

Saila Nieminen

# VETYTALouden KEHITTYMINEN POHJOISMAISISSA TEOLLISUUSYRI- TYKSISSÄ

Teknis-liiketoiminnallinen tarkastelu

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Henrik Tolvanen  
Joulukuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Saila Nieminen: Vetytalouden kehittyminen Pohjoismaisissa teollisuusyrityksissä  
Development of the hydrogen economy in Nordic industrial companies  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Joulukuu 2022

---

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan vetytalouden kehittymistä Pohjoismaisissa teollisuusyrityksissä. Työssä perehdytään erityisesti vihreän vedyn, eli hiilineutraaleilla menetelmillä tuotetun vedyn, käyttömahdollisuuksiin teräksen, ammoniakkin sekä metanolin tuotannossa. Kansalliset sekä Euroopan unionin päästövähennystavoitteet sekä vetystrategiat edistävät vetytalouden kehittymistä teollisuudessa. EU:n vetystrategiassa määritellään, että vetytaloutta tulisi ensisijaisesti kehittää teräs- sekä kemianteollisuudessa. Pohjoismaiden kansalliset strategiat myös korostavat vetytalouden mahdollisuuksia teollisuudessa. Poliittisten linjausten lisäksi Ukrainan sota kiihdyttää siirtymää fossiilisista polttoainesta päästöttömiin vaihtoehtoihin, mikä edelleen kasvattaa teollisuuden painetta löytää uusia hiilineutraaleja toimintatapoja.

Pohjoismaissa on kehitteillä useita projekteja, joissa pyritään tekemään ensimmäisiä kaupallisen tason sovelluksia erilaisista teollisista prosesseista, jotka hyödyntävät vihreää vetyä. Kukin Pohjoismaan ennustetaan tietyn teollisuuden alan sovelluksiin: Ruotsissa odotetaan olevan erityisesti vetyä hyödyntävää terästeollisuutta, Norjassa ammoniakkin tuotantoa sekä Tanskassa metanolin tuotantoa. Sen sijaan Suomella ei toistaiseksi ole selkeää suuntaa, miten vetytaloutta tullaan maassa kehittämään kansallisen vetystrategian puuttuessa.

Vihreää vetyä voidaan hyödyntää monipuolisesti erilaisissa teollisissa prosesseissa. Ammoniakin tuotanto vaatii vain vedyn tuotantomenetelmän vaihtamisen maakaasun reformoinnista päästöttömään, esimerkiksi elektrolyyttiseen vedyntuotantoon. Toisaalta vetyä hyödyntävä teräksen valmistus vaatii koko tuotantoprosessin uusimisen raudan suorareduktioon sekä valokaariuuniin. Lisäksi metanolin valmistuksessa hyödynnetään hiilidioksidia sekä vihreää vetyä, joiden synteesissä saadaan tuotettua metanolia. Hiilidioksidin lähteenä voi toimia esimerkiksi hiilivoimalaitoksen tai teräksen tuotannon savukaasut.

Vetytalouden kehittymiseen liittyy useita teknologisia, poliittisia sekä liiketoiminnallisia riskejä. Näihin liittyy mm. standardien, kaupallisten sovellusten, ja markkinoiden puute sekä teknologian epävarmuus. Tällä hetkellä vihreää vetyä hyödyntävästä teollisesta prosessista ei ole olemassa kaupallisia sovelluksia. Teolliset yritykset pystyvät madaltamaan vetyteknologioiden kehittämiseen liittyviä riskejä tekemällä monialaista yhteistyötä toisten yritysten kanssa sekä laajentamalla asiakaskäsitystään varhaisten markkinoiden luomiseksi. Kuitenkaan riskien totaalinen minimoiminen ei ole mahdollista, jolloin yritykset ottavat suuren riskin kehittäessään näitä prosesseja. Tällöin yritykset pyrkivät muovaamaan tulevaisuuden markkinoita sekä kantavat yhteiskunnallista vastuuta oman toimialan päästövähennyksistä.

Avainsanat: vetytalous, teollisuus, liiketoimintamallit, Pohjoismaat

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. VETYTALOUS JA SEN ENSIASKELEET .....	3
2.1 Vedyn ominaisuudet .....	3
2.2 Vedyn tuotannon väriskaala .....	4
2.3 Vetytalous Pohjoismaissa .....	5
2.4 Vetytalouden kehitykseen vaikuttavat tekijät teollisuudessa .....	7
2.4.1 Poliittiset ohjauskeinot .....	7
2.4.2 Vetytalouden projekteja .....	8
2.4.3 Markkinat uusille tuotteille .....	9
3. VIHREÄN VEDYN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA TEOLLISUUDESSA .....	11
3.1 Teräksen tuotanto .....	11
3.2 Metanolin tuotanto .....	12
3.3 Ammoniakin tuotanto .....	14
4. VETYTALouden KEHITTÄMISTÄ TEOLLISUUDESSA TUKEVAT LIIKETOIMINTAMALLIT .....	16
4.1 Liiketoiminnalliset haasteet .....	16
4.2 Ratkaisuja liiketoimintamallien haasteisiin .....	18
4.2.1 Monialainen yhteistyö eri toimijoiden kanssa .....	19
4.2.2 Asiakaskäsityksen laajentaminen .....	21
4.2.3 Riskienhallinnan näkökulman laajentaminen .....	22
5. VETYTALouden KEHITTÄMINEN TEOLLISUUDESSA TAPAHTUU VANHOJA TOIMINTATAPOJA RIKKOMALLA .....	26
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	29
LÄHTEET .....	31

# 1. JOHDANTO

Euroopan energiajärjestelmä on suuren murroksen edessä, kun ilmastonmuutos sekä Ukrainan sota kiihdyttävät siirtymää kohti fossiilivapaata energiantuotantoa ja yhteiskunnan sähköistymistä. Pariisin ilmastopimuksen 1,5 asteen tavoitteen saavuttamiseksi on tehtävä merkittäviä päästövähennyksiä kaikilla sektoreilla ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Lisäksi Ukrainan sodan myötä Euroopan Unionissa halutaan vähentää energia-riippuvaisuutta Venäjästä radikaalisti fossiilisten polttoaineiden osalta [1].

Merkittävä ongelma siirtymässä on teollisuuden kannalta se, että useita energiantensiivisiä teollisia prosesseja ei ole mahdollista sähköistää. Tällaiset prosessit ovat usein riippuvaisia fossiilisten polttoaineiden hyödyntämisestä. Teollisuus kattaa maailmanlaajuisesti 28,94 % energiankulutuksesta [2], joten ongelma on mittava päästövähennysten kannalta.

Yksi mahdollinen ratkaisu teollisuuden päästövähennyksiin on vihreän vedyn laaja käyttöönotto teollisuudessa. Vetytalous nousi konseptina esiin jo 1970-luvulla, mutta vedyn tuotannon, varastoinnin ja käytön teknologiat ovat kehittyneet vaihtelevalla tahdilla [3, ks. 4]. Viime vuosina kiinnostus vetyä kohtaan on kasvanut ja useat maat sekä organisaatiot näkevätkin vedyn keinona tehdä toiminnastaan hiilineutraalia [3]. Kuitenkin yritykset kohtaavat useita liiketoiminnallisia haasteita kehittäessään kestäviä vetytalouteen perustuvia teollisia ratkaisuja, mikä hidastaa kehitystä [5].

Vetytalouden piirissä toimivista teollisuusyrityksistä ja niiden liiketoimintamalleista on tehty erinäisiä tutkimuksia. Esimerkiksi Engwall et al. [6] tarkastelivat tutkimuksessaan haasteita, joita vetyteknologioihin perustuvat uudet projektit ja yritykset kohtaavat ja miten näitä haasteita on ratkaistu. Lisäksi Löfgren et al. [7] tutkivat, miten lainsäädännöllä voidaan tukea yrityksiä teknologia-, markkina- ja koordinaatiohaasteissa, joita yritykset kohtaavat vetytalouden osalta.

Tässä työssä tutkitaan vetytalouden piirissä toimivien teollisuusyritysten toimintaympäristöä Pohjoismaissa sekä liiketoimintamalleja, jotka tukevat alalla toimivien yritysten menestymistä. Aihe on rajattu käsittelemään vetytaloudessa teollisuutta ja teollisuudessa erityisesti teräs- ja kemian teollisuutta. Tämä rajaus on tehty, koska EU kannustaa teollisuutta kiihdyttämään siirtymää kohti vetytalouteen perustuvaa teollisuutta [9] ja koska

vetyyn perustuviin teollisiin prosesseihin on tehty merkittävästi investointeja viime vuosina. Työtä varten valitut teollisuuden alat (teräksen, metanolin ja ammoniakkin tuotanto) on valittu sillä perusteella, että ne ovat energiantensiivisiä ja vaikeasti sähköistettäviä aloja ja että EU on määritellyt niiden olevan ensisijaisia aloja, joilla vetyä tulisi hyödyntää [8].

Tässä työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin

1. Mitä poliittisia sekä taloudellisia ajureita tällä hetkellä on Pohjoismaissa olosuhteissa vetytalouden kasvulle?
2. Mitkä toimialat ja teknologiat ovat Pohjoismaissa olosuhteissa tärkeimpiä vetytalouden kannalta teollisuudessa?
3. Minkälaiset liiketoimintamallit tukevat parhaiten vetytalouden piirissä toimivia teollisuusyrityksiä?

Toisessa luvussa esitellään vetytaloutta sekä eritellään sen kehitystä ajavia tekijöitä. Kolmannessa luvussa käydään läpi vetyyn pohjautuvia teräksen, metanolin sekä ammoniakkin tuotantoprosesseja. Neljännessä luvussa käydään läpi liiketoiminnallisia haasteita, joita yritykset kohtaavat kehittäessään vetyyn pohjautuvaa teollisuutta, sekä miten näitä haasteita on ratkaistu. Viidennessä luvussa kootaan yhteen työssä käsitellyt ilmiöitä ja pohditaan, mitkä tekijät yhdessä mahdollistavat vetytalouden piirissä toimivien teollisten toimijoiden menestymisen.

## 2. VETYTALOUS JA SEN ENSIASKELEET

Vetytalous määriteltiin ensimmäisen kerran jo 1970-luvulla. Määritelmän mukaan vetytaloudessa vetyä tuotetaan elektrolyysin avulla ja se kuljetetaan teollisuuteen, koteihin sekä huoltoasemille ja muunnetaan takaisin sähköksi polttokennojen avulla. [10] Vuosien aikana määritelmä on laajentunut ja muovautunut teknologian kehityksen myötä. Alun perin vedystä oltiin kiinnostuneita sähköntuotannon ja liikenteen kannalta, mutta nykyään on myös huomattava määrä kiinnostusta monialaisempaan vedyn hyödyntämiseen, esimerkiksi teollisuuden käytössä. [3]

### 2.1 Vedyn ominaisuudet

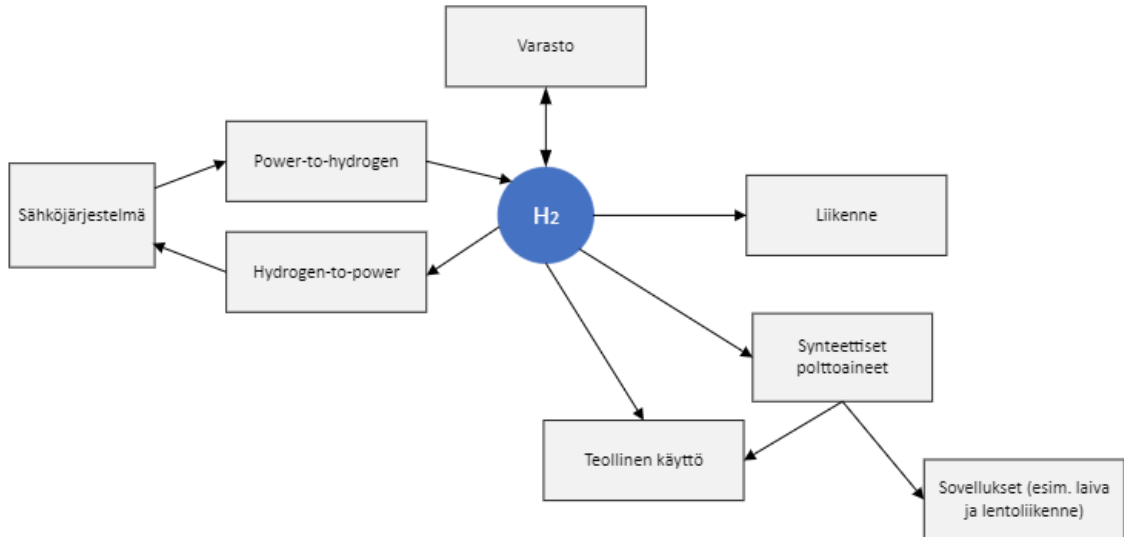
Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine ja kattaa 90 % kaikesta aineesta. Se on yksinkertaisin sekä kevyin alkuaine (moolimassa 1,008 g/mol). Huoneenlämmössä vety esiintyy värittömänä sekä hajuttomana kaasuna ja se on myrkytön sekä ympäristölle vaaraton kaasu. Vety on energiankantaja, mikä tarkoittaa, että se sisältää energiaa, joka voidaan muuntaa mekaaniseksi tai lämpöenergiaksi. Teollisuuden kannalta tärkeä vedyn ominaisuus on sen herkkä syttyvyys; vedyn syttymisenergia ilmassa on noin 0,02 mJ, mikä on erittäin pieni verrattuna bensiinin syttymisenergiaan, 0,24 mJ [11]. Lisäksi vedyn energiatiheys on korkea: 142 MJ/kg noin 3 kertaa korkeampi kuin bensiinin, minkä takia se on erinomainen polttoaine [12].

Vedyllä on useita mahdollisia käyttökohteita, joita on esitelty Kuvassa 1. Kuitenkin käytännötoteutukset ovat toistaiseksi vielä harvassa. Vetyä on mahdollista hyödyntää mm. tasaamaan vaihtelevaa energiantuotantoa, asuntojen lämmityksessä, polttoaineena raskaassa sekä kevyessä liikenteessä, energiavarastona, sekä raaka-aineena teollisuudessa. [3]

Vedyn käyttöönotossa nähdään useita etuja. Ilmastokriisin keskellä suuri etu on, että vihreän vedyn tuotanto tai käyttö ei aiheuta hiilidioksidipäästöjä. Vedyn korkea energiatiheys sekä matala syttymisenergia tekevät siitä erinomaisen polttoaineen. Lisäksi edellä mainitut vedyn monipuoliset käyttökohteet ovat merkittävä etu, sillä useat eri alat tarvitsevat ratkaisuja hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi.

Kuitenkin vedyn käyttöön liittyy myös merkittäviä haasteita. Vaikka vedyn energiatiheys suhteessa massaansa on korkea verrattuna muihin polttoaineisiin, kaasumainen vety vaatii NTP olosuhteissa varastointiin 19 kertaa suuremman tilavuuden kuin nestemäinen ben-

siini [11]. Lisäksi vedyn turvallisuuteen liittyy edelleen haasteita. Vaikka matala sytytysenergia on hyödyllinen polttoprosesseissa, se aiheuttaa riskejä varastoinnissa, sekä kuljetuksessa. Lisäksi palaessaan vedyn liekki on näkymätön, mikä voi vaikeuttaa vedyn turvallista käsittelyä ja voi aiheuttaa tapaturmia tai vaurioita laitteistoihin. [13]



**Kuva 1:** Mahdollisia vedyn käyttökohteita Pohjoismaissa. Muokattu lähteestä [14]

Vedyn turvallisuuteen, varastointiin ja kuljetukseen liittyy edelleen merkittäviä haasteita, jotka hidastavat vetytalouden kehittymistä. Haasteista huolimatta vety on lupaava tulevaisuuden polttoaine, raaka-aine sekä energian varastointimenetelmä, joka pystyy tukemaan yhteiskunnan eri sektoreita vähentämään päästöjään.

## 2.2 Vedyn tuotannon väriskaala

Vety voidaan luokitella vihreään, siniseen, pinkkiin, keltaiseen ja harmaaseen vetyyn sen tuotantotavan perusteella. Väriluokituksille ei ole olemassa kansainvälisiä standardeja ja määritelmät vaihtelevat myös kirjallisuudessa. Lisäksi luokituksiin voi mahdollisesti tulla muutoksia tulevaisuudessa vetytalouden kehittyessä. Tässä työssä käytetään seuraavia määritelmiä:

Vihreä vety on tuotettu vedestä hyödyntäen biomassaa tai uusiutuvaa sähköenergiaa, joka muunnetaan, esimerkiksi elektrolyysin avulla, vedyksi. Sininen vety on tuotettu fossiilisten polttoaineiden, kuten maakaasun, avulla, mutta tuotantoprosessiin on yhdistetty hiilidioksidintalteenottojärjestelmä. Harmaa vety sen sijaan on tuotettu fossiilisten polttoaineiden avulla ilman hiilidioksidintalteenottojärjestelmää. [15] Pinkki vety on tuotettu elektrolyysin avulla, mutta prosessin käyttämä sähkö on ydinvoimasta. Keltainen vety on

tuotettu myös elektrolyysillä, mutta se käyttää verkossa olevaa sähköä, jolloin tuotantotapa voi olla vaihteleva. [16]

Näiden värimääritelmien lisäksi vedystä voidaan käyttää termejä puhdas vety, uusiutuva vety ja matalahiilinen vety. Esimerkiksi EU käyttää vetystrategiassaan termiä uusiutuva vety, joka kuvaa vetyä, joka on tuotettu vedestä ja muunnettu elektrolyysin ja uusiutuvan sähköenergian avulla vedyksi. Lisäksi biomassasta tuotettu vety sisältyy määritelmään, mikäli biomassasta kattaa EU:n kestävyysvaatimukset. [8]

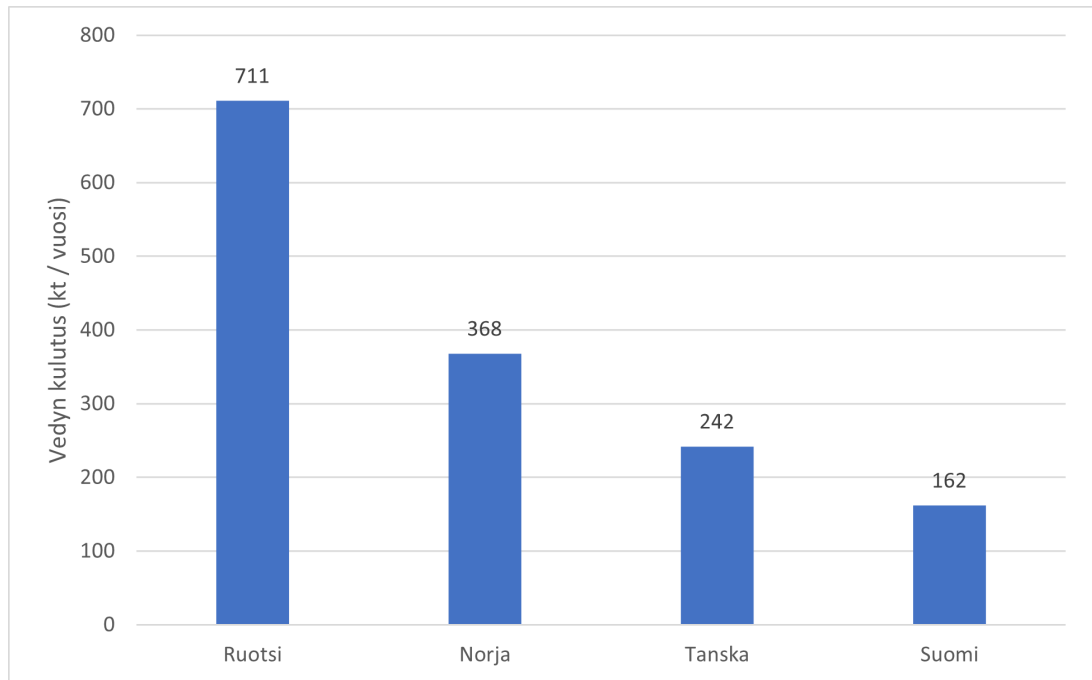
### **2.3 Vetytalous Pohjoismaissa**

Pohjoismaissa vetytalous on alkanut kehittymään viime vuosina. Ruotsi, Norja ja Tanska ovat julkaisseet omat vetystrategiansa [17]. EU:hun kuuluvat Ruotsi, Tanska ja Suomi ovat sitoutuneet EU:n omaan vetystrategiaan. Pohjoismaissa on myös kehitteillä useita vetytalouteen perustuvia projekteja, joiden kautta pyritään kehittämään ensimmäisiä vetytalouden kaupallisia sovelluksia [18].

Suomessa vetytalous ottaa vasta ensimmäisiä askeliaan. Business Finland on julkaissut Suomen vetytiekartan sekä vetytalouden tavoitteet on määritelty Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa. Suomen vetyprojektit ovat keskittyneet H2 Cluster Finland:in eli Suomen vetyklusterin piiriin. Klusteri mahdollistaa useiden toimijoiden yhteistyön sekä tiedon jakamisen vedyn tuotantoon, kuljetukseen, varastointiin ja loppukäyttöön liittyen. Yhteensä klusterin piirissä on 18 projektia sekä 64 toimijaa. Toteutuessaan projektit muodostaisivat yhteensä 1,1 GW elektrolyysikapasiteetin Suomen alueelle. [19] Kuitenkin tämä on suhteellisen pieni luku verrattuna muihin pohjoismaisiin projekteihin. Esimerkiksi Tanskassa yksistään Green Fuels for Denmark -projektin kapasiteetti tulee suunnitelman mukaan olemaan 1,3 GW [18].

Vetytalouden odotetaan kehittyvän Pohjoismaiden teollisuudessa hyvin eri tahtiin. Kuten kuvasta 2 nähdään, Ruotsin teollisuuden odotetaan olevan selkeästi suurin vedyn kuluttaja koko Pohjoismaissa. Suomen teollisuuden sen sijaan oletetaan olevan pienin vedyn kuluttaja.





**Kuva 2:** Arvioitu vedyn kulutus teollisuudessa vuonna 2030. Perustuu lähteeseen [20]

Ruotsi on ottanut vahvan aseman vetytalouden kehityksessä erityisesti hiilineutraalin teräksen valmistuksessa. Esimerkiksi ruotsalaisessa HYBRIT-projektissa SSAB, Vattenfall sekä LKAB pyrkivät tekemään teräksen valmistuksesta hiilineutraalia Ruotsissa sekä Suomessa. Vuonna 2021, projektissa onnistuttiin tuottamaan ensimmäinen erä hiilineutraalia terästä. Toimijoilla on tavoitteena tarjota fossiilivapaata terästä markkinoille vuoteen 2026 mennessä. [21]

Norjassa sen sijaan kehitetään ammoniakkin valmistusta vihreästä vedystä selkeästi eniten kaikista Pohjoismaista [20]. Odotettu vedyn kulutus vuonna 2030 on 297 kt vuodessa. Tämä kattaa 28 % koko Euroopan vedyn kysynnästä ammoniakkin tuotannossa. [20] Suuri lannoitteiden valmistaja Yara on aloittanut projektin tuottaa ammoniakkia vihreän vedyn avulla. Projektin tavoitteena on tuottaa 500 000 tonnia ammoniakkia vuodessa meriliikenteen polttoaineita sekä ruokateollisuutta varten. Projektin on määrä valmistua vuoteen 2026 mennessä. [22] Vastaavan kokoluokan projekteja Suomessa ei ole edes kehitteillä. [18]

Tanskassa vedyn kulutuksen odotetaan olevan metanolin tuotannossa korkeinta Pohjoismaissa; 81 kt vetyä vuodessa vuonna 2030. [20] Esimerkiksi Aalborg Forsyning, Reno-Nord ja Copenhagen Infrastructure Partners ovat yhdessä aloittaneet vihreää vetyä hydyntävän metanolin tuotantolaitoksen rakentamisen. Prosessiin saatava hiilidioksidi tulee Reno-Nordin jätteenpolttoprosessien savukaasuista. Projektin on tarkoitus valmistua vuoteen 2028 mennessä ja olisi ensimmäisiä kaupallisen tason metanolin valmistusprosesseja. [23]

Pohjoismaissa otetaan selkeitä askeleita kohti vetytaloutta useilla eri teollisuuden aloilla. Erityisesti Ruotsissa odotetaan vetytalouden yleistyvän nopeasti teollisuusyritysten piirissä. Lisäksi eri Pohjoismaat ovat selkeästi erikoistuneet eri teollisuuden alojen kehittämiseen: Ruotsi teräkseen, Norja ammoniakkiin sekä Tanska metanoliin. [20] Suomi sen sijaan on jäänyt kehityksessä jälkeen sekä oman osaamisen kehittäminen on jäänyt vajaan [19].

## 2.4 Vetytalouden kehitykseen vaikuttavat tekijät teollisuudessa

Vetytalouden kehittyminen on edelleen todella varhaisessa vaiheessa. Vihreän vedyn tuotanto vuonna 2020 oli 30 kilotonnia, ja vastasi 0,03 % kaikesta vedyn tuotannosta [24]. Vetytalouden kehitykseen pyritään vaikuttamaan poliittisilla ohjauskeinoilla, jotka kohdistetaan teknologian kehitykseen sekä vetymarkkinoiden luomiseen. [8]

### 2.4.1 Poliittiset ohjauskeinot

Suomessa vetypolitiikka on aluillaan. Suomella ei ole toistaiseksi omaa vetystrategiaa, mutta Valtioneuvoston uudessa energia- ja ilmastostrategiassa määritellään, että vuoteen 2025 mennessä Suomessa tulee olla 200 MW kapasiteettia vedyn tuotannolle sekä 150 miljoonaa euroa on ohjattu vetytalouden kehitykseen. Vuoteen 2030 mennessä kapasiteetin tulisi olla 1000 MW [25]. Nykyiset kehitteillä olevat projektit tulevat toteutessaan täyttämään tavoitteet [19]. Tavoitteet ovat siis matalat verrattuna muihin Pohjoismaihin. Esimerkiksi Ruotsin tavoite on 5 000 MW vuoteen 2030 mennessä ja 15 000 MW vuoteen 2045 mennessä [26].

EU on ottanut selkeän linjan edistää vetytalouden nopeaa kehittymistä koko unionissa. Keskeisimmät ilmastopaketit, kuten FIT for 55 valmiuspaketti ja European Green Deal eli vihreän kehityksen ohjelma sekä energiaomavaraisuuden ohjelma REPower EU, määrittelevät kehityksen vetytalouden kehittymiselle jäsenmaissa. Lisäksi EU:n vetystrategia määrittelee tarkemmat askeleet tavoitteiden saavuttamiseksi.

Vihreän kehityksen ohjelma (eng. *European Green Deal*) on strategia, jonka tavoitteena on luoda Euroopasta hiilineutraali, resurssitehokas sekä kukoistava yhteiskunta [9]. Fit for 55 valmiuspaketti (eng. *Fit for 55 package*) sen sijaan määrittelee toimet, jolla 55% päästövähennykset voidaan saavuttaa vuoteen 2030 mennessä [27]. Ohjelmissa pyydetään teollisia toimijoita kehittämään ensimmäisiä kaupallisia sovelluksia hiilineutraaleista ja resurssiviisaista prosesseista, erityisesti hyödyntäen vetyä tai polttokennoja. EU tulee investoimaan vetytutkimukseen, sekä ohjaamaan yksityisiä investointeja hiilineutraaleihin prosesseihin. [9, 27]

REPower EU suunnitelmassa pyydetään teollisia toimijoita kehittämään vetystandardeja tuotantoon, infrastruktuuriin sekä loppukäyttöön. Suunnitelma asettaa tavoitteeksi tuottaa 10 miljoonaa tonnia vihreää vetyä EU:ssa sekä tuoda 10 miljoonaa tonnia EU:n ulkopuolelta vuoteen 2030 mennessä. [1] Tämän suunnitelman perusteella tulevaisuudessa EU:ssa tulee olemaan käytettävissä merkittävä määrä vetyä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi teollisissa prosesseissa.

EU:n vetystrategia käsittelee vetytalouden kehittymistä yleisesti koko unionin alueella. Sen mukaan elektrolyysikapasiteetti jäsenmaiden keskuudessa tulisi olla yhteensä 6 GW vuoteen 2024 mennessä ja 40 GW vuoteen 2030 mennessä. Teollisuuden ensisijainen tavoite olisi korvata hiili-intensiivinen vety uusiutuvalla vedyllä, minkä jälkeen vedyn hyödyntämistä pitäisi laajentaa erityisesti ammoniakin, metanolin sekä teräksen tuotannossa. Lisäksi vetyklustereiden odotetaan kehittyvän, missä vedyn tuotanto ja käytön sovellukset ovat lähekkäin. [8]

EU:ssa on näiden ohjelmien perusteella selkeä tavoite kehittää vetytaloutta koko unionin alueella sekä hyödyntää sitä hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi. Ohjelmissa vedotaan erityisesti teollisiin toimijoihin, että ne aktivoituisivat vetytalouden suhteen, pyrittäin varmistamaan, että vihreää vetyä olisi tarpeeksi EU:n alueella, sekä ohjaamaan investointeja uusien teknologien kehittämiseen.

## 2.4.2 Vetytalouden projekteja

Teollisten vetyteknologioiden kehittämisen kannalta koko toimitusketjun vahvistuminen on välttämätöntä aina sähköntuotannosta loppukäyttöön asti. Useat teollisuuden alat eivät pysty saavuttamaan hiilineutraaliustavoitteita vain yhden teknologisen innovaation avulla, vaan tarvitaan useita, myös teollisuutta ympäröiviin tukijärjestelmiin. [7]

Vaikka kirjallisuudessa keskustellaan laajasti vetytalouden mahdollisuuksista teollisuudessa [3, 13] ja teknologiat ovat yleisesti tunnettuja, käytännön kokemus vetyyn perustuvista teollisista prosesseista on hyvin rajallista [7]. Näin ollen projektit, joissa kehitetään visioituille teknologioille käytännön toteutuksia, ovat avainasemassa teknologian ja kustannustehokkuuden kehittämisen sekä käyttöönoton kannalta.

Esimerkiksi tällä hetkellä on käynnissä useita projekteja, joissa tavoitteena on toteuttaa teollisen tason sovellus vetyyn perustuvasta teräksen tuotannosta. Tällaisia projekteja on listattu Taulukkoon 1. Laajasti huomiota saanut luvussa 2.2 esitelty HYBRIT-projekti on tällä hetkellä Pohjoismaissa yksi merkittävimmistä vihreän teräksen kehitysprojek-

teista. Onnistuessaan projektilla on potentiaalia suunnata Pohjoismaiden teräksen tuotantoa kohti hiilineutraaliutta. [21] Myös H2 Green Steel pyrkii rakentamaan vihreän teräksen tuotantoa, missä hyödynnetään myös raudan suorapelkistystä sekä vihreää vetyä.

Lisäksi useat projektit keskittyvät myös vetyyn pohjautuvaan metanolin tuotantoon. Metanolin tuotantoprosessia käsitellään tarkemmin luvussa 3.3. Ruotsissa FReSMe-pilotti-projektissa onnistuttiin rakentamaan metanolin tuotantolaitos terästehtaan yhteyteen vuonna 2021. Prosessissa metanolin valmistukseen käytetään vihreää vetyä sekä teräksen tuotantoprosesseista syntyneitä hiilidioksidipäästöjä. [28]

**Taulukko 1:** Käynnissä olevia teollisia vihreään vetyyn pohjautuvia projekteja Pohjoismaissa

Projekti	Yritys/Yritykset	Kuvaus	Sijainti	Lähde
HYBRIT	SSAB, LKAB ja Vattenfall	Teräksen tuotanto	Ruotsi	[29]
H2 Green Steel	H2 Green Steel	Teräksen tuotanto	Ruotsi	[30]
FlagshipONE	Liquid Wind	Metanolin tuotanto	Ruotsi	[31]
Kokkolan vetytehdas	Flexens, Both2nia	Ammoniakin tuotanto	Suomi	[32]
Yara	Yara ja Engie	Ammoniakin tuotanto	Norja	[22]
Finnmark green NH3	Horisont Energi ja ST1 Oy	Ammoniakin tuotanto	Norja	[18]
HØST PtX Esbjerg	HØST PtX Esbjerg	Ammoniakin tuotanto	Tanska	[33]
Power-to-X in Aalborg	Aalborg Forsyning, Reno-Nord ja Copenhagen Infrastructure Partners	Metanolin tuotanto	Tanska	[23]

Projekteja on kehitteillä ympäri Pohjoismaita, mutta suurin osa projekteista on Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Projektit ovat pääosin keskittyneet vihreän vedyn tuotantoon, mutta kuten taulukosta 1 näkyy, ensimmäisiä projekteja vedyn hyödyntämisestä teollisuudessa on kehitteillä. [18]

### 2.4.3 Markkinat uusille tuotteille

Teknologisten ja poliittisten tekijöiden lisäksi uusille tuotteille tulee olla markkinat, jotta niiden valmistusmenetelmien kehittäminen on taloudellisesti kannattavaa. Markkinat

kestäville tuotteille, erityisesti teollisuudessa, eivät ole vielä muodostuneet. On tunnistettu, että tulevaisuudessa kestäville tuotteille tulee olemaan kysyntää, mutta korkeat tuotantokustannukset eivät tällä hetkellä mahdollista kysynnän kehittymistä. Toisaalta tämä aiheuttaa sen, että tarjontakin on rajoittunutta. [34] Suurten kysyntään ja teknologiaan liittyvien riskien takia vetytalouden teollisten sovellusten kehittämiseen ei välttämättä investoida nopeasti [7]. Tästä huolimatta Pohjoismaissa on kehitteillä useita vihreään vetyyn perustuvia teollisia sovelluksia, kuten Taulukosta 1 nähdään. Innovaatiot tuotekehityksessä voisivat tehdä uusista prosesseista kustannustehokkaampia sekä kilpailukykyisempiä verrattuna perinteisiin teollisiin toimijoihin [34].

Kuitenkin markkinat vähähiilisillä menetelmillä tuotetulle teräkselle, eli vihreälle teräkselle näyttävät toista suuntaa. Vaikka vihreän teräksen kustannukset ovat tällä hetkellä 20–30 % korkeammat kuin perinteisillä menetelmillä tuotetulla teräksellä, eräät teollisuuden alat, kuten auto- ja rakennusteollisuus, ovat silti valmiita maksamaan korkeamman hinnan. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että teräksen korkeampi hinta ei vaikuta merkittävästi heiden tuotteiden loppuhintaan [27, 28]

Ilman poliittisilla ohjauskeinoilla luotua kysyntää, vedyn avulla tuotettujen tuotteiden kysyntä on jäävä yksittäisten toimialojen piiriin, jotka ovat valmiita maksamaan korkeamman hinnan ympäristöystävällisistä tuotteista [35]. EU tunnistaa vetystrategiassa kysynnän puutteen, joka heikentää myös tarjonnan kehittymistä. Keinoiksi luoda kysyntää sekä vahvistaa markkinoita on nostettu päästökaupan laajentaminen, markkinapohjaiset tukimekanismit, joilla palkitaan elektrolysaattoreita niiden tuottamista palveluista energiasysteemiin sekä CFD-sopimukset (eng. *carbon contract for difference*), joilla voidaan taata investoijille päästöoikeuksia korkeammat tuotot päästövähennyksistä. [8]. Lisäksi EU:n päästöoikeusjärjestelmän hiilidioksidipäästöt tulevat todennäköisesti nousemaan, jolloin perinteisen teollisuuden tuotteiden hinnat tulevat myös nousemaan ja hiilineutraaleista sekä vähähiilisistä tuotteista tulee kilpailukykyisempiä. [36]

Varhaisten markkinoiden olemassaolo on erittäin tärkeää kestävien tuotteiden kehittymisen sekä laajan käyttöönoton kannalta. Varhainen kysyntä mahdollistaa uuden teknologian käytännön testauksen ja kehittämisen sekä madaltaa investointien riskiä. Lisäksi EU:n tekemät toimet markkinoiden luomiseksi vakauttavat alaa ja madaltavat investointeihin liittyviä riskejä.

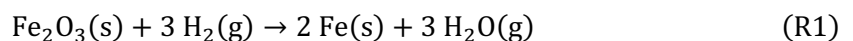
### 3. VIHREÄN VEDYN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA TEOLLISUUDESSA

Vaikeasti sähköistettävät prosessit ovat teollisuudessa yleisiä, minkä takia uusia ratkaisuja on löydettävä. Yksi lupaava vaihtoehto on vihreän vedyn hyödyntäminen eri teollisuuden aloilla, minkä myös EU on tunnistanut teollisuuden päästövähennysstrategioissaan [27]. Harmaata vetyä hyödynnetään jo kemian teollisuudessa, erityisesti ammoniakin sekä metanolin valmistuksessa, mutta Euroopan unioni kannustaa teollisia toimijoita siirtymään vihreään vetyyn sekä kannustaa vedyn käyttöönottoa myös teräs- sekä sementtiteollisuudessa [8].

#### 3.1 Teräksen tuotanto

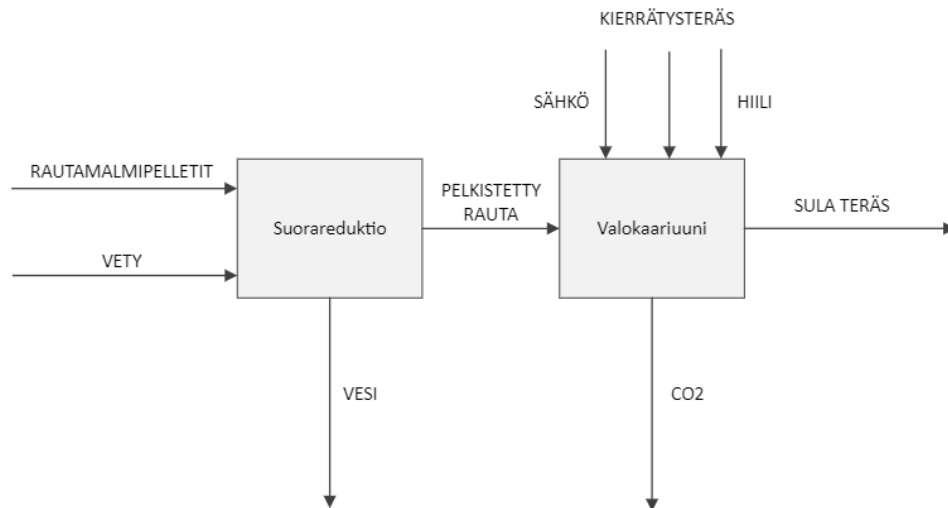
Teräksen valmistus on energiantensiivinen sekä vaikeasti sähköistettävä prosessi. Suurin osa prosessin päästöistä tulee masuunista, missä rautaoksidi sulatetaan sekä hapeutetaan hiilen avulla. [37] Useita eri prosesseja, jotka käyttävät vetyä pelkistimenä, on visioitu korvaamaan perinteisen tuotantoprosessin, mutta näistä kolme on tunnistettu olevan mahdollisia laajaan kaupalliseen käyttöön: vedyn suora ruiskutus olemassa oleviin masuuneihin, suorapelkistys (DR) sekä vety-plasma reduktio (HPR) [38]. Tässä luvussa käsitellään raudan suorapelkistysmenetelmää (DRI) vedyn avulla, joka on menetelmä mitä ruotsalaiset projektit H2 Green Steel sekä HYBRIT hyödyntävät [37, 39]. Lisäksi DRI prosessin on teknologinen valmius on korkein [38]. Prosessi on kokonaisuudessaan esitelty kuvassa 3.

Suorapelkistyksessä rautamalmi pelkistetään raudaksi ilman, että se muunnetaan kiinteästä olomuodosta nestemäiseen. Pelkistimenä prosessissa toimii vety. Ensimmäisessä vaiheessa rautamalmi menee suorapelkistykseen, missä 500–600 °C lämpötilassa raudan happi reagoi vedyn kanssa, jolloin muodostuu rautaa sekä vesihöyryä reaktion 1 mukaisesti. Lämpötila on matalampi kuin masuunissa tehdyssä pelkistyksessä, koska rauta pysyy kiinteässä olomuodossa. [32, 33]



Tämän jälkeen suurin osa pelkistetyistä raudasta on kiinteässä muodossa rautasiemenä (engl. *iron sponge*) tai rautajauheena. Pelkistetty rauta johdetaan valokaariuuniin (EAF). Tämän lisäksi valokaariuuniin voidaan lisätä teräsjätettä. Valokaariuunissa rauta sulatetaan sähkön avulla nestemäiseksi seokseksi 4000–6000 °C lämpötilassa. Rauta sulaa, kun uunin katossa olevien elektrodisauvojen ja rautaseoksen välille muodostuu

valokaaria, joissa sähköenergia muuntuu lämpöenergiaksi. EAF:ssä tapahtuu myös melotus. Seoksen pinnalle lisätään hiiltä, joka reagoi prosessiin tuodun hapen kanssa, jolloin muodostuu hiilimonoksidikaasua. Lisäksi melloituksessa tapahtuu myös fosforin kuo-  
naantuminen, mutta muita epäpuhtauksia, kuten kuparia tai sinkkiä, ei saada poistettua. Lisätty hiili madaltaa tarvittavaa lämpötilaa sekä myös lisää prosessista saadun teräksen hiilipitoisuutta. [37, 39]



**Kuva 3:** Vihreään vetyyn perustuva teräksen valmistusprosessi. Muokattu lähteestä [38]

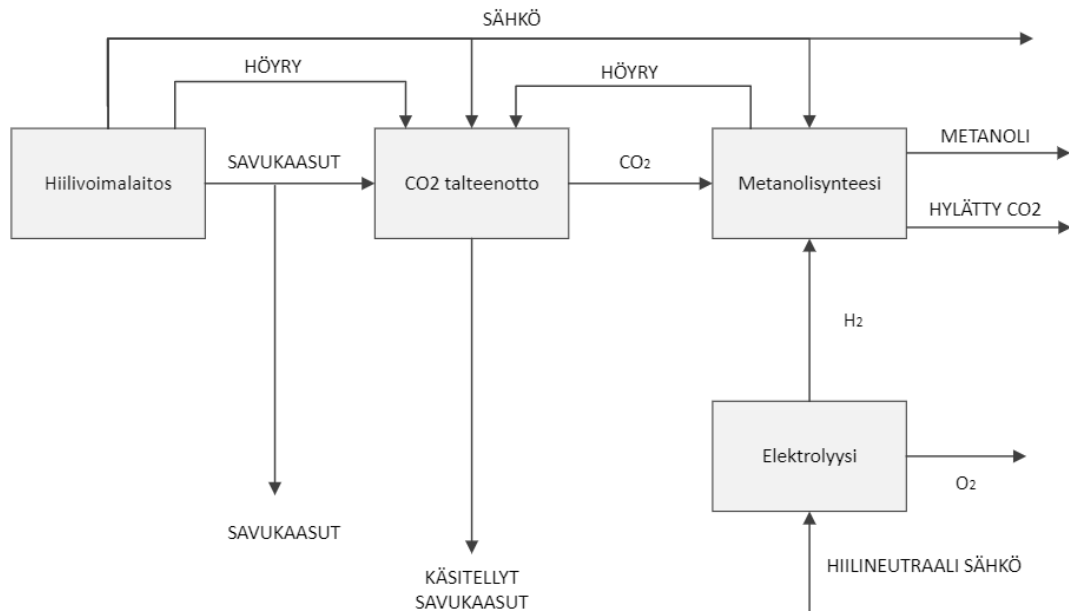
EAF on jo yleisesti käytössä teollisuudessa ja sitä käytetään teräsjätteen käsittelyssä. Sen teknologinen valmius on siis korkea sekä sillä on jo useita käytännön sovelluksia. Valokaariuunien yleinen panoskoko on 10–150 tonnia ja niiden uunajat ovat lyhyitä, parhaimmillaan 30 minuuttia. [41]

Suurin haaste suorapelkistysmenetelmän kehityksessä on olemassa olevien tekniikoiden, kuten masuunin tehokkuus. Masuuni on ollut pitkään käytössä, vakaa sekä energiatehokas. Sen korvaaminen yhtä tehokkaalla sekä toimivalla menetelmällä tulee olemaan haasteellista. [37]

### 3.2 Metanolin tuotanto

Metanolin ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) tuotannossa voidaan hyödyntää vetyä useilla eri tavoilla. Perinteisessä metanolin tuotantoprosessissa hyödynnetään synteetikaasua, joka koostuu pääasiassa hiilimonoksidista, vedystä sekä hiilidioksidista, jotka johdetaan metanolisynteesiin, missä ne reagoivat keskenään muodostaen metanolia. [42]

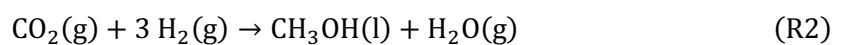
Yksi hiilineutraaleista menetelmistä on tuottaa metanolia hiilidioksidin ja vedyn avulla, mikä on esitelty Kuvassa 4. Prosessissa hiilidioksidi voi olla peräisin esimerkiksi voimalaitoksen savukaasuista tai teräs- tai sementtiteollisuuden savukaasuista. Lisäksi prosessissa käytetty vety tulee olla vihreää. [42]



**Kuva 4** Vihreään vetyyn perustuva metanolin tuotantoprosessi, joka on kytketty hiilivoimalaitokseen sekä hiilidioksidin talteenottoyksikköön. Muokattu lähteestä [42]

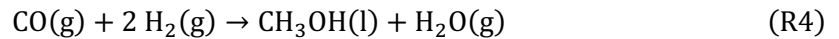
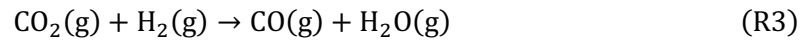
Prosessissa voimalaitoksesta saadaan sähköä, höyryä sekä savukaasuja metanolin valmistukseen. Savukaasut käsitellään sekä paineistetaan ennen hiilidioksidin talteenottoa. Hiilidioksidin talteenotossa savukaasut kulkevat absorptiopylvään (engl. *abrobtion columnun*) pohjalta yläpäättyyn. Hiilidioksidi absorboituu pylväässä olevaan liuottimeen. Tämän jälkeen liotettu hiilidioksidi regeneroidaan jälleen hiilidioksidikaasuksi. Hiilidioksidin talteenotossa voidaan käyttää voimalaitoksen sekä metanolisynteesin höyryä, josta saadaan osa prosessin tarvitsemasta lämpöenergiasta. Hiilidioksidi siirtyy tämän jälkeen metanolisynteesiin. [42]

Metanolisynteesi voidaan suorittaa yhdessä tai kahdessa vaiheessa. Reaktio vaatii toteutuakseen katalyytin, mikä on yleensä sinkki- tai kuparioksidi. Yhdessä vaiheessa hiilidioksidi reagoi vedyn kanssa katalyyttisessä hydrausreaktiossa, jonka reaktioyhtälö esitellään reaktiossa 2. [42]



Kahdessa vaiheessa hiilidioksidista ja vedystä tehdään ensin hiilimonoksidia ( $\text{CO}$ ), jonka jälkeen se hydrataan metanoliksi. Reaktio on esitelty reaktioissa 3 ja 4.





Hyödyntämällä edellä kuvattua menetelmää, metanolin tuotannosta on mahdollista vähentää 1,6 tonnia hiilidioksidipäästöjä jokaista tuotettua metanolitonnin kohti. [42] Esimerkiksi Tanskassa Aalborg Forsyningin, Reno-Nordin ja Copenhagen Infrastructure Partnersin projektissa rakennetaan metanolin tuotantolaitosta jätteenpolttolaitoksen yhteyteen. Prosessiin vety tuotetaan elektrolyysillä ja hiilidioksidi saadaan jätteenpolttolaitoksen savukaasuista. [23] Lisäksi vuonna 2021 Ruotsissa onnistuttiin rakentamaan metanolin tuotantolaitos, joka hyödyntää teräksen valmistuksesta syntyviä savukaasuja. Projekti oli pilottiluontoinen, joten se oli käynnissä vain rajatun ajan. [28]

### 3.3 Ammoniakin tuotanto

Ammoniakin ( $\text{NH}_3$ ) tuotanto on jo nykyään suurin vedyn hyödyntäjä maailmanlaajuisesti kuluttaen noin 75% (33,75 Mt) kaikesta kemianteollisuuden käyttämästä vedystä [24]. Lisäksi ammoniakki on myös hyvin lupaava yhdiste vetytalouden kannalta, koska se voisi toimia vedyn kantajana. Ammoniakkia on helpompi varastoida sekä kuljettaa kuin puhdasta vetyä, mikä tekee siitä houkuttelevan.

Nykyään ammoniakin tuotantoprosessiin tarvittavassa vedyn tuotannossa kuitenkin hyödynnetään maakaasun reformointia ilman hiilidioksidintalteenottojärjestelmää eli prosessissa hyödynnetään harmaata vetyä. Ammoniakin tuotantoprosessi tuottaakin merkittävästi hiilidioksidipäästöjä: 20 tCO<sub>2</sub> jokaista tuotettua ammoniakkitonnin kohden [43]. Koska suurin osa prosessin päästöistä syntyy kaasun reformoinnissa vedyksi, prosessin hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää hyödyntämällä prosessissa harmaan vedyn sijaan vihreää vetyä. Tämänlaisen prosessin prosessikaavio on esitelty kuvassa 5.

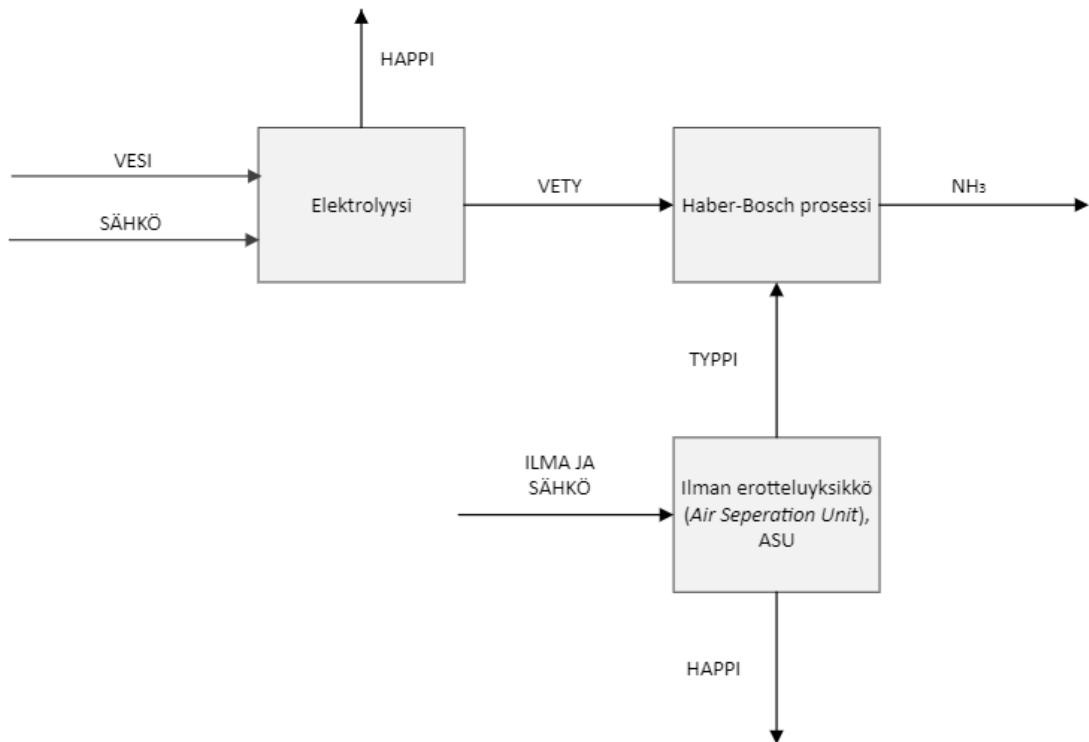
Ammoniakin valmistamiseen tarvitaan kahta eri yhdistettä, vetyä sekä typpeä. Vety prosessiin voidaan saada erilaisista vihreän vedyn tuotantomenetelmistä, kuten elektrolyysistä. Typpi prosessia varten saadaan yleensä ilmanerotusyksiköllä erottelemalla typpi sekä happi ilmakehän ilmasta. [44]

Ammoniakin valmistusprosessi perustuu Haber-Bosch menetelmään, jossa typpi ja vety reagoivat keskenään reaktion 5 mukaisesti ammoniakiksi.



Reaktio on heikosti eksoterminen, eli se vapauttaa lämpöä. Reaktiossa systeemin entropia pienenee, minkä takia reaktio vaatii katalyytin sekä korkean lämpötilan ja paineen

toteutuakseen. Katalyyttina prosessissa käytetään yleensä rautapohjaisia katalyyttejä [45].



**Kuva 5:** Ammoniakin tuotantoprosessi vihreän vedyn avulla. Muokattu lähteestä [44]

Vihreän vedyn avulla tuotetun ammoniakin hinta on korkeampi kuin maakaasureformoidun vedyn avulla. Mikäli prosessin hiilidioksidipäästöjä haluaa vähentää nopeasti sekä kustannustehokkaasti, CCS yksikön lisääminen olisi taloudellisesti kannattavampaa [44]

Tästä huolimatta Norjassa lannoitteidenvalmistaja Yara on kehittämässä vihreään vetyyn perustuvaa ammoniakin valmistusprosessia, jonka tavoitteena olisi tuottaa 500 000 tonnia vihreää ammoniakkia vuodessa. Projektissa muunnettaisiin olemassa oleva Porsgunnin tehdas sähköiseksi sekä se hyödyntäisi ainoastaan vihreää vetyä. Toteutuessaan projektilla olisi mahdollista saavuttaa 800 000 tonnin hiilidioksidipäästöt vuosittain. [22]

## 4. VETYTALouden KEHITTymistä TEOLLISUudessa TUKEVAT LIKETOIMINTAMALLIT

Liiketoimintamalli on yrityksen toiminnalleen luoma malli, jossa määritellään tuote, asiakassegmentti, sekä jakelukanavat, yhteistyökumppanit, kustannusrakenne ja tuoton lähteet. Liiketoimintamallia voidaan käyttää suunnitteluun, toiminnan hallintaan sekä analysointiin. [46] Liiketoimintamalli voidaan jäsenellä koostumaan kolmesta osasta: arvon haltuunottoon (engl. *value capture*), arvon luomis- ja toimitussysteemiin (engl. *value creation and delivery*) sekä arvolupaukseen (engl. *value proposition*). Arvon haltuunotolla tarkoitetaan yrityksen rahavirtoja ja arvon luomisella sekä jakelulla organisaatiota sekä sen resursseja, osaamista sekä arvoa luovia toimintoja. Arvolupaus käsittää yrityksen määrittelemän asiakasryhmän sekä yrityksen niille lupaaman arvon. [47]

Nykyiset liiketoimintamallit nähdään pullonkaulana kestäväen kehityksen edistymisessä, sillä ne painottavat taloudellista menestymistä kestävyudessa menestymisen sijaan. [44, 45] Vetytalouden kehittymisen kannalta liiketoimintamallien kehittyminen on tärkeää, jotta projektit voivat olla taloudellisesti kannattavia sekä houkuttelevia yrityksille.

Vetytalouden kehittymistä tukevia liiketoimintamalleja on tutkittu kirjallisuudessa suhteellisen vähän. Useat tutkimukset ovat tunnistaneeet vetytalouteen liittyviä ongelmia yrityksille, mutta laajamittaisia tarkasteluja erityisesti teollisuutta tukevista liiketoiminnasta on vähän. Lisäksi tehdyt tutkimukset keskittyvät joko vain teoreettisiin ratkaisuihin tai suppeaan otantaan. [5, 6, 7, 34]

### 4.1 Liiketoiminnalliset haasteet

Teolliset toimijat kohtaavat merkittäviä liiketoiminnallisia haasteita vetytaloudessa. Nämä haasteet voidaan luokitella liiketoiminnallisiin, teknologisiin, poliittisiin sekä koordinoiminnin haasteisiin.

Liiketoiminnallisiin haasteisiin luetaan matala kysyntä sekä hintasensitiivisyys hiilineutraaleille sekä matalahiilille tuotteille. Vihreän vedyn avulla tuotettujen tuotteiden hinta on korkeampi, kuin harmaalla vedyllä tai muilla menetelmillä tuotettujen tuotteiden. Esimerkiksi vihreän teräksen hinnan oletetaan olevan noin 20% korkeampi kuin normaalin teräksen [29]. Matalan kysynnän takia uusien tuotteiden kehittäminen ei ole vielä taloudellisesti houkuttelevaa sekä sisältää merkittäviä riskejä. Alalla ei ole varmuutta, että uudet tuotteet voisivat saada kysyntää. Erityisesti teollisuuden tuotteiden markkinoilla

ulkoiset tekijät vaikuttavat toimintaan herkästi, sillä suunnitteluikkuna on pitkä ja reagoitakyky heikko. [7] Tämän lisäksi vedylle ei ole olemassa yhteisiä markkinoita, minkä takia myös vedyn hinta voi vaihdella tuottajakohtaisesti. Vakiintuneiden markkinoiden puute on merkittävä riski niin vedyn myyjille kuin ostajillekin [37].

Teknologisiin haasteisiin sen sijaan liittyy epävarmuus teknologian kehittymisestä sekä kaupallisen käytön mahdollisuuksista. Vetytalouden teollisista sovelluksista on vain vähän käytännön toteutuksia ja tällä hetkellä käynnissä olevilla pilottiprojekteilla onkin tarkoitus luoda ensimmäisiä toteutuksia, kehittää teknologiaa sekä kerätä tietoa. Ongelmana on lisäksi se, että vetyteknologioihin liittyvät standardit ovat puutteellisia, minkä takia teknologian kehitykseen liittyvän tiedon jakaminen vaikeutuu. [6]

Teknologian kehityksen sekä kysynnän ollessa epävarmaa, suuret investointikustannukset muodostavat suuren riskin toimijoille. Erityisesti teollisuudessa investointikustannukset ovat suuret. Esimerkiksi vihreän teräksen tuotantolaitos vaatisi 1,2 miljardin investoinnin sekä 1,3 GW elektrolyysikapasiteetin. [20] Investointikustannusten ollessa suuret, alaa mullistavien mutta toisaalta epävakaiden teknologioiden kehittämiseen investoiminen ei ole houkutteleva vaihtoehto. Lisäksi uusien toimijoiden on vaikea päästä alalle suurien investointikustannusten sekä teknologisten riskien takia. [7] Perinteisesti kestävien tuotteiden yleistymisen markkinoilla on tapahtunut uusien toimijoiden tullessa alalle ja korvaten vanhojen toimijoiden markkinaosuutta. [5] Kuitenkin teollisuuden uudistumisessa tämä ei ole vastaavasti mahdollista suurten investointikustannusten sekä riskien takia. Näin ollen alan kehitys on riippuvainen olemassa olevien toimijoiden valmiudesta kehittää uusia teknologioita sekä ottaa niitä kaupallisesti käyttöön.

Lisäksi teollisuudessa on historiallisesti investoitu vain vähän tutkimukseen ja kehitykseen, keskimäärin 3 % liikevaihdosta [50]. Keskimäärin vuonna 2021 EU:n alueella kemianteollisuuden yritykset sijoittivat 137,1 miljoonaa euroa tuotekehitykseen. Metalliteollisuudessa vastaava luku on 62,7 miljoonaa euroa [51]. Nämä ovat suhteellisen matalia lukuja verrattuna esimerkiksi autoteollisuuteen (749,8 miljoonaa euroa) ja rakennusalaan (344,8 miljoonaa euroa) [52]. Tuotekehitykseen suunnattuja investointeja voidaan suhteuttaa tuotekehitysinvestointien intensiivisyydellä, eli investoinnit suhteutetaan yritysten myyntiin. Teollisten toimijoiden tuotekehityksen intensiivisyys on suhteellisen matala verrattuna muihin aloihin. Metalliteollisuudessa se oli vuonna 2021 EU:n alueella 1,5 % ja kemian teollisuudessa 4,8 % [51]. Autoteollisuudessa vastaava luku 6,0 % ja kaikkien teollisuuden alojen keskiarvo on 4,2 % [52].

Poliittinen ympäristö vetytalouden osalta on edelleen hyvin epävarma yritysten näkökulmasta, vaikka EU sekä useat Pohjoismaat ovat ottaneet selkeän linjan integroida vetytalouden osaksi teollisuutta. Valtioiden selkeä tuki on elintärkeää vetyprojekteille, minkä takia nykyinen poliittinen epävarmuus on riski yrityksille [37]. Erityisesti teknologisten standardien puute lisää epävarmuutta toimijoiden keskuudessa. Ilman selkeitä standardeja maiden välillä, eri visiot voivat mennä päällekkäin, eikä rajattuja resursseja käytetä tehokkaasti [53]. Esimerkiksi teräsalan toimijat korostavat standardien kehittymisen vihreille tuotteille olevan erityisen tärkeää luottamuksen luomiseen asiakkaiden kanssa tuotteiden alkuperästä ja jäljitettävyydestä. [35]

Vetytalouden kehittymisen kannalta koordinointi tulee entistä tärkeämmäksi, sillä ilman selkeää koordinointia teollisuuden hiilineutraaliustavoitteiden saavuttaminen ei ole mahdollista. Jotta vetyyn perustuvat teolliset prosessit voivat kehittyä, vihreää vetyä tulee olla helposti saatavana, mikä osaltaan vaatii uusiutuvaa energiaa. Lisäksi vetyä pitää pystyä kuljettamaan paikasta toiseen turvallisesti. Jotkut prosessit vaativat myös muita raaka-aineita, esimerkiksi vihreän vedyn avulla tuotettu ammoniakki vaatii hiilidioksidia, minkä takia myös näiden raaka-aineiden toimitusketjujen pitää olla tarkoin määriteltyjä, jotta prosesseja on mahdollista toteuttaa. Tällä hetkellä kuitenkin koordinaatio on pitkälti yritysten varassa, eikä poliittiset toimijat ole luoneet kehitystä tai lainsäädäntöä koordinaatiolle, joka kannustaisi tai ohjaisi yrityksiä ratkaisemaan koordinaatioon liittyviä haasteita. [7]

Vetytalouden kehittyminen teollisten toimijoiden keskuudessa on haasteellista mm. edellä mainittujen tekijöiden takia. Korkeat investointikustannukset sekä poliittiset, teknologiset sekä koordinaatioon liittyvät haasteet luovat epävarman ympäristön teollisille yrityksille. Haasteiden sekä riskien olemassaolossa huolimatta teollisten yritysten on vähintään aloitettava suunnittelemaan, miten he tulevat täyttämään hiilineutraaliustavoitteet pitkien valmistelu- ja läpimenoaikojen takia. [7]

## 4.2 Ratkaisuja liiketoimintamallien haasteisiin

Teolliset toimijat kohtaavat enenevässä määrin painetta vähentää hiilidioksidipäästöjään, mutta nykyiset liiketoimintamallit eivät tue hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamista [6]. Lisäksi teknologian muuttuessa perustavanlaatuisesti, on myös osaamisen sekä prioriteettien muututtava yrityksissä kestävämmiksi, jotta he voivat pärjätä myös tulevaisuuden markkinoilla [7]. Van der Speek et al. argumentoivat, että systeemin arvoa ei voida määritellä ainoastaan talouskasvun avulla, vaan kestävä kehityksen näkökulmat on otettava huomioon liiketoimintamalleissa [3]. Markkinoiden muuttuessa, on mahdollista, että nykyiset suuret toimijat eivät pysty pitämään asemaansa, vaan nykyiset pioneerit

saavuttavat merkittävän markkinaosuuden [5]. Ratkaisemalla luvussa 4.1 esiteltyjen haasteita yritysten on mahdollista varmistaa oma paikkansa tulevaisuuden markkinoilta sekä heillä on mahdollisuus vaikuttaa nykyisiin markkinoihin merkittävästi [6].

#### 4.2.1 Monialainen yhteistyö eri toimijoiden kanssa

Tiivis yhteistyö eri toimijoiden välillä on tärkeää vetytalouden kehittymisen kannalta, sillä kyseessä on systemaattinen muutos, mikä vaikuttaa koko alan rakenteisiin. Useat teolliset toimijat ovatkin kääntyneet toisten toimijoiden puoleen luodakseen ensimmäisiä teollisen tason sovelluksia vetyyn perustuvista prosesseista laajentaakseen omaa tietotaitoa. Tällaisia useiden yritysten muodostamia verkostoja voidaan kutsua kokeellisiksi verkostoiksi. Kokeellinen verkosto (engl. *Experimental networks*) on ryhmä organisaatioita, jotka tekevät yhteistyötä ajallisesti rajoitetussa, toimialarajoja ylittävässä verkostossa tutkiakseen potentiaalisia liiketoimintamalleja perustavanlaatuisiin muutoksiin sosio-tekniisissä systeemeissä. [6]

Verkostojen ja yhteistyön avulla yritykset voivat vähentää riskiä tutkiessaan uusia teknologioita. Kun kukin toimija vastaa vain yhdestä osasta isompaa projektia, yksittäiselle toimijalle mahdolliset riskit ovat pienemmät, kuin jos yksittäinen yritys suorittaisi projektin alusta loppuun yksin. [6]

Lisäksi yhteistyön avulla voidaan muodostaa monimuotoisia asiantuntijaryhmiä, jotka lähtevät toteuttamaan projektia. Yhteistyötä tekevät yritykset ovat usein eri toimialoilta, ja heillä on vähän kokemusta yhteistyöstä projektien muiden yhteistyökumppanien kanssa. [6] Monimuotoisuus innovaatioprosesseissa parantaa suorituskykyä [54]. Lisäksi yksittäisiltä yrityksiltä saattaa puuttua sisäistä tietotaitoa, mikä on välttämätöntä projektien tekemiseksi, minkä takia he kääntyvät toisten toimijoiden puoleen. [6]

Vetytalouden kehittymisen kannalta eri toimijoiden välinen koordinaatio on erittäin tärkeää. Tuotanto, kuljetus, varastointi sekä loppukäyttö pitää järjestää niin, että jokainen pala sopii yhteen. [7] Yhteistyön avulla voidaan mahdollistaa helpompi koordinaatio, kun eri alojen yritykset ovat jo sitoutuneita projektiin. Lisäksi vetytalouden murros vaatii muutosta koko arvoketjussa. Yhteistyön avulla voidaan kattaa suurempi osa tästä arvoketjusta kuin toimimalla yksin. [6]

Esimerkiksi HYBRIT-projektissa on mukana teräksen valmistaja SSAB, energian tuottaja Vattenfall sekä konsultointitoimisto LKAB. SSAB:n toimitusjohtaja on kommentoinut, että yhteistyö Vattenfallin kanssa oli luontevaa yrityksen ollessa yksi Ruotsin suurimmista sähköntuottajista. Merkittävän projektin aiheuttaman sähkön kysynnän takia jokin suuri

energiantuottaja olisi pitänyt ottaa projektiin mukaan ennemmin tai myöhemmin. [6] Toisaalta Ruotsin valtio omistaa LKAB:n [55] sekä Vattenfall AB:n [56] kokonaan ja LKAB omistaa SSAB:n osakkeista 10,50 % [57], minkä takia yhteistyö on voinut olla toimijoille luontevaa.

Aalborgin Power-to-X projektissa Aalborg Forsyning, Reno-Nord ja Copenhagen Infrastructure Partners rakentavat yhdessä metanolin tuotantolaitoksen, missä Reno-Nordin jätteenpolttolaitokselta ohjataan savukaasujen hiilidioksidia prosessiin ja ylimääräinen lämpö ohjataan Aalborg Forsyningin kaukolämpöverkkoon. Yhteistyön avulla yritysten on mahdollista vastata koordinaatioon liittyviin haasteisiin sekä integroida metanolin tuotantolaitos olemassaolevaan infrastruktuuriin tehokkaasti. [23]

Yhteistyön avulla luodaan myös uskottavuutta projektille. Selkeä yhteinen ääni mahdollistaa ulkoisen tuen saamisen projekteille, mihin kuuluu myös julkinen sekä yksityinen rahoitus. Esimerkiksi HYBRIT-projekti onnistui keräämään rahoitusta yhteistyön mahdollistaman uskottavuuden sekä positiivisen julkisuuskuvan avulla. Rahoittajiin kuuluu myös Ruotsin Energiavirasto (ruots. *Energimyndigheten*) eli projekti on saanut julkista rahoitusta. [6]

Lisäksi vetytalouden suhteen ei ole olemassa kansallisia tai EU:n standardeja, mikä vaikeuttaa tiedon jakamista sekä teknologian systemaattista kehitystä. [58] Yhteistyön kautta yritykset pystyvät jakamaan toisilleen tietoa omista tutkimuksistaan ja kokeiluistaan, mikä vähentää yritysten riippuvuutta standardien olemassaolosta.

Tiivis yhteistyö eri alojen toimijoiden kesken vetytalouden ratkaisujen kehittämiseksi vaikuttaa yritysten liiketoimintamalliin kokonaisvaltaisesti. Tässä luvussa esitellyt vaikutukset sekä edut ovat tiivistetty taulukkoon 2.

**Taulukko 2:** Monialaisen yhteistyön vaikutukset yritysten liiketoimintamallin eri osa-alueisiin

<b>Arvon haltuunotto</b> (rahavirrat)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yhteistyön luoma uskottavuus mahdollistaa laajemman rahoituksen</li> </ul>
<b>Arvon luomis- sekä toimitussysteemi</b> (organisaatorakenne, resurssit, osaaminen sekä toiminnot)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projektiorganisaation rakenne on erilainen, kun mukana on useita eri toimijoita</li> <li>• Moninaiset asiantuntijaryhmät</li> <li>• Laaja sisäinen osaaminen ja tietotaito projektin eri osa-alueista sekä tiedon jakamisen helpottuminen</li> <li>• Laajat käytettävissä olevat resurssit</li> <li>• Koordinoinnin helpottuminen koko arvoketjussa</li> </ul>

<b>Arvolupaus</b> (asiakasryhmä ja heille luvattu arvo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kukin toimija pystyy lupaamaan omille asiakkailleen edistäväänsä kestävästä kehitystä sekä hiilineutraaliustoimia</li> </ul>
---	---

Kokonaisuudessaan kokeelliset verkostot mahdollistavat taloudellisten, poliittisten, ja teknologisten riskien minimoimisen, selkeämmän koordinoinnin arvoketjun eri toimijoiden kanssa sekä laajan tiedon jakamisen. Kukin näistä osa-alueista vastaa vetytalouden aiheuttamiin liiketoiminnallisiin haasteisiin ja madaltaa teollisten yritysten kynnystä osallistua vetytalouteen.

## 4.2.2 Asiakaskäsityksen laajentaminen

Vihreän vedyn avulla tuotetut tuotteet ovat toistaiseksi kalliimpia kuin perinteisillä menetelmillä tuotetut vastaavat tuotteet, mikä johtuu vihreän vedyn toistaiseksi korkeammasta hinnasta verrattuna harmaaseen vetyyn [24]. Esimerkiksi HYBRIT-projektissa tuotetun vihreän teräksen hinnan odotetaan olevan noin 20 % korkeampi kuin tavallisen teräksen hinnan [29].

Teollisuus on historiallisesti ollut hyvin kilpailuhenkinen ala, joka koostuu hintasensitiivisistä asiakkaista. Erityisesti teräsala on kilpailuhenkinen. [35] Vihreän vedyn hyödyntäminen ei välttämättä näytä teollisille toimijoille houkuttelevalta, koska se tarkoittaisi vääjäämättä korkeampia hintoja tuotteille ja se voidaan nähdä merkittävänä riskinä yrityksen toiminnan jatkuvuuden kannalta.

Edelleen kuluttajat eivät ole välttämättä valmiita maksamaan korkeampaa hintaa ympäristöystävällisestä tuotteesta, jos tuotteen ominaisuudet eivät ole selkeästi paremmat. Kuitenkin on olemassa tiettyjä aloja, jotka ovat valmiita maksamaan korkeammat kustannukset ympäristöystävällisistä tuotteista. Esimerkiksi rakennus- ja autoteollisuus ovat valmiita maksamaan korkeampaa hintaa vihreästä teräksestä. Erityisesti autoteollisuudessa korkeampi hinta ei välttämättä ole kynnyskysymys, sillä vihreän vedyn käyttö nostaisi autojen hintoja 108–270 €, joka on 0,5–1 % yleisten bensiini- ja dieselautojen myyntihinnasta. [35] Yritykset voivat hyödyntää vihreää terästä markkinoinnissa ja luoda tuotteelle lisäarvoa, mikä autoteollisuudessa voisi oikeuttaa korkeamman hinnan.

Lisäksi rakennusalalla on osoitettu kiinnostusta vihreän vedyn avulla tuotettua terästä kohtaan. Rakennusalalla on yleisesti pyritty minimoimaan kustannukset pitkien alihankkijaketjujen sekä kilpailutuksen takia. Niinpä onkin erikoista, että juuri tämä ala olisi kiinnostunut vihreästä teräksestä. Kuitenkin rakennusalan asiakkaat olisivat mahdollisesti valmiita maksamaan korkeampaa hintaa ympäristöystävällisemmästä talosta. Niinpä



odotetaan, että kysyntää vihreälle teräkselle tulisi erityisesti jo matalahiilisistä taloista, joissa markkinointi perustuu pitkälti rakennuksen ympäristöystävällisyyteen. [35]

H2 Green Steel projekti on jo myynyt vuodesta 2025 eteenpäin tuotettavaa terästä 1,5 miljoonaa tonnia erityisesti autoteollisuuden ja rakennusalan käyttöön ja tällä rahoittanut projektia sekä luonut omille tuotteilleen varmaa kysyntää tulevaisuuteen [59].

Taulukossa 3 on eritelty, miten asiakaskäsityksen laajentaminen vaikuttaa liiketoimintamalleihin. Oikeiden asiakkaiden löytäminen asiakaskäsitystä laajentamalla voi tuoda uusia rahavirtoja yrityksille sekä tuotteiden vihreyttä voidaan käyttää yrityksen eri markkinoinnin osa-alueella. Kuitenkin asiakaskäsityksen laajentaminen korostuu eniten arvolutausta, erityisesti eri asiakassegmenttejä laadittaessa.

**Taulukko 3:** Asiakaskäsityksen laajentamisen vaikutukset liiketoimintamallin eri osa-alueisiin.

<b>Arvon haltuunotto</b> (rahavirrat)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vihreiden, vaikkakin kalliimpien tuotteiden myyminen markkinoilla</li> </ul>
<b>Arvon luomis- sekä toimitussysteemi</b> (organisaatorakenne, resurssit, osaaminen sekä toiminnot)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vetyyn perustuvien tuotteiden ympäristöystävällisyys tai vähähiilisyys on tuotteen ominaisuus, joka voi tuoda lisäarvoa asiakkaalle</li> </ul>
<b>Arvolupaus</b> (asiakasryhmä ja heille luvattu arvo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tuotteen koko toimitusketjun tarkasteleminen asiakassegmenttejä määriteltäessä.</li> </ul>

Tarkastelemalla myös omien asiakkaidensa asiakkaita, teollisten toimijoiden ei välttämättä tarvitse kiinnittää huomioita tuotantohintaan samalla tavalla kuin aikaisemmin. Tämä antaa yrityksille mahdollisuuden nähdä oma potentiaalinen asiakaskuntansa laajemmin sekä luoda taloudellista vakautta projektille, mitä esimerkiksi H2 Green Steel sekä HYBRIT ovat tehneet [33, 49].

Tämän perusteella osa vetytalouden piirissä toimivista teollisista yrityksistä mieltää asiakaskuntansa laajemmin, kuin vain heidän suorat asiakkaansa. Liiketoimintamallissa määritellään myös, ketkä ovat potentiaalisten asiakkaiden asiakkaita sekä ovatko he valmiita maksamaan korkeammat kustannukset ympäristöystävällisistä tuotteista ja miten he mieltävät tuotteen ympäristöystävällisyyden vaikutuksen. [35]

#### 4.2.3 Riskienhallinnan näkökulman laajentaminen

Vetytalouteen liittyvissä projekteissa riskit ovat merkittävät teollisille toimijoille erityisesti suurten investointikustannusten sekä poliittisen ja teknologisen epävarmuuden takia. Luvuissa 4.2.1 ja 4.2.2. käsitellyillä menetelmillä voidaan madaltaa riskejä, mutta ei kuitenkaan eliminoida. Tästä huolimatta kehitteillä on useita projekteja, jotka ovat keränneet myös merkittävän määrän rahoitusta sekä tukea puolelleen, joita on kuvattu Taulukossa 1.

Vihreä siirtymä, jota vetytalous tukee, on laaja systemaattinen muutos yhteiskunnassa, minkä yritykset huomioivat pilottiprojekteja kehittäessään. Jo itsessään vetytalouden integroituminen teollisuuteen vaatii radikaaleja muutoksia toimitusketjuihin sekä toimintamalleihin [48]. Luvussa 2.4 käsitellyt tekijät kiihdyttävät vetytalouden kehitystä ja ala on muuttumassa nopeasti. Kehityskulkua voidaan osaltaan verrata tuuli- tai aurinkovoiman kehitykseen, missä kumpikin ala vaikutti kehittyvän hitaasti vielä 2000-luvun alussa, mutta oikeilla kannustimilla kummankin kapasiteettia oli mahdollista kasvattaa nopeasti sekä alentaa tuotantomuotojen hintaa kilpailukykyiseksi. Nykyinen systeemi on siis suuren muutoksen alla ja muutoksia sekä niiden nopeutta on vaikea ennakoida tarkasti.

Riskienhallinnassa laajentamalla tarkastelua koko systeemin tasolle ainoastaan taloudellisten tekijöiden sijaan, on mahdollista saavuttaa kokonaisvaltaisempi kuva myös tulevaisuuteen liittyvistä riskeistä. Tulevaisuuden markkinat voivat näyttää hyvin erilaisilta verrattuna nykyisiin. Varhaisilla toimijoilla on mahdollisuus varmistaa oma paikkansa tulevaisuuden markkinoilla sekä kehittää omaa osaamistaan uusista teknologioista. Lisäksi heillä on mahdollisuus myös muovata markkinoita määrittelemäänsä suuntaan. Esimerkiksi HYBRIT tai H2 Green Steel projektit onnistuessaan mullistaisivat koko teräksenvalmistussektoria Pohjoismaissa. [6]

Lisäksi kestävien tuotteiden yleistyessä markkinoilla ei johda välttämättä markkinoiden kasvuun, vaan ne korvaavat epäkestäviä tuotteita. Normaalisti uudet, kestäviä tuotteita valmistavat yritykset astuvat markkinoille ja haastavat olemassa olevien toimijoiden markkina-asemaa. [5] Kuitenkin teollisuudessa tämä ei ole mahdollista korkeiden investointikustannusten takia, jolloin vetytalouden integraatio on jo olemassa olevat toimijat ovat pääasiassa vastuussa alan kehityksestä. [37] Tämän lisäksi teollisuudelle ominaiset pitkät suunnitteluajat nostavat toimijoiden riskiä altistua nopeille markkinoiden muutoksille, jolloin vetytaloutta aikaisin kehittämään lähteneet toimijat minimoivat riskiään altistua näille muutoksille [7]. Kokonaisuudessaan tulevaisuuden markkinoiden tarkasteleminen osoittaa merkittäviä riskejä teollisille toimijoille, jotka eivät lähde aikaisessa vaiheessa aloita minimoimaan päästöjä ja näin varmistaa paikkaansa markkinoilla, joilla he voivat mahdollisesti tulla tulevaisuudessa vetytalouden aikaisten kehittäjien syrjäytyksi.

Vaikka tulevaisuutta tarkastellessa vetytalouden teollisten käytännön toteutusten kehittäminen vaikuttaa tulevaisuutta tarkastellessa houkuttelevalta. Projektin epäonnistuminen on myös realistinen mahdollisuus. Tällöin yritys menettää rahaa, resursseja sekä aikaa. Kuitenkin SSAB:n varatoimitusjohtaja kommentoi, että he HYBRIT-projektissa kehittävät ja kokeilevat uutta teknologiaa. Jonkun on tehtävä tämä kokeilu, jotta voidaan saada selville, toimiiko teknologia vai ei. [35] SSAB on siis ottanut myös vastuuta teollisuuden päästövähennyksistä koko systeemin tasolla, eikä vain oman teräksen tuotannon kannalta. Mikäli heidän projektinsa ei onnistu, on kuitenkin saatu tietoa sekä kokemusta aiheesta, jonka perusteella he, tai jokin toinen toimija voi yrittää toisenlaista ratkaisua. Epäonnistumista ei siis välttämättä nähdä ainoastaan negatiivisena asiana vaan myös välttämättömänä askeleena teollisuuden päästövähennysten saavuttamiseksi.

HYBRIT projektissa merkittävänä rahoittajan on Ruotsin valtio, joka omistaa LKAB:n sekä Vattenfallin. [55, 56] Tämä tuo toiminnalle vakautta ja mahdollistaa myös suuremman riskienoton. HYBRIT menestyminen myös tukee sitä, että valtioiden tuki sekä poliittinen vakaus ovat erittäin tärkeitä projektien aloittamisen sekä menestymisen kannalta.

Taulukkoon 4 on eritelty miten riskienhallinnan näkökulman laajentaminen vaikuttaa liiketoimintamallin eri osa-alueisiin. Pääasiassa se vaikuttaa yritysten arvon luomis- sekä toimitussysteemiin ja erityisesti organisaation sisäisiin asenteisiin sekä olemassa olevien resurssien ohjaamiseen tutkimukseen sekä kehitykseen.

**Taulukko 4:** Riskienhallinnan vaikutukset yritysten liiketoimintamallien eri osa-alueisiin

<b>Arvon haltuunotto</b> (rahavirrat)	-
<b>Arvon luomis- sekä toimitussysteemi</b> (organisaatorakenne, resurssit, osaaminen sekä toiminnot)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Positiivinen asenne teknologian kehittämiseen sekä niiden kaupallisten toteutusten rakentamiseen.</li> <li>• Olemassa olevien resurssien ohjaaminen tutkimukseen ja kehitykseen, vaikka työn tuloksena ei ole varmoja tuottoja</li> </ul>
<b>Arvolupaus</b> (asiakasryhmä ja heille luvattu arvo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yritykset pystyvät markkinoimaan omaa riskinottoa kestävämmän tulevaisuuden luomiseksi sekä antaa esimerkkejä radikaaleista sekä konkreettisista toimista, joita he ottavat (esim. SSAB, LKAB ja Vattenfall sekä heidän valmistamansa vihreän teräksen markkinointi).</li> </ul>

Siirtymä vetytalouteen teollisuudessa olisi suuri systemaattinen muutos teollisuuden toimintatavoissa sekä arvoketjuissa. Muutosta ei kuitenkaan voida tarkastella perinteisenä teknologian murroksena teollisuuden luonteen takia. Suuret investointikustannukset sekä kapeat voittomarginaalit eivät mahdollista uusien toimijoiden tuleamista alalle, jotka voisivat korvata vanhat toimijat uusilla ympäristöystävällisillä ratkaisuilla. Vanhojen toimijoiden on siis oltava muutoksessa mukana sen onnistumisen kannalta.

## 5. VETYTALouden KEHITTYMINEN TEOLLISUUDESSA TAPAHTUU VANHOJA TOIMINTATAPOJA RIKKOMALLA

Pohjoismaissa vetytalouden kehittyminen teollisuudessa alan luonteen takia vaikuttaa hankalalta. Perinteisesti teollisuus on panostanut vain vähän tuotekehitykseen korkeiden investointikustannuksen sekä riskien minimoimisen takia [50]. Erilaisiin projekteihin liittyy myös pitkät suunnittelu-, luvitus- sekä rakentamisajat [7]. Lisäksi alalla voittomarginaalit ovat matalia sekä kilpailu toimijoiden kesken on kovaa, mikä takia vihreän vedyn avulla tuotettujen tuotteiden korkeammat hinnat nähdään suurena riskinä [35].

Kuitenkin teollisten toimijoiden toimintaympäristö on muutoksessa, mikä takia vanhat toimintatavat eivät enää vastaa tulevaisuuden haasteisiin [6]. Kiristyvät ilmastotavoitteet arvottavat kestäviä sekä hiilineutraaleja toimintoja sekä tuotteita enenevässä määrin. Toisaalta erilaisten ohjauskeinojen avulla poliittiset toimijat kasvattavat kustannuksia hiilidioksidipäästöjä tuottavissa toiminnoissa.

Tämän lisäksi Venäjän hyökkäys Ukraina on nostanut keskiöön energiaomavaraisuuden Pohjoismaissa ja koko Euroopan alueella. Riippuvuus Venäjän maakaasusta sekä öljystä ei ole enää turvallisuuden tai huoltovarmuuden kannalta toimiva ratkaisu, mikä takia energiaomavaraisuudesta on tullut tärkeämpi osa tulevaisuuden skenaarioita. Osaltaan tämä tarkoittaa siirtymää kohti uusiutuvaa energiantuotantoa ja teollisuudessa fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä. [1]

Lisäksi viime vuosien aikana EU on ottanut selkeän poliittisen suunnan edistää vetytaloutta erityisesti teollisten toimijoiden keskuudessa ja Pohjoismaiden kansalliset vetystrategiat tukevat myös tätä linjaa. [8, 24] Teollisuuden päästövähennyksiä tullaan siis mitä todennäköisemmin pyrkimään saavuttaa integroimalla vetytaloutta osaksi teollisuutta.

Näiden toimintaympäristön muutosten perusteella teollisuuden on siis muutettava prosessejaan nopeasti hiilineutraaliksi sekä hyödyntämään ja erityisesti vetyteknologiat nähdään keinona tähän [8]. Kuitenkin vetyteknologioiden kaupallisten sovellusten kehittäminen ei sovi yhteen teollisuuden nykyisen luonteen kanssa. Vähäinen tuotekehitys, pitkät sekä riskittömät kehitysprojektit ja taloudellisen tehokkuuden tavoittelemisen eivät ole yhteensopivia vetytalouden nopean kehityksen kanssa, merkittävien riskien sekä korkeiden kustannusten ja epävarmojen tuottojen kanssa. Tämä murros ei ole siis ainoastaan

teknologinen, vaan vaatii myös poliittisia sekä liiketoiminnallisia ratkaisuja teknisten innovaatioiden ohella [48].

Nyt kehitystyön aloitettavien teollisten yritysten toiminta pohjautuu pitkälti sektoreita ylittävälle yhteistyölle, näkökulmien muutokselle riskienhallinnassa, sekä oikeiden asiakas-segmenttien tunnistamiseen [6, 33]. Toimijoilla on uskallusta yrittää toimia epävarmoilla markkinoilla sekä löytää ratkaisuja heidän kohtaamiin haasteisiin.

Huomionarvoista kuitenkin on, että teollisten toimijoiden on muutettava liiketoimintamallejaan merkittävästi, osallistuakseen vetytalouden kehittämiseen. Arvottamalla kestävä kehitystä liiketoimintamalleissa yritykset eivät välttämättä tähtää taloudelliseen kasvuun, vaan myös yhteiskunnan hyvinvointiin sekä koko systeemin päästövähennyksiä kohti. Tekemällä riskialttiita, mutta myös välttämättömiä ratkaisuja hiilineutraalin teollisuuden kehittämisen puolesta sekä toimimalla yhteistyössä toistensa kanssa, yritykset voivat varmistaa paikkansa tulevaisuuden markkinoilla sekä saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä. Useat yritykset ovatkin ottaneet tämän riskin sekä aloittaneet tiiviin yhteistyön eri toimijoiden kanssa. Taulukosta 1 voidaan nähdä, että useimmissa projekteissa on monia yrityksiä mukana. Tämä vaatii kuitenkin muutosta ajattelutavoissa, joissa toiset toimijat määritellään kilpailijoiksi, eikä yhteistyökumppaneiksi sekä ajatuksista välittömän taloudellisen arvon ja kasvun tärkeydestä. Tulevaisuus voi olla todella arvaamaton ja voimasuhteet markkinoilla voivat kääntyä helposti niin, että tämän päivän pienet toimijat kasvattavatkin osuuttaan ja syrjäyttävät suuria toimijoita [5].

Pohjoismaiden asettuminen teollisuuden vetytalouteen on alueellisesti hyvin vaihteleva. Ruotsin, Norjan sekä Tanskan vetystrategiat mahdollistavat alueille selkeän suunnan vetytalouden kehityskulusta sekä madaltavat vetytalouteen liittyviä poliittisia riskejä. Näissä maissa onkin kehittynyt kunnianhimoisia sekä monipuolisia aikaisia vetyprojekteja sekä maat ovat keränneet osakseen miljardien eurojen arvosta yksityisiä sekä julkisia investointeja [30, 50, 51]. Sen sijaan Suomi nojautuu vahvasti EU:n vetystrategiaan kansallisen vetystrategian puuttuessa ja oman suunnan löytäminen ei ole yhtä selkeää kuin muissa Pohjoismaissa. Suomessa projekteja onkin huomattavasti vähemmän sekä niiden ennustetut kapasiteetit ovat keskimäärin pienempiä kuin muiden Pohjoismaiden.

Vetytalouden kehittyminen teollisuudessa ei tule olemaan yksinkertaista tai helppoa. Kehityskulun vaatima systemaattinen muutos sekä epävarmuus tulevaisuudesta luovat alan toimijoille haasteita, mutta myös mahdollisuuksia kehittää omaa toimintaansa vastamaan näihin haasteisiin. Tämä kuitenkin vaatii yrityksiltä suuria muutoksia heidän liiketoimintamalleissa sekä toimintatavoissa. Suurin muutos on kuitenkin, että tätä kehi-

tystä sekä siihen liittyviä projekteja ei voida ajatella ainoastaan tuottojen varmuuden kannalta, vaan teollisten yritysten on otettava myös yhteiskunnallista vastuuta alan kehittämisestä hiilineutraaliutta kohti, vaikka se sisältäisikin riskejä. Riskit eivät tule katoamaan ja ilmastonmuutoksen takia konkreettisia toimia teollisuudessa on tehtävä mahdollisimman nopeasti.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Vetytalouden kehittyminen on ottanut viime vuosien aikana isoja askeleita niin poliittisesti, kuin teknologisesti. Teollisuuden kasvavat paineet vähentää hiilidioksidipäästöjä sekä poliittiset linjaukset teollisuuden integraatiosta vetytalouteen työntävät teollisuutta kehittämään vihreään vetyyn perustuvia teollisia ratkaisuja. Tästä huolimatta teolliset toimijat kohtaavat useita haasteita integraatiossa vetytalouteen, mikä hidastaa toimialan kehitystä.

Vetytalouden kehittymiseen teollisuudessa vaikuttaa useat tekijät yhtäaikaaisesti. Pohjoismaissa suurin osa maista on jo tehneet oman vetystrategiansa, mitkä linjaavat tavoitteet vetytalouden kehityksestä ja työntää alaa eteenpäin EU:n vetystrategian ohella. Lisäksi ensimmäiset kaupallisen sekä teollisen tason vetyratkaisujen toteuttaminen kehittää teknologiaa sekä markkinoita eteenpäin.

Vetytalouden integraatio teollisuuteen on Pohjoismaissa lupaavinta erityisesti teräksen, metanolin sekä ammoniakkin tuotannossa. Jokaisella alalla vihreän vedyn hyödyntäminen fossiilisten polttoaineiden tai harmaan vedyn sijaan vähentyisi merkittävästi toimialan hiilidioksidipäästöjä. Kuitenkin kyseisiä prosesseja ei ole vielä toteutettu kaupalliseen käyttöön, minkä takia ne nähdään riskialttiina teknologioina.

Yksi merkittävä ongelma vetytalouden kehittymisen kannalta teollisuudessa on liiketoiminnalliset haasteet, joita yritykset kohtaavat. Näihin kuuluu mm. standardien sekä markkinoiden puute, kalliimmat tuotantokustannukset, teknologian epävarmuus, epävarma poliittinen ympäristö sekä arvoketjun puute. Haasteiden ratkaiseminen, sekä niiden kanssa toimimaan oppiminen ovatkin olennaisia toimia vetytalouden kehityksen sekä päästövähennysten kannalta tärkeitä toimia.

Yritykset ovat ratkaisseet haasteita sekä minimoineet riskejä vetyyn perustuvissa projekteissa tekemällä tiivistä yhteistyötä toimialarajojen yli. Pohjoismaissa tällaisia projekteja ovat esimerkiksi HYBRIT, Power-2-X in Aalborg sekä Yaran ammoniakkin tuotantolaitos. Yhteistyön avulla yritykset ovat pystyneet madaltamaan projekteihin liittyviä riskejä sekä koordinoimaan keskenään vetyprojekteissa erityisen tärkeää toimitusketjua. Lisäksi yritykset ovat myös pyrkineet löytämään tuotteilleen ostajia, jotka ovat valmiita maksamaan kalliimmista ympäristöystävällistä tuotteista. Näihin kuuluvat erityisesti auto- sekä rakennusteollisuus. Varhaisen kysynnän avulla yritykset ovat varmistaneet kysyntää omille tuotteille.



Kuitenkin vetytalous sekä energiamurros ovat suuria systemaattisia muutoksia, joiden takia myös liiketoimintamallit sekä yritysten ajattelumallit ovat muutoksen alla, sillä vanhat toimintatavat eivät ole enää yhteensopivia hiilineutraaliustavoitteiden kanssa. Tästä esimerkkinä on kestävä kehityksen nouseminen taloudellisen hyödyn rinnalle yritysten arvoissa.

Koska vetytalouden kehittyminen teollisuudessa ottaa vielä ensi askeliaan, tämä työ perustuu pitkältä kirjallisuusanalyysiin. Kuitenkin tarkempaa tietoa yritysten kohtaamista haasteista, käytetyistä teknologioista ja liiketoimintamalleista voi saada ainoastaan yrityksiltä sekä käytännön projekteista. Näiden tutkiminen mahdollistaisi tarkemman analyysin aiheesta sekä myös selkeämmän ja konkreettisemmän näkymän alan trendeihin.

## LÄHTEET

- [1] European Commission. REPowerEU Plan, [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF) (2022, viitattu 18.9.2022).
- [2] International Energy Agency. Energy Statistics Data Browser. *Energy Statistics Data Browser*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector> (2022, viitattu 2.9.2022).
- [3] van der Spek M, Banet C, Bauer C, et al. Perspective on the hydrogen economy as a pathway to reach net-zero CO<sub>2</sub> emissions in Europe. *Energy Environ Sci* 2022; 15: 1034–1077.
- [4] Bockris JOM, Appleby AJ. The hydrogen economy: an ultimate economy? *Environ This Mon*; 1.
- [5] Schaltegger S, Lüdeke-Freund F, Hansen EG. Business Models for Sustainability: A Co-Evolutionary Analysis of Sustainable Entrepreneurship, Innovation, and Transformation. *Organization & Environment* 2016; 29: 264–289.
- [6] Engwall M, Kaulio M, Karakaya E, et al. Experimental networks for business model innovation: A way for incumbents to navigate sustainability transitions? *Technovation* 2021; 108: 102330.
- [7] Löfgren Å, Rootzén J. Brick by brick: Governing industry decarbonization in the face of uncertainty and risk. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 2021; 40: 189–202.
- [8] European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf) (2020, viitattu 22.9.2022).
- [9] European Commission. The European Green Deal, [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF) (2019, viitattu 21.9.2022).
- [10] Oliveira AM, Beswick RR, Yan Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering* 2021; 33: 100701.
- [11] Petkov T, Veziroglu T, Sheffield J. An outlook of hydrogen as an automotive fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 1989; 14: 449–474.
- [12] Table 61. Hydrogen Densities in Different Forms of Storage., <https://app.knovel.com/hot-link/itble/rcid:kpHPUNE001/id:kt012144D2/hydrogen-production-using/table-61-hydrogen-densities> (viitattu 27.9.2022).
- [13] Griffiths S, Sovacool BK, Kim J, et al. Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Social Science* 2021; 80: 65.
- [14] Quarton CJ, Tlili O, Welder L, et al. The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. *Sustainable Energy Fuels* 2020; 4: 80–95.
- [15] Newborough M, Cooley G. Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bulletin* 2020; 2020: 16–22.

- [16] Germscheidt RL, Moreira DEB, Yoshimura RG, et al. Hydrogen Environmental Benefits Depend on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050. *Adv Energy Sustain Res* 2021; 2: 2100093.
- [17] HyResource. International Policy, <https://research.csiro.au/hyresource/policy/international/> (2022, viitattu 12.10.2022).
- [18] International Energy Agency. Hydrogen Project Database, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database> (2021, viitattu 30.9.2022).
- [19] H2 Cluster Finland, <https://h2cluster.fi/about-us/> (viitattu 29.9.2022).
- [20] Muran M, Pawelec G, Ferrari de Carvalho P, et al. *Green Hydrogen Monitor 2022*. Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/clean-hydrogen-monitor-2022/> (2022).
- [21] HYBRIT Demonstration. *HYBRIT*, <https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-demonstration/> (viitattu 29.9.2022).
- [22] Yara. Yara ready to enable the hydrogen economy with historic full-scale green ammonia project. *Yara*, <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-ready-to-enable-the-hydrogen-economy-with-historic-full-scale-green-ammonia-project/> (2020, viitattu 29.9.2022).
- [23] State of Green. Power-to-X plant in Aalborg will produce green methanol from local waste-based CO<sub>2</sub>, <https://stateofgreen.com/en/news/power-to-x-plant-in-aalborg-will-produce-green-methanol-from-local-waste-based-co2/> (2021, viitattu 2.11.2022).
- [24] International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2021*. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [25] Työ- ja elinkeinoministeriö. *Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiasstrategia*. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.
- [26] Energimyndigheten. Förslag till nationell strategi för fossilfri vätgas, <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/forslag-till-nationell-strategi-for-fossilfri-vatgas/> (2021, viitattu 17.10.2022).
- [27] European Commission. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN> (2021, viitattu 21.9.2022).
- [28] FReSMe. FReSMe, <http://www.fresme.eu/> (viitattu 31.10.2022).
- [29] HYBRIT. *Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017*. HYBRIT, <https://dh5k8ug1gwbyz.cloudfront.net/uploads/2021/02/Hybrit-broschure-engelska.pdf> (viitattu 17.10.2022).
- [30] H2 Green Steel. H2 Green Steel - About us, <https://www.h2greensteel.com/about-us> (viitattu 31.10.2022).
- [31] Liquid Wind. Flagships, <https://www.liquidwind.se/flagships> (viitattu 31.10.2022).
- [32] Möller S, Vähäsarja I. 500 miljoonan vetytehdas Kokkolaan on vasta vauvanaskel – viisi vastausta valottaa, miksi ja kenelle vety on tärkeää. *Yle*, <https://yle.fi/a/74-20004931> (2022, viitattu 21.11.2022).
- [33] HØST PtX Esbjerg. About the plant, <https://hoestptxesbjerg.dk/about-ptx/> (viitattu 31.10.2022).
- [34] IRENA. *Green hydrogen for industry: A guide to policy making*. Abu Dhabi: IRENA.

- [35] Muslemani H, Liang X, Kaesehage K, et al. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. *Journal of Cleaner Production* 2021; 315: 128127.
- [36] Cludius J, de Bruyn S, Schumacher K, et al. Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS - an analysis for six industry sectors. *Energy Economics* 2020; 91: 104883.
- [37] Karakaya E. Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future? *Journal of Cleaner Production* 2018; 13.
- [38] Souza Filho IR, Springer H, Ma Y, et al. Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores. *Journal of Cleaner Production* 2022; 340: 130805.
- [39] H2 Green Steel. Green Steel Production, <https://www.h2greensteel.com/articles/green-steel-production> (2022, viitattu 23.9.2022).
- [40] Li S, Zhang H, Nie J, et al. The Direct Reduction of Iron Ore with Hydrogen. *Sustainability* 2021; 13: 8866.
- [41] *Teräskirja*. Helsinki: Metallinjalostajat ry, [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja\\_flip/mobile/index.html](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html) (marraskuu 2014).
- [42] Van-Dal ÉS, Bouallou C. Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Journal of Cleaner Production* 2013; 57: 38–45.
- [43] International Energy Agency. *The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities*. Paris: International Energy Agency.
- [44] Chisalita D-A, Petrescu L, Cormos C-C. Environmental evaluation of European ammonia production considering various hydrogen supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020; 130: 109964.
- [45] Imam A. Ammonia introduction, <https://www.coursehero.com/file/20960594/04-AMMONIA/> (2016, viitattu 24.11.2022).
- [46] Osterwalder A, Pigneur Y, Tucci CL. Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept. *CAIS*; 16. Epub ahead of print 2005. DOI: 10.17705/1CAIS.01601.
- [47] Richardson J. The Business Model: An Integrative Framework for Strategy Execution. 2005; 27.
- [48] Axelson M, Oberthür S, Nilsson LJ. Emission reduction strategies in the EU steel industry: Implications for business model innovation. *Journal of Industrial Ecology* 2021; 25: 390–402.
- [49] Bidmon CM, Knab SF. The three roles of business models in societal transitions: New linkages between business model and transition research. *Journal of Cleaner Production* 2018; 178: 903–916.
- [50] Grubb M, McDowall W, Drummond P. On order and complexity in innovations systems: Conceptual frameworks for policy mixes in sustainability transitions. *Energy Research & Social Science* 2017; 33: 21–34.
- [51] Grassano N, Hernandez Guevara H, Fako P, et al. The 2021 EU Industrial R&D Investment Scoreboard, SB2021\_EU1000\_0.xlsx, <https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard/2021-eu-industrial-rd-investment-scoreboard> (2021, viitattu 5.12.2022).
- [52] Grassano N, Hernandez Guevara H, Tübke A, et al. *The 2021 EU industrial R&D investment scoreboard*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.

- [53] Noussan M, Raimondi PP, Scita R, et al. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability* 2020; 13: 298.
- [54] Gkypali A, Filiou D, Tsekouras K. R&D collaborations: Is diversity enhancing innovation performance? *Technological Forecasting and Social Change* 2017; 118: 143–152.
- [55] LKAB. Our organisation, <https://lkab.com/en/who-we-are/our-organisation/> (accessed 12 May 2022).
- [56] Vattenfall. Tietoja meistä, <https://group.vattenfall.com/fi/keita-olemme/tietoja-meista> (accessed 5 December 2022).
- [57] SSAB. Shareholders, <https://www.ssab.com/en/company/investors/ssab-share/shareholders> (viitattu 5.12.2022).
- [58] Bataille C, Åhman M, Neuhoff K, et al. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production* 2018; 187: 960–973.
- [59] H2 Green Steel. H2 Green Steel has pre-sold over 1.5 million tonnes of green steel to customers, <https://www.h2greensteel.com/latestnews/h2-green-steel-has-pre-sold-over-15-million-tonnes-of-green-steel-to-customers> (2022, viitattu 24.10.2022).
- [60] H2 Green Steel. Leading European financial institutions support H2 Green Steel's €3.5 billion debt financing, <https://www.h2greensteel.com/latestnews/leading-european-financial-institutions-support-h2-green-steels-35-billion-debt-financing> (2022, viitattu 24.11.2022).
- [61] Yara. Renewable hydrogen and ammonia production - YARA and ENGIE welcome a A\$42.5 million ARENA grant., <https://www.yara.com/news-and-media/news/archive/2021/renewable-hydrogen-and-ammonia-production-yara-and-engie-welcome-arena-grant/> (2022, viitattu 24.11.2022).