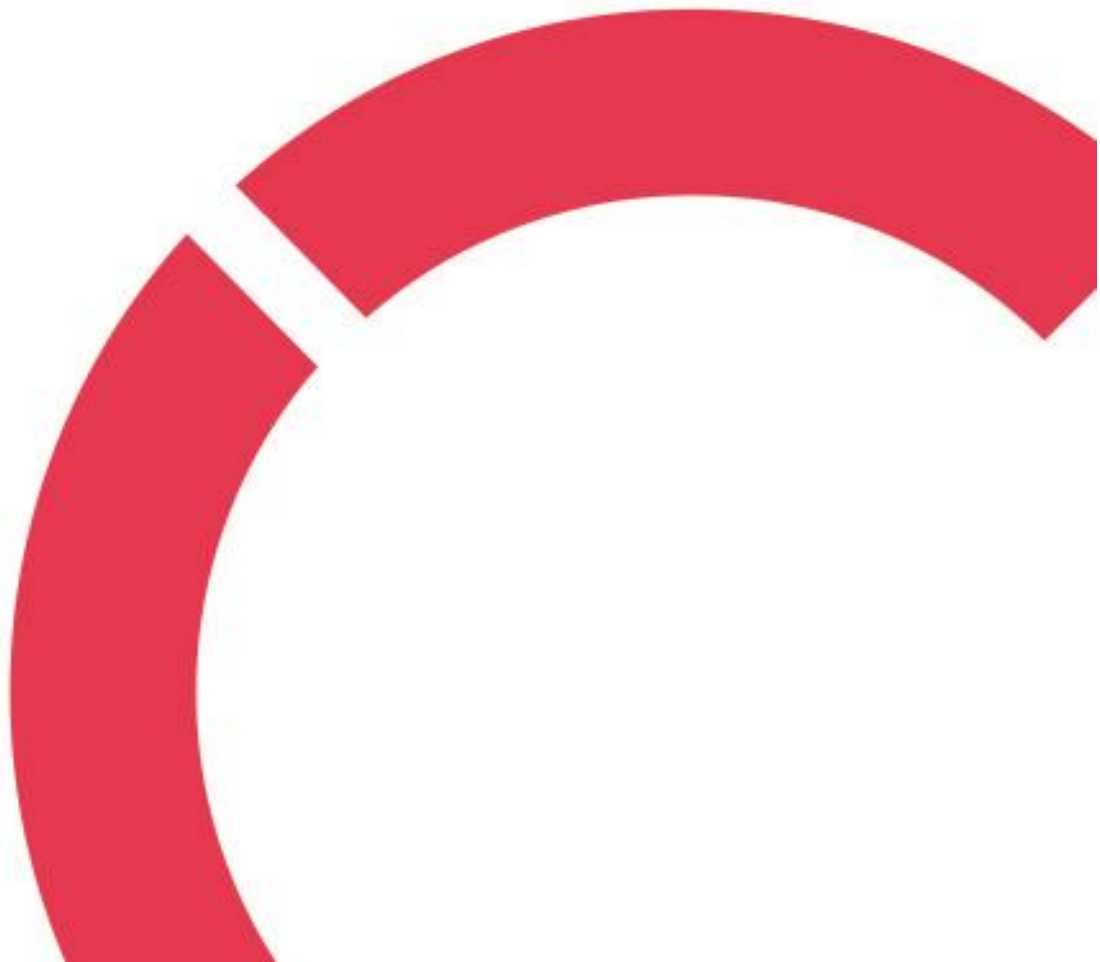


Janne Vierimaa

**VIHREÄN VETYTEKNOLOGIAN YMPÄRISTÖVAIKUTUS JA
ELINKAARIARVIOINTI**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Huhtikuu 2025**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Huhtikuu 2025	Tekijä/tekijät Janne Vierimaa
Koulutus Kemiantekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi VIHREÄN VETYTEKNOLOGIAN YMPÄRISTÖVAIKUTUS JA ELINKAARIARVIOINTI		
Työn ohjaaja Tiina Aittola		Sivumäärä 28
Työelämäohjaaja		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella vihreän vetyteknologian tuotannon, varastoinnin ja käytön ympäristövaikutusta sekä tehdä elinkaariarviointia vihreän vedyn tämänhetkisestä tilanteesta. Työ saatiin toimeksiantona erääseen Centrian hankkeeseen liittyen ja siinä käsiteltiin vedyntuotannon taustoja ja selvitettiin sekä vihreiden vetytuotantoketjujen hiilidioksidipäästöjä että aurinko- ja tuuli-voimavedyn hiilijalanjälkeä. Työn painotus teknologian osalta oli aurinkovoimassa. Tähän työhön liittyi alueellinen tarkastelu, missä huomioitiin Pohjois-Pohjanmaan tämänhetkiset vedynkäytön haasteet ja mahdollisuudet sekä tuuli- ja aurinkovoiman ympäristövaikutukset.</p> <p>Tarkastelun pohjalta ilmeni, että keskitetyllä aurinkokeräinjärjestelmällä tuotetun ammoniakkin ympäristövaikutukset olivat alhaisemmat kuin perinteisen aurinkopaneelin tai termisen aurinkokeräimen käytöllä. Tuulivoimalla tuotetun vedyn hiilijalanjälki oli samaa luokkaa aurinkovoimavedyn kanssa, mutta oli myös viitteitä siitä, että maatuulivoimalla tuotetun vedyn ympäristövaikutukset voisivat olla paljon pienemmät verrattuna merituulivoimaan ja vihreään aurinkovetyyn. Mikäli tuulivoimaan yhdistettiin elektrolyysiprosessista syntyvän hapen talteenotto, niin päästiin negatiiviseen päästölukemaan sadan vuoden ajanjaksoa katsoessa.</p> <p>Pohjois-Pohjanmaan tarkastelussa havaittiin paljon alueellista vetypotentiaalia. Maakunnassa tuotettiin lähes puolet Suomen tuulivoimasta ja suunnitteilla oli kasvattaa tuulivoimaa merkittävästi. Aurinkovoiman osuus oli vielä pientä alueella, mutta hankkeita oli käynnissä määrän kasvattamiseksi. Alueen vedyntuotannon ongelmina nähtiin sähkönsiirtokapasiteetin loppuminen ja vetyinfrastruktuurin puuttuminen. EU:n laajuisia ja maakuntaan kohdistuvia vetyhankkeita oli käynnissä, joiden odotettiin helpottavan sähkönsiirtoverkon tilannetta ja parantavan maankäyttöä.</p>		
Asiasanat elinkaariarviointi, vetyteknologia, vihreä vety, ympäristövaikutus		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date April 2024	Author Janne Vierimaa
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis ENVIRONMENTAL IMPACT AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF GREEN HYDROGEN TECHNOLOGY		
Centria supervisor Tiina Aittola	Pages 28	
Instructor representing commissioning institution or company		
<p>The aim of this thesis was to examine the environmental impact of production, storage and use of green hydrogen technology along with life cycle assessment of the current situation of green hydrogen. The work was commissioned as part of a Centria project, and it addressed the background of hydrogen production and explored both the carbon dioxide emissions of green hydrogen production chains and the carbon footprint of solar and wind-power hydrogen. The emphasis of the work on technology is solar power. The work included a regional review, which considered the current challenges and opportunities of hydrogen use in Northern Ostrobothnia, as well as the environmental impacts of wind and solar power.</p> <p>Based on the review, it was found that the environmental impact of ammonia produced by a concentrated photovoltaic thermal system was lower than that of a conventional solar panel or thermal solar collector. While the carbon footprint of wind-generated hydrogen was similar to solar hydrogen, there were also indications that the environmental impact of onshore wind-generated hydrogen could be much lower compared to offshore wind and green solar hydrogen. If combined with the recovery of oxygen from the electrolysis process, a negative emission figure was reached when looking at the 100-year period.</p> <p>This work found a lot of regional hydrogen potential for Northern Ostrobothnia. Almost half of Finland's wind power was produced in the province and plans were made to increase wind power significantly. The share of solar power was still small in the area, but projects were underway to increase the number. Problems with hydrogen production in the area were seen as the end of electricity transmission capacity and the lack of hydrogen infrastructure. EU-wide and provincial hydrogen projects were underway, which were expected to help improve the situation of the electricity transmission network and improve land use.</p>		

Key words

environmental impact, green hydrogen, hydrogen technology, life cycle assessment

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

ATR

Auto-thermal reforming tarkoittaa autotermistä reformointia

CCS

Carbon capture and storage tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia

CCU

Carbon capture unit tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoyksikköä

CCUS

Carbon capture, utilization and storage tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa, hyödyntämistä ja varastointia

CH₂

Compressed hydrogen on paineistettua vetyä

CH₃

Metyyli

CO₂

Hiilidioksidi

CPV-T

Concentrated photovoltaic thermal system on keskitetty aurinkokeräinjärjestelmä

GW

Gigawatti

GHR

Global Hydrogen Review tarkoittaa IEA:n vuotuista globaalia vetytarkastelua

GWP

Global warming potential on kerroin ominaislämmitysvaikutukselle

H₂

Vety

kWh

Kilowattitunti

LCA

Life cycle assessment on elinkaariarviointi

LH₂

Liquified hydrogen on nestemäistä vetyä

Mtpa

Million ton per annum tarkoittaa miljoonaa tonnia vuodessa

NZE

Net zero emissions tarkoittaa nettonollapäästöjä

NH₂

Typpikaasu

NH₃

Vetynitraatti, mikä paremmin tunnetaan ammoniakkinä

OH

Funktionaalinen ryhmä nimeltä hydroksyyli-ryhmä, missä on yksi happiatomi ja yksi vetyatomi

POM

Partial oxidation of methane tarkoittaa metaanin osittaista hapettamista

PV

Photovoltaic tarkoittaa auringonvalon muuntamista sähköksi aurinkokennoilla

PV-T

Photovoltaic thermal tarkoittaa aurinkosähköistä kennostoa, missä on lämminvesikiertojärjestelmä

SMR

Steam methane reforming tarkoittaa höyryreformointivedyn valmistusta

TWh

Terawattitunti

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 TAUSTAA	2
3 VIHREÄN VEDYN ELINKAARIARVIOINTI	6
3.1 Tuotantovaihe ja toimitusketjut	7
3.2 Käsittelyn energiankulutus ja häviöt	8
3.3 Varastoinnin häviöt.....	9
3.4 Uudelleen käsittelyn energiankulutus ja häviöt	10
4 VIHREÄN AURINKOVEDYN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	11
4.1 Tuotannon ympäristövaikutukset.....	12
4.2 Käsittelyn ympäristövaikutukset	13
4.3 Varastoinnin ympäristövaikutukset	13
4.4 Uudelleen käsittelyn ympäristövaikutukset.....	14
4.5 Ammoniakin ja metanolin ympäristövaikutukset.....	14
4.6 Yhteenveto aurinkovoimalla tuotetusta vihreästä vedystä	15
5 VIHREÄN TUULIVOIMAVEDYN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET.....	16
6 VEDYN KÄYTÖSTÄ SYNTYVIEN HÄVIÖIDEN KOKONAISVAIKUTUS.....	19
7 VERTAILUA AURINKO- JA TUULIVOIMAN GWP-KERTOIMILLA.....	21
8 ALUEELLINEN TARKASTELU (POHJOIS-POHJANMAA)	22
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA.....	25
10 YHTEENVETO	26
LÄHTEET	27
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Vähäpäästöisten vetyjen tuotanto.....	4
KUVIO 2. Elektrolyysihankkeet vuoteen 2030 mennessä.....	5
KUVIO 3. Lohkokaavio vihreän vedyn tuotannosta elektrolyysillä.....	7
KUVIO 4. Lohkokaavio vihreän vedyn vaiheista eri olomuotoineen	8
KUVIO 5. Tuulivoimasta syntyvät vetypäästöt	16
KUVIO 6. Vertailua tuulivoimaloiden ympäristövaikutuksista	18
KUVIO 7. Vedyntuotantotekniikoiden GWP-kertoimet häviöillä ja ilman kahdelle aikavälille	19
KUVIO 8. Vetyhäviöt eri häviömäärillä.....	20
KUVIO 9. GWP-vertailua aurinko -ja tuulivoiman kesken.....	21

TAULUKOT

TAULUKKO 1. GWP-kertoimet kuudelle tuotantopolulle 11

1 JOHDANTO

Tässä työssä oli tarkoitus tehdä kirjallisuuskatsaus vihreän vedyn tuotannon, varastoinnin ja käytön ympäristöön vaikuttavista tekijöistä ja selvittää, millä teknologialla päästään pienimpään hiilidioksidipäästöön. Työssä pääpaino on aurinkovoimalla tuotetussa vedyssä ja tuulivoimalle poimitaan GWP-arvoja vertailtavaksi eri lähteistä. Vesivoima ja esimerkiksi biomassa jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

Kasvihuonekaasujen päästöjä mitataan ominaislämmitysvaikutuksen kertoimella eli nk. GWP (global warming potential) -kertoimella (Tilastokeskus). Tässä tutkimuksessa GWP:tä käytetään pääasiassa ilmaisemaan, kuinka monta kiloa hiilidioksidia vapautuu yhdestä tuotetusta vetykilosta. Muita kuormitustekijöitä, kuten esimerkiksi otsoninkatoa ja maaperän happamoitumista, ei tutkimuksessa huomioida.

Työssä käytetään työkaluna elinkaariarviointia (engl. LCA), joka koostuu neljästä eri vaiheesta: arvioinnin tavoitteesta ja laajuudesta, elinkaaren sisällöstä, elinkaaren vaikutuksista ja lopuksi arvioinnin tulkinnasta (EcoOnline.) Työn päätavoitteena on tutkia vihreän vedyn tuotannosta, varastoinnista ja käytöstä syntyviä ympäristövaikutuksia, ilmaista niitä GWP-kertoimella ja vertailla tuloksia sinisen vedyn kertoimiin. Se sisältää tarkastelun vedyn toimitusketjuista vedyn eri olomuotoihin ja aina lopputuotteeksi asti. Laskentaa ei katsauksessa tehdä ja vedyn loppukäyttäjän osuutta ei tutkita.

2 TAUSTAA

Maailmanlaajuinen vedyntuotanto vapautti 920 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuonna 2023, ja lähes kaksi kolmasosaa johtui maakaasusta, joka vapautti 10–12 kilogrammaa hiilidioksidia yhtä tuotettua vetykiloa kohden. Tästä 20 % syntyi hiilestä, mistä vapautui 22–26 kilogrammaa hiilidioksidia per tuotettu vetykilo. Tuotannosta syntyvät päästöt kattoivat 75–95 % kokonaispäästöistä. (IEA 2024.) Euroopan unionin fossiilisista polttoaineista irtautumista koskevat tavoitteet ovatkin maailman kunnianhimoisimmat, ja EU:lla on tavoitteena vähentää nettopäästöjä vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä ja saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2050 mennessä. Tämä on käynnistänyt EU:n politiikassa toimia, jotta päästöttömiä teknologioita ja ei-teknologisia ratkaisuja voitaisiin ottaa massiivisesti käyttöön ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Uusiutuvien energialähteiden osuuden sähköntuotannossa pitäisi nousta nopeasti nykyisestä 40 %:sta ainakin kaksi kolmasosaa 55 %:n vähennykseen pääsyyn ja nousun tulisi olla lähes 70 % EU-maiden energiapolitiikan elpymissuunnitelman REPowerEU:n mukaan. Aurinko- ja tuulivoimalla tuotetun uusiutuvan energian odotetaan yhdessä kattavan 60 % ja REPowerEU-suunnitelman mukaan 67 % kokonaisenergiatuotannosta vuoteen 2030 mennessä. REPowerEU-suunnitelmassa katsotaan aurinkovoiman olevan kapasiteetiltaan suurin energialähde vuonna 2030 tuulivoiman kattaessa 31 % osuudesta. Uusiutuvien energioiden osuuden odotetaan kasvavan vuoden 2030 jälkeen, jotta vuoden 2050 hiilineutraalisuuteen päästäisiin. (Euroopan komissio 2023.)

EU:n tavoitteisiin nähden tuuli- ja aurinkovoiman kokonaiskapasiteetin on kaksinkertaistuttava vuoteen 2030 mennessä. Tuulivoiman kokonaiskapasiteetin tulisi saavuttaa 510 GW ja aurinkovoiman 592 GW, kun taas esimerkiksi ydinvoiman vain 94 GW. EU tavoittelee merkittävää päästöttömien teknologioiden kasvua, ja esimerkiksi elektrolyysille odotetaan massiivista vuosittaista nousua vuoden 2022 165 MW:sta 25 GW:n vuosikeskiarvoon vuosille 2025–2030. Tuulivoimateknologioiden vuosittaisen kasvun odotetaan lähes kolminkertaistuvan 15 GW:sta 42 GW:iin; aurinkovoiman käyttöönoton osalta kasvua odotetaan vain 30 %, koska 41 GW:n tavoite saavutettiin jo vuonna 2022. (Euroopan komissio 2023.)

Vety on noussut lupaavaksi energialähteeksi ja sillä on potentiaalia mullistaa energiantuotanto ja -kulutus lähitulevaisuudessa. Vedyllä on useita ominaisuuksia, jotka tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon fossiilisille polttoaineille. Se on puhdas raaka-aine, joka ei tuota päästöjä, kun sitä poltetaan energiantuotannossa, se on kestävä energialähde, sillä vetyä voidaan tuottaa elektrolyysillä käyttämällä aurinko- tai tuulivoimaa ja se on energialähteenä tehokas, sillä vedyllä on erinomainen energiasisältö

fossiilisiin polttoaineihin verrattuna sekä se soveltuu moniin eri käyttötarkoituksiin, kuten liikenteelle, lämmitykseen ja sähköntuotantoon. (Vetylaitos.)

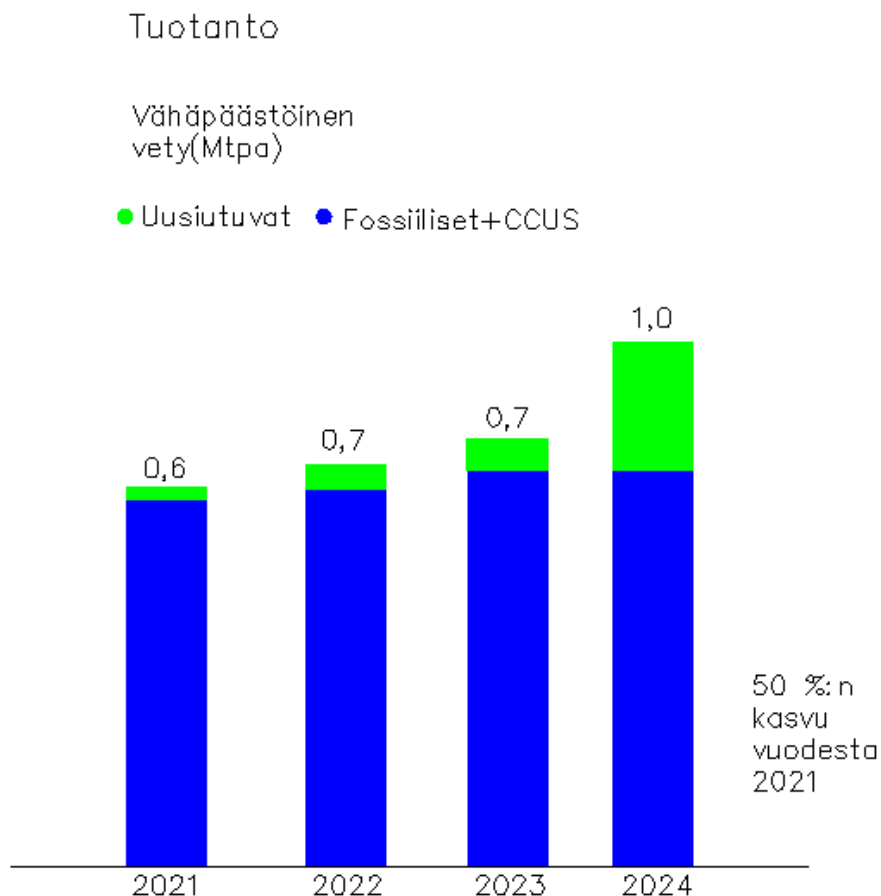
Perinteisin ja edelleen yleisin vedyn valmistusmenetelmä on höyryreformointi (SMR), mitä kutsutaan harmaaksi vedyksi ja sitä tuotetaan pilkkomalla maakaasua vedyksi ja hiilidioksidiksi. Harmaa vety on suhteellisen edullinen ja energiatehokas, mutta siitä syntyy valtavasti hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Harmaa vety muuttuu hieman puhtaammaksi siniseksi vedyksi, kun harmaan vedyn tuotantoon on yhdistetty hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimenetelmä (CCS, carbon capture and storage). Sinisen vedyn haasteina ovat hiilidioksidin tehokas varastointi ja energianintensiivisyys, ja hiilijalanjälki on silti suurempi kuin esimerkiksi elektrolyysivedyllä. (Kortelainen 2021.)

Vihreä vety on vetyä, joka on tuotettu käyttäen uusiutuvia energialähteitä, kuten aurinko- tai tuulivoimaa. Yleisin käytössä oleva teknologia on elektrolyysi, missä vesi pilkotaan vedyksi ja hapeksi. Veden sijasta voidaan elektrolyysissä käyttää biometaanua, mikä vähentää maakaasusta aiheutuvia päästöjä ja pienentää vesivarantojen kuormitusta tuottaen samalla vetyä, mitä voidaan käyttää energialähteenä eri tavoin. Vihreän vedyn etuna on, että se ei tuota juuri lainkaan kasvihuonepäästöjä. (Vetylaitos 2024.) Elektrolyysivety on päästötöntä tuottaa, mutta vihreäksi vedyksi sitä voidaan kutsua vain, mikäli myös sen energianlähde on uusiutuvaa. Energiantuotannosta syntyvien päästöjen pitää olla alle 200–240 grammaa CO_2/kWh , jotta höyryreformointivedyn raja-arvo alittuu. Yhtä lailla uusiutuva energia on päästötöntä tuottaa, mutta päästöjä voi syntyä uusiutuvan energiainfrastruktuurin rakentamisesta ja muusta valmistuksesta. Tällaisia päästöjä ei ole vielä huomioitu useimmissa tarkasteluissa, ja nämä päästöt voivat vaihdella 0,4–2,7 kg CO_2/kgH_2 . (IEA 2024.) Tällä hetkellä Euroopan unionissa puhdas vety määritellään siten, että päästöt eivät saa ylittää 3,38 kg CO_2/kgH_2 , mikä vastaa 70 %:n päästövähennystä fossiilisiin polttoaineisiin nähden (Erbach & Svensson 2023).

Vihreän vedyn tuotannossa käytetään keskeisenä menetelmänä edellä mainittua elektrolyysiä, missä vesimolekyylit jaetaan happi- ja vetykaasuihin sähkövirran avulla ja missä prosessin tarvitsema sähkö tuotetaan yleensä aurinko-, tuuli- tai vesivoimalla. Elektrolyysi koostuu elektrolyysiyksiköstä, mikä sisältää elektrolyyttiliuokseen upotettuja elektrodeja, jotka koostuvat ionipitoisesta vedestä tai vesiliuoksesta. Käytettäessä sähkövirtaa vesimolekyylit dissosioituvat elektrodeihin. Vetyionit liikkuvat elektrolyysiyksikön katodille, jolloin ne pelkistyvät vetykaasuksi, kun taas happimolekyylit vapautuvat yksikön anodilla hapettumisen kautta synnyttäen happikaasua. Elektrolyysi tapahtuu ihanneolosuhteissa tarjoten helposti skaalattavan ja ympäristöystävällisen menetelmän vedyn tuotantoon. Elektro-

lyysiteknologian kehitys on johtanut erilaisten ja suorituskyvyiltään poikkeavien elektrolyysimenetelmien syntyyn, ja näistä menetelmistä huomattavimmat ovat olleet alkali- tai emäselektrolyysi (AE), protonimembraanielektrolyysi (PEM) ja kiinteän oksidin elektrolyysi (SOE). (Zeng & Zhang 2010.) Nykyään myös anionin vaihtomembraanielektrolyysi (AEM) on saavuttamassa suosiota, mutta yleisin elektrolyysiprosesseista on yhä alkalielektrolyysi. Sen etuna on erittäin emäksinen (pH14 tai yli) ympäristö, jolloin voidaan käyttää jalometallivapaita katalyyttejä. Tämä laskee elektrolyysiyksikön kustannuksia merkittävästi ja hillitsee kriittisten materiaalien käyttöä. (Convery, Delpisheh., Mamlouk, Niblett, Ramakrishnan & Vinothkannan 2024.)

Kuviossa 1 on esitetty kansainvälisen energiajärjestön IEA:n selvitys vihreän vetytuotannon tämänhetkisestä kehityksestä verrattuna siniseen vetyyn. Arvot on annettu miljoonaa tonnia per vuosi (Mtpa). Kasvua on tapahtunut 50 % vuodesta 2021, mutta edelleen sinistä vetyä tuotetaan huomattavia määriä. (IEA 2024.)



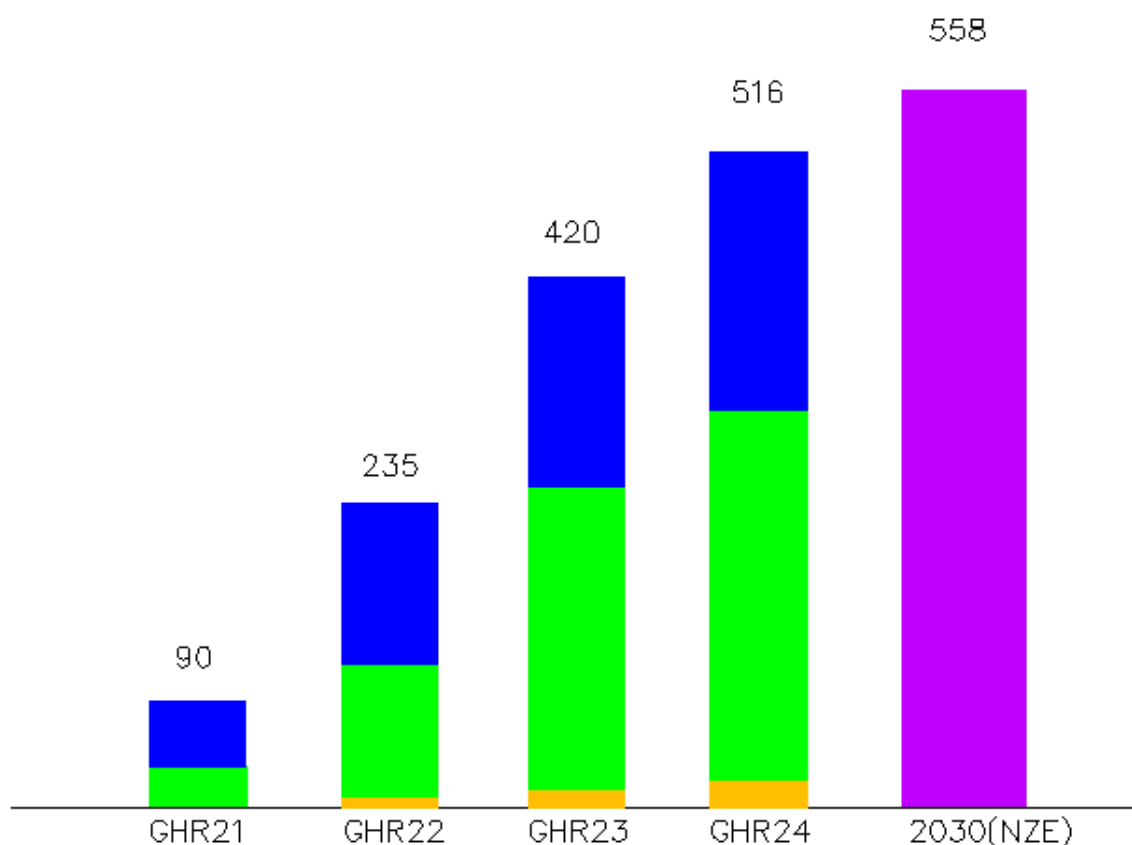
KUVIO 1. Vähäpäästöisten vetyjen tuotanto (mukailten IEA 2024)

Kuviossa 2 on esitetty IEA:n selvitys tämänhetkisistä elektrolyysivetyhankkeista ja arvio kokonaismäärästä vuoteen 2030 mennessä. Arvot on annettu gigawatteina (GW). Kuviossa ovat mukana niin valmistuneet hankkeet kuin varhaisessa vaiheessa olevat sekä viimeistä rahoituspäätöstä odottavat hankkeet.

Julkistetut
elektrolyysihankkeet
vuoteen 2030 mennessä

GW

- Valmistuneet
- Varhaisessa vaiheessa
- Rahoituspäätöstä odottavat



KUVIO 2. Elektrolyysihankkeet vuoteen 2030 mennessä (mukaihen IEA 2024)

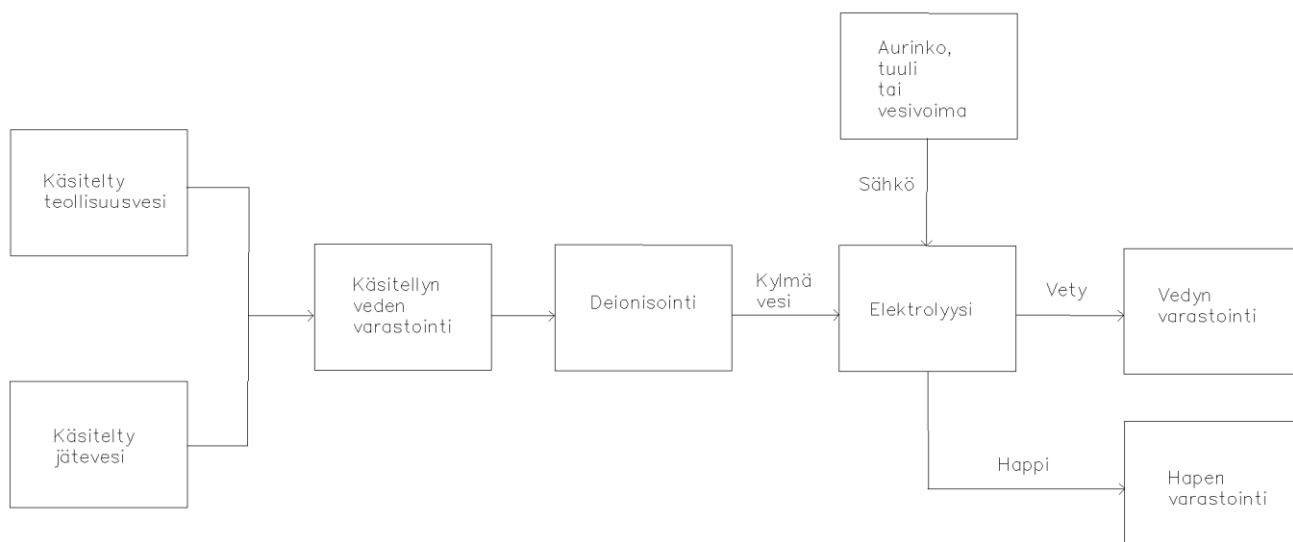
3 VIHREÄN VEDYN ELINKAARIARVIOINTI

Vihreää vetyä voidaan tuottaa eri tavoin, joiden ympäristöön kohdistuvat päästöt vaihtelevat. Kun puhutaan aurinkovoimalla tuotetusta vihreästä vedystä, käsitellään perinteistä aurinkopaneelia, termistä aurinkokeräintä, mikä on perinteistä aurinkopaneelia tehokkaampi kuumavesikiertonsa ansiosta ja keskitettyä aurinkokeräinjärjestelmää, jotka kaikki on yhdistetty elektrolyysiin. Mitä keskitetympään tuotantotapaan mennään, sitä paremmaksi myös elektrolyysin suorituskyky kasvaa. Elektrolyysillä tuotettu vety voi olla nestemäistä tai paineistettua tai siitä voidaan jatkovalmistaa ammoniakkaa tai metanolia. Sinistä vetyä voidaan tuottaa useilla eri prosesseilla, mutta yleisimmät ja keskeisimmät ovat höyryreformointi (SMR), metaanin osittainen hapettaminen (POM) ja autoterminen reformointi (ATR), joihin on yhdistetty hiilidioksidin talteenottoyksikkö (CCU). Vedyn olomuodon mukaan varastointiin ja kuljetukseen on olemassa myös eri tapoja. (Alghool, Haouari & Trucco 2024a, 2024b.)

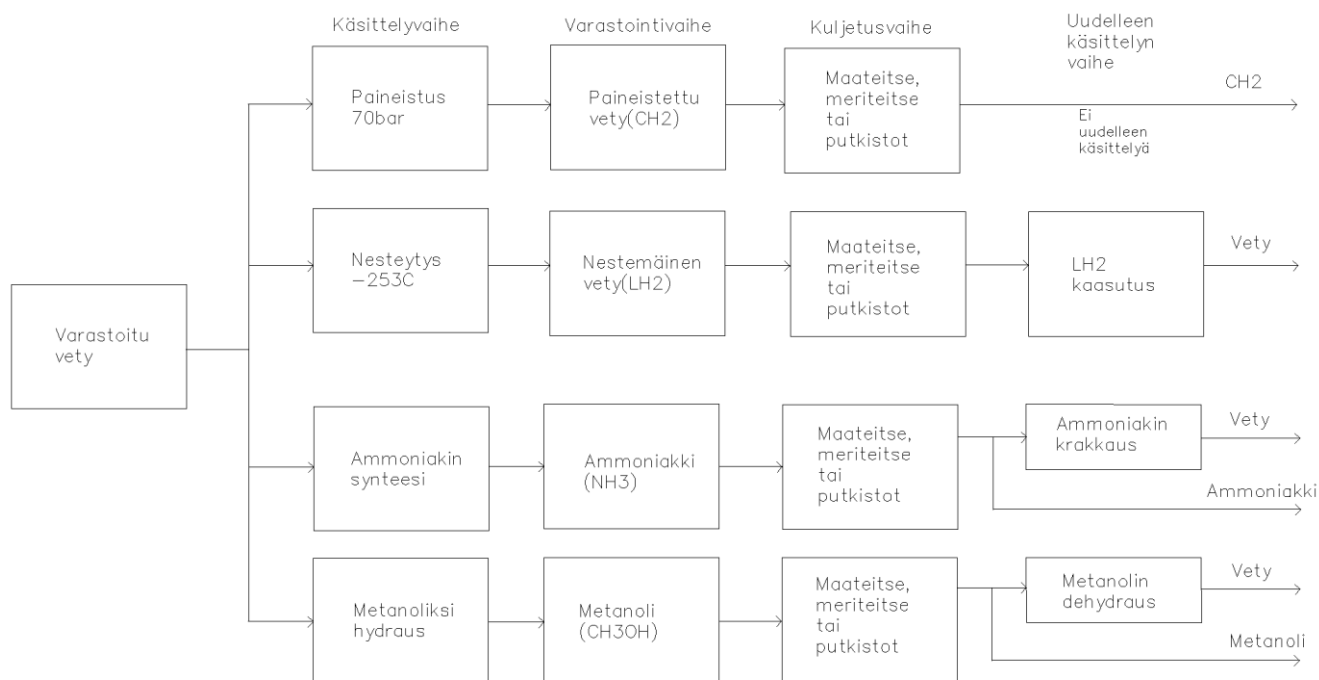
Alghool ym. (2024a, 2024b) tutkivat 18 polkua vihreän ja sinisen vedyn tuotannossa, varastoinnissa ja käytössä selvittääkseen, millä vetypoluilla on alhaisin GWP-kerroin. Tutkimukset osoittavat, että sillä vihreän vedyn polulla, mikä käyttää keskitettyä aurinkokeräinjärjestelmää energiantuotantoon ja paineistukseen vihreän vedyn käsittely- ja kuljetusvaiheissa on alhaisimmat ympäristövaikutukset, ollen $2,67 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ja siniselle vetypolulle alhaisin lukema on $2,12 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ lopputuoteammoniakilla, kun prosessina on käytetty autotermistä reformointia yhdistettynä CO_2 -talteenottoon. Vihreän vetypolun lopputuoteammoniakilla päästään niinkin alhaiseen lukemaan kuin $0,7 \text{ kgCO}_2/\text{kgNH}_3$, mikä tekee siitä vertailussa olleista vaihtoehdoista päästöttömimmän. (Alghool ym. 2024a, 2024b.)

3.1 Tuotantovaihe ja toimitusketjut

Vedyn elektrolyysissä käytetään deionisoitua vettä, mikä on ionin vaihdolla ja käänteisosmoosilla valmistettu teollisuus- tai jätevedestä. Alghool ym. (2024b) mukaan yhden vetykilogramman ja kahdeksan happikilogramman tuottamiseen kuluu 10 kg vettä ja 50 kWh energiaa, kun käytetään alkalielektrolyysiä. Tämä elektrolyysi saa energiansa perinteisistä aurinkopaneeleista, termisestä aurinkokeräimestä tai keskitetystä aurinkokeräinjärjestelmästä. Elektrolyysissä syntyy vedyn lisäksi siis happea, ja molemmat varastoidaan varastointiyksiköihin, joista vety voidaan käsitellä neljällä eri tavalla: vety paineistetaan, se voidaan nesteyttää erittäin matalassa lämpötilassa tai vety voidaan syntetisoida ammoniakiksi tai muuttaa metanoliksi hydrausprosessissa. (Alghool ym. 2024b.) Tuotanto ja sen toimitusketjut vihreälle vedylle eri olomuotoineen on esitetty kuvioissa 3 ja 4.



KUVIO 3. Lohkokaavio vihreän vedyn tuotannosta elektrolyysillä (mukaiillen Alghool ym. 2024b)



KUVIO 4. Lohkokaavio vihreän vedyn vaiheista eri olomuotoineen (mukaillen Alghool ym. 2024b)

Tuotannon jälkeen vety etenee neljää eri toimitusvaiheen reittiä: käsittely, varastointi, kuljetus ja uudelleen käsittely. Jokaisessa vaiheessa on kuusi erilaista polkua valittavissa: paineistettu vety, nesteytetyn vedyn kaasutus, ammoniakin krakkaus, metanolin dehydraus ja ammoniakin sekä metanolin lopputuotteet. Kaikissa muissa vaiheissa käytetään aurinkovoiman avulla tuotettua uusiutuvaa energiaa, paitsi uudelleen käsittelyssä, mikä on loppukäyttäjän vastuulla. (Alghool ym. 2024b.) Alghool ym. (2024b) tutkivat, että vedyn tuotantovaiheessa perinteisen aurinkopaneelin hyötysuhde on 18 %. He arvioivat, että termisen aurinkokeräimen hyötysuhde on 60 % ja keskitetyn aurinkokeräinjärjestelmän 80 % (Alghool ym. 2024b).

3.2 Käsittelyn energiankulutus ja häviöt

Alghoolin ym. (2024b) mukaan käsittelyvaiheista vedyn paineistus tehdään 70 bar:ssa, mihin kuluu energiaa 0,57 kWh/kgH₂ ja mikä tuottaa 1 kg:n paineistettua vetyä. Paineistuksessa häviöt ovat 0,5 %:n luokkaa. Vedyn nesteytyksessä vedyn lämpötila lasketaan -253 °C, mikä kuluttaa energiaa 10 kWh/kgH₂ ja mistä saadaan 1 kg nestemäistä vetyä. Nesteytyksessä häviö on 1 %. Vastaavasti ammo-

niakin synteesissä tarvitaan 4,68 kg typpikaasua ja 1 kg vetyä, jotta saadaan tuotettua 1 kg ammoniakia. Käsittelyssä energian kulutus on suurin eli 11,2 kWh/kgH₂, mutta häviöt ovat paineistusta ja nesteytystä pienemmät (0,025 %). Metanolin hydruukseen tarvitaan 7,25 kg hiilidioksidia ja yksi kilogramma vetyä yhden metanolikilogramman tuottamiseen. Hydruuksessa energiankulutus on 10,9 kWh/kgH₂ häviöiden ollessa vain 0,005 %. (Alghool ym. 2024b.)

3.3 Varastoinnin häviöt

Käsittelyvaiheen jälkeen vety varastoidaan tilapäisiin varastointiyksiköihin, mistä se voidaan kuljettaa, meriteitse, maateitse tai putkia pitkin. Alghoolin ym. (2024b) tutkimuksessa viitataan varastoinnista aiheutuviin häviöihin, jotka ovat 0,18 % nesteytetylle vedylle, ammoniakille 0,062 % ja metanolille 0,005 %. (Alghool ym. 2024b.) Paineistetun vedyn häviöitä ei ole merkitty, mikä viittaa siihen, että häviöt ovat olemattomat tai niitä ei ole laskettu.

3.4 Uudelleen käsittelyn energiankulutus ja häviöt

Varastoinnista vety ohjautuu uudelleen käsittelyyn lukuun ottamatta paineistettua vetyä, mikä ohjataan sellaisenaan loppukäyttäjälle tai muuhun käyttöön. Alghoolin ym. (2024b) mukaan nesteytetyn vedyn kaasutuksessa yksi kilogramma nestemäistä vetyä kaasutetaan, jolloin vety palautuu kaasumaiseen olemuotoonsa. Tässä prosessissa energiaa kuluu 2,53 kWh/kgH₂ ja häviöt ovat 0,5 %. Ammoniakin krakkauksessa 5,68 kg ammoniakkia tarvitaan yhden vetykilogramman tuottamiseen, ja tällöin energiankulutus on 1,93 kWh/kgH₂ häviöiden ollessa 1,38 %. Metanolin dehydrauksessa 5,18 kg metanolia dehydrataan, jolloin energiaa kuluu 10,37 kWh/kgH₂. Häviöt kipuavat 2,47 %:iin. (Alghool ym. 2024b.)

4 VIHREÄN AURINKOVEDYN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Alghool ym. (2024b) selvittivät kaikkien 18 ketjun ja kuuden eri tuotantopolun ympäristövaikutukset laskennallisesti käyttäen GaBi -nimistä sovellusta. Tutkimuksessa vaikutukset laskettiin aurinkovoimalle eli esimerkiksi tuulivoiman vaikutuksia ei huomioitu. Laskentojensa mukaan keskitetyt aurinkokeräimet eli CPV-T-keräimet tuottavat vähiten päästöjä jokaisessa vedyn tuotantopolussa. Numeeriset arvot on esitetty taulukossa 1. Taulukossa neljän ensimmäisen polun lopputuotteena on vety, joita on vertailtu keskenään. Kahden viimeisen eli ammoniakkin sekä metanolin välillä on tehty oma vertailunsa. (Alghool ym. 2024b.)

TAULUKKO 1. GWP-kertoimet kuudelle tuotantopolulle (kgCO₂/kgH₂) (mukaiillen Alghool ym. 2024)

Vedyn polku	Perinteinen PV	Terminen PV	Terminen ja keskitetty PV
CH ₂	3,63	2,76	2,67
LH ₂ → H ₂	5,05	4,03	3,93
NH ₃ → H ₂	6,22	5,19	5,09
CH ₃ OH → H ₂	10,73	9,7	9,6
NH ₃	0,9	0,72	0,7
CH ₃ OH	1,02	0,82	0,81

Taulukosta 1 huomataan, että paineistetun vedyn GWP-kerroin on alhaisin verrattuna muihin vedyn lopputuotteisiin. Tämä johtuu siitä, että paineistuksessa energiankulutus on muita alhaisempi (vain 0,57 kWh/kgH₂), kuten edellä mainittiin ja uudelleen käsittelyä ei paineistetulle vedylle tarvita, vaan se voidaan varastoinnin jälkeen ohjata sellaisenaan eteenpäin. Tuotannosta syntyikin suurimmat päästöt, mitkä Alghoolin ym. (2024b) mukaan ovat 2,50 kgCO₂/kgH₂. Metanolin dehydrauksella kerroin on korkein, sillä dehydraus on endoterminen prosessi, mikä edellyttää suuren määrän lämpöä. Tämä lämpö saadaan maakaasusta, mitä poltetaan ja mikä vapauttaa paljon hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi dehydrauksessa hiilidioksidi otetaan talteen uudelleen hydrausta varten, ja tämä prosessi tuottaa myös hiilidioksidipäästöjä. Nestemäisen vedyn kaasutuksella on paineistettua vetyä korkeampi kerroin, koska kaasutus on energiaintensiteetimpi prosessi kuin paineistus. Tässä polussa on mukana uudelleen

käsittely, toisin kuin paineistuksessa. Kaasutuksen energiankulutus on 0,047 kWh/kgH₂. Toisaalta, ammoniakkin krakkauksella on yli 90 % korkeampi kerroin kuin paineistuksessa ja 29,5 % korkeampi kuin kaasutuksessa, koska ammoniakkin krakkauksessa energiaa kuluu eniten eli 11,2 kWh/kgH₂. (Alghool ym. 2024b.)

Alghoolin ym. (2024b) tutkimus osoittaa, että ammoniakkin ollessa lopputuotteena on GWP-kerroin kaikkein alhaisin (0,7 kgCO₂/kgNH₃), vaikkakin ammoniakkin syntetisointi kuluttaa paljon energiaa. Lopputuoteammoniakkin polkuun ei sisälly uudelleen käsittelyä, kun taas ammoniakkin krakkauksessa 21,9 % koko GWP-kertoimesta syntyy uudelleen käsittelystä. Lopputuoteammoniakkin kerroin kertoo yhden ammoniakikilogramman tuoton, kun muissa on otettu huomioon yhden vetykilogramman tuotto. Näin ollen kerroin on korkeampi muissa poluissa lukuun ottamatta metanolin ja ammoniakkin lopputuotteita. (Alghool ym. 2024b.) Tästä syystä Alghool ym. (2024b) vertailivat näitä kahta lopputuotetta keskenään, ja havaitsivat, että metanolin kertoimet ovat kaikilla kolmella aurinkoenergiaa tuotavalla järjestelyllä korkeammat kuin ammoniakilla. Perinteisellä aurinkopaneelilla kerroin on 15,7 % korkeampi, termisellä aurinkokeräimellä 13,33 % korkeampi ja keskitetyllä aurinkokeräinjärjestelmällä vastaava luku on 13,89 %. Korkeammat kertoimet johtuvat siitä, että vetyä tarvitaan enemmän metanolin kuin ammoniakkin valmistamiseen: vetyä kuluu 0,193 kg yhden metanolikilon valmistuksessa, kun taas ammoniakkin valmistamiseen vetyä kulutetaan 0,176 kg per yksi ammoniakikilo. Tämä aiheuttaa deionisoidun veden kulutukseen kasvua. Toisin sanoen, energiaa vaaditaan enemmän niin elektrolyysille kuin ionin vaihdon prosessille. (Alghool ym. 2024b.) Alghool ym.(2024b) vertailivat myös metanolin hydrausta ja ammoniakkin synteesiä, ja tuloksena on, että hydrausprosessi tuottaa 19,8 % enemmän hiilidioksidipäästöjä (0,32 kgCO₂/kgCH₃OH) kuin ammoniakkin synteesi (0,26 kgCO₂/kgNH₃) (Alghool ym. 2024b).

4.1 Tuotannon ympäristövaikutukset

Alghool ym. (2024b) osoittavat, että kun lopputuotteena on vety ja käytetään CPV-T-keräimiä, niin GWP-kerroin on sama jokaisen vetypolun tuotantovaiheessa, ollen 2,5 kgCO₂/kgH₂. Kerroin on 4 % korkeampi, kun tuotannossa käytetään PV-T-keräimiä ja 38,8 % korkeampi käytettäessä perinteistä aurinkopaneelia. Tuotantoon kuluu eniten energiaa muihin vaiheisiin verrattuna, koska vihreää vetyä tuotetaan energiaa paljon vaativalla elektrolyysillä. (Alghool ym. 2024b.)

4.2 Käsittelyn ympäristövaikutukset

Vedyn käsittelyvaiheessa vedyn paineistus ja sen jättäminen paineistettuun olomuotoon tuottavat vähiten päästöjä ($0,14 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$), koska paineistukseen ei kulu paljoa energiaa. Siten paineistus edustaa vain 5,4 % kokonaiskertoimesta. Verrokkina vedyn nesteytyksestä syntyvä kerroin on $1,17 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, mikä on 29,6 % kokonaiskertoimesta ja ammoniakkin synteetille vastaavat luvut ovat $1,46 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ja 28,6 %. Näiden kahden päästöt ovat korkeammat, koska käsittelyvaiheessa kulutetaan enemmän energiaa paineistukseen verrattuna. (Alghool ym. 2024b.) Alghool ym. (2024b) tutkivat, että vedyn hydraus metanoliksi tuottaa eniten päästöjä, mikä lukuna on $1,66 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Hydraus kuluttaa toiseksi eniten energiaa ($10,9 \text{ kWh/kgH}_2$) ja prosessiin kuuluu hiilidioksidin talteenotto, mistä syntyy lisäpäästöjä. Hydraus edustaa kuitenkin vain 17,3 % metanolipolun koko GWP-kertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

4.3 Varastoinnin ympäristövaikutukset

Alghoolin ym. (2024b) mukaan varastointivaiheessa metanolin varastointi osoittautui vähiten päästöjä tuottavaksi, tuottaen vain $0,0023 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Syynä tähän on, että metanolin varastointiin kuluu vähiten energiaa ($0,012 \text{ kWh/kgCH}_3\text{OH}$) muihin vedyn olomuotoihin verrattuna. Alhainen energiankulutus taas johtuu siitä, että metanoli voidaan varastoida nestemäisessä muodossa peruspaineessa ja lämpötilassa. Tällöin ei tarvita esimerkiksi jäähdytystä, mikä kasvattaisi päästöjä. Metanolin varastointi edustaa 0,02 % koko GWP-kertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

Nestemäisen vedyn varastoinnista syntyy eniten päästöjä ($0,026 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$), koska energiaa kuluu $0,042 \text{ kWh/kgLH}_2$, mikä on enemmän muihin vedyn olomuotoihin verrattuna. Säilyttääkseen nestemäisen olomuotonsa joudutaan vety jäähdyttämään -253 °C , mikä nostaa energiankulutusta huomattavasti. Lisäksi nestemäisen vedyn varastoinnista aiheutuvat häviöt ovat suuremmat kuin esimerkiksi metanolilla. Nestemäisen vedyn varastointi edustaa 0,7 % sen koko GWP-kertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

Ammoniakin varastoinnista syntyvät päästöt ovat $0,015 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, mitkä ylittävät metanolin vastaavat arvot. Varastoinnin energiankulutus on korkeampi ($0,014 \text{ kWh/kgNH}_3$) johtuen ammoniakkin jäähdytysvaatimuksesta ja korkeammasta kiehumispisteestä. Energiankulutus on huomattava, etenkin ison mittakaavan varastoinnissa. Toisaalta ammoniakkin varastoinnista syntyy vähemmän päästöjä kuin

paineistetun vedyn varastoinnista, koska paineistettu vety joudutaan pitämään 70 bar:n paineessa, mikä näkyy energiankulutuksen kasvuna. Ammoniakin varastointi edustaa 0,3 % sen kokonaiskertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

Varastoidessa paineistettua vetyä päästöjä syntyy hieman vähemmän (0,025 kgCO₂/kgH₂) verrattuna nestemäisen vedyn varastointiin. Paineistettu vety voidaan varastoida korkeammassa lämpötilassa ja paineessa kuin nestemäinen vety, ja prosessi ei vaadi samankaltaista jäähdytystä. Näin ollen paineistettu vety on energiankulutukseltaan huokeampi vaihtoehto kuin nestemäinen vety. Paineistetun vedyn varastointi edustaa 0,9 % sen kokonaiskertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

4.4 Uudelleen käsittelyn ympäristövaikutukset

Vedyn uudelleen käsittelyn vaiheessa ei huomioida paineistettua vetyä, koska vety pysyy samassa olo- muodossa koko ajan ja se toimitetaan paineistetussa muodossaan loppukäyttäjille tai muuhun käyttöön. Nestemäisen vedyn palauttaminen takaisin kaasufaasiin tuottaa vähiten hiilidioksidipäästöjä (0,23 kgCO₂/kgH₂), koska energiankulutus 0,047 kWh/kgH₂ on pienin muihin uudelleen käsittelyn prosesseihin verrattuna. Kaasutuksen osuus kokonaiskertoimesta on 5,4 %. Ammoniakin krakkauksessa päästöt ovat korkeammat, koska energiankulutus on 1,93 kWh/kgH₂, mikä on selvästi enemmän kuin kaasutuksessa. Lukuna päästö on 1,12 kgCO₂/kgH₂ ja ammoniakin krakkaus edustaa 29,7 % kokonaiskertoimesta. (Alghool ym. 2024b.)

Metanolin dehydrauksen päästölukema on 5,43 kgCO₂/kgH₂, mikä on suurin muihin uudelleen käsittelyn vaiheisiin verrattuna. Kuten tämän luvun alussa mainittiin, dehydraus on endoterminen prosessi, mihin tarvitaan 10,37 kWh/kgH₂ edestä lämpöä ja energiaa, ja energianlähteeksi poltetaan hiilidioksidipitoista maakaasua. Dehydrauksen osuus kokonaiskertoimesta onkin 56,6 %. (Alghool ym. 2024b.)

4.5 Ammoniakin ja metanolin ympäristövaikutukset

Alghool ym. (2024b) osoittavat, että kun kyseessä on ammoniakki ja metanoli lopputuotteina, niin tuotantovaiheessa metanoli tuottaa päästöjä enemmän kuin ammoniakki: metanolin päästöt ovat 0,48 kgCO₂/kgCH₃OH ja ammoniakin 0,44 kgCO₂/kgNH₃ CPT-V-keräimien ollessa käytössä. Mikäli termisiä aurinkokeräimiä käytetään, niin metanolin kerroin on 0,54 kgCO₂/kgCH₃OH, mikä on 12,5 %

enemmän kuin CPT-V-keräimen kerroin. Ammoniakin vastaava kerroin on $0,49 \text{ kgCO}_2/\text{kgNH}_3$, mikä on 11,4 % enemmän kuin CPT-V-keräimellä. Kun kyseessä on terminen aurinkokeräin, niin metanolin päästöt ovat 9,3 % korkeammat kuin ammoniakilla. Vertailtaessa päästöjä perinteiseen aurinkopaneeliin on metanolin GWP-kerroin $0,74 \text{ kgCO}_2/\text{kgCH}_3\text{OH}$, mikä on 54,2 % korkeampi kuin CPV-T-keräimessä. Vastaava arvo ammoniakilla on $0,68 \text{ kgCO}_2/\text{kgNH}_3$, mikä on 54,5 % korkeampi kuin CPV-T:lle. Perinteinen aurinkopaneeli paritettuna metanoliin synnyttää 8,8 % enemmän päästöjä kuin ammoniakilla toteutettu vastaavanlainen järjestely. Tuotanto -ja käsittelyvaiheen päästöt ovat metanolilla ammoniakilla korkeammat, kuten luvun 3 alussa mainittiin. Varastoinnin osalta ammoniakin päästöt ovat korkeammat kuin metanolilla. (Alghool ym. 2024b.)

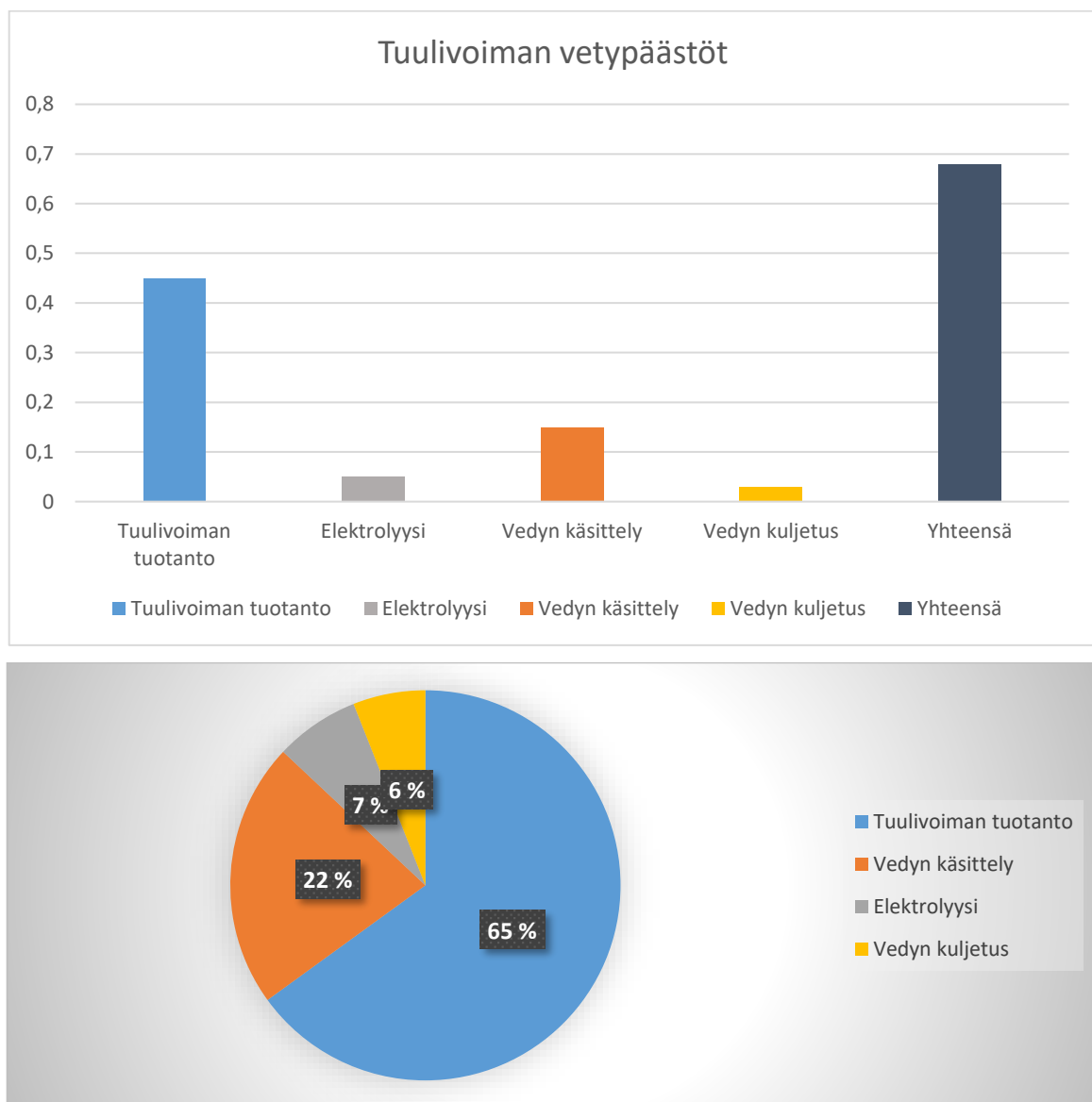
4.6 Yhteenveto aurinkovoimalla tuotetusta vihreästä vedystä

Alghoolin ym. (2024a, 2024b) tutkimukset osoittavat, että käytettäessä CPV-T-keräimiä yhdessä elektrolyysin kanssa saadaan alhaisin GWP-kerroin muut kaksi vertailussa ollutta aurinkoenergianjärjestelmää ja koko vetyketju kaikkine olomuotoineen huomioiden. Kun CPV-T-keräimellä tuotettu vety paineistetaan ja toimitetaan lopputuotteena loppukäyttäjälle, saavutetaan alhaisimmat päästöt ($2,67 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$) verrattuna muihin vihreän vedyn lopputuotepolkuihin. Kun sinisen vetypolun lopputuotteena on ammoniakki, niin lukema on sinisen vetypolun alhaisin ollen $2,12 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, kun prosessina käytetään ATR:ää yhdistettynä CCU:hun. Jos myös vihreän vetypolun lopputuotteena on ammoniakki, niin tällöin päästään lukemaan $0,7 \text{ kgCO}_2/\text{kgNH}_3$, mikä on lähes neljä kertaa alhaisempi kuin vihreän vetypolun paineistetulla vedyllä ja kolme kertaa matalampi kuin sinisen vetypolun ammoniakilla. (Alghool ym. 2024a, 2024b.)

Huolimatta keskitettyjen aurinkokeräinjärjestelmien suorituskyvystä niiden riippuvuus auringonvalon saatavuudesta herättää tärkeitä kysymyksiä maankäytöstä ja ekosysteemin häiriintymisestä. Lisäksi ne ovat hintavia ja yhden paneelin hinnaksi onkin arvioitu 600 \$ eli nykykurssilla noin 555 €. Perinteisen aurinkopaneelin saa 110 \$ (noin 100 €) kappalehintaan, mikä voi jarruttaa CPV-T-keräinten suosiota merkittävästi. (Alghool ym. 2024b.)

5 VIHREÄN TUULIVOIMAVEDYN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

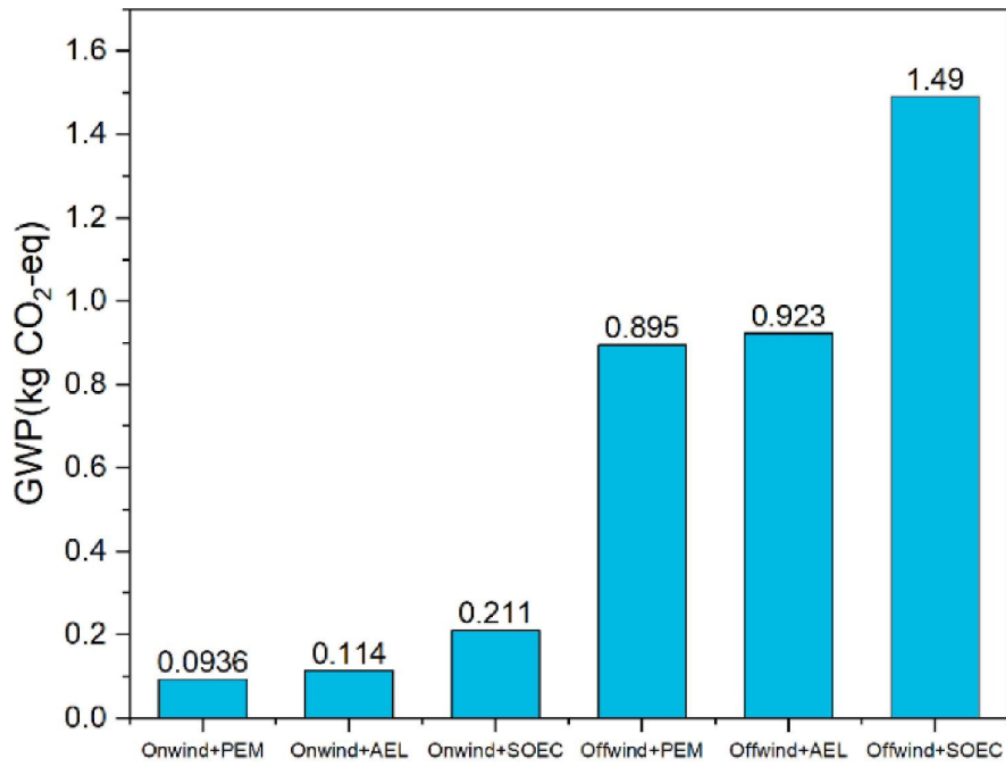
Ghandehariun ja Kumar (2016) tutkivat kymmenkunta vuotta sitten, että tuulivoimalla tuotetun elektrolyysivedyn päästöt ovat $0,68 \pm 0,05 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, josta 65 % syntyy kolmen megawatin tuulivoimalan rakennusvaiheesta. He käyttivät länsi-Kanadassa tehdyssä tutkimuksessaan alkalielektrolyysiä yhdistettynä maatuulivoimalapuistoon. (Ghandehariun & Kumar 2016.) Kuviosta 5 käy ilmi päästöjen muodostuminen ja kokonaispäästöt. Rakennusvaiheen korkea osuus johtuu tuulivoimalaan käytetyistä rakennusmateriaaleista.



KUVIO 5. Tuulivoimasta syntyvät vetypäästöt (mukaiillen Ghandehariun ja Kumar 2016)

Hermesmann ja Müller (2022) tutkivat Saksassa PEM-elektrolyysiä merellä sijaitsevaan tuulivoimalaan liitettynä. Tutkimusvuonna PEM:llä ja paikallisella kantaverkolla tuotetun vedyn päästöt olivat 34,85 kgCO₂/kgH₂, mutta kun PEM yhdistettiin merituulivoimalaan, tippuivat päästöt 0,88 kgCO₂/kgH₂ eli 97,8 prosenttia. Heidän mukaansa voidaan päästä lukemaan 0,7 kgCO₂/kgH₂, mikäli PEM-elektrolyysi kehittyy tulevaisuudessa. He kuitenkin huomauttivat, että jos PEM saa käyttösähkönsä pelkästään uusiutuvista energioista, tarvitaan merkittävää energian varastointikapasiteettia uusiutuvien energioiden jaksoittaisuudesta (engl. intermittency) johtuen. Jaksoittaisuudella viitataan siihen, että on myös hetkiä, jolloin ei tuule ja öisin ei aurinko paista. He arvioivatkin, että kahden megawatin merituulivoimala voisi tuottaa sähköä 4000 tuntia vuodessa ja voimalan käyttöikä olisi 20 vuotta. Sisämaassa sijaitsevalle 4,5 megawatin tuulivoimalalle he arvioivat vastaavien lukujen olevan 2000 tuntia ja 20 vuotta. Hermesmann ja Müller (2022) valitsivat PEM-elektrolyysin tutkimukseensa siksi, että siinä muun muassa käytetään alkalelektrolyysiä korkeampaa virrantiheyttä ja sitä kautta sillä saavutetaan korkeampi kaasupuhtaus. Se on myös alkalelektrolyysiä kompaktimpi kokonaisuus. (Hermesmann & Müller 2022.)

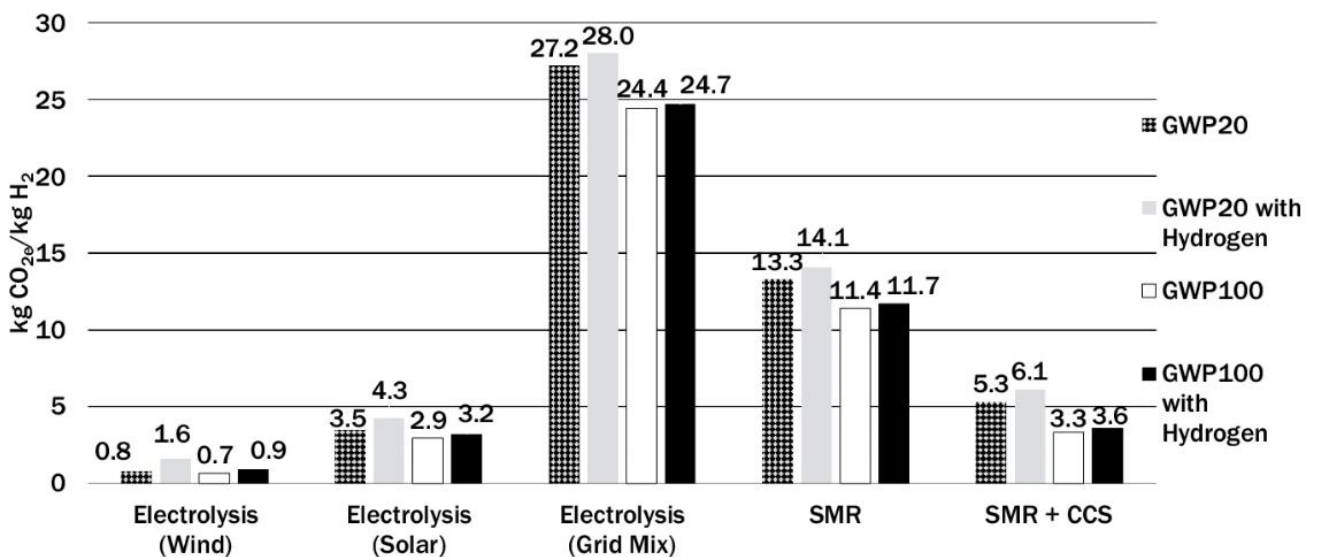
Zhang, Wang, He, Li, Wang, Wang, Zhu ja Cen (2023) vertailivat Kiinassa sisämaan tuulivoimalan päästöjä merituulivoimalapuistoon, mikä sijaitsee viiden kilometrin päässä rannikosta. Heidän mukaansa PEM-elektrolyysiä käyttävä maatuulivoimala tuottaa vähiten päästöjä muihin vertailukohteisiin nähden. Vaikka nykyinen elektrolyysikennosto kuluu loppuun 20 vuodessa, asettivat tutkijat tuulivoimalan käyttöikäksi 30 vuotta arvioinnin johdonmukaisuuden varmistamiseksi ja olettaen, että kennosto jossain vaiheessa vaihdetaan. Merituulivoiman osalta he huomioivat, että elektrolyysin vedentuotantoon on yhdistetty meriveden suolanpoisto käänteisosmoosin avulla. Kuvioista 6 nähdään, että GWP-kerroin on vain 0,0936 kgCO₂/kgH₂ maatuulivoimalalle (Onwind+PEM). Merkittävimpänä erona maatuulivoimalan ja merituulivoimalan kesken tutkijat näkivät rakennusvaiheen, missä merituulivoimalaan on käytettävä korroosiota hyvin sietäviä materiaaleja, mitkä nostavat päästöjä. He osoittivat myös, että PEM-elektrolyysin kerroin on esimerkiksi alkalelektrolyysiä alhaisempi siksi, että PEM on tehokkuudeltaan parempi (PEM:n tehokkuus arvioitu 10 % korkeammaksi) ja prosessihäviöt ovat pienemmät. Lisäksi PEM-elektrolyysiyksikön valmistusprosessilla on suhteellisesti pienempi ympäristövaikutus kuin alkali- ja kiinteäoksidielektrolyysin laitteilla. (Zhang ym.2023.)



KUVIO 6. Vertailua tuulivoimaloiden ympäristövaikutuksista (Zhang ym.2023)

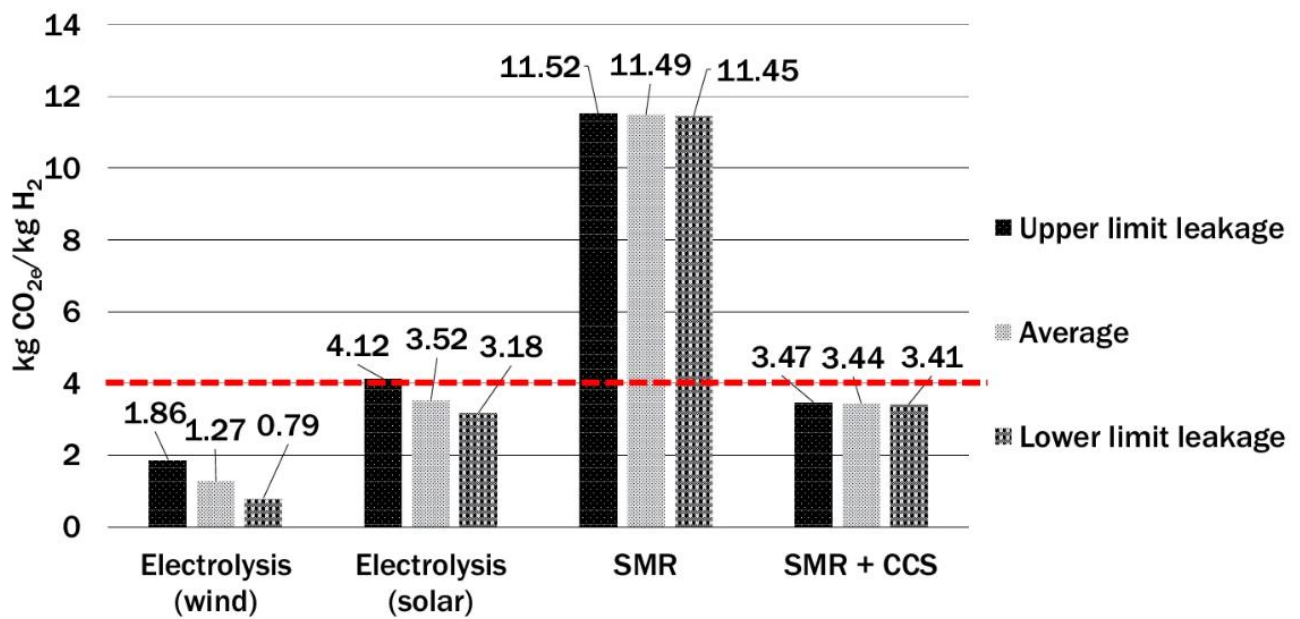
6 VEDYN KÄYTÖSTÄ SYNTYVIEN HÄVIÖIDEN KOKONAISVAIKUTUS

Goita, Beagle, Nasta, Wissmiller, Ravikumar ja Webber (2025) selvittivät vetyhäviöiden ympäristövaikutuksia ja miten häviöt ilmenevät GWP-kertoimessa. Kaasumainen vety on reaktiivisempaa kuin esimerkiksi metaani ja se on molekyylitasoltaan pienempi, minkä vuoksi se on alttiimpi häviöille. Goitan ym. (2025) mukaan useimmat tutkimukset ilmaisevat vetyhäviöitä prosenttien ja kymmenen prosentin väliin ympäristövaikutusten arvioinnissa ja uusimpienkin tutkimusten arvot vaihtelevat usean prosentin välillä. Kuviossa 7 on esitetty GWP-kertoimet eri vedyntuotannon tekniikoille kahden prosentin häviöllä (with hydrogen) ja ilman. GWP-kertoimet ovat sekä 20 vuoden aikajaksolle että 100 vuoden ajalle. (Goita ym. 2025.)



KUVIO 7. Vedyntuotantotekniikoiden GWP-kertoimet häviöllä ja ilman kahdelle aikavälille (Goita ym.2025)

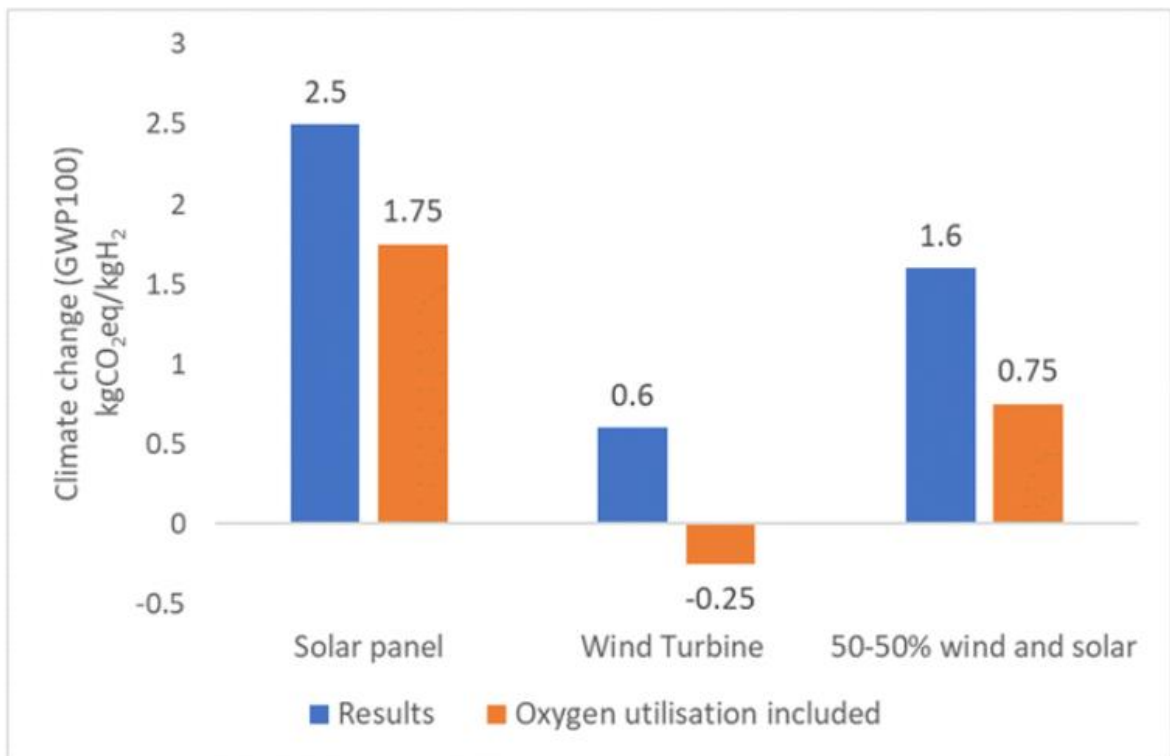
Goitan ym. (2025) mukaan elektrolyysivedyn tuotanto tuulivoimalla on kaikkein päästöttömintä häviömääristä riippumatta. Kuvioon 8 on listattu GWP-kertoimia eri häviömäärillä vertailun vuoksi. Elektrolyysivedyn häviölukemat ovat 9,2 % (musta pylväs), 4,6 % (harmaa) ja 2 % (pikselöity). GWP on annettu 100 vuodelle. (Goita ym. 2025.) Kuviossa punainen katkoviiva kertoo Yhdysvaltojen energiaviraston puhtaalle vedylle asettaman määrittymisen, mikä on $4,0 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ (U.S. Department of Energy 2023).



KUVIO 8. Vetyhäviöt eri häviömäärillä (Goita ym.2025)

7 VERTAILUA AURINKO- JA TUULIVOIMAN GWP-KERTOIMILLA

Cho, Evans ja Strezov (2023) vertailivat aurinko- ja tuulivoimaa tullen siihen tulokseen, että keskimääräinen GWP-kerroin on aurinkovoimalla tuulivoimaa korkeampi. Chon ym. (2023) tavoitti Pateli, Havukainen, Horttanainen, Soukka ja Tuomaala (2024) tekivät vertailua Gabi-sovelluksella ja havaitsivat, että tuulivoiman GWP-kerroin jää 0,6 kgCO₂/kgH₂, kun aurinkovoimalla se nousee 2,5 kgCO₂/kgH₂ (Patel ym.2024). Kuviossa 9 esitetään heidän tutkimustuloksensa PEM-elektrolyysillä. Hyvänä huomiona on elektrolyysivedyn tuotannosta syntyvän sivutuotehapon hyödyntäminen, millä tuulivoiman osalta päästään negatiiviseen GWP₁₀₀-arvoon. Myös kertoimet hybridimallille (tuuli- ja aurinkovoima integroitu 50/50-käyttösuhteella) on esitetty.



KUVIO 9. GWP-vertailua aurinko -ja tuulivoiman kesken (Patel ym.2024)

8 ALUEELLINEN TARKASTELU (POHJOIS-POHJANMAA)

Vuonna 2020 Pohjois-Pohjanmaan sähköntuotanto oli 8468 GWh, josta vesi -ja tuulivoiman osuus oli 83 %. Pohjois-Pohjanmaa on Suomen suurin tuulivoimaa tuottava maakunta: vuonna 2021 tuulivoimasähköä tuotettiin 2939 GWh, mikä on noin 40 % koko Suomen tuulivoimasta. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023a.) Lisääntyvä tuulivoimakapasiteetti aiheuttaa kuitenkin paineita sähköverkon rakentamiselle. Sähkönsiirtokapasiteetin suppeus ja sen loppuminen nähtiinkin koko Pohjois-Pohjanmaalla isona ongelmana vetyhankkeiden kehitykselle. Lisäksi Puolustusvoimien tutka-asemien vuoksi Puolustusvoimat eivät ole puoltaneet uusia tuulivoimahankkeita Oulun seudulle ja Koillismaan itäisimpiin osiin. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023b.) Vuoteen 2030 mennessä maakunnan tuulivoimakapasiteetin odotetaan nousevan 30 gigawattiin, mistä 25,3 gigawattia tuotetaan maatuulivoimalla ja loput 4,7 gigawattia merituulivoimaloilla. Ilmoitetut luvut ovat maksimiarvoja, joten todellisuudessa kapasiteetti tulee olemaan tätä pienempi. (VTT 2023.)

Maakunnan energiasta tuotetaan aurinkovoimalla vain pieni osa. Yksittäisiä aurinkovoimalahankkeita kyllä on ja merkittävimmät näistä ovat Kalajoen Juurakon hybridienergiapuisto ja Oulun Vihreäsaaren aurinkovoimapuisto, mikä koostuu 10 000 aurinkopaneelista ja minkä teho on 5 megawattia. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023a.) Oulun Seudun Sähkö yhdessä Oomin kanssa rakennuttaa Utajärvelle 20 megawatin ja 30 000 aurinkopaneelia käsittävän aurinkopuiston, minkä on tarkoitus valmistua vuoden 2025 loppuun mennessä (Oomi). Aurinkovoima nähdään maakunnassa houkuttelevimpana vaihtoehtona tuulivoimalle, koska kaikille alueille ei ole mahdollista tuulivoimaa rakentaa. Aurinkopaneeleja voidaan jo nyt asentaa olemassa olevan rakennuskannan yhteyteen ja nk. brown field -alueita eli esimerkiksi käytöstä poistettuja kaatopaikkoja, vanhoja turvealueita ja heikosti tuottavia viljelysalueita voidaan hyödyntää. Lisäksi aurinkovoiman tuotantoalue ei edellytä maakuntakaavamerkintää, mikä edesauttaa näiden tuotantoalueiden suunnittelua ja kaavoitusta. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023a.)

Tällä hetkellä maakunnassa tuotetaan vetyä lähinnä tuotantojen sivuvirroista tai fossiilisilla polttoaineilla. Suurimmaksi vedyntuotannon epävarmuustekijäksi maakunnassa nähdään logistiikka, sillä alueella ei ole vedyn jakeluun ja varastointiin soveltuvaa infrastruktuuria. Pidemmän aikavälin ratkaisuna koetaan putkistojen kautta tapahtuva jakelu, mutta tämän mahdollistaminen edellyttää lisähankkeita. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023a.) Alueen tämänhetkinen elektrolyysivedyn tuotantopotentiaali on huomattava, sillä VTT:n (2023) selvityksen mukaan potentiaali on lukuina 30,3 TWh/a ja 0,9 miljoonaa vetytonnia vuodessa, kun käytettävissä on 50 % tuulivoiman arvioidusta maksimikapasiteetista vuonna 2035. Alueen vedyntarve oli vuonna 2023 noin 6,2 kilotonnia vuodessa. VTT (2023) arvioi,

että vedynkysyntä tulee olemaan suunnilleen 15 TWh/a ja 0,4 miljoonaa vetytonnia vuodessa vuoteen 2035 mennessä. (VTT 2023.) Pohjois-Pohjanmaan liitto (2023a) katsoi, että vedyntuotannosta syntyvää ylimääräistä lämpöä voitaisiin käyttää maakunnassa kaukolämpönä ja mikäli kaukolämpöverkkoa ei ole, niin vedyntuotannon kasvaessa voisi maakuntaan muodostua alueellisia lämpöverkkoja, mitkä hyödyntäisivät vedyn lämpövirtaa kiinteistöjen lämmityksessä (Pohjois-Pohjanmaan liiton (2023a).

Pohjois-Pohjanmaan suurimmat hiilidioksidilähteet ovat SSAB Raahen terästehdas, Raahen Voima Oyj, Stora Enso ja Oulun Energia Oyj, joista SSAB tuotti eniten CO₂-päästöjä, mitkä olivat 1900 kilotonnia vuonna 2020 (VTT 2023). SSAB:n tehdas on maakunnan potentiaalisin suuren mittakaavan vedynkäyttäjäksi, kun tehtaan raaka-aineeksi on tarkoitus ottaa vedyllä pelkistetty rauta vuonna 2030. Tehtaan siirtyminen tuottamaan fossiilivapaata terästä lisää vedyn kulutusta yli 100 kilotonnia vuodessa, mikä on yli 50 %:n lisäys yksittäisen toimijan puolelta. Tämä luo merkittävästi lisäkysyntää vihreälle vedylle. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2023a.) VTT:n (2023) selvityksessä mainitaan, että SSAB:n vedyntarve olisi noin 150 kilotonnia vuodessa (VTT 2023).

Pohjois-Pohjanmaan liiton vuoden 2024 selvityksen mukaan yhden 35 vuotisen tuulivoimalan koko elinkaaren aikaisiksi päästöiksi arvioidaan 5,5 kgCO₂/MWh, josta 95 % muodostuu rakentamisesta ja 5 % tuulivoimalan toiminta-ajasta. Tutkimuksessa oletetaan, että kaikkien alueelle suunnitelluiden reilun 1200 meri- ja maatuulivoimalan sekä niitä tukevan sähkönsiirron maksimaaliset kielteiset ilmastovaiikutukset 35 vuoden ajanjaksolle olisivat hieman yli 10000 kilotonnia hiilidioksidia tai noin 7 gCO₂/kWh, josta 87 % syntyy voimaloiden rakentamisen ja käytön aikaisista päästöistä, 7 % alueen hiilinielujen menetyksestä ja 6 % alueen hiilivarastojen menetyksestä. Tuulivoimaloiden tilantarve olisi samalle 35 vuoden ajanjaksolle 5,2 % koko maakunnan alueesta. Uusiutuvasta energiasta saatava päästövähennys 35 vuodelle olisi tutkimuksen mukaan suurimmillaan yli 98000 kilotonnia/CO₂ ja pienimmillään noin 23000 kilotonnia/CO₂. Päästövähennyspotentiaali vastaa noin 62 % maakunnan kokonaispäästöistä, kun huomioidaan 98000 kilotonnia/CO₂:n vähenemä ja 12 % laskettaessa 23000 kilotonnilla/CO₂. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2024.)

Aurinkovoimaloiden elinkaaren pituudeksi Pohjois-Pohjanmaan liiton tutkimus (2024) oletti 30 vuotta ja päästöt laskettiin yhden hehtaarin voimala-alueelle. Aurinkovoimalan materiaalien valmistuksesta ja kuljetuksesta arvioidaan syntyvän 531 tonnin hiilidioksidipäästöt, joista aurinkopaneelit aiheuttaisivat 88 %, paneelitelinet noin 11 % ja huoltotiet yhden prosentin. Maankäyttömuutoksen osalta tutkimus katsoi, että aurinkovoimaloiden elinkaaren aikana menetettävä metsien hiilinielun suuruus on noin 79 tCO₂/hehtaari ja maaperälle vastaava menetys on noin 11 tCO₂ hehtaarilta. Maakunnan metsien keski-

määräinen hiilivarasto on noin 76,5 tCO₂/hehtaari. Metsämaalle rakennetun aurinkovoimalan aiheuttama hiilivarastojen ja -nielujen häviö olisi arvion mukaan noin 166 tCO₂/hehtaari. Elinkaaren lopussa aurinkovoimalan paneelien jätteenkäsittelystä aiheutuisi päästöjä 21 tCO₂/hehtaari, mutta kierrätyksestä ja muusta hyödyntämisestä saatavat edut olisivat noin 22 tCO₂/hehtaari. 30-vuotisen aurinkovoimalan elinkaaren päästöt olisivat näin ollen yhteensä metsämaille 718 tCO₂/hehtaari ja muille alueille, kuten niittymaille 552 tCO₂/hehtaari. Koko elinkaaren ajalle aurinkovoiman tuotantopäästöt olisivat metsämaille noin 35 gCO₂/kWh ja muille alueille noin 27 gCO₂/kWh. Tutkimus arvioi, että suurimmillaan aurinkovoimatuotannolla päästäisiin noin 2160 tCO₂/hehtaari päästövähennemään ja pienimmillään 550 tCO₂/hehtaari. Maakunnassa on aurinkovoimalle erityisen hyvin soveltuvaa aluetta yhteensä 43000 hehtaaria eli noin yhden prosentin verran ja aurinkovoimalle soveltumattomia alueita on noin 29 % koko maakunnan pinta-alasta. (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2024.)

VTT:n (2023) selvityksen mukaan Suomessa ei ole kansallista vedyn siirto- tai jakeluputkistoa, mutta tähän liittyviä vetyhankkeita on käynnissä, joista merkittävin on Gasgrid Finlandin ja ruotsalaisen Nordion Energian ajama ja rajat ylittävä Nordic Hydrogen Route-hanke (VTT 2023). Hankkeen tavoitteena on rakentaa Perämeren alueelle kattava vetyinfrastruktuuri ja avoin vetymarkkina vuoteen 2030 mennessä (Nordic Hydrogen Route). Hanke on osa European Hydrogen Backbone initiative -hanketta, mikä tavoittelee EU:n laajuista vetyverkoston rakentamista vuoteen 2050 mennessä (European Hydrogen Backbone initiative). Hankkeet avaavat vetyyn liittyviä sijoitusmahdollisuuksia niin Suomelle kuin Pohjois-Pohjanmaalle (VTT 2023).

Pohjois-Pohjanmaalla on potentiaalia tuottaa tarpeeksi vetyä koko Suomen vedyntuotantotavoitteiden saavuttamiseksi. Tuulivoimakapasiteetiltaan Pohjois-Pohjanmaa on lupaava alue vedyntuotannolle. Mikäli vedyntuotanto saadaan hajautettua tuulivoimapuistojen yhteyteen ja vedyn siirto järjestetään vetyputkiston kautta, niin voitaisiin vapauttaa sähkönsiirtoverkon kapasiteettia ja parantaa maankäyttöä, joilla on suora vaikutus ympäristöön. Energiansiirron ja maankäytön näkökulmasta katsoen laajamittainen vedynsiirtoverkko on tehokkaampi vaihtoehto kuin sähköverkon siirto, mikä voi myös vaikuttaa yhteiskunnalliseen hyväksyntään positiivisesti. (VTT 2023.)

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA

Huomion arvoista puhtaissa vertailututkimuksissa on se, että vaikka tuulivoima on GWP-kertoimeltaan aurinkovoimaa alhaisempi, ei vertailututkimuksissa ole tarkalleen kerrottu, mitä aurinkovoimatyyppejä on tutkittu, mikä elektrolyysi on ollut käytössä ja onko tuulivoimala/tuulivoimalat merellä vai sisämaassa. Vertailevissa tutkimuksissa tarkasteltiin oletettavasti perinteistä aurinkopaneelia, mutta lopputuotetyyppejä vihreälle vedylle ei ole mainittu. Alghool ym. (2024b) laajentavat käsittelyään eri aurinkovoimajärjestelmiin ja vedyn tuotepolkuihin, ja näin saadaan vertailukelpoisempia lukuja.

Tutkimukset osoittavat, että vihreässä vedyssä ja niin aurinko- kuin tuulivoimassa on valtavasti yhteistä potentiaalia ja vihreällä vedyllä tuotetun ammoniakkin kysyntä tulee mitä luultavimmin kiihtymään, kunnes täysin päästöttömän vedyn tuotanto muissakin olomuodoissa mahdollistuu laajemmassa mittakaavassa. Tällä hetkellä uusiutuvan vedyn valmistus on monta kertaa kalliimpaa kuin perinteisellä harmaalla menetelmällä valmistettu vety. Varastoinnista syntyy häviöitä ja se kuluttaa paljon resursseja, joten vedyn varastointiin sekä myös kuljetukseen tulisi kehittää tehokkaampia ja nykyistä edullisempia menetelmiä. Vihreä vety on puhtaudestaan huolimatta erittäin energiaintensiivistä ja sen lisäksi elektrolyysi kuluttaa paljon vettä, mikä täytyy huomioida erityisesti vähävetisillä alueilla. Teollisuus- ja jätevedtä voidaan puhdistaa elektrolyysiä varten alueilla, missä vettä ei ole riittävästi, mutta vedenkäsittelystä koituvat kustannukset ja ympäristövaikutukset on suunnittelussa huomioitava kokonaisuutta ajatellen.

10 YHTEENVETO

Alghoolin ym. (2024a, 2024b) tutkimuksista käy ilmi, että hyötysuhteeltaan 80 prosenttinen CPV-T-keräin yhdessä alkalielektrolyysin tuottaa lopputuoteammoniakilla päästöjä $0,7 \text{ kgCO}_2/\text{kgNH}_3$ ja kun ATR:n kanssa käytetään hiilidioksidin talteenottoa, niin lopputuoteammoniakin päästöt ovat alimmillaan $2,12 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Paineistetulla lopputuotevedyllä päästöt olivat heidän mukaansa $2,67 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Ghandehariun ja Kumar (2016) selvittivät jo lähes kymmenen vuotta sitten, että alkalielektrolyysillä ja maatuulivoimalla päästään alle $0,7 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Hermesmann ja Müller arvioivat vuonna 2022, että PEM-elektrolyysillä ja merituulivoimalla voitaisiin päästä $0,7 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$:n päästöihin. Kiinalaisten Zhangin ym. vuonna 2023 tekemä tutkimus tuulivoiman päästöistä on lupaavin, koska maatuulivoimalla yhdessä PEM-elektrolyysin kanssa saa päästöarvon $0,0936 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Alkalielektrolyysi ei jää tästä kauas $0,114 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ lukemallaan. Puhtaasti aurinko- ja tuulivoimaa vertailevista tutkimuksista selviää, että aurinkovoimalla tuotetun elektrolyysivedyn päästöt ovat keskimäärin tuulivoimaa korkeammat. Patelin ym. vuoden 2024 selvityksen mukaan tuulivoimalla päästöt ovat $0,6 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ja aurinkovoimalla $2,5 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Mikäli häviöt otetaan tarkemmin huomioon, niin Goitan ym. (2025) häviömäärävälillä 2–9,2 % tuulivoiman päästöt ovat selvästi alle aurinkovoiman päästöarvojen. Sadan vuoden ajalle tuulivoimapäästöjen oletetaan jäävän 2 %:n häviöillä noin $0,8 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Samalla häviömäärällä ja aikavälillä aurinkovoiman päästöt olisivat $3,18 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$. Kaikki edellä mainitut päästöluvut alittavat Euroopan unionin asettaman puhtaan vedyn ylärajan $3,38 \text{ kg CO}_2/\text{kgH}_2$.

VTT arvioi vuonna 2023, että Pohjois-Pohjanmaan vety potentiaali olisi $30,3 \text{ TWh/a}$ ja $0,9$ miljoonaa vetytonnia vuodessa, kun vuonna 2035 on käytettävissä puolet tuulivoiman arvioidusta maksimikapasiteetista. Vedynekseen oletetaan olevan noin 15 TWh/a ja $0,4$ miljoonaa vetytonnia vuodessa vuoteen 2035 mennessä. Jos ja kun SSAB Raahen terästehdas siirtyy vähäpäästöiseen raudan valmistukseen, niin maakunnan vedyntarve nousee $100\text{--}150$ kilotonniin vuodessa. Pohjois-Pohjanmaan liitto arvioi vuonna 2024, että 35 vuotta kestävä tuulivoimalla aiheuttaa päästöjä $5,5 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}$ ja toteutessaan reilun 1200 tuulivoimalan yhteispäästöt olisivat hieman yli 10000 kilotonnia hiilidioksidia 35 vuoden ajanjaksolle. Kolmekymmentä vuotta toimiva aurinkovoimalla aiheuttaisi liiton teettämän tutkimuksen mukaan päästöjä metsämaalle $718 \text{ tCO}_2/\text{hehtaari}$ ja muille alueille $552 \text{ tCO}_2/\text{hehtaari}$. Laskentatavan mukaan tuulivoimalarakentamisen myönteiset ympäristövaikutukset olisivat 98000 kilotonnia/ CO_2 tai 23000 kilotonnia/ CO_2 ja aurinkovoiman päästövähennys olisi $2160 \text{ tCO}_2/\text{hehtaari}$ tai $550 \text{ tCO}_2/\text{hehtaari}$.

LÄHTEET

- Alghool, D., Haouari, M. & Trucco, P. 2024a. It is not the same blue: A comparative LCA study of blue hydrogen supply network pathways. *International Journal of Hydrogen Energy*, 81(1), 214-224. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.165>. Viitattu: 9.3.2025.
- Alghool, D., Haouari, M. & Trucco, P. 2024b. It is not the same green: A comparative LCA study of green hydrogen supply network pathways. *International Journal of Hydrogen Energy*. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.346>. Viitattu: 9.3.2025.
- Cho, H., Evans, T. & Strezov, V. 2023. A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies. *Sustainable Materials and Technologies*, 35(1). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00567>. Viitattu: 16.3.2025.
- Convery, C., Delpisheh, M., Mamlouk, M., Niblett, D., Ramakrishnan, S. & Vinothkannan, M. 2024. Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195(1). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114320>. Viitattu: 28.2.2025.
- EcoOnline. Mikä on LCA eli elinkaariarviointi. Saatavissa: <https://www.ecoonline.com/fi/blogi/mika-on-lca/>. Viitattu: 28.2.2025.
- Erbach, G. & Svensson, S. 2023. EU rules for renewable hydrogen. Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin. Saatavissa: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI\(2023\)747085_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI(2023)747085_EN.pdf). Viitattu: 18.3.2025.
- Euroopan komissio. 2023. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act). Saatavissa: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en. Viitattu: 8.3.2025.
- European Hydrogen Backbone initiative. Saatavissa: <https://www.ehb.eu/>. Viitattu: 20.3.2025.
- Ghandehariun, S. & Kumar, A. 2016. Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22), 9696-9704. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.077>. Viitattu: 17.3.2025.
- Goita, E., Beagle, E., Nasta, A., Wissmiller, D., Ravikumar, A. & Webber, M. 2025. Effect of hydrogen leakage on the life cycle climate impacts of hydrogen supply chains. *Communications Earth & Environment*, 6(160). Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02141-3>. Viitattu: 17.3.2025.
- Hermesmann, M. & Müller, T. 2022. Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90(1). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2022.100996>. Viitattu: 17.3.2025.
- IEA. 2024. Global Hydrogen Review 2024. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Viitattu: 10.3.2025.

