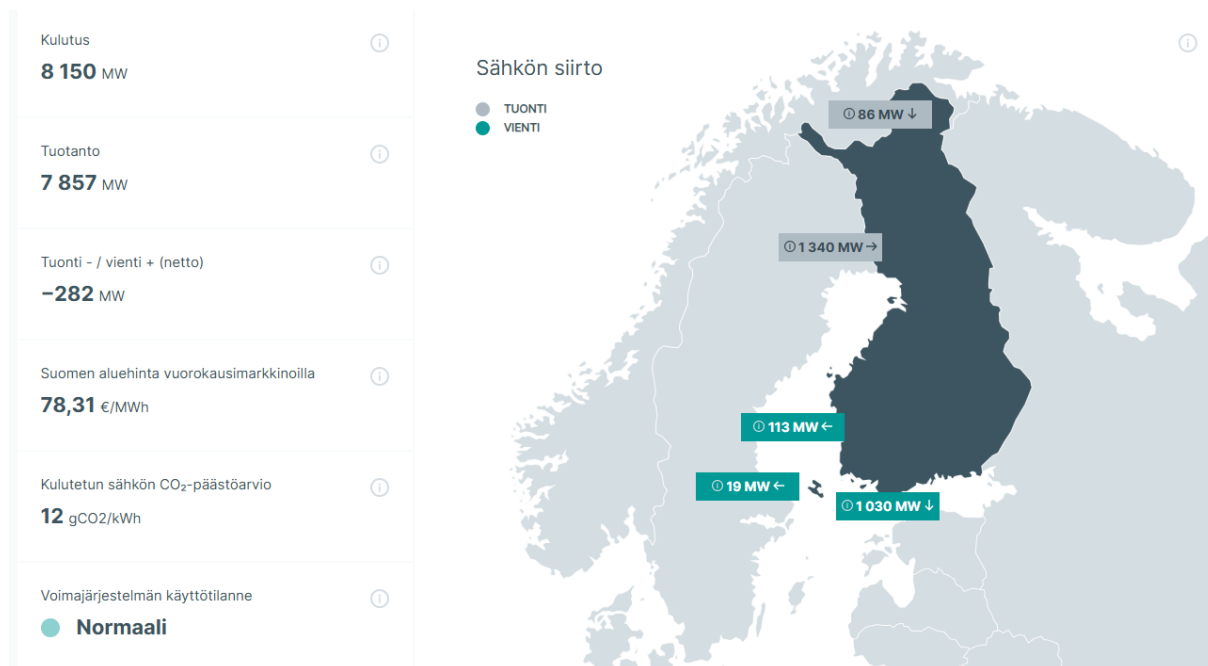
voimalaitokset, tasapainottavat tätä vaihtelua. Tulevaisuudessa sähköä tullaan tuottamaan yhä enemmän sääriippuvaisilla aurinko- ja tuulivoimalla, mikä tulee lisäämään vaihtelua. [13] Suomen ilmastotavoitteiden saavuttaminen edellyttää teollisuuden, lämmityksen ja liikenteen sähköistämistä sekä päästöttömän sähköntuotannon merkittävää lisäystä, mikä vaatii vahvaa kantaverkkoa. [14]

### **3.1 Tuotanto ja kulutus**

Suurin osa Suomen sähköstä tuotetaan Länsi- ja Pohjois-Suomessa, mutta suurin osa Suomen sähkönkulutuksesta tapahtuu Etelä-Suomessa. Sähköä täytyykin siirtää Pohjanmaalta Etelä-Suomeen. Sähköverkon taajuutta pidetään tasaisena hyödyntämällä reservejä. [13] Sähkön siirtotarve pohjoisesta etelään on tälläkin hetkellä suuri, mutta sen odotetaan moninkertaistuvan uusiutuvan energian osuuden kasvaessa. Pohjois-Etelä-suuntainen sähkön kantaverkko vaatii siis merkittävää vahvistusta. [14]

### **3.2 Sähkömarkkinat**

Suomi on osa eurooppalaisia sähkömarkkinoita, joilla vallitsee vapaa kilpailu. [1] Sähkömarkkinoilla toimivat sekä sähkön tuottajat, kuluttajat että sähköverkot varmistaen sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen sekä yhteiskunnan sähkönsaannin mahdollisimman kustannustehokkaasti. Hinnat ohjaavat markkinatoimijoiden tuotanto- ja kulutuspäätöksiä lyhyellä aikavälillä sekä investointeja pitkällä aikavälillä. [15] Sähkön markkinahinnan muodostumiseen vaikuttaa kysyntä- ja tarjontatilanteen lisäksi esimerkiksi sää, lämpötilat, vesitilanne, polttoaineiden hinnat, suurten voimantuotantoyksiköiden tila, ympäröivät markkinat ja niiden hintatasot ja päästöoikeuden hinta. Sähkön hinta on korkeimmillaan kysynnän ollessa suurta, sillä tällöin siihen vastaamiseksi tarvitaan perusvoimalaitosten lisäksi myös käyttökustannuksiltaan kalliimpia voimalaitoksia. [15]



Kuva 2: Lotta Liuhamo, Suomeen saapuva ja Suomesta myytävä sähköteho hetkenä 15.6.2026 kello 23.12, Fingrid [16]

Sähkötukkimarkkinapaikoista tärkeimpänä voidaan pitää yhteiseurooppalaisia vuorokausimarkkinoita, joiden tarkoituksena on tarjota kaikille markkinoille osallistuville alueille mahdollisimman kustannustehokkaasti tuotettua sähköä. Vuorokausimarkkinat määräävät sähkön pörssihinnan. [15]

Tukkumarkkinoiden lisäksi jokaisessa maassa on omat sähkön vähittäismarkkinat, joilla sähkönmyyntiyhtiöt myyvät itse tuottamaansa tai tukkumarkkinoilta ostamaansa sähköä edelleen kuluttajille. Pörssisähkösopimuksessa kuluttaja maksaa tukkumarkkinoilla määritetyn mukaisen hinnan kuluttamastaan sähköstä, mihin lisätään sopimuksen mukainen välitysmaksu, kun taas kiinteähintaisessa sopimuksessa kuluttaja saa aina sähköä sovittuun hintaan /kWh. [15]

## 4 Vedyn tuotanto

Sähköntuotannon kasvava riippuvuus uusiutuvista, sääriippuvaisista tuotantomuodoista lisää tilanteita, joissa sähköä tuotetaan enemmän kuin sitä pystytään kuluttamaan tai siirtämään sähköverkossa. Tällaisissa tilanteissa ylimääräistä sähköenergiaa voidaan hyödyntää veden elektrolyysissä, jossa vesi pilkotaan sähkövirran avulla vety- ja happikaasuiksi. Tuotettua vetyä voidaan käyttää sellaisenaan energiankantajana, muuntaa myöhemmin takaisin sähköksi tai jalostaa edelleen muiksi kemikaaleiksi ja polttoaineiksi. [2], [17]

Perinteisesti vetyä on tuotettu fossiilisista polttoaineista, erityisesti maakaasusta höyryreformoinnin avulla. Menetelmä tuottaa kuitenkin merkittäviä määriä hiilidioksidipäästöjä: yhtä tuotettua vetytonnia

kohden syntyä noin 10 tonnia hiilidioksidia. Tämän vuoksi kiinnostus vähäpäästöisesti tuotettua vihreää vetyä kohtaan on kasvanut viime vuosina huomattavasti. Tällä hetkellä vain pieni osa maailman vedystä tuotetaan veden elektrolyysin avulla, mutta osuuden odotetaan kasvavan merkittävästi uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä ja päästövähennystavoitteiden kiristyessä. [18]

Vihreän vedyn tuotannon nähdään tarjoavan ratkaisuja erityisesti sellaisille teollisuudenaloille, joiden päästöjä on vaikea vähentää pelkän sähköistämisen avulla. Vetyä voidaan hyödyntää esimerkiksi hiilivapaan teräksen valmistuksessa korvaamalla fossiilisia pelkistimiä terästeollisuuden prosesseissa. Lisäksi vedystä voidaan valmistaa ammoniakkia, jota käytetään muun muassa lannoiteteollisuudessa. Suomessa kiinnostus vetytaloutta kohtaan on kasvanut nopeasti, ja esimerkiksi Naantaliin suunnitellaan vety- ja ammoniakkilaitosta osana vihreän siirtymän hankkeita. Elektrolyysiprosessissa syntyvää hukkalämpöä voidaan myös hyödyntää kaupunkien kaukolämpöverkoissa, mikä parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta.

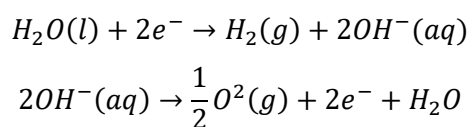
Satakunnan Harjavaltaan rakentui vuonna 2024 Suomen ensimmäinen vihreän vedyn tuotantolaitos, joka hyödyntää uusiutuvaa energiaa tuottaen vihreää vetyä muun muassa teollisuuden tarpeisiin. Tuotantolaitoksen kapasiteetti on 20 megawattia, ja sen sivuvirtoina syntyy teollisuuden tarvitsemää happea ja lämpöenergiaa. [14] Seuraavaksi tutustutaan yleisempiin elektrolyysiteknologioihin.

## 4.1 Elektrolyysitekniikat

### 4.1.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysi on vanhin ja kaupallisesti kypsä elektrolyysimenetelmä. Menetelmän etuja ovat suhteellisen alhaiset investointikustannukset sekä pitkä käyttöikä. Haittapuolina ovat hitaampi reagointi kuormituksen muutoksiin ja matalampi virrantiheys verrattuna PEM-elektrolyysiin. [19]

Järjestelmä koostuu elektrodiparista, jotka on upotettu emäksiseen liuokseen, yleensä 25–30-prosenttiseen kaliumhydroksidiin (KOH). Katodilla vesi hajoaa muodostaen vetyä (H<sub>2</sub>) ja vapauttaen hydroksidianioneja, jotka kulkeutuvat kalvon läpi ja yhdistyvät anodilla muodostaen happea (O<sub>2</sub>) seuraavien reaktioiden mukaisesti [20]:



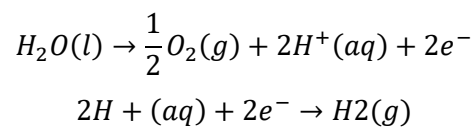
Alkalielektrolyysin hyötysuhde on tyypillisesti noin 60–70 %. Teknologia on kaupallisesti kypsä ja luotettava, mutta hyötysuhde jää hieman alhaisemmaksi verrattuna kehittyneempiin korkean lämpötilan

menetelmiin. [21]

#### 4.1.2 PEM-elektrolyysi

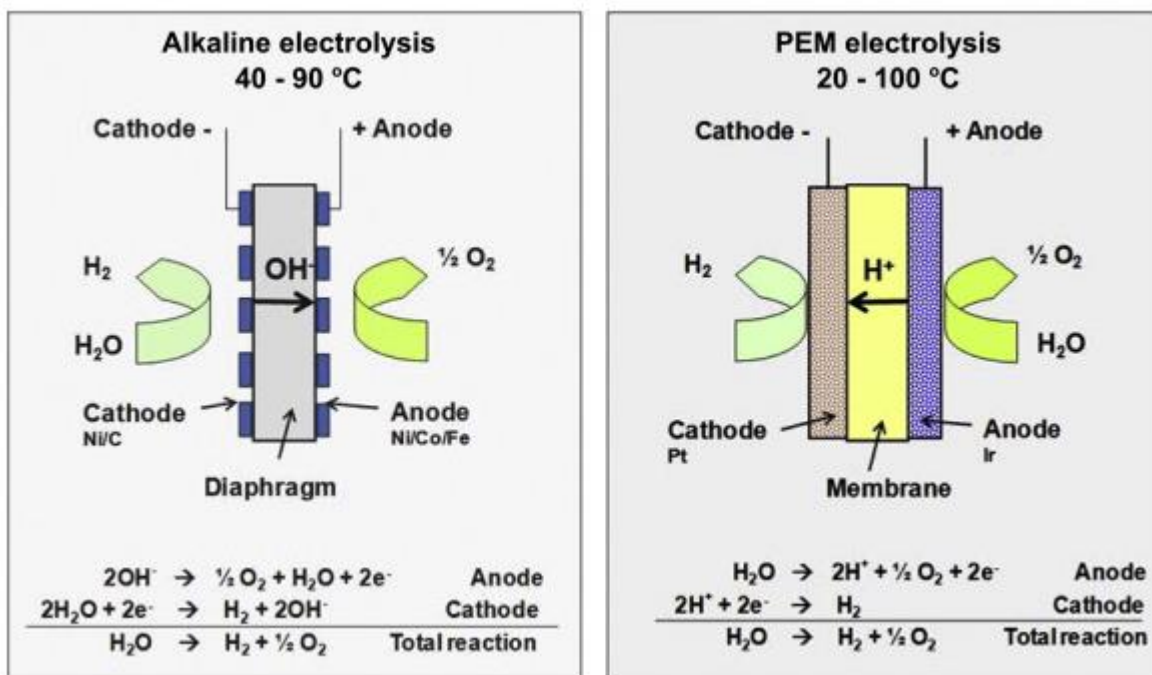
PEM-elektrolyysi (Proton Exchange Membrane) eroaa alkalielektrolyysistä ennen kaikkea elektrolyytin osalta. Nestemäisen emäksisen elektrolyyttiliuoksen sijaan PEM-elektrolyysissä käytetään kiinteää protoninvaihtokalvoa, joka johtaa protoneja mutta estää kaasujen sekoittumisen. Kalvo muodostaa yhdessä anodin ja katodin kanssa niin kutsutun kalvoelektrodikokoonpanon (membrane electrode assembly, MEA), joka on järjestelmän keskeinen komponentti.

PEM-elektrolyysissä vesi syötetään yleensä anodipuolelle, jossa se hapettuu muodostaen happea, protoneja ja elektroneja. Protonit kulkeutuvat kalvon läpi katodille, kun taas elektronit siirtyvät ulkoisen virtapiirin kautta. Katodilla protonit ja elektronit yhdistyvät muodostaen vetykaasua seuraavien reaktioiden mukaisesti [20]:



Kiinteän kalvon ansiosta PEM-elektrolyysillä voidaan saavuttaa suurempia virrantiheyksiä kuin alkalielektrolyysillä, minkä lisäksi järjestelmä reagoi nopeasti tehonvaihteluihin. Tämän vuoksi PEM-elektrolyysi soveltuu erityisen hyvin tuuli- ja aurinkovoiman yhteyteen, joissa sähköntuotanto vaihtelee jatkuvasti. Teknologian etuina ovat myös kompakti rakenne, hyvä osakuormakyky sekä mahdollisuus tuottaa erittäin puhdasta vetyä korkeassa paineessa suoraan elektrolyysikennosta. [21]

PEM-elektrolyysin haittapuolena ovat alkalielektrolyysiä korkeammat investointikustannukset. Kalvo sekä elektrodit sisältävät usein jalometalleja, kuten platinaa ja iridiumia, mikä nostaa järjestelmän hintaa. Lisäksi teknologia on herkempi veden epäpuhtauksille kuin alkalielektrolyysi. PEM-elektrolyysin hyötysuhde on yleensä noin 60–75 %, mutta sen erinomainen säädettävyys tekee siitä yhden lupaavimmista teknologioista uusiutuvalla sähköllä tuotettavan vihreän vedyn valmistuksessa. [21]



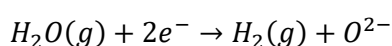
Kuvat 3 ja 4: alkalielektrolyysikemmo ja PEM-elektrolyysikemmo [21]

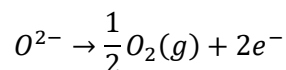
Kuvista 3 ja 4 havaitaan alkalielektrolyysikemmon ja PEM-elektrolyysikemmon rakenteelliset erot: PEM-elektrolyysikemmo sisältää kuvassa keltaisella merkityn, katodin ja anodin välissä sijaitsevan protoninvaihtokalvon. [21]

#### 4.1.3 Kiinteäoksidielektrolyysi

Kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cell) eroaa sekä alkali- että PEM-elektrolyysistä ennen kaikkea elektrolyytin ja käyttölämpötilan osalta. Nestemäisen elektrolyyttiliuoksen tai polymeerikalvon sijaan SOEC-järjestelmässä käytetään kiinteää keraamista elektrolyyttiä, joka johtaa happi-ioneja ( $\text{O}^{2-}$ ). Teknologia toimii huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa, tyypillisesti noin 600–850 °C, minkä vuoksi elektrolyysiin tarvittavasta energiasta osa voidaan tuoda lämpöenergiana sähköenergian sijasta. Tämän vuoksi SOEC soveltuu erityisen hyvin teollisiin kohteisiin, joissa on saatavilla hukkalämpöä tai muuta korkean lämpötilan lämpöenergiaa. [19]

SOEC-elektrolyysissä vesihöyry syötetään katodille, jossa se pelkistyy vedyksi ja happi-ioneiksi. Happi-ionit kulkeutuvat keraamisen elektrolyytin läpi anodille, jossa ne luovuttavat elektroninsa ja muodostavat happikaasua seuraavien reaktioiden mukaisesti [20]:





Korkean käyttölämpötilan ansiosta reaktiot tapahtuvat nopeasti ja sähköenergian tarve on pienempi kuin muissa elektrolyysiteknologioissa. SOEC suurin etu onkin erittäin korkea hyötysuhde, joka voi nousta jopa 80–90 prosenttiin. Lisäksi teknologia mahdollistaa tehokkaan hukkalämmön hyödyntämisen, mikä voi parantaa koko prosessin energiatehokkuutta merkittävästi. [21]

Korkeasta lämpötilasta aiheutuu kuitenkin myös haasteita. Materiaalien on kestävä jatkuvaa altistumista kuumalle vesihöyrylle, vedylle ja suurille lämpötilavaihteluille, mikä lisää laitteiston teknistä vaatavuutta ja kustannuksia. Lisäksi järjestelmän käynnistäminen ja tehon säätäminen ovat hitaampia kuin PEM-elektrolyysissä, minkä vuoksi SOEC ei sovellu yhtä hyvin nopeasti vaihtelevan uusiutuvan sähköntuotannon yhteyteen. Teknologia on edelleen osittain kehitysvaiheessa, eikä sitä ole vielä kaupallistettu yhtä laajasti kuin alkalielektrolyysiä tai PEM-elektrolyysiä. [21]

## 5 Vedyn varastointi

Vety on myrkytön, hajuton, väritön, erittäin helposti syttyvä kaasu. Sitä voidaan käyttää joko polttoaineena polttomoottoreissa tai polttokennoissa tai energian kantajana. [2] Vedyn varastointi on haasteellista sen ominaisuuksien, kuten suuren tilavuuden ja pienen molekyylikoon vuoksi. Normaalisissa ilmapaineissa (1 bar) ja lämpötilassa (20° C) 1 kg vetykaasua vaatii 11 m<sup>3</sup>:n varastointitilavuuden ja sen tilavuuskohtainen energiatiheys on vain 3 Wh/l, joten vedyn energiakäyttö ja varastointi vaatii suuren varastointitiheyden, mikä saavutetaan useimmin joko paineistamalla tai nesteyttämällä. Vetyä varastoitaessa on huomioitava sen aiheuttamat suurimmat riskit eli palo- ja räjähdysvaarat. [2]

Vety pystyy pienen molekyylikokonsa vuoksi tunkeutumaan helposti monien materiaalien rakenteisiin, mikä voi aiheuttaa materiaalien haurastumista sekä lisätä vuotoriskiä putkistoissa, säiliöissä ja liitoksissa. Lisäksi vedyn energiasisältö tilavuusyksikköä kohden on alhainen normaaliolosuhteissa, minkä vuoksi sitä joudutaan varastoimaan joko korkeassa paineessa, erittäin alhaisessa lämpötilassa nesteytettynä tai kemiallisesti sidottuna muihin aineisiin.

Vuodot muodostavat merkittävän turvallisuusriskin, sillä vety on erittäin helposti syttyvä kaasu. Verrattuna maakaasuun vedyn syttymisenergia on pienempi, minkä lisäksi vety palaa lähes näkymättömällä liekillä, mikä vaikeuttaa vuotojen havaitsemista. Näistä syistä vedyn käsittely ja varastointi edellyttävät erityisiä materiaali- ja turvallisuusratkaisuja. [2]

## 5.1 Paineistus

Vetyä varastoidaan useimmiten paineistettuna kaasuna. Tyypillinen varastointipaine on 200-700 baaria. Paineistetun vedyn säiliö koostuu yleensä kolmesta kerroksesta. Sisin kerros toimii vedyn läpäisyä estävänä vetytiivinä kerroksena, jonka tehtävänä on ehkäistä vedyn vuotamista säiliön seinämien läpi. Sisäkerros voidaan valmistaa esimerkiksi metallista, tiiviistä kestopuuvista tai pinnoitetusta komposiittimateriaalista. Sisäkerroksen ulkopuolella sijaitsee paineen kantava rakennekerros, joka valmistetaan usein kuitulujitetuista komposiiteista. Sen tehtävänä on kestää vedyn aiheuttama korkea sisäinen paine sekä vähentää säiliön kokonaismassaa. Uloin suojakuori suojaa säiliötä ympäristön aiheuttamilta iskuilta, kulumiselta, kosteudelta, UV-säteilyltä sekä muilta ulkoisilta rasituksilta. Ulkokuori voi olla valmistettu esimerkiksi metallista tai hiilikuitukomposiitista. Paineistetun vedyn säiliöissä käytetään erityisiä venttiilejä, varoventtiilejä ja vetyä läpäisemättömiä tiivisteitä, joiden avulla ehkäistään vuotoja ja estetään säiliön vaarallinen ylipaineistuminen. [2]

Kun vety paineistetaan korkeaan paineeseen, esimerkiksi 350–700 bariin, tarvitaan kompressoreita nostamaan kaasun painetta. Paineistuksen tavoitteena on kasvattaa vedyn energiatihedystä tilavuusyksikköä kohden, sillä normaalipaineessa vety vie hyvin suuren tilavuuden suhteessa sisältämäänsä energiamäärään. Kompressorien energiankulutus riippuu muun muassa lopullisesta paineesta, vedyn virtausmäärästä ja käytetystä kompressoritekniikasta. Tyypillisesti paineistus kuluttaa noin 5–15 % vedyn sisältämästä energiasta, mikä vastaa noin 85–95 % hyötysuhdetta. Paineistus on kuitenkin yleensä energiatehokkaampi vaihtoehto kuin vedyn nesteyttäminen, jonka energiankulutus on huomattavasti suurempi. Korkeat paineet asettavat lisäksi vaatimuksia säiliöiden, putkistojen, venttiilien ja tiivisteiden mekaaniselle kestävyydelle sekä turvallisuusjärjestelmille, sillä mahdollisessa vuototilanteessa paineistettu vety vapautuu erittäin nopeasti ympäristöön. [2]

## 5.2 Nesteyttäminen

Nesteytys on tapa säilöä vetyä huomattavan tiiviiksi ja energiatiheäksi jäädyttäen se -253,15 celsiusasteen lämpötilaan. Vedyn nesteytys vaatii merkittävän määrän energiaa jäädyttämiseen -253 °C lämpötilaan. Hyötysuhde vaihtelee riippuen esimerkiksi käytetystä teknologiasta, paineistustasosta, lämpötilasta ja häviöistä eri vaiheissa, mutta on tyypillisesti 65-80%. Nestemäistä vetyä muuntaessa takaisin kaasuksi hyötysuhde on lähellä 100%.

Nestemäistä vetyä käytetään avaruustekniikassa, joissakin liikkuvissa ja lentokoneteknisissä sovelluksissa sekä erityisesti suuren vetymäärän varastoinnissa. Nestemäisen vedyn varastoinnin etuja

ovat tilansäästö, vedyn korkea puhtausaste sekä mahdollisuus matalapaineiseen varastointiin. Nestemäistä vetyä varastoidaan tyypillisesti alle 5 baarin paineessa. Varastoinnin huonoja puolia ovat korkea energiankulutus, nestemäisen vedyn höyrystymisen (boil-off) aiheuttamat vetyhäviöt ilmakehään sekä erityisvaatimukset säiliömateriaalille. Vedyn nesteytys vaatii monimutkaisen laitteiston sisältäen komprimoinnin, jäädytyksen ja kaasun kierrätyksen. [2]

Nestemäisen vedyn varastosäiliön ja siihen liittyvien laitteistojen, kuten putkien ja venttiilien, tulee kestää erittäin suurta lämpötilaeroa, sillä nestemäisen vedyn lämpötila on noin  $-253\text{ °C}$ . Suuret lämpötilaerot aiheuttavat materiaalien lämpölaajenemista ja -supistumista, mikä asettaa vaatimuksia rakenteiden mekaaniselle kestävyydelle. Lisäksi monet materiaalit haurastuvat erittäin alhaisissa lämpötiloissa, ja vetymolekyylillä läpäisee helposti useita materiaaleja pienen kokonsa vuoksi. Myös jään muodostumista tulee välttää, sillä se voi lisätä materiaalien haurastumista ja heikentää laitteiston toimintaa. Nestemäinen vety ei kuitenkaan aiheuta korroosiota. [2]

Merkittävä haaste ja turvallisuusriski nestemäisen vedyn varastoinnissa on niin kutsuttu boil-off-ilmiö eli vedyn jatkuva höyrystyminen. Höyrystyminen aiheuttaa energiahäviöitä, koska vedyn nesteyttämiseen käytetty energia menetetään, ja höyrystynyttä vetyä poistuu säiliöstä hönkäputkien kautta. Höyrystyminen voi aiheuttaa turvallisuusriskin erityisesti suljetuissa tai huonosti tuuletetuissa tiloissa, sillä ilmaan vapautunut vety muodostaa helposti syttyviä ja räjähdysherkkiä seoksia ilman kanssa. Höyrystymistä ei voida täysin estää, mutta tehokkailta eristeratkaisuilla ja kaksoisvaippasäiliöillä sitä voidaan rajoittaa jopa noin 0,1 %:iin päivässä. [2]

Höyrystymisen vuoksi nestemäisen vedyn kuljetussäiliöitä ei voida täyttää täysin, vaan maantiekuljetuksissa täyttöaste on yleensä enintään 85 % säiliön tilavuudesta. Lisäksi nestemäisen vedyn varastoinnissa ja kuljetuksessa on huomioitava BLEVE-ilmiön (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) mahdollisuus. [2] BLEVE tarkoittaa tilannetta, jossa paineistettu nestettä sisältävä säiliö repeää äkillisesti esimerkiksi ulkoisen kuumenemisen seurauksena. Tällöin neste höyrystyy erittäin nopeasti, aiheuttaen voimakkaan paineaallon ja mahdollisesti räjähdysten tai tulipalon. Nestemäisen vedyn tapauksessa BLEVE-riskiä lisää vedyn erittäin alhainen kiehumispiste ja nopea höyrystyminen lämpötilan noustessa. Riskiä voidaan vähentää käyttämällä tehokkaita lämpöeristeitä, paineenhallintajärjestelmiä, varoventtiileitä sekä sijoittamalla säiliöt turvallisiin ja hyvin tuuletettuihin ympäristöihin.

### 5.3 Jatkojalostus

Vedystä voidaan myös valmistaa useita erilaisia jatkojalosteita, kuten polttoaineita, kemikaaleja tai jopa

terästä. [22] Hyvin yleinen jatkojalostustuote on ammoniakki, jota tuotetaan nykyään pääasiassa metaanista varsin saastuttavin menetelmin, ja joka on lannoitteiden tärkeä raaka-aine.

Ammoniakkia on helppo varastoida ja kuljettaa, koska se nesteytyy helposti ja säilyy hyvin – toisin kuin vety. Vety voidaan tarvittaessa sitoa kuljetuksen ja säilytyksen ajaksi ammoniakkiin, ja erottaa takaisin vedyksi käyttökohteessa, kuten voimalaitoksessa tai laivoissa. Koska ammoniakki ei esimerkiksi palakovin intensiivisesti, se on myrkyllistä, ja se voi syövyttää tiettyjä metalleja herkästi, tarvitaan ennen käyttöönottoa laajaa ymmärrystä ammoniakkin käytöstä energialähteenä. Ammoniakin polttamisesta ei synny hiilidioksidipäästöjä, mutta palaminen voi tuottaa pieniä määriä esimerkiksi typpioksideja, joka ovat erittäin haitallisia kasviuonekaasuja. [23]

Vedystä voidaan valmistaa myös synteettisiä polttoaineita eli e-polttoaineita. Yleisiä e-polttoaineita ovat esimerkiksi e-metaani, e-metanoli sekä synteetikaasu (syngas), joka koostuu pääasiassa vedystä ja hiilimonoksidista. E-metaania voidaan hyödyntää erityisesti kaasumoottoreissa sekä maakaasun korvaajana energiantuotannossa, kun taas e-metanolia käytetään muun muassa meriliikenteessä, kemianteollisuuden raaka-aineena sekä muiden synteettisten polttoaineiden valmistuksessa. Synteetikaasua voidaan puolestaan hyödyntää esimerkiksi Fischer–Tropsch-prosessissa synteettisten diesel- ja lentopolttoaineiden tuotantoon. [24]

E-polttoaineiden etuna on niiden vähäisemmät lähi- ja hiukkaspäästöt verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin. Lisäksi niiden käytöllä voidaan vähentää ilmastopäästöjä erityisesti sektoreilla, joilla suora sähköistäminen on vaikeaa, kuten lento- ja meriliikenteessä. Mikäli e-polttoaineiden valmistuksessa käytetty hiilidioksidi otetaan talteen esimerkiksi teollisuuden päästölähteistä tai ilmakehästä ja vety tuotetaan uusiutuvalla sähköllä, voidaan polttoaineita pitää lähes hiilineutraaleina. Tällöin polttoaineen käytön aikana vapautuva hiilidioksidi vastaa pääosin sitä määrää, joka on aiemmin sidottu polttoaineen valmistusvaiheessa. [24]

Vetyä voidaan käyttää myös suoraan teollisuudessa muun muassa teräksen valmistuksessa pelkistimenä, jolloin nykyisin käytetty koksi ja muut hiilipohjaiset pelkistimet voidaan korvata vedyllä. Vedyn käytön merkittävin etu on hiilidioksidipäästöjen voimakas väheneminen, sillä pelkistysreaktion lopputuotteena syntyy veden sijaan hiilidioksidin asemesta vettä. Lisäksi hiilipohjaisten pelkistimien korvaaminen voi vähentää prosessiin polttoaineesta kulkeutuvien epäpuhtauksien, kuten rikin, määrää, vaikka teräksen lopullinen puhtaus riippuu myös malmin laadusta ja myöhemmistä prosessivaiheista. Hiilivapaan teräksen tuotanto olisi merkittävä tapa vähentää Suomen hiilidioksidipäästöjä, sillä terästeollisuus aiheuttaa merkittävän osuuden teollisuuden kasviuonekaasupäästöistä. Hiilivapaan teräksen tuotanto olisi merkittävä tapa vähentää Suomen hiilidioksidipäästöjä, sillä tällä hetkellä noin 7% päästöistä syntyy teräksen valmistuksesta. [22]

## 6 Vedyn kuljettaminen

Tuotettua ja varastoitua vetyä voidaan siirtää monin eri tavoin: säiliöissä esimerkiksi rekoilla, junilla tai laivoilla joko paineistettuna kaasuna tai nesteytettynä vetynä, tai kaasuputkia pitkin. Kaikki nykyiset maakaasuputket eivät sovellu vedyn siirtämiseen ilman muutoksia, sillä vedyn aiheuttama haurastuminen ja vuotoriski asettavat putkimateriaaleille erityisiä vaatimuksia. Fingridin ja Gasgridin vetytalous Hankkeessa on arvioitu, että suuren vedynsiirtoputken energiankuljetuskapasiteetti voi vastata noin 15 suurjännitteisen voimajohdon kapasiteettia. Arvio riippuu kuitenkin putken ja sähköverkon teknisistä ominaisuuksista. [17] [25]

### 6.1 Säiliöt ja rahtaus

Kaasumaista vetyä voidaan siirtää ja varastoida kaasupullokonteissa (MEK-kontti) tai putkipäraunuissa. Säiliöiden kuljetuspaine on tyypillisesti 180-640 bar. Tyypillinen päraunukontti sisältää noin 500kg vetyä. Vedyn kuljettamisessa korostuukin säiliön suuri tilavuus ja massa, koska sen sisältämän vedyn massa on suhteellisen pieni: paineistetunkin vedyn siirtämiseen vaaditun paineenkestävän astian massa on huomattavasti suurempi, kuin sen sisältävän vedyn massa. Myös kompressorit ja muu putkisto vaikuttavat järjestelmän kokonaismassaan.

Kaasumaisen vedyn varastoinnissa ja kuljetuksessa turvallisuus on keskeinen osa järjestelmien suunnittelua. Säiliöissä käytetään esimerkiksi varoventtiileitä, joiden avulla vetyä voidaan hallitusti poistaa paineen tai lämpötilan noustessa liian korkeaksi. Lämpötilasta aktivoituvat varoventtiilit aukeavat, kun lämpötila saavuttaa 108-110 °C, ja niitä käytetään ehkäisemään tyypillisesti komposiittisäiliön ylikuumentumisesta johtuvaa säiliön seinämien vaarallista repeämistä. [2] Lisäksi vedyn käsittelyssä on huomioitava sen erittäin herkkä syttyvyys ja kyky muodostaa ilman kanssa helposti syttyviä seoksia. Kuljetuksessa yksi merkittävimmistä riskeistä liittyy liikenneonnettomuuksiin: esimerkiksi vedyn kuljetussäiliön vaurioituminen voi johtaa nopeasti syttyvään kaasuvuotoon ja pahimmillaan räjähdysvaaraan. Tämä eroaa esimerkiksi bensiinisäiliöauton onnettomuudesta, jossa seurauksena on tyypillisemmin laaja tulipalo ja ympäristöhaittoja polttoainevuodon vuoksi. Vedyn turvallisessa käytössä korostuvatkin kestävätkin säiliömateriaalit, vuodonvalvonta, ilmanvaihto sekä turvalliset kuljetus- ja varastointijärjestelyt. [2]

Nestemäisen vedyn varastoinnin etuja ovat tilansäästö, vedyn korkea puhtausaste sekä mahdollisuus matalapaineiseen varastointiin: nestemäistä vetyä varastoidaan tyypillisesti alle 5 baarin paineessa, kun taas kaasumaisen vedyn varastointiin käytetään usein jopa satojen baarien paineita. Tämän vuoksi nestemäisen vedyn säiliöihin kohdistuvat mekaaniset rasitukset ovat pienempiä kuin paineistetun vedyn

säiliöissä. Toisaalta nestemäisen vedyn varastointi edellyttää tehokasta lämpöeristystä ja jatkuvasti toimivaa jäähdytysjärjestelmää, jonka tehtävänä on pitää vety nestemäisessä olomuodossa.

Nestemäisen vedyn varastosäiliöiden sekä niihin liittyvien putkien, venttiilien ja muiden laitteistojen tulee kestää erittäin suuria lämpötilaeroja, sillä nestemäisen vedyn lämpötila on noin  $-253\text{ °C}$ . Monet materiaalit haurastuvat näin alhaisissa lämpötiloissa, minkä vuoksi materiaalivalinnat ovat keskeinen osa järjestelmän turvallisuutta. [2]

Nestemäisen vedyn varastoinnin merkittävimpiä turvallisuushaasteita on vedyn jatkuva höyrystyminen eli boil-off-ilmiö: siinä säiliöön ympäristöstä siirtyvä lämpö saa osan vedystä höyrystymään, jolloin säiliön paine kasvaa ja höyrystynyt vety on poistettava hallitusti varoventtiilien tai paineenhallintajärjestelmien avulla. Mikäli höyrystynyttä vetyä pääsee kertymään suljettuun tilaan, voi muodostua helposti syttyvä tai räjähdysherkkä kaasuseos ilman kanssa.

Nestemäisen vedyn varastoinnissa onkin huomioitava korkea energiankulutus, nestemäisen vedyn höyrystymisestä aiheutuvat vetyhäviöt sekä erityisvaatimukset säiliömateriaaleille ja jäähdytyslaitteistoille. Vedyn nesteytys vaatii monimutkaisen järjestelmän, joka sisältää kompressoreita, lämmönvaihtimia, jäähdytyslaitteistoja sekä kaasun kierrätysjärjestelmiä. [2]

## 6.2 Kaasuputket

Säiliöiden lisäksi vetyä voidaan siirtää myös kaasuputkissa samalla periaatteella kuin maakaasua, ja siirtäminen onnistuu sopivan infrastruktuurin rakentamisen seurauksena helposti myös ulkomaille. Nykyiset maakaasuputket eivät kuitenkaan vedyn siirtämiseen sovellu, vety haurastuttaa useimpia tavallisesti putkissa käytettyjä metalleja, ja vedyn siirtäminen vaatiikin varta vasten vedylle suunnitellut putket, tiivisteet, venttiilit ja muut komponentit, kuten kompressorit: vetykompressori eroaa typpikompressorista.

Vetyhaurastuminen perustuu vedyn pieneen molekyylikokoon, mikä ansiosta se pystyy tunkeutumaan korkeissa paineissa metallin sisälle alentaen merkittävästi metallin murtovenymää, iskusitkeyttä, sekä väsymiskestoa. Vetyhaurastunut materiaali voi myös murtua äkillisesti ylikuormituksen seurauksena, mistä voi seurata vaaratilanteita. Terästen soveltuvuuteen vetykäytössä vaikuttavat useat eri tekijät, kuten kemiallinen koostumus, lämpökäsittely, mekaaninen käsittely, mikrorakenne, epäpuhtaudet, jäännösjännitykset ja lujuus. Materiaalivalintojen on oltava sellaisia, että ne kestävät jatkuvaa altistumista vedylle. Vedyn siirtoputkistossa vältetään liian lujien teräslaatuojen käyttöä: ne ovat alttiimpia vetyhauraudelle. Metallin suhteellisen alhainen myötölujuus antaa kestävyyttä vetyhaurautta ja muita haurasmurtumamekanismeja vastaan. [2]

Koska liitokset ovat vetyputkistojen tyypillisimpiä vuotokohtia, niiden määrää pyritään vähentämään

mahdollisimman paljon. Tämän vuoksi liitokset toteutetaan usein kierre- ja laippaliitosten sijaan hitsaamalla, mikä parantaa rakenteen tiivyyttä. Hitsatut liitokset voivat kuitenkin tehdä putkiston valmistuksesta ja huoltotoimenpiteistä työläämpiä kuin helposti avattavat liitokset. [2]

Putkistojen materiaalivalinnoissa on huomioitava vedyn vaikutukset sekä käyttöympäristön asettamat vaatimukset. Muovimateriaaleja käytettäessä materiaalin tulee mahdollistaa maadoitus staattisen sähköön hallitsemiseksi. Lisäksi muovien lämmön-, palon- ja UV-säteilynkestävyys on usein metallisia rakenteita heikompi, mikä on otettava huomioon putkiston suunnittelussa ja sijoittelussa. [2]

Vedyn turvallisessa siirtämisessä keskeistä on myös mahdollisten vuotojen nopea havaitseminen ja niiden vaikutusten rajoittaminen. Putkistoihin voidaan asentaa vuodonvalvontajärjestelmiä sekä rakenteita, jotka ohjaavat mahdollisen vuodon tai palon turvalliseen suuntaan. Lisäksi laitteistojen välille jätetään riittävät suojaetäisyydet, jotta mahdollisen vetypalon tai räjähdysvaikutukset eivät leviä muihin prosessilaitteisiin. Vuotojen ehkäiseminen ja häviöiden minimointi ovat tärkeitä paitsi turvallisuuden myös vedyn siirron taloudellisen kannattavuuden kannalta. [2]

### **6.3 Vihreän vedyn infrastruktuuri Suomessa ja Pohjois-Euroopassa**

Kuten aiemmin todettiin, suuri osa Suomen uusiutuvasta sähköntuotannosta sijoittuu erityisesti Länsi- ja Pohjois-Suomeen, missä tuulivoiman tuotantoedellytykset ovat parhaat. Sen sijaan merkittävä osa sähköön ja tulevaisuudessa myös vedyn kulutuksesta sijoittuu Etelä-Suomeen sekä teollisuuden keskittymiin. Tämän vuoksi vihreän vedyn laajamittainen hyödyntäminen edellyttää uusien siirto- ja varastointiratkaisujen sekä koko energia- ja vetyinfrastruktuurin kehittämistä.

Suomessa vedyn siirtoinfrastruktuuria suunnittelee erityisesti Gasgrid Finland, jonka tavoitteena on rakentaa kansallinen vedyn siirtoverkko yhdistämään tuotantoalueita, teollisia käyttäjiä sekä vientisatamia. Pitkällä aikavälillä tavoitteena on myös liittää Suomen vetyverkko osaksi laajempaa pohjoiseurooppalaista infrastruktuuria. Esimerkiksi Nordic-Baltic Hydrogen Corridor -hankkeessa suunnitellaan vedyn siirtoverkkoa Suomen, Viron, Latvian, Liettuan, Puolan ja Saksan välille. Tällainen verkosto mahdollistaisi vedyn siirtämisen alueille, joilla sen kysyntä on suurta mutta tuotantopotentiaali rajallista.

Vedyn kysynnän odotetaan kasvavan merkittävästi erityisesti Keski-Euroopassa. Monet Euroopan teollisuudenalat, kuten teräs-, kemian- ja lannoiteteollisuus, käyttävät nykyisin suuria määriä maakaasua joko energialähteenä tai raaka-aineena. Koska vetyä voidaan hyödyntää monissa samoissa käyttökohteissa, nähdään se keskeisenä keinona vähentää teollisuuden ympäristölle haitallisia päästöjä. Euroopan unionin ilmasto- ja energiatavoitteiden myötä puhtaasti tuotetun vedyn kysynnän arvioidaan

kasvavan huomattavasti tulevina vuosikymmeninä, mikä luo Suomelle mahdollisuuden toimia sekä vedyn tuottajana että viejänä. [26]



Kuva 5, Lotta Liuhamo, Suunnitellut vetyreitit Suomessa ja Pohjoismaissa, Gasgrid [25] [26] [27]

## 7 Johtopäätökset

Uusiutuvat sähköntuotantotavat yleistyvät vauhdilla, ja varsinkin tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta jopa noin 50-kertaistunut 15 vuodessa, ja kasvun odotetaan kiihtyvän entisestään, joten energian varastointiin tarvitaan uusia ratkaisuja. Tuulivoima on tällä hetkellä edullisin tapa tuottaa sähköä Suomessa.

Suomen hallitus on asettanut tavoitteeksi tuottaa vähintään 10 prosenttia EU:n päästöttömästä vedystä vuoteen 2030 mennessä [28], mikä edellyttää merkittäviä investointeja vedyn tuotantoon, siirtoon ja käyttöön liittyvään infrastruktuuriin. Suomen vahvuuksia vetytaloudessa ovat kilpailukykyinen sähkön hinta, toimiva energiajärjestelmä sekä runsas uusiutuvan energian ja biogeenisen hiilidioksidin määrä.

Nämä tekijät luovat suotuisan pohjan vetytalouden kehitykselle ja houkuttelevat investointeja alalle. [29]

Gasgrid selvittää parhaillaan kansallisen vetyinfrastruktuurin linjausvaihtoehtoja sekä vedynsiirtotarpeita Suomessa ja Itämeren alueella. Nordic Hydrogen Route on Ruotsin ja Suomen vetyinfrastruktuurin yhdistävä hanke, joka avaa avoimen vetymarkkinan Perämeren alueelle vuoteen 2030 mennessä. Nordic-Baltic Hydrogen Corridor – hankkeen tavoitteena on vetyinfrastruktuurin kehittäminen Suomesta Viron, Latvian, Liettuan ja Puolan kautta Saksaan vuoteen 2030 mennessä. Baltic Sea Hydrogen Collector – kehityshankkeessa tutkitaan mahdollisuutta rakentaa Suomen, Ruotsin ja Keski-Euroopan yhdistävä laajamittainen vetyputki-infrastruktuuri, joka mahdollistaa puhtaan ja kestävästi vedyn tuottamisen Euroopan tarpeisiin. [29] Näille Gasgridin yhdessä kansainvälisten kumppaniensa kanssa toteutettaville hankkeille on myönnetty yhteensä 51,4 miljoonan euron suuruinen Euroopan Unionin Verkkojen Eurooppa -rahoitusvälinetuki. [24] [27]

Uusiutuva energia tuottaa nykyisin monissa tapauksissa markkinoiden edullisinta sähköä, joten siirtymää pois fossiilisista polttoaineista ohjaavat ympäristösyiden lisäksi myös taloudelliset tekijät. [5] [6] Erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman tuotantokustannukset ovat laskeneet merkittävästi viime vuosina, mikä on tehnyt vähäpäästöisestä sähköntuotannosta yhä kilpailukykyisempää. Uusiutuvan energian suurimpana haasteena on kuitenkin tuotannon vaihtelevuus: sähkön tuotanto ei aina seuraa kulutusta. Tämän vuoksi energian varastoinnilla on keskeinen rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Vihreä vety tarjoaa yhden lupaavimmista ratkaisuista uusiutuvan energian varastointiin ja hyödyntämiseen silloin, kun sähköntuotanto ylittää kulutuksen. Samalla vetyä voidaan käyttää teollisuuden raaka-aineena esimerkiksi ammoniakkin, synteettisten polttoaineiden ja vähäpäästöisen teräksen valmistuksessa, mikä mahdollistaa päästövähennyksiä myös niillä energiankäyttösektoreilla, joiden sähköistäminen on haastavaa. [24]

Suomella on hyvät edellytykset nousta merkittäväksi vedyn tuottajaksi suuren uusiutuvan energiantuotantopotentiaalinsa ansiosta. Erityisesti tuulivoiman nopea kasvu, suhteellisen edullinen sähkö sekä suunnitteilla oleva vetyinfrastruktuuri luovat mahdollisuuksia sekä kotimaiselle teollisuudelle että vedyn viennille. Vaikka vetytalouteen liittyy edelleen teknisiä, taloudellisia ja infrastruktuurisia haasteita, vihreän vedyn voidaan arvioida muodostuvan tärkeäksi osaksi sekä Suomen että Euroopan tulevaa energiajärjestelmää.

## Lähteet

- [1] ”Sähköntuotanto”, Energiateollisuus. Viitattu: 20. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/>
- [2] ”Vetyopas - Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus”, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus>
- [3] H.-K. Hämäläinen, ”Sähkövuosi 2023: Puhdas sähköntuotanto kasvoi, päästöt ja hinnat romahtivat”, Energiateollisuus. Viitattu: 20. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://energia.fi/tiedotteet/sahkovuosi-2023-puhdas-sahkontuotanto-kasvoi-paastot-ja-hinnat-romahtivat/>
- [4] ”Kotimaisella sähkön tuotannolla katettiin 98 % Suomen sähkön tarpeesta vuonna 2023 | Tilastokeskus”. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://stat.fi/fi/julkaisu/cln2zc9wg8fgb0cut7vm9hil8>
- [5] M. J. B. Kabeyi ja O. A. Olanrewaju, ”The leveled cost of energy and modifications for use in electricity generation planning”, *Energy Rep.*, vol. 9, s. 495–534, syys 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.06.036.
- [6] ”Renewable Power Generation Costs in 2024”. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- [7] ”Tuulivoiman tuotanto”, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoiman-tuotanto/>
- [8] ”Aurinkosähköjärjestelmät”, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat>
- [9] ”Materials for Renewable and Sustainable Energy”, SpringerLink. Viitattu: 16. kesäkuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://link.springer.com/journal/40243>
- [10] ”Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa | LUT-yliopisto”. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>
- [11] ”Aurinkovoiman tuotanto”, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>
- [12] ”Olkiluotoon uusi akkuyhtiö – Raumallekin suunnitelmia”, Yle Uutiset. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20192222>
- [13] S. Haanpää, ”Miksi sähköjärjestelmän vakaa taajuus on tärkeää?”, Fingrid-Lehti. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/miksi-sahkojarjestelman-vakaa-taajuus-on-tarkeaa/>
- [14] ”Suomen ensimmäisellä vihreän vedyn tuotantolaitoksella edetty putkistoasennuksiin”, Enersense. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://enersense.fi/suomen-ensimmaisella-vihrean-vedyn-tuotantolaitoksella-edetty-putkistoasennuksiin/>
- [15] ”Yleistietoa sähkömarkkinoista”, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/>
- [16] ”Sähköjärjestelmän tila”, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/>
- [17] ”Vetytalous Hankkeen väliraportti esittelee sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuurin mahdollisuuksia energijärjestelmälle”, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/vetytalous-hankkeen-valiraportti-esittelee-sahkon-ja-vedyn-siirtoinfrastruktuurin-mahdollisuuksia-energiajarjestelmalle/>
- [18] ”Global Hydrogen Review 2023 – Analysis”, IEA. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- [19] S. Shiva Kumar ja V. Himabindu, ”Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”, *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, nro 3, s. 442–454, joulukuuta 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

- [20] M. David, C. Ocampo-Martínez, ja R. Sánchez-Peña, ”Advances in alkaline water electrolyzers: A review”, *J. Energy Storage*, vol. 23, s. 392–403, kesä 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.03.001.
- [21] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, ja D. Stolten, ”A comprehensive review on PEM water electrolysis”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, nro 12, s. 4901–4934, huhti 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [22] ”Tulevaisuuden vetytalous ja kestävä terästuotanto | Oulun yliopisto”. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www oulu.fi/fi/tutkimus/tulevaisuuden-vetytalous-ja-kestava-terastuotanto>
- [23] ”Ammoniakin tutkimukseen 2,5 miljoonaa euroa – vetytalous edistyy”, *Kemia-lehti*. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://kemia-lehti.fi/ammoniakin-tutkimukseen-25-miljoonaa-euroa-vetytalous-edistyy/>
- [24] ”Synteettiset sähköpolttoaineet ottivat uusia edistysaskelia – E-Fuel-tutkimushanke onnistuneeseen päätökseen – Kemiamedia”. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.kemiamedia.fi/synteettiset-sahkopolttoaineet-ottivat-uus-ia-edistysaskelia-e-fuel-tutkimushanke-onnistuneeseen-paatokseen/>
- [25] Gasgridin ja Fingridin vetytaloushankkeen tulokset, Fingrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/final-seminar-presentation\\_gasgrids-and-fingrids-hydrogen-economy-project.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/final-seminar-presentation_gasgrids-and-fingrids-hydrogen-economy-project.pdf)
- [26] ”Nordic Hydrogen Route”, Gasgrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://gasgrid.fi/en/hydrogen-development/nordic-hydrogen-route/>
- [27] riitta.silvennoinen, ”Gasgrid kumppaneineen sai yli 50 miljoonaa euroa EU-tukea kolmelle vedynsiirtohankkeelleen”, *h2cluster.fi*. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://h2cluster.fi/gasgrid-kumppaneineen-sai-yli-50-miljoonaa-euroa-eu-tukea-kolmelle-vedynsiirtohankkeelleen/>
- [28] ”Hallitus hyväksyi periaatepäätöksen vedystä - Suomella edellytykset valmistaa 10 prosenttia EU:n vihreästä vedystä 2030”, Valtioneuvosto. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvaksyi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>
- [29] ”Suomen kansallinen vedynsiirtoverkko”, Gasgrid. Viitattu: 21. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://gasgrid.fi/vetykehitys/suomen-kansallinen-vedynsiirtoverkko/>