



## **VETYPELKISTETYN TERÄKSEN TUOTANTO HYBRIT-MENETELMÄLLÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2022

Miika Kurvi

Tarkastaja(t): Dosentti Arto Laari

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Miika Kurvi

### **Vetypelkistetyn teräksen tuotanto HYBRIT-menetelmällä**

Kemiantekniikan kandidaatintyö

34 sivua, 15 kuvaa, 0 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastaja(t): Dosentti Arto Laari

Avainsanat: HYBRIT, teräs, vety, hiilidioksidi, H-DR, vetypelkistys

Teräs on merkittävä materiaali rakennus ja konerakennusteollisuudessa. Nykypäivän ilmastotoimien vaikutus luo painetta myös teräksen tuotannossa. Tällä hetkellä teräs valmistetaan pelkistämällä rautarikastetta suurissa masuuneissa, joissa polttoaineena toimii hiili ja koksi. Pelkistysprosessissa rautaoksidi reagoi hiilen kanssa pelkistyen raudaksi, jolloin vapautuu hiilidioksidia. Prosessi vaatii valtavasti energiaa, joten myös syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat merkittävät, peräti 7 prosenttia koko maailman päästöistä. Tuotettua terästönä kohden päästöjä syntyy keskimäärin 2,1 tonnia. Teräksen tuotannon ennustetaan lähes tuplaantuvan vuoteen 2050 mennessä, joten uusia puhtaampia tuotantomenetelmiä tarvitaan.

Teräsyhtiö SSAB, energiayhtiö Vattenfall ja kaivosyritys LKAB aloittivat vuonna 2016 tutkimaan vaihtoehtoisia teräksentuotantomenetelmiä. Potentiaalia löytyi uudesta HYBRIT-tekniikasta, jossa perinteiset polttoaineet hiili ja koksi korvattaisiin vetykaasulla. Korvaavassa vetypelkistysmenetelmässä rautaoksidi pelkistyy vapaaksi raudaksi, jolloin sivutuotteena muodostuu vesihöyryä. Onnistuessaan tuotantomenetelmä laskisi teräksentuotannon hiilidioksidipäästöt lähes nolnaan, mikäli uusiutuvaa energiaa on käytettävissä.

HYBRIT-teräksen tuotantoa suunnitellessa ilmenee useita kysymyksiä tuotantolaitteistoon ja menetelmiin liittyen. Tässä työssä vertaillaan ja pohditaan kriittisesti HYBRIT-teräksen tuotannossa avautuvia vaihtoehtoja. Työssä etsitään tuotantokokonaisuus, joka on tehokkain sekä taloudellisesti, että ekologisesti.

## Sisällysluettelo

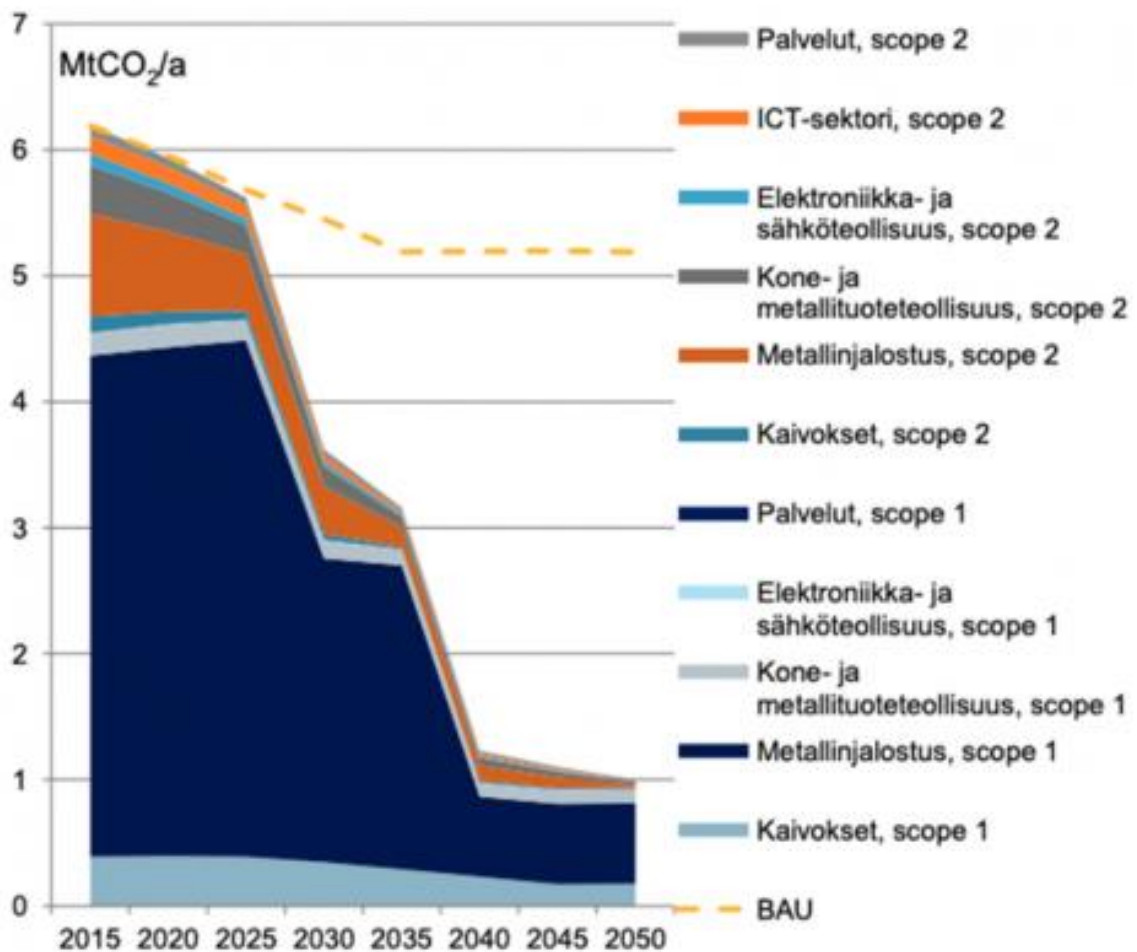
### Tiivistelmä

1	Johdanto.....	4
1.1	Työn tausta .....	4
1.2	Keskeiset tulokset.....	5
1.3	Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät.....	7
2	Muuttuva energiaintensiivinen teollisuus ja HYBRIT .....	8
2.1	Energiaintensiivinen teollisuus .....	8
2.2	Nykyisen prosessin muutos.....	9
3	HYBRIT integraation haasteet .....	11
3.1	Vedyn tuotanto elektrolyysillä .....	11
3.2	Vedyn varastointi .....	16
3.3	Energian kulutus ja hiilidioksidipäästöt.....	21
3.4	Kustannukset ja kannattavuus .....	25
4	Johtopäätökset .....	31
	Lähdeluettelo .....	33

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Teräs on merkittävä materiaali rakennus ja konerakennusteollisuudessa. Sen tuotanto kattaa noin 7 prosenttia koko maapallon vuotuisista hiilidioksidipäästöistä. Ilmastopöimukset, kuten vuoden 2015 Pariisin ilmastokokous sekä Euroopan komission Green Deal -ohjelma asettavat tavoitteita kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiselle. Pariisin sopimuksen pääta-voitteena on rajoittaa ilmastön lämpenemistä alle kahteen celsiusasteeseen ja etsiä menetelmiä, joilla rajoittaa lämpeneminen 1,5 celsiusasteeseen. (United Nations, 2015) Myös terästeollisuuden on pystyttävä vastaamaan muuttamalla tuotantomenetelmiään. Terästeollisuuden tulee käydä läpi kokonaisvaltainen muutos kuljetuksesta tuotantoon ja kierrättämiseen. Tällä hetkellä valtaosa terästuotannon päästöistä syntyy raakateräksen tuotannosta masu-  
neissa, joiden pääpolttoaineena toimii hiili. Raakateräksen kysyntä on jatkuvassa nousussa. Sen tarpeellisuus ei katoa minnekään tulevaisuuden vähäpäästöisessä yhteiskunnassa. Läpi-  
murrot päästöjen leikkaamiseksi raakateräksen tuotannossa ovat tarpeellisia. EU:n terästeol-  
lisuuden tavoitteena on leikata päästöt lähes nollaan vuoteen 2050 mennessä Pariisin ilmas-  
tosopimusta mukaillen. Kuva 1 havainnollistaa teräs- ja metalliteollisuuden päästöjen suu-  
ruutta Suomessa, sekä ennustaa päästöjen kehitystä tulevina vuosikymmeninä. (Metallinjalostajat, 2021)

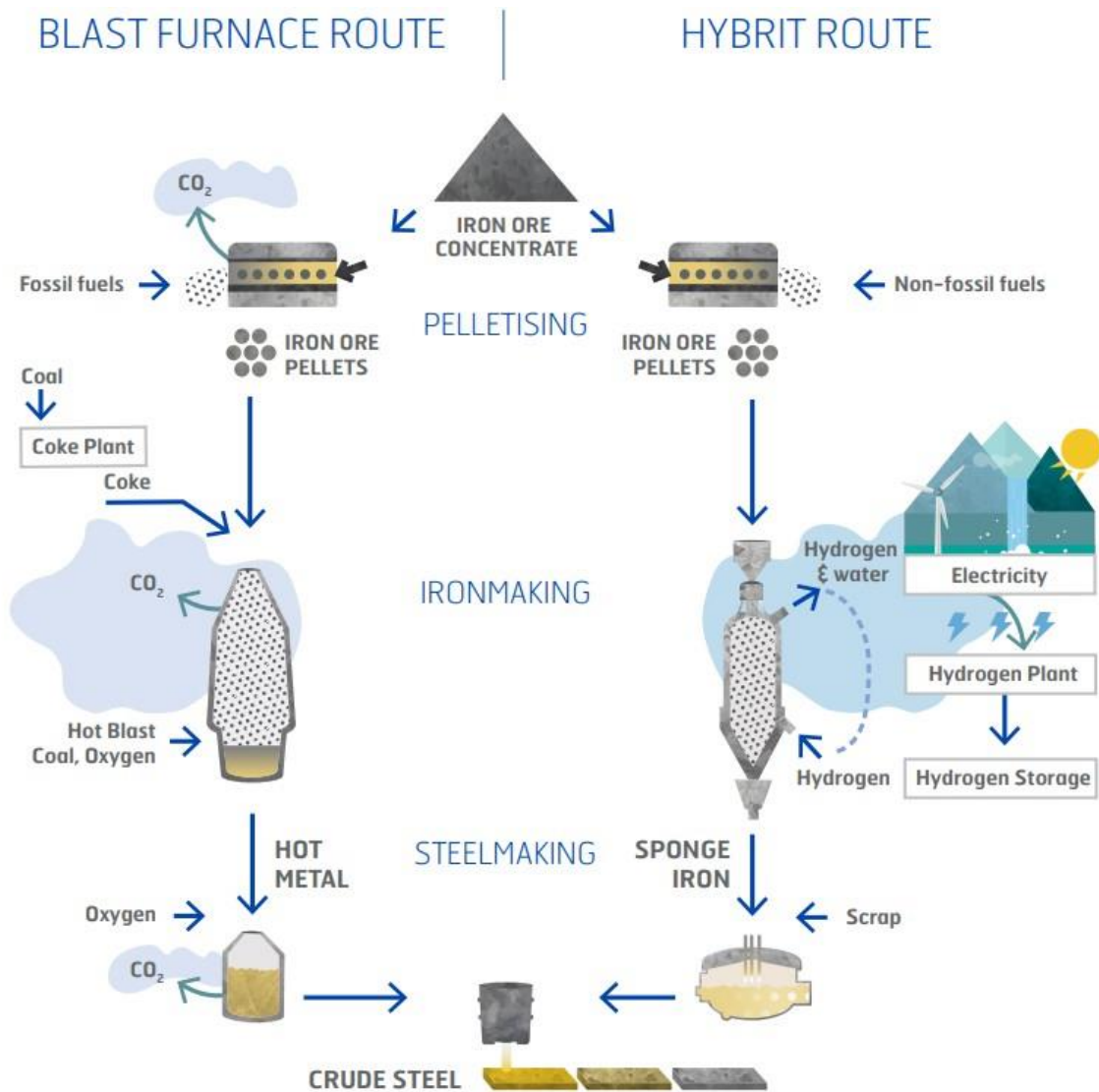


Kuva 1 Suomen teknologiateollisuuden kasvihuonepäästöt (Metallinjalostajat 2021) Scope 1 päästöillä tarkoitetaan päästöjä, joihin yritys toiminnallaan voi suoraan vaikuttaa. Scope 2 päästöillä tarkoitetaan epäsuoria päästöjä esimerkiksi sähkön ja lämmön tuotannosta aiheutuvia päästöjä.

## 1.2 Keskeiset kehityshankkeet

Teräsyhtiö SSAB, energiayhtiö Vattenfall ja kaivosyritys LKAB aloittivat vuonna 2016 puhtaampien teräksentuotantomenetelmien tutkimuksen. Potentiaalia löytyi menetelmästä, jossa käytössä olevat masuunit vaihdettaisiin akseliuuneihin ja valokaariuuneihin. Perinteiset polttoaineet hiili ja kooksi korvattaisiin vetykaasulla. HYBRIT eli Hydrogen Breakthrough Iron-making Technology-menetelmässä merkittävin sivutuote on vesihöyry. Uusi tuotantomenetelmä olisi lähes kokonaan fossiilivapaa, mikäli käytetty vety tuotetaan puhtaasti uusiutuvalla sähköllä. Vuonna 2018 suoritetussa esiselvityksessä ei löydetty minkäänlaisia

merkittäviä teknologisia esteitä HYBRIT-menetelmää vastaan. Suuri osa tarvittavasta teknologiasta on jo käytössä teollisissa prosesseissa. (HYBRIT, 2018) Myös tuotanto vaikuttaa kannattavalta.



Kuva 2 Vertailu perinteisen terästuotantolaitoksen ja HYBRIT-menetelmää käyttävän tuotantolaitoksen välillä. (HYBRIT, 2018)

Alustavien ennusteiden ja arvioiden mukaan HYBRIT-menetelmällä tuotettu teräs on vain 20-30 prosenttia kalliimpaa kuin fossiilinen teräs. Uusi menetelmä tarkoittaa kasvavaa sähkönkulutusta. Puhtaan sähkön tuotannon ongelmana on sen epävarmuus. Tuotetun sähkön määrä ailahtelee olosuhteiden mukaan. Onnistunut järjestelmä vedyn tuotantoon ja säilytykseen suuressa mittaluokassa lisää joustavuutta sähköntarpeeseen (HYBRIT, 2018).

### 1.3 Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät

Vetypelkistettyä terästä voidaan valmistaa lukuisilla eri tavoilla. Ei ole olemassa yksiselitteistä tietä puhtaamman teräksen valmistamiselle. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutustua tarkemmin teräksentuotantoa mullistavaan HYBRIT-teknologiaan tutkimalla sen tuomia vaatimuksia ja vaikutuksia teollisuudessa, sekä selvittää sen tämänhetkisiä suurimpia haasteita. Tutkimuksessa tutustutaan kattavasti HYBRIT-teräksen tuotannon vaatimiin muutoksiin energiankulutuksessa ja tuotannossa, raaka-aineen tuotannossa ja säilytyksessä sekä tarkastellaan muutoksen kustannuksia ja kannattavuutta. Tutkimuksen tavoitteena on löytää kannattavin kokonaisuus HYBRIT-teräksen tuotannolle.

Työn teoriaosuus suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka lähteinä toimivat tieteelliset artikkelit ja kirjallisuus.

## 2 Muuttuva energiaintensiivinen teollisuus ja HYBRIT

Kansainväliset ilmastopöimukset sitovat hyväksyneitä osapuolia miettimään toimintaansa ja kehittämään sitä puhtaampaan ja kestävämpään suuntaan. Vahvimmat muutoksen tuulet puhaltavat energiaintensiivisen teollisuuden sisällä. Energiaintensiivinen teollisuus tuottaa raaka-ainetta lähes kaiken muun teollisuuden käyttöön ja siten myös sen päästöt ovat merkittävät. Yksi esimerkki tällaisesta teollisuudesta on metallin jalostus. HYBRIT on Ruotsissa kehitteillä oleva puhtaan metallin jalostuksen muoto, joka pyrkii olemaan ratkaisu kansainvälisten ilmastopöimusten velvoittamalle muutokselle. (HYBRIT, 2018)

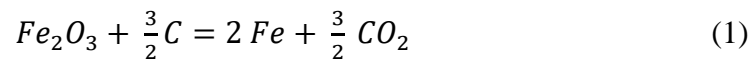
### 2.1 Energiaintensiivinen teollisuus

Kehitys uusiutuvan sähkön tuotannossa, sähköautoissa ja energian varastoinnissa on lupavaa. Näiden skaalaaminen maailmanlaajuisesti normiksi vuoteen 2050 – Pariisin sopimuksen tavoitevuoteen mennessä vaatii suurta muutosta. Sähkön tuotanto ja logistiikka yhdessä kattavat alle 40 % maailmanlaajuisista kasvihuonepäästöistä (IPCC 2014). Merkittäviä haasteita päästöjen vähentämiseksi löytyy myös muilta sektoreilta, eikä niistä vähäisin ole teollisuus. Teollisuuden päästöjen osuus on suuruusluokaltaan sama kuin sähkön tuotannon, mutta toimet niiden vähentämiseksi ovat saaneet huomattavasti vähemmän huomiota kuin vastaavat toimet sähkön tuotannolle (Åhman, Nilsson, Johansson, 2017). Valtaosa teollisuuden päästöistä on peräisin energiaintensiivisestä teollisuudesta kuten sementti-, polttoaine- ja metalliteollisuudesta. Edellä mainitut alat tuottavat välituotteita raaka-aineesta. Nämä prosessit omaavat suuren energiatarpeen, käyttävät fossiilista polttoainetta sekä raaka-aineena, että energiana ja tuottavat energiaan liittymättömiä päästöjä tuotantoprosessissa (Wesseling, Lechtenböhmer, Åhman, Nilsson, Worrell, Coenen, 2017a).



### 2.1.1 Terästeollisuus

Teräksen tuotanto kattaa kaikkein suurimman sektorin teollisuuden päästöistä ja on suuruudeltaan noin 7% maailmanlaajuisista kokonaispäästöistä (Pérez-Fortes, Moya, Vatopoulos, Tzimas, 2014). Malmiperäinen terästuotanto alkaa rautamalmikaivoksesta. Louhinnan jälkeen malmi prosessoidaan ja jalostetaan rautaoksidea runsaasti sisältäviksi pelleteiksi. Teräksentuotantolaitoksella pelletit pelkistetään koksilla masuunissa. Rautaoksidi ja hiili reagoivat masuunissa muodostaen hiilidioksidia, sekä metallista rautaa reaktion (1) mukaisesti.



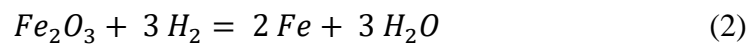
Nestemäisessä muodossa raakarautaa jatko käsitellään, ennen kuin puolivalmisteinen terästuote valetaan. Ruotsissa nykyteknologialla valmistettu terästonnin tuottaa hiilidioksidipäästöjä 1,6–1,7 tonnia. (HYBRIT, 2018) Teräs on keskeinen materiaali modernissa teollisessa yhteiskunnassa. Lisääntyvä teräksen käyttö on välttämätöntä infrastruktuurin laajentamiseksi ja kehittämiseksi sekä maailmanlaajuisen elinolosuhteiden parantamiseksi. Keskeinen haaste on löytää keino, jonka avulla terästä voidaan käyttää yhteiskunnan rakennusmateriaalina samaan aikaan välttäen sen tuotannosta aiheutuvia negatiivisia ympäristövaikutuksia.

### 2.2 Nykyisen prosessin muutos

Edullisen uusiutuvan energian saatavuuden kasvaessa sähköistämisen eri muodot nähdään yhä mielekkäämpinä vaihtoehtoina raskaan teollisuuden hiilidioksidipäästöjen leikkaamiseksi (Wesseling, Lechtenböhmer, Åhman, Nilsson, Worrell, Coenen, 2017b). Useita eri teknologisia ratkaisuja on ehdotettu terästeollisuuden edellä mainitun tavoitteen saavuttamiseksi (Abdul Quader, Ahmed, Dawal, Nukman, 2016). Esimerkki lupaavimpien teknologisten ratkaisujen joukossa on rautamalmin elektrolyysi eli niin kutsuttu ”electrowinning”. Tekniikka edellyttää sähköä käyttäen pelkistimenä samoin tavoin kuin alumiinin valmistuksessa alumiinioksidista. Tekniikka on kuitenkin vasta kehityksensä varhaisvaiheessa ja on toistaiseksi suoritettu ainoastaan laboratoriotasolla. (Fishedick, Marzinkowski, Winzer, Weigel, 2014)

HYBRIT-tekniikka luokitellaan kategoriaan konsepteista, jotka ovat huomattavasti lähempänä kaupallista käynnistämistä. Nämä konseptit perustuvat vedyn käyttöön pelkistimenä sekä sen tuotantoon uusiutuvalla sähköllä käyväällä elektrolyysillä. Ympäristön kannalta menetelmän tärkein vahvuus on päästöjen muuttuminen hiilidioksidista vedeksi, josta seuraa huomattava lasku kasvihuonepäästöissä. HYBRIT kuuluu useiden muiden aloitteiden joukkoon, jotka käyttävät vetypelkistys- ja valokaariuunin yhdistelmää. Tässä yhdistetään rautamalmin suorapelkistys vedyn avulla, jonka jälkeen rauta jatkojalostetaan teräkseksi valokaariuunissa (Ranzani da Costa, Wagner, Patisson, 2013); (Fischedick et al. , 2014).

Rautamalmin suorapelkistystä voidaan kuvata kaavalla (2).



Vetypelkistysprosessin tuotetta kutsutaan suorapelkistetyksi raudaksi (direct reduced iron, DRI) tai rautasieneksi, joka syötetään valokaariuuniin, sekoitetaan siellä tarvittavaan määrään rautaromua ja jatkojalostetaan teräkseksi. Vaikka tätä tiettyä yhdistelmää ei ole vielä otettu käyttöön kaupallisella skaalalla, useita sen yksittäisiä osia on laajalti käytössä terästeollisuudessa. Valokaariuuniin pohjautuva teräs kattaa nykyisin 30% maailman vuotuisesta terästuotannosta. Myös suorapelkistys on otettu laajalti käyttöön kattaen 7% maailman raudan tuotannosta ja on usein integroituna valokaariuunin kanssa. Vaikka puhdasta vetyä onkin käytetty pelkistimenä kaupallisella tasolla, nykyinen olemassa oleva suorapelkistetyn raudan tuotanto pohjautuu höyryreformoidun maakaasun käyttöön. Höyryreformoinnilla maakaasusta saadaan pelkistin, joka on hiilimonoksidin ja vedyn seos. Maakaasun hinnan ollessa ratkaisevassa asemassa tämän menetelmän taloudelliselle kannattavuudelle, suurin osa suorapelkistystä käyttävistä tehtaista sijaitsee runsaasti maakaasua sijaitsevilla alueilla. Menneet vuodet ovat osoittaneet Yhdysvaltalaisen suorapelkistystuotannon kasvua liuskekaasun nopean tuotannon kasvun seurauksena. Liuskekaasu on kalkki- ja liuskekiven huokosista porattavaa maakaasua.

Vaikka vetysuorapelkistys- ja valokaariuunin yhdistelmän useita komponentteja on testattu ja kehitelty teollisissa olosuhteissa, pääongelmat pysyvät yhä läsnä. Haasteet liittyvät prosessin integraatioon, tuotelaatuun, vetyinfrastruktuurin (tuotanto ja säilytys) skaalaukseen ylöspäin ja kokonaisuuden integrointiin uusiutuvaan sähköön perustuvaan energiaverkkoon. Kappaleessa 3 tutustutaan haasteisiin yksityiskohtaisemmin.

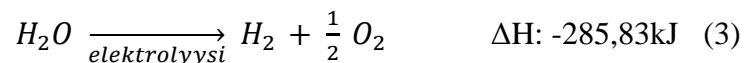
### 3 HYBRIT integraation haasteet

Vaikka HYBRIT kuulostaakin paperilla lupaavalta, ei sen käyttöönotto ole aivan niin yksiselitteistä. Tässä kappaleessa käydään läpi vetypelkistetyn teräksen suurimmat haasteet, jotka yritykset, kuten HYBRIT:n kehittäjä SSAB joutuvat ylittämään, mikäli tekniikka halutaan ottaa kaupallisella tasolla käyttöön. Parhaan kannattavuuden saavuttamiseksi on tärkeää löytää paras kokonaisuus, jonka pohjalta teräksen tuotannon uusi vaihe voidaan aloittaa.

#### 3.1 Vedyn tuotanto elektrolyysillä

Veden elektrolyysi kehiteltiin viime vuosisadalla pääasiallisesti vedyn tuotantoa varten. Sähköenergiaa hyödyntäen, vesimolekyylit voidaan halkaista vedyksi ja hapeksi. Samalla sähköinen energia muuttuu kemialliseksi energiaksi. HYBRIT-teräksen tärkeintä polttoainetta, vetyä tulee kulumaan tehdasmittakaavan tuotannossa valtavia määriä. Vetyä, joka on tuotettu veden elektrolyysillä käytetään rautamalmipellettien pelkistämiseen akseliuunissa fossiilitonta energiaa käyttäen. Akseliuuni on lieriömäinen uuni, jota perinteisessä raudan pelkistysmenetelmässä kutsutaan masuuniksi.

Kokonaisreaktio veden sähkökemialliselle erottamiselle vedyksi ja hapeksi sähkö- ja lämpöenergian läsnä ollessa on esitetty kaavassa (3)



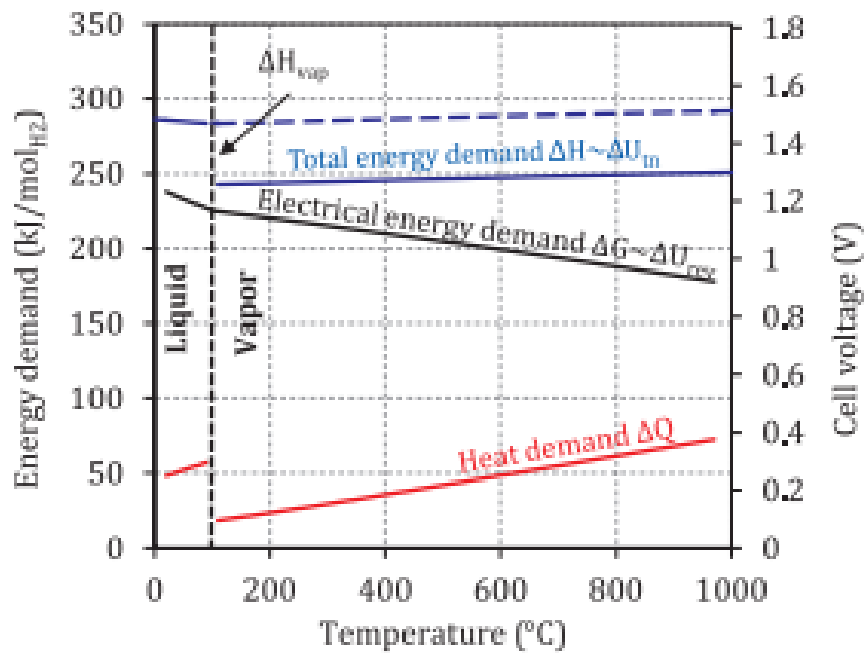
Kaavasta (3) huomataan, että elektrolyysireaktiossa happea syntyy puolet vedyn määrästä. Reaktioentalpia  $\Delta H$  kertoo reaktion kokonaisenergiantarpeen, joka puolestaan kertoo elektrolyysilaitteiston tarvitseman sähköenergian määrän. Todellisuudessa reaktiossa syntyy kuitenkin lämpöhäviöitä, joten myös kokonaisenergiantarve on suurempi.

Kuvasta (3) Havaitaan, että reaktion reaktioentalpia muuttuu vain vähän reaktiolämpötilan muuttuessa (lämpötilaväli 0-1000°C). Lämpötilan kohotessa myös lämpöenergia kasvaa.

Tämä pienentää Gibbsin energian muutokseen tarvittavan sähköenergian määrää. Paremman reaktiokinetiikan lisäksi sisäisten lämpöhäviöiden hyödyntäminen on suuri motivaattori ylläpitää elektrolyysireaktiota korkeassa lämpötilassa. Elektrolyysireaktion teoreettinen minimikennojännite eli reversiibeli kennojännite  $U_{rev}$  on määritelty tarpeellisen ulkoisen lämpöenergian osuudella kokonaislämmöntarpeesta  $\Delta Q$ . Minimikennojännite on suoraan verrannollinen muutokseen Gibbsin vapaassa energiassa  $\Delta G$ . Minimikennojännitteellä tarkoitetaan pienintä tarvittavaa jännitettä veden erottamiseksi vedyksi ja hapeksi. Ilmiötä voidaan havainnollistaa kaavalla (4)

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad (4)$$

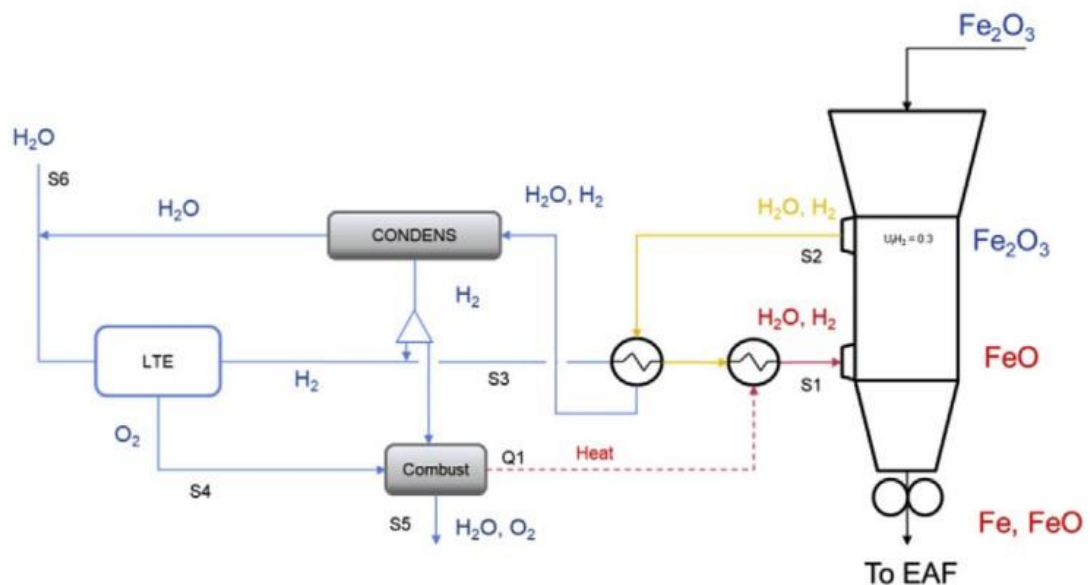
missä  $z$  on siirrettyjen elektronien lukumäärä reaktiota kohden ja  $F$  on Faradayn vakio (96 485 C/mol). (Buttler, Spliethoff, 2018)



Kuva 3 Kokonaisenergian ( $\Delta H$ ), lämpöenergian ( $\Delta Q$ ) ja sähköisen energian ( $\Delta G$ ) tarpeet ideaalisessa elektrolyysiprosessissa lämpötilan funktiona kuvattuna. (Buttler, Spliethoff, 2018)

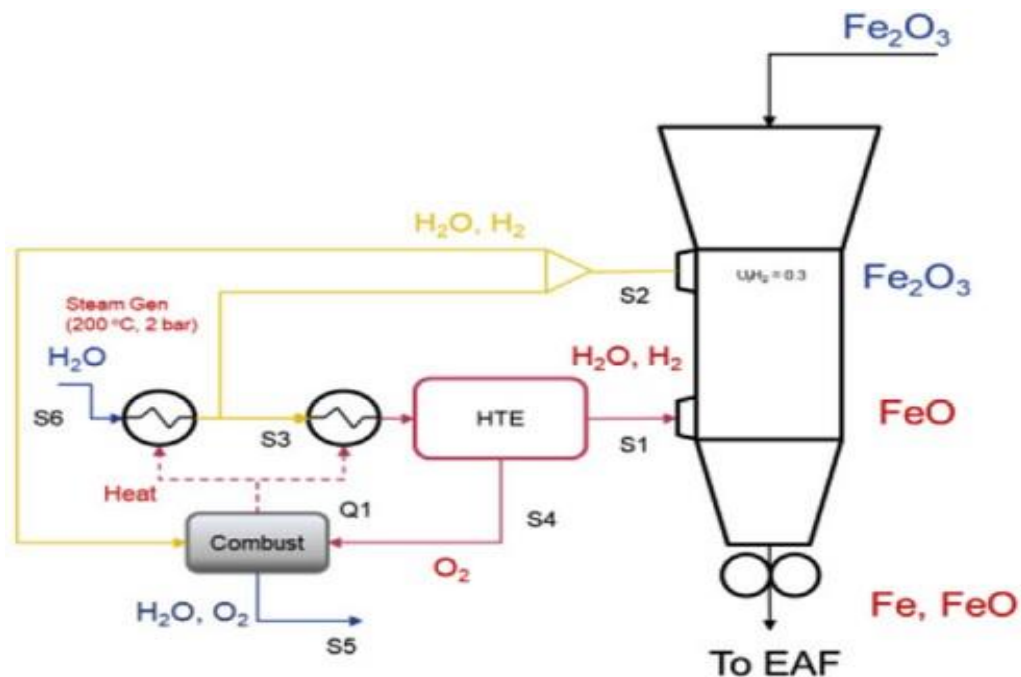
Kuten yllä mainittiin, elektrolyysireaktiossa tarvittava sähköenergian määrä riippuu reaktiolämpötilasta. Alhaisen lämpötilan elektrolyysi on tänä päivänä tutkitumpi ja luotettavampi menetelmä kuin korkean lämpötilan elektrolyysi, joka suoritetaan noin 700-1000:ssa

celsiusasteessa käyttäen höyryä lämmityksessä. Alhaisen lämpötilan elektrolyysin sähkönkulutus on noin 50-60 kWh/kg vetyä. Tulos perustuu nykyiseen tilastodataan ja tulevaisuuden ennusteisiin. Korkean lämpötilan elektrolyysillä sähkönkulutus ennustetaan olevan noin 37 kWh/kg vetyä, mikäli höyryä on saatavilla. Veden höyrystyminen on energiaintensiivinen prosessi veden korkean höyrystymisentalpian takia ( $\Delta H^\circ = 40,6 \text{ kJ/mol}$ ). Mikäli korkean lämpötilan elektrolyysistä halutaan tehdä kannattavaa, höyryä tulisi olla valmiiksi saatavilla. Suorapelkistysprosessissa syntyvän huippukaasun höyryosuutta voitaisiin mahdollisesti käyttää tähän tarkoitukseen. (Krüger, Andersson, Grönkvist, Cornell, 2020) Korkean lämpötilan elektrolyysin ongelmana on myös sen laitteiston nopea rapautuminen. Korkea toimintalämpötila lyhentää laitteiston elinikää huomattavasti. Kuvat (4) ja (5) havainnollistavat, kuinka molempien lämpötilojen elektrolyysit voitaisiin integroida rautamalmin pelkistysprosessiin. molemmissa tapauksissa vetykaasu  $H_2$  ohjataan akseliuuniin 900 celsiusasteen lämpötilassa. Alhaisen lämpötilan tapauksessa vetykaasu esilämmitetään lämmönvaihdolla huippukaasun kanssa tai sähköisellä lämmittämällä.



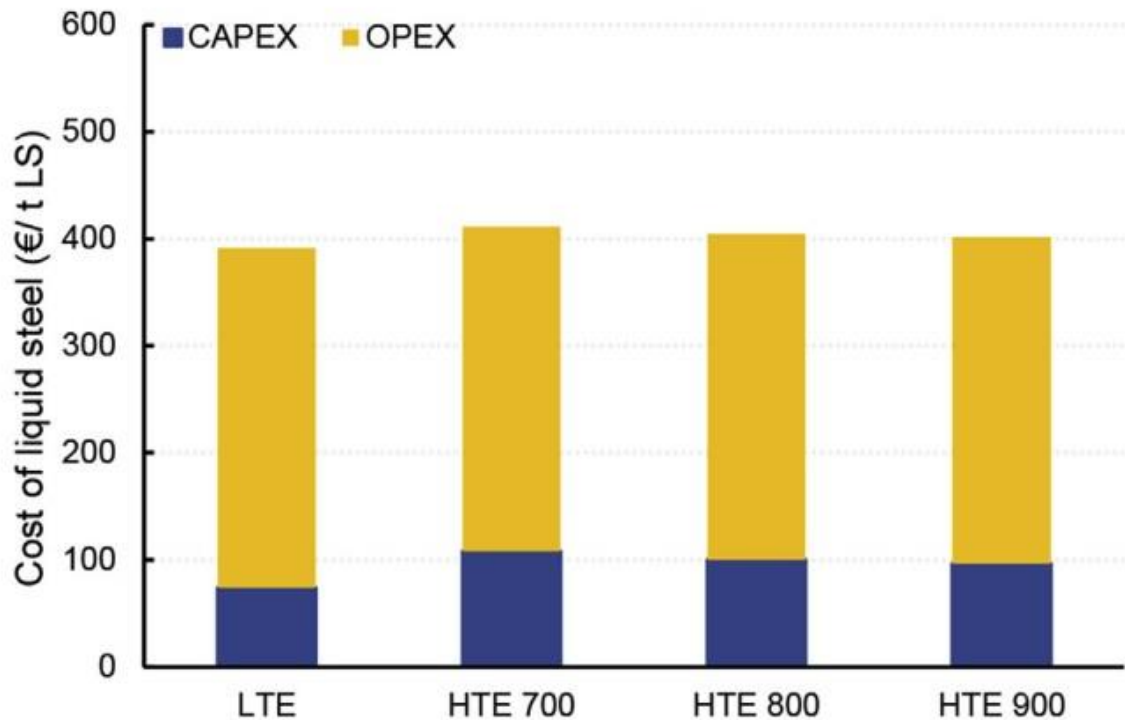
Kuva 4 Alhaisen lämpötilan elektrolyysilaitteiston ja akseliuunin toimintaperiaate. (Krüger et al. , 2020)

Korkean lämpötilan tapauksessa huippukaasua ei käytetä vetykaasun esilämmittämiseen, vaan suurin osa siitä ohjataan suoraan elektrolyysiyksikköön. (Krüger et al. , 2020)



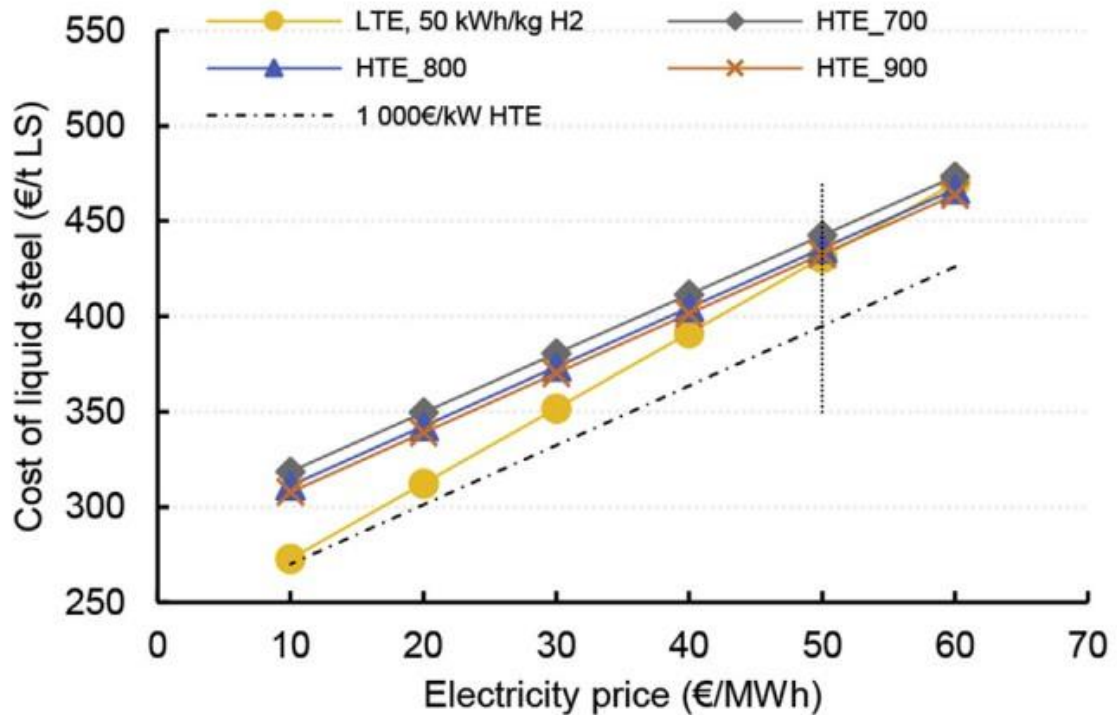
Kuva 5 Korkean lämpötilan elektrolyysilaitteiston ja akseliuunin toimintaperiaate. (Krüger et al. , 2020)

HYBRIT teräksen valmistuskustannukset ovat voimakkaasti riippuvaisia sähkön hinnasta. Tutkimusten mukaan energiakustannukset kattavat 32 prosenttia koko tuotantokustannuksista, kun sähkön hinta on 40 EUR/MWh. Vastaava lukema on 47 prosenttia, kun sähkön hinta tuplaantuu eli hinnan ollessa 80 EUR/MWh. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018a) Sähkön hinta on iso tekijä sekä matalan-, että korkean lämpötilan elektrolyyseissä. Kuvasta (6) voidaan havaita teräksen tuotantokustannusten olevan samankaltaisia matalan lämpötilan sekä korkean lämpötilan elektrolyysien tapauksissa. Merkittävin ero kustannuksissa muodostuu investointivaiheessa. Korkean lämpötilan elektrolyysilaitteisto vaatii suurempia investointeja, mutta on halvempi operoida verrattuna matalan lämpötilan elektrolyysiin.



Kuva 6 CAPEX eli investointikustannukset ja OPEX eli operointikustannukset. LTE (Low Temperature Electrolysis) tarkoittaa alhaisen lämpötilan elektroyysiä. HTE (High Temperature Electrolysis) tarkoittaa korkean lämpötilan elektroyysiä. Numeroarvot kuvaavat lämpötilaa celsiusasteikolla. (Krüger et al., 2020)

Koska sähkön hinnalla on suuri vaikutus HYBRIT-teräksen tuotannon kannattavuuteen, on syytä vertailla sen hinnan vaikutusta eri elektroyysimenetelmien kustannustehokkuuteen. Kuvassa (7) vertaillaan edellä mainittuja elektroyysimenetelmiä ja niiden kustannustehokkuutta sähkön eri markkinahinnoilla. Kuvasta (7) voidaan havaita, että korkean lämpötilan elektroyysi on vain marginaalisesti halvempi vaihtoehto, kun sähkön hinta ylittää 50 EUR/MWh. Matalan lämpötilan elektroyysi on siis halvempi vaihtoehto, kun sähkö on halvempaa. Kuvassa harmaalla katkoviivalla on esitetty myös teoreettinen kustannuslaskelma korkean lämpötilan (900°C) elektroyysilaitteistolle, jonka investointikustannukset on laskettu puoleen todellisesta määrästä. Voidaan siis todeta, että mikäli korkean lämpötilan elektroyysikennon valmistus- ja operointikustannukset saadaan tutkimuksen myötä kuriin, on se selkeästi halvin vaihtoehto. (Krüger et al., 2020)



Kuva 7 Elektrolyysilaitteistojen hintavertailua sähkön hinnan suhteen. LTE (Low Temperature Electrolysis) tarkoittaa alhaisen lämpötilan elektrolyysiä. HTE (High Temperature Electrolysis) tarkoittaa korkean lämpötilan elektrolyysiä. Numeroarvot kuvaavat lämpötilaa celsiusasteikolla. Harmaa katkoviiva kuvaa korkean lämpötilan elektrolyysiä lämpötilassa 900°C, kun investointikustannukset ovat 50% todellisuudesta. (Krüger et al., 2020)

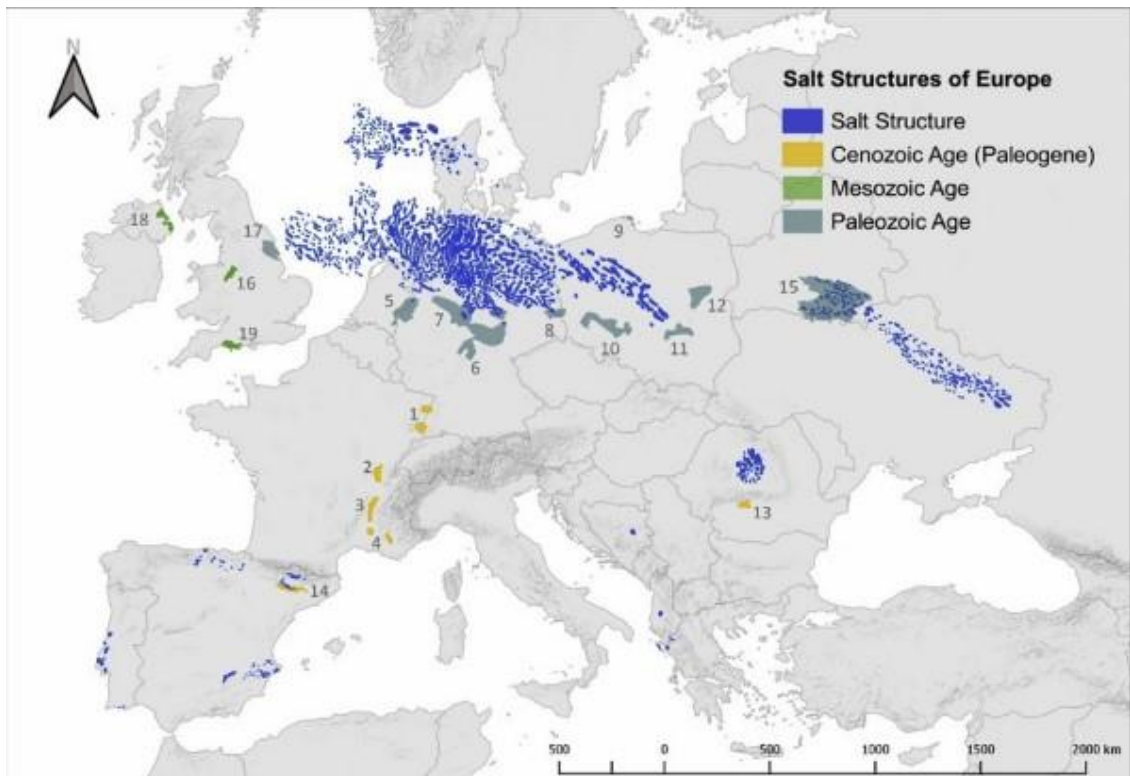
Tänä päivänä halvin vaihtoehto HYBRIT-teräksen tuotantoon on siis matalan lämpötilan elektrolyysillä tuotetun vedyn käyttäminen pelkistysreaktiossa. Sähkön hinnan vaihtelu ei tee tuotantokustannuksista yksiselitteisiä, mutta tuottamalla vetyä ylimäärin varastoon sähkön ollessa halpaa, voidaan kustannusten heittäilyä hallita. Tarvitaan siis edistyneitä vedyn varastointimenetelmiä.

### 3.2 Vedyn varastointi

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, vedyn tuotanto elektrolyysillä on energiantensiivinen prosessi. Yhtä HYBRIT-menetelmän suurimmista kustannuseristä, sähkönkulutusta, voidaan optimoida elektrolyysillä tuotetun vedyn varastoinnin keinoin. Mikäli vetyä voidaan luotettavasti ja tehokkaasti varastoida, voidaan sitä tuottaa ylimäärin sähkön hinnan ollessa

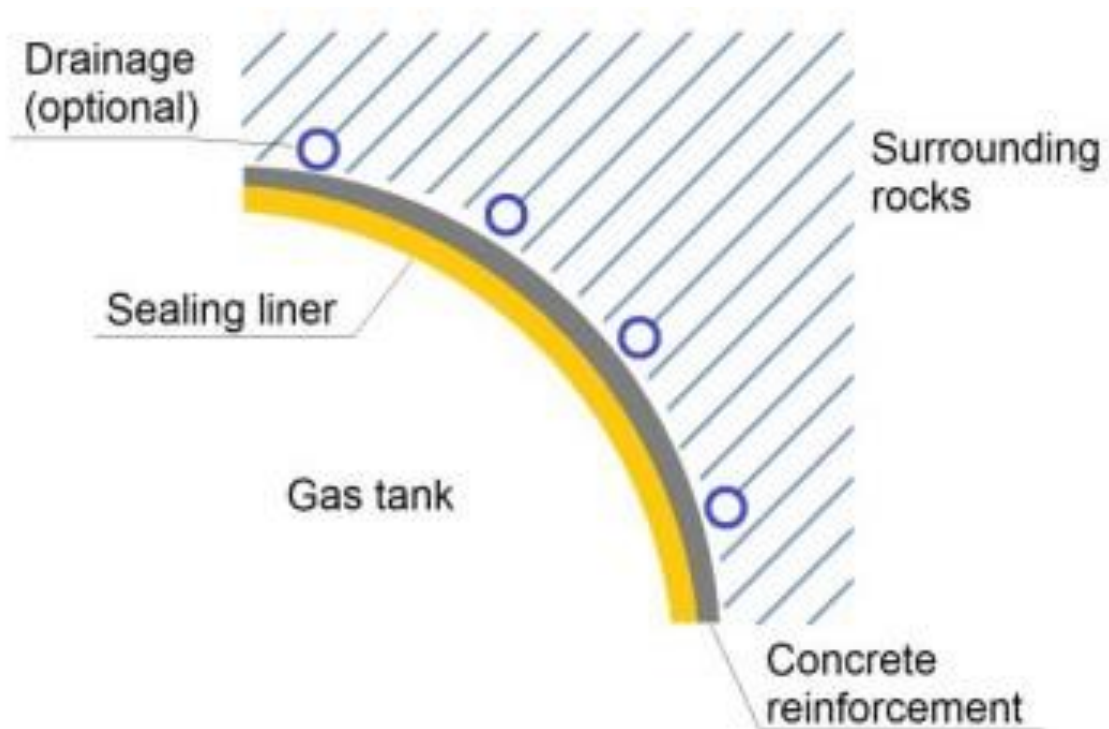


halpaa. Jotta investoiminen vedyn varastointiin osana raudan pelkistämisen prosessia olisi kannattavaa, täytyy sähkön hinnan vaihtelusta aiheutuvat säästöt olla suurempia kuin varastointilaitteistoon ohjatut investoinnit ja sen operoimisen kulut. Lisäksi ideaalisen vedyn varastointilaitteiston tulisi olla dynaaminen ja helppokäyttöinen. Mahdollisuus vastata nopeasti sähkön hinnan muutoksiin varastointi- ja tyhjennystilan välillä on tärkeää (Andersson, 2021). Vedyn varastointi on haastavaa sen alhaisen tiheyden ja korkean reaktiivisuutensa vuoksi. Suuren mittakaavan vetyvarastoja on tänä päivänä vain muutamia. Näistä kaikki ovat suuria keinotekoisesti louhittuja taskuja luonnollisesti esiintyvissä suolamuodostumissa. Suolataskut täytetään paineistetulla (n. 230 bar) vetykaasulla (Andersson, 2021). Näitä niin kutsuttuja suolaluolia pidetään parhaana ratkaisuna suuren mittakaavan vedynsäilytykselle kokonaiskustannusten suhteen. Suolaluolien edullisuus perustuu pääasiassa alhaisiin rakentamiskustannuksiin liuotuksen kautta sekä suolaseinämien alhaiseen läpäisevyyteen. HYBRIT-hankkeen kannalta ongelmaksi koituu suolaluolavarastoinnin paikallisuus. Alla kuvassa (8) on esitettyä Euroopan suolaesiintymiä ja rakennelmia. HYBRIT on pääasiallisesti ruotsalais-suomalainen hanke, eikä kummastakaan maasta löydy vedyn varastoinnille potentiaalisia esiintymiä (Caglayan, Weber, Heinrichs, Linßen, Robinius, Kukla, Stolten, 2020). Suolaesiintymien puutteessa on löydettävä muunlaisia vetyvarastointimenetelmiä, mikäli tekniikkaa halutaan HYBRIT-hankkeessa hyödyntää.



Kuva 8 Maanalaisen vetyvarastoinnin toimivuuskartoituksen kautta löydetty eurooppalaiset suolaesiintymät ja rakennelmat. (Caglayan, Weber, Heinrichs, Linßen, Robinius, Kukla, Stolten, 2020)

Luonnollisten suolaesiintymien puutteessa hyvä vaihtoehto vedyn varastointiin on vuoratut kallioluolat (Lined Rock Caverns (LRC)). Menetelmän toimivuus on jo todistettu maakaasun säilytyksessä. Sopivalla pinnoitteella sitä voidaan hyödyntää myös vedyn säilytyksessä. Vuoratut kallioluolat toimivat seuraavasti: Kallioperään porataan luola, joka on täysin eristyksissä ulkoisesta ympäristöstä. Kallioperällä ei siis tarvitse olla eristäviä vaikutuksia kuten suolaluolilla. Tämä mahdollistaa menetelmän hyödyntämisen lähes missä tahansa. Porattu luola vahvistetaan ruiskubetonilla ja siihen asennetaan vielä tarvittavat viemäröinnit. Viimeiseksi luolaan lisätään eristävä kerros, joka toimii samoin kuten suolaluolien suolakeros (Gajda, Marcin Lutyński, 2021).



Kuva 9 Vuoratun kallioluolan seinämärakenne. Porattuun kallioluolaan ruiskutetaan betonia, josta ulkoinen kerros muodostuu. Sisempi kerros on vetyä eristävä kerros, joka jäljittelee luonnollisten suolaluolien rakennetta. (Gajda, Marcin Lutyński, 2021).

Eristekerroksen materiaalivalinta on tärkeä. Yleisin eristemateriaali on teräs. Teräskerroksen tarkoitus on varmistaa absoluuttinen läpäisemättömyys varastoitavalle kaasulle. Teräskerroksessa ei saa olla ollenkaan halkeamia. Sen sijaan betonikerroksen tehtävänä on toimia varastoitavan kaasun paineen tasaisena levityspintana ympäröivään kallioperään sekä toimia tasaisena pintana teräskerrokselle. Tästä syystä pienet halkeamat betonikerroksessa ovat sallittuja, mikäli ne pysyvät tapauskohtaisten toleranssien rajoissa (Park, Kim, Ryu, Choi, Han, 2013). Vuorattujen kallioluolien rakentaminen ja ylläpitäminen on työläämpää, kuin suolaluolien, kuitenkin se on yksi parhaimmista vaihtoehdoista HYBRIT-hanketta varten. Kumpaakin luolavarastointimenetelmää rajoittaa vedyn mekaaninen poistonopeus säiliöstä. Molemmissa tapauksissa poistonopeus liikkuu alueella 6-15% maksimisäilytyskapasiteetista per päivä (Andersson, 2021). Edellä mainittujen menetelmien rajoitteet kannustavat tutki-  
maan muunlaisia vedynvarastointimenetelmiä. Yksi vaihtoehdoista perustuu nestemäisiin vedynkantajiin.

Saattamalla vety reagoimaan kemiallisesti ulkoisen aineen kanssa, on mahdollista muodostaa niin kutsuttuja nestemäisiä vedyn kantajia. Vedyn korkean reaktiivisuuden vuoksi nämä hydrausreaktiot ovat yleensä eksotermisiä eli lämpöä vapauttavia. Nestemäisten kantajien etuna on mahdollisuus säilyttää vetyä suuremman tiheyden omaavassa nestemäisessä muodossa mahdollistaen vähemmän tilaa vievän säilytyksen ja alhaisemmat kuljetuskustannukset. Kun vetyä tarvitaan, nestemäiset kuljettimet dehydrataan termokemiallisissa endotermisissä prosesseissa. Muodostuu vetyä ja sivutuotetta riippuen mitä kuljetinta käytetään. Nestemäisten kuljettimien alhaiset säilytys- ja kuljetuskustannukset avaavat mahdollisuuksia, jotka eivät olisi yhtä yksinkertaisia toteuttaa kaasumaisen säilytyksen tapauksissa (Andersson , 2021). Muutamia esimerkkejä tästä ovat:

- Nestemäisen vedyn kantajan tuonti ja vienti terästehtaan alueella on yksinkertaista.
- Vedyn varastointilaitteistojen sijainti on maantieteellisesti vähemmän rajoittunutta.
- Menetelmä mahdollistaa erittäin suuren mittakaavan varastoinnin. Esimerkiksi sähkönhinnan vuodenaajallisiin muutoksiin voidaan varautua.

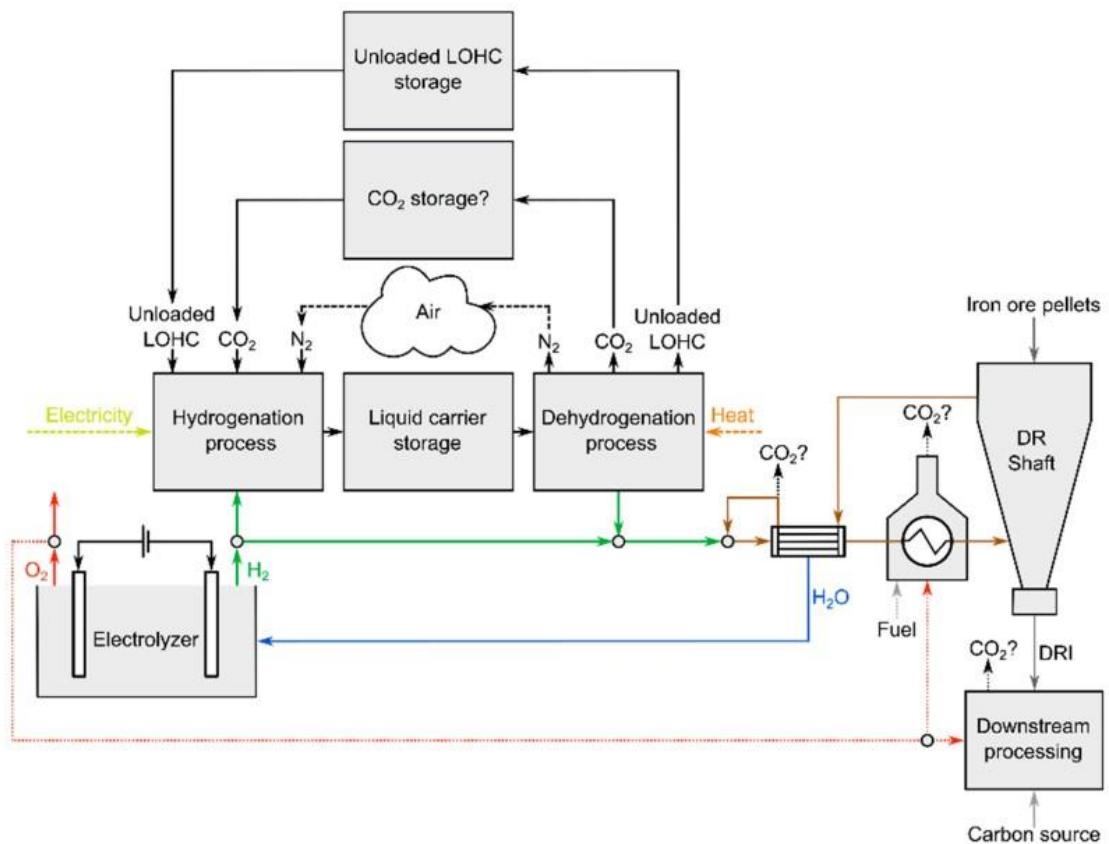
Suurimmat esteet nestemäisten vedyn kantajien käytölle ovat:

- Dehydrausvaiheen korkea lämmöntarve.
- Suuret investointikulut tarvittaville hydraus- ja dehydrauslaitteistoille.
- Hydrausvaiheessa vetykaasun täytyy olla paineistettua. Seurauksena runsas sähköntarve.

Vaikka kaikki nestemäiset kantajat jakavat yllä olevat hyödyt ja haasteet, on silti monta eri vaihtoehtoa juuri sopivaksi kantajaksi HYBRIT-hankkeen tarpeisiin. Kolme eniten tutkittua kantajaa kuitenkin tiedetään, jotka voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan seuraavasti: (Andersson , 2021)

- (1) Kantajat, jotka perustuvat reaktioon vedyn ja hiilidioksidin välillä.
- (2) Kantajat, jotka perustuvat reaktioon vedyn ja typen välillä.
- (3) Kantajat, jotka perustuvat reaktioon vedyn ja tyydyttymättömien nestemäisten hiilivetyjen välillä.

Nykyteknologiaan perustuen, jokainen näistä kantajatyypeistä toimisi suuren mittakaavan vetyvarastoinnissa HYBRIT-hanketta ajatellen (Andersson , 2021). Kunkin kantajatyypin integraatio HYBRIT-teräksen tuotantolaitteistoon on kuvattuna alla kuvassa (10).

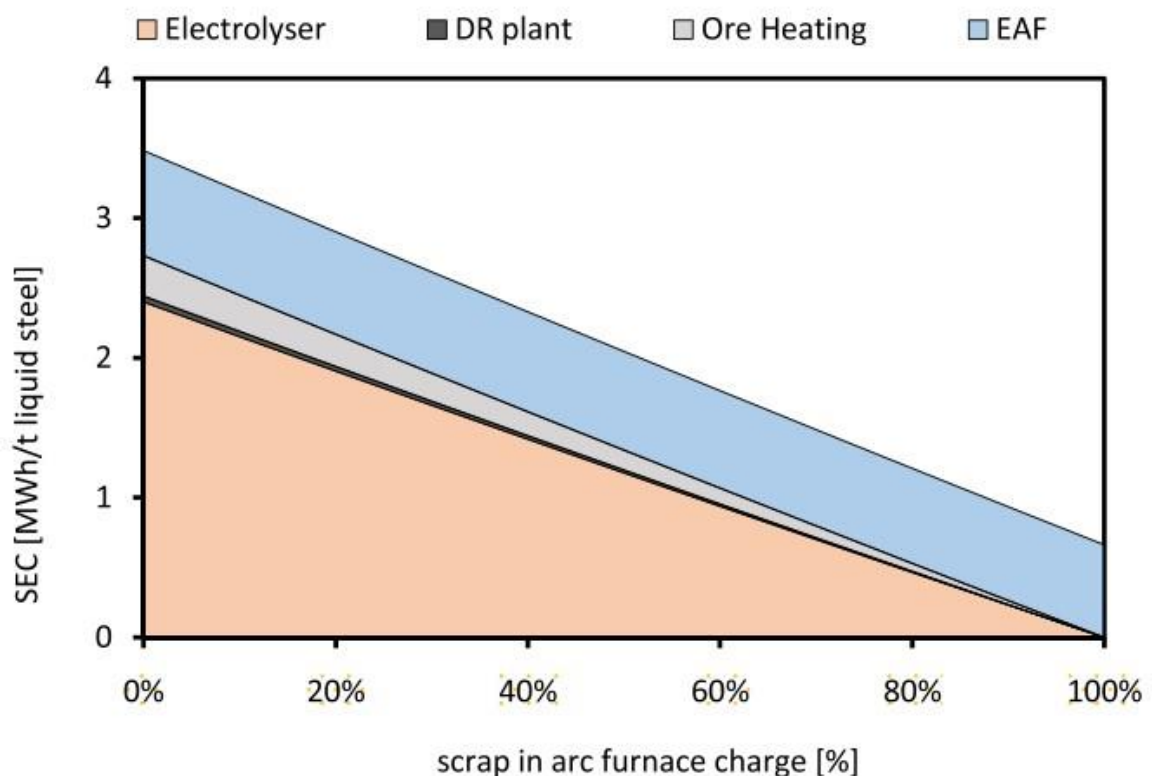


Kuva 10 Kuvaus kolmen merkittävimmän nestemäisen vedyn kantajan integroinnista HYBRIT- teräksen pelkistyslaitteistoon. (Andersson, 2021)

### 3.3 Energian kulutus ja hiilidioksidipäästöt

Laskelmien mukaan vetypelkistetyin terästonnin ominaisenergiankulutus on noin 3,48 MWh. Sulatusmasuuni verrattavan systeemin rajoissa kuluttaa 3,69 MWh energiaa terästonnia kohden pääasiallisesti hiilen ja koksen muodossa (Otto, Robinius, Grube, Schiebahn, Praktijnjo, Stolten, 2017). Elektrolyysikemno kuluttaa edellä mainitusta arvosta kaksi kolmasosaa. Valokaariuuni sekä malmin kuumennus kuluttavat valtaosan jäljelle jäävästä energiasta. Pelkistyksessä käytettävä akseliuuni kuluttaa energiaa verrattain vähän. Tämä voidaan selittää vedyn lauhduttimesta talteen otetun hukkalämmön hyödyntämisen avulla. Mikäli Ruotsin nykyinen hiileen perustuva terästuotanto (3,10 Mt/y) korvattaisiin vetypelkistys metodilla, kasvaisi sähköntarve huomattavalla tasolla. Ruotsin nykyinen terästuotanto kuluttaa energiaa noin 11,4 TWh. Vuotuinen uusiutuvan energiantarve kasvaisi noin 15 TWh (Vogl,

Åhman, Nilsson, 2018b) (HYBRIT, 2018). Samaan aikaan fossiilisen polttoaineen käyttö laskisi 41,2 PJ/y. Edellä mainituissa lukemissa on otettu huomioon ainoastaan raudan- ja teräksentuotanto. Siinä ei ole huomioitu pelletointiprosessissa sekä jatkojalostuksessa kuluvaa energiaa. Alla kuvassa (11) on esitettyä vetyterästuotannon eri vaiheiden osuudet ominaissähkönkulutukseen valokaariuuniin syötetyn rautaromun funktiona. Rautaromua syntyy malmin pelkistysvaiheessa sivutuotteena ja sen koostumus on 95% rautaa ja 5% inerttiä ainesta.

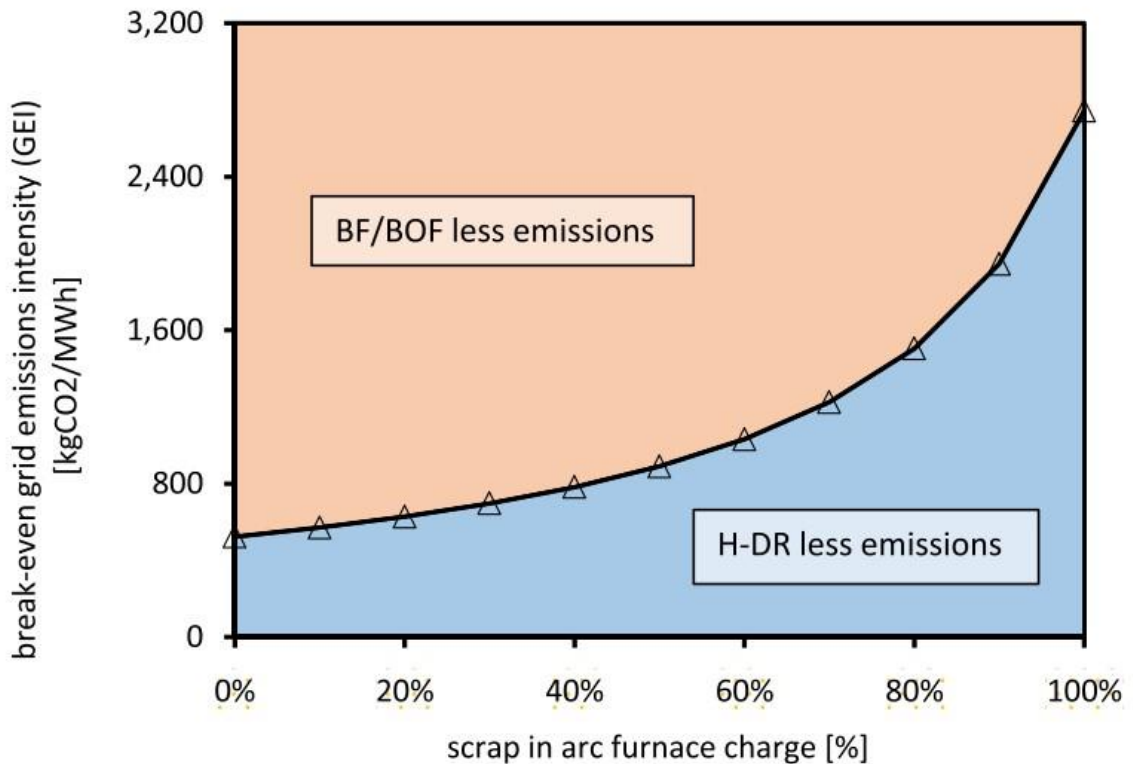


Kuva 11 Vetypelkistetyn raudan ominaisenergian kulutus valokaariuuniin syötetyn romun funktiona [MWh/tLS] Kulutus on jaettu tuotantoprosessin osiin, jossa DR plant on akseliuuni, Ore Heating tarkoittaa malmin esilämmitystä ja EAF tarkoittaa valokaariuunia. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018b)

Kuvasta (11) voidaan havaita ominaisenergian kulutuksen olevan vahvasti riippuvainen valokaariuuniin syötetyn rautaromun määrästä. Pääsyy ilmiölle on se, että mitä enemmän rautaromua syötetään, sen vähemmän rautamalmia tarvitaan, mikä johtaa alhaisempaan energian kulutukseen kaikissa vaiheissa ennen valokaariuunia. Kuvaajasta voimme tulkita, että jos valokaariuuniin syötetään noin 50% romua, elektrolyysikennon sähkönkulutus puoliintuu. Lisäksi teräksen tuotanto rautaromusta vaatii vähemmän energiaa (0,667 MWh/tLS) kuin valmistus puhtaasta pelkistetystä raudasta (0,753 MWh/tLS) (Vogl et al. , 2018).

Ominais sähkökulutukseen vaikuttaa myös useat muut prosessin tekijät. Akseliuunissa sää-  
vutettu metallin saanto vaikuttaa ominais sähkökulutukseen. Kun alhainen kuumabrike-  
toidun raudan saannon taso johtaa energiakulutuksen kasvuun valokaariuunissa, vähentää se  
kuitenkin kokonais sähkökulutusta. Tämä on seurausta alhaisemmasta vedyn tarpeesta pel-  
kistysreaktiossa ja sitä kautta elektrolyysikennon energiantarve on pienempi. Ominais säh-  
kökulutus riippuu myös syötetyn vetykaasun määrästä akseliuunissa. Oletetaan että  $\lambda$  on  
akseliuuniin syötetyn vedyn määrän ja kaiken rautamalmin pelkistämiseen tarvittavan vedyn  
määrän suhde. Herkkyysanalyysien mukaan ominais sähkökulutus kasvaa 41,0 kWh/tLS  
mikäli  $\lambda$  kasvaa yhdellä yksiköllä. Herkkyysanalyysin mukaan arvoon  $\lambda = 5$  asti lämpö voi-  
daan kierrättää. Kun  $\lambda = 6$  lämpöä ei voida enää kierrättää ja se lämmittää ainoastaan akse-  
liuunia. Ylimääräistä lämmitystä akseliuuniin syötetylle vedylle tarvitaan tästä huolimatta,  
joten alhaisten  $\lambda$ :n arvojen voidaan todeta johtavan alhaiseen energiakulutukseen. Lisäksi  
jäähdyntynyt kuumabriketoitu rauta kuluttaa 159 kWh/tLS enemmän energiaa kuin rauta, joka  
on syötetty kuumana suoraan valokaariuuniin. Valokaariuunista tuotteet poistuvat kuumina.  
Energiatehokkuutta voidaan parantaa mikäli tuotteiden lämpöenergia voidaan ottaa talteen  
ja hyödyntää jatkojalostuksessa (Vogl et al. , 2018).

Vetytelkistysmenetelmän kautta raudanjalostusprosessin voidaan olettaa täysin sähköis-  
tetty. Tällöin prosessin kokonaispäästöt ovat pääasiallisesti sitoutuneita sähköverkkoon. Pu-  
hutaan sähköverkon päästöintensiteetistä. Uusiutuvan energian käytöllä on siis valtava vai-  
kutuksen vetytelkistetyn teräksen kokonaispäästöihin. Vetytelkistysmenetelmän ja perinteisen  
teräksentuotantomenetelmän päästöjä voidaan vertailla niin sanotun sähköverkon nollatulos  
päästöintensiteetin avulla. Se on määritelty sähköverkon päästöinä (kgCO<sub>2</sub>/MWh), jotka joh-  
taisivat samansuuruisiin kokonaispäästöihin tuotantomenetelmien välillä (1870 kg  
CO<sub>2</sub>/tLS). Alla kuvassa (12) esitetään sähköverkon päästöjen nollatulosintensiteetti valokaa-  
riuuniin syötetyn rautaromun osuuden funktiona. Kuvaajasta voidaan havaita, että kun rau-  
taromua ei syötetä ollenkaan uuniin, sähköverkon päästöt saavat olla korkeintaan 532  
kgCO<sub>2</sub>/MWh, jotta vetytelkistetty teräs olisi kokonaispäästöiltään puhtaampaa kuin ma-  
suuni teitse pelkistetty teräs (Vogl et al. , 2018). Tänä päivänä lähes kaikki Euroopan säh-  
köverkot alittavat edellä mainitun lukeman reilusti. Ruotsissa arvo on noin 8,8 kgCO<sub>2</sub>/MWh.  
Suomessa vastaava arvo on noin 80 kgCO<sub>2</sub>/MWh (FINGRID, 2022). Voidaan todeta, että  
tänä päivänä vaihto vetytelkistysmenetelmään vähentäisi teräksentuotannon kokonaispääs-  
töjä lähes jokaisessa EU maassa.



Kuva 12 Sähköverkon päästöjen nollatulosintensiiteetti valokaariuuniin syötetyn rautaromun osuuden funktiona. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018b)

Suuri osa perinteisen masuuniteräksen hiilidioksidipäästöistä voidaan siis välttää vetypelkistysmenetelmällä, mikäli uusiutuvaa energiaa on saatavilla. Puhdas uusiutuva energian ei kuitenkaan yksin tarkoita päästötöntä teräksentuotantoa. Hiilidioksidipäästöt ovat siitä huolimatta sitoutuneina malmin ja kalkin louhintaan, kalkin kalsinointiin ja hiilen edelleen ollessa teräksen välttämätön raaka-aine. Mikäli päästöt kalkin kalsinointivaiheessa haluttaisiin välttää, tarvittaisiin hiilen kaappaus- ja varastointimenetelmiä kalkin tuotantovaiheessa. Toinen keino on korvata kalkki materiaalilla, joka tarjoaa samat ominaisuudet valokaariuunissa (kuonan vaahdotus ja rikinpoisto). Lisäksi pieniä määriä hiiltä tarvitaan valokaariuunissa teräksen tuottamiseksi raudasta. Nykypäivän kaupallisessa menetelmässä hiili lisätään maa-kaasun mukana reaktioon. Kun pelkistimenä käytetään puhdasta vetyä, uusi hiilen lähde on tarpeen. Soveltuva hiilen lähde voisi olla esimerkiksi biometaanin tai jokin muu biogeeninen hiili. Vaikka hiilen ja kalkin päästöjä ei saataisikaan selvitettyiksi, olisi päästöintensiteetit paljon alhaisemmat kuin tämän päivän käytössä olevan menetelmän päästöt. Päästöt hiilen ja kalkin käytöstä, sekä elektrolyysikennon grafiittielektrodin kuluma johtaisivat kokonaispäästöihin 53 kgCO<sub>2</sub>/tLS. Tämä on vain 2.8% nykypäivän teräksentuotantomenetelmän kokonaispäästöistä (Vogl et al., 2018).



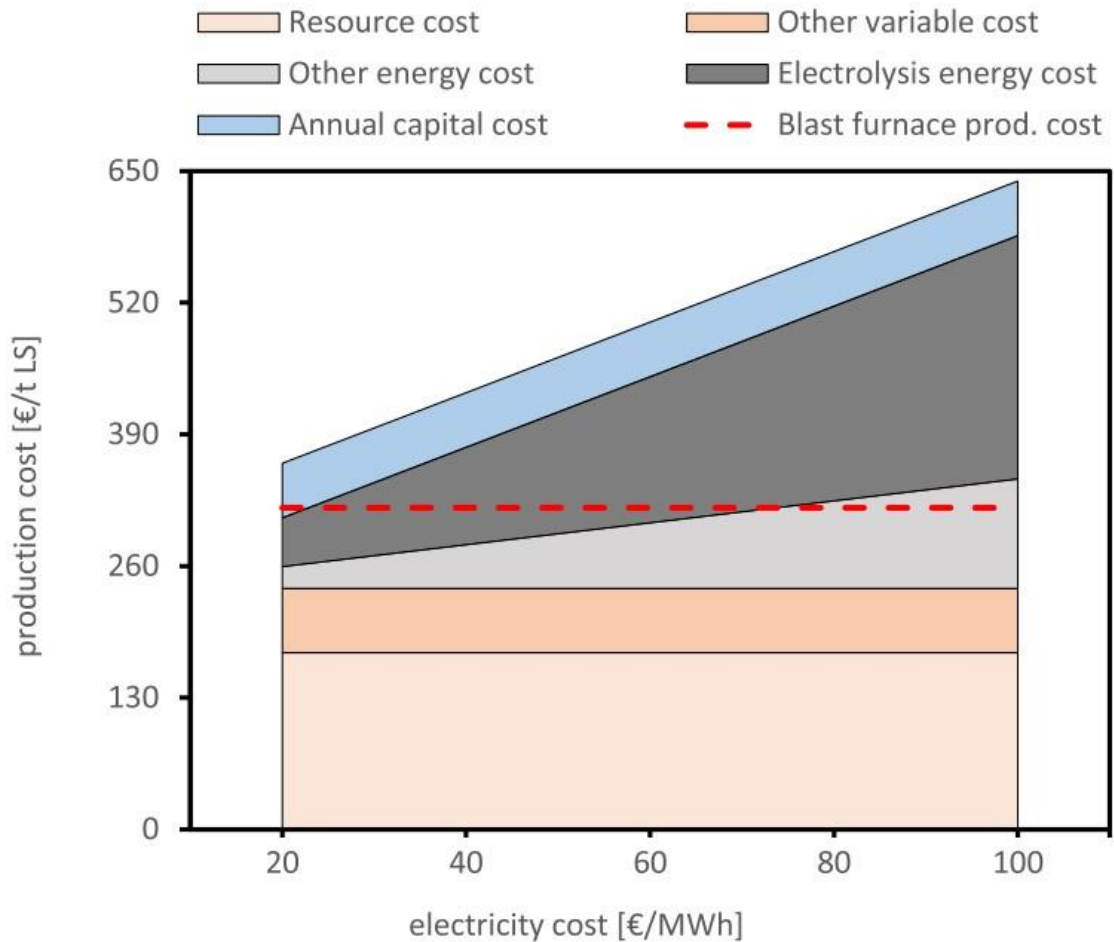
### 3.4 Kustannukset ja kannattavuus

Käänteentekevää muutosta teräksentuotantoon suunnitellaan on syytä selvittää muutosta edellyttävien kustannusten suuruus. HYBRIT-teräksen tuotannon kustannukset voidaan jakaa investointikustannuksiin, johon kuuluu kaikki uuteen tuotantolaitteistoon sijoitettu raha, sekä operointikustannuksiin, joka sisältää tuotantoon kuuluvat jatkuvat kulut kuten tuotantolaitteiden ylläpidon ja raaka-aineiden kustannukset. Tässä kappaleessa arvioidut investointikulut tuotantolaitteiston pääkomponenttien osalta perustuvat vuoden 2030 teknologiaan. Elektrolyysilaitteisto tässä mittakaavassa on vielä kohtalaisen tuoretta teknologiaa, joten investointikuluja arvioidessa niiden uskotaan teknologian kehittyessä elektrolyysin osalta laskevan. Valokaariuuni sekä akseliuuni ovat kehittyneitä teknologiaa, eikä niiden investointikustannusten odoteta paljonkaan laskevan ajan myötä. Operointikustannukset on arvioitu käyttäen vuosien 2015-2018 keskimääräisiä markkinahintoja.

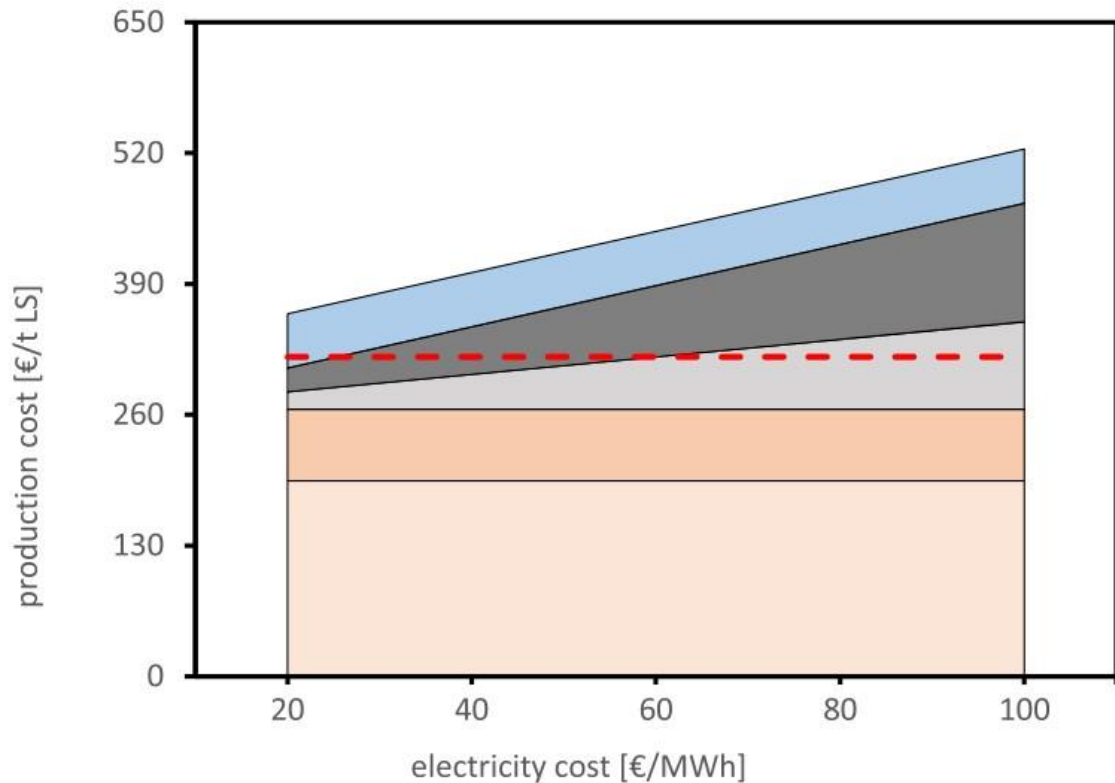
Investointikustannukset vetytelkistystä käyttävälle terästehtaalle lasketaan olevan 574 euroa tonnin kapasiteettia kohden. Hinta on 30% enemmän kuin tavallisen hiiltä käyttävän tehtaan investointikustannukset (Wörtler, Schuler, Voigt, Schmidt, Dahlmann, Lungen, Ghenda, 2013) Se sisältää 160 EUR/t kapasiteetin elektrolyysikennolle, 230 EUR/t akseliuunille ja 184 EUR/t valokaariuunille (Wörtler et al. , 2013) Toisen tutkimuksen (Fischedick et al. , 2014) mukaan investointikustannukset vetytelkistystä käyttävälle terästehtaalle olisivat 874 euroa tonnin kapasiteettia kohden. Tutkimuksessa oletetaan elektrolyysikennon operoivan ainoastaan sähkön hinnan ollessa alhainen. Tällöin elektrolyysikennon kapasiteetin tulee olla suurempi ja suuren mittakaavan vetyvarastointia tarvitaan. Tästä seuraavat korkeammat investointikustannukset.

Vetytelkistetyn teräksen tuotantokustannuksia on arvioituna kuvissa (13) ja (14) sähkön hinnan funktiona. Tuloksista voidaan huomata tuotantokustannuksien olevan herkkiä sähkön hinnan vaihtelulle. Energian hinta kattaa 32% tuotantokuluista sähkön hinnan ollessa 40 EUR/MWh ja 47% tuotantokuluista hinnan ollessa 80 EUR/MWh. Kuvasta (14) voidaan havaita herkkyyden sähkön hinnalle vähenevän, kun rautaromua syötetään valokaariuuniin. Rautaromun ja pellettien 50:50 syöttösuhteella kokonaistuotantokustannukset laskevat verrattuna tuotantoon pelkällä rautapelletillä. Raaka-ainekustannukset kasvavat hiukan rautaromua syötettäessä valokaariuuniin romun ollessa hieman pellettejä kalliimpaa. Sekä malmin, että romun hinta vaihtelevat huomattavasti joka osaltaan voi vaikuttaa edellä mainittuun

tietyissä markkinatilanteissa. Elektrolyysikennon grafiittielektrodit kattavat operointikustannuksista 8 EUR/t olettaen, että niiden aikaisemmat hinnankorotukset ovat hellittäneet. Vetytelkistetyn teräksen tuotantokustannukset ovat yleisesti ottaen perinteistä masuuniteerästä korkeammat, mutta ovat kilpailukykyisiä, mikäli sähkön hinta on alhainen (Vogl et al., 2018)



Kuva 13 Vetytelkistetyn teräksen tuotantokustannukset sähkön hinnan funktiona ilman rautaromusyöttöä valokaariuuniin. Sininen väri kuvaa vuotuisen pääoman hintaa, tummanharmaa kuvaa elektrolyysin energiakustannuksia, vaaleanharmaa kuvaa muita energiakustannuksia. Pohjalla vakiokustannukset raaka-aineista, sekä muuttuvista kustannuksista. Punainen katkoviiva kuvaa nykytuotantomenetelmän hintaa. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018b)



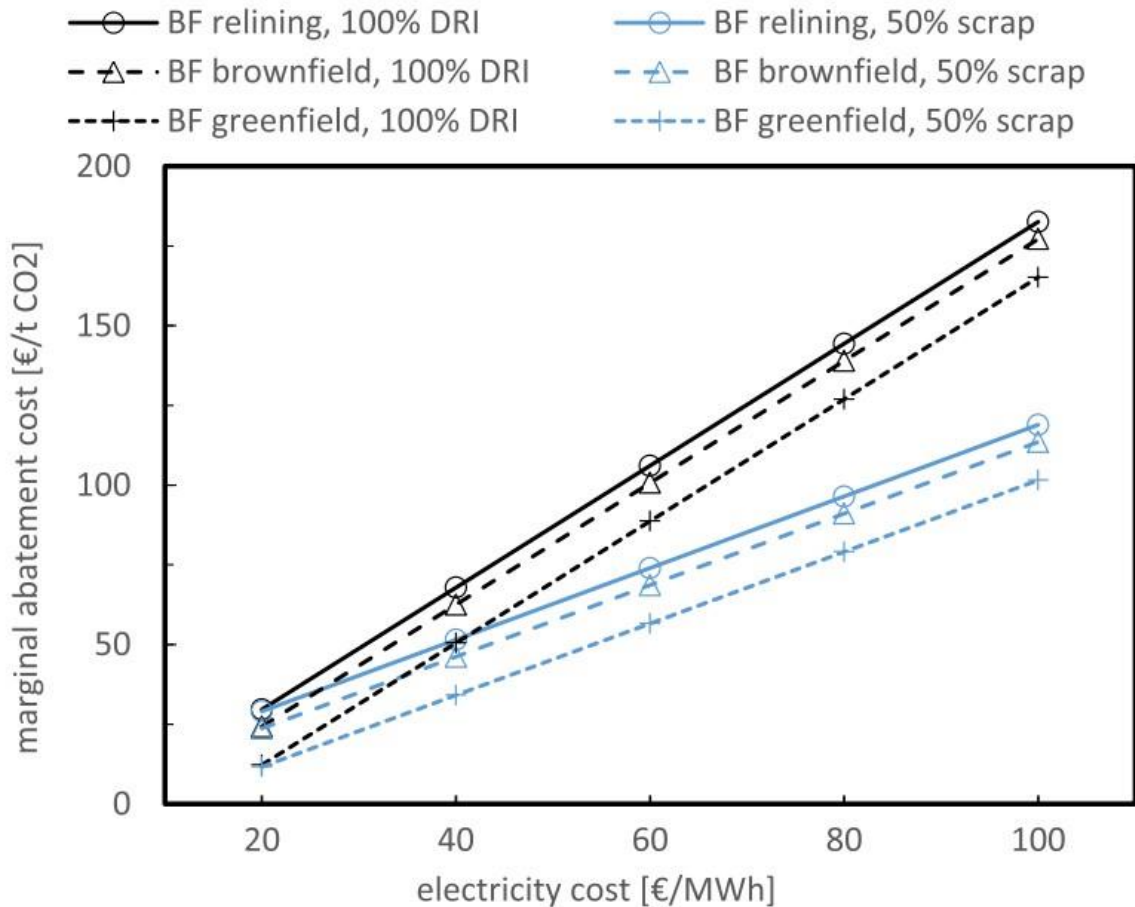
Kuva 14 Vetypelkistetyn teräksen tuotantokustannukset sähkön hinnan funktiona rautaromun ja pellettien syöttösuhteen ollessa 50:50. Sininen väri kuvaa vuotuisen pääoman hintaa, tummanharmaa kuvaa elektrolyysin energiakustannuksia, vaaleanharmaa kuvaa muita energiakustannuksia. Pohjalla vakiokustannukset raaka-aineista, sekä muuttuvista kustannuksista. Punainen katkoviiva kuvaa nykytuotantomenetelmän hintaa. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018b)

Tutkimus uusiutuvan energian käytön kasvusta Saksassa vuoteen 2050 mennessä ennustaa elektrolyysillä tuotetun vedyn hinnaksi 3,05-3,90 EUR/kg elektrolyysikennon käytön ollessa 5000 tuntia ja sähkön hinnan ollessa 40-60 EUR/MWh. Vastaavia tuloksia saatiin ISE-Freiburgin teettämästä tutkimuksesta veden elektrolyysin nykystatuksesta ja kehittämispotentiaalista vedyn tuotantoon uusiutuvista energialähteistä (Mergel, Carmo, Fritz, 2013) Vedyn lisäksi elektrolyysikennossa syntyy suuria määriä happea. Jokaista terästönä kohden syntyy 411 kg happea. Mikäli tuotetulle hapelle löytyy markkinoita, operointikustannukset ja prosessin kannattavuus parantuvat huomattavasti (Vogl et al., 2018)

Kuvassa (15) vertaillaan rajavähennyskustannuksia sähkön hinnan suhteen kuudessa eri tapauksessa. Rajavähennyskustannuksilla tarkoitetaan tuotannon hiilidioksidipäästöistä aiheutuvia rahallisia kompensointimaksuja. Vertailussa sähkö oletetaan päästöttömäksi. Rajavähennyskustannuksia verrataan perinteiseen masuuniteräkseen, jonka päästöintensiteetti on 1870 kg hiilidioksidia tuotettua raakaterästönä kohden. Korvaavia menetelmiä on kolme:

1. Nykyisen jo olemassa olevan masuunin uudelleenvuoraus (MAC vuoraus)
2. Brownfield investointipäätös masuuni- ja vetypelkistetyn teräksen välillä (MAC brownfield)
3. Greenfield investointipäätös masuuni- ja vetypelkistetyn teräksen välillä (MAC greenfield)

Brownfield-investoinnilla tarkoitetaan investointeja, joissa yritys siirtää uuden toimintansa olemassa olevaan sopivaan tilaan tai tehtaaseen joko ostamalla tai vuokraamalla tilat. Greenfield-investoinnilla tarkoitetaan puolestaan investointia, jossa yritys etsii uuden tontin ja rakentaa uudet tuotantotilat alusta alkaen toimintaansa varten. Kuvan (15) tuloksista voidaan havaita, että rajavähennyskustannusten ollessa 46 EUR/t hiilidioksidia ja sähkön hinnan ollessa 40 EUR/MWh, brownfield-investoinnit ovat kilpailukykyisiä. Mikäli rautaromua ei syötetä valokaariuuniin, rajavähennyskustannusten täytyy olla 62 EUR/t hiilidioksidia. Vetypelkistyksellä toimiva tehdas on kilpailukykyinen uudelleenvuoratus hiilimasuunin kanssa, mikäli rajavähennyskustannukset ovat 68 EUR/t hiilidioksidia (ei romua) ja 52 EUR/t (50% romua). Samoissa olosuhteissa greenfield-investoinnit ovat kilpailukykyisiä hinnoilla 52 EUR/t hiilidioksidia ja 34 EUR/t hiilidioksidia (syöttö 0% ja 50% romua valokaariuuniin). Kuitenkin globaalien ylituotannon vuoksi terästeollisuus ei välttämättä harkitse greenfield-investointeja lähitulevaisuudessa (Vogl et al., 2018)



Kuva 15 Rajavähennyskustannukset sähkön hinnan funktiona eri investoinneilla. (Vogl, Åhman, Nilsson, 2018b)

Viimeiseksi on syytä muistaa elektrolyysikennon valinnan vaikutus energian kulutukseen ja sitä kautta tuotantokustannuksiin. Elektrolyysikennon hyötysuhteeseen vaikuttaa pääasiassa kennoteknologian valinta. PEM (proton exchange membrane) elektrolyysikennot ovat lupaava vaihtoehto terästeollisuuden käyttöön. Kuten jo sanottua, suuren mittakaavan elektrolyysilaitteistot ovat vielä kehittyvää teknologiaa. Teknologian kehittymisen myötä voidaan odottaa parannuksia PEM-elektrolyysilaitteistoihin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää alkalista elektrolyysiä tai SOE-elektrolyysiä (solid oxide electrolysis). Alkalisilla elektrolyysikennoilla saavutetaan yli 100 MW:n kapasiteetti. Esimerkkilaitteistoja löytyy Norjasta ja Egyptistä. Näiden hyötysuhde ja kuormitusalue ovat heikompia kuin PEM-elektrolyysikennoissa (Saba, Müller, Robinius, Stolten, 2018) SOE-teknologia on vielä keskeneräistä, mutta tutkimukset lupaavat parempaa hyötysuhdetta ja alhaisempia investointeja PEM- ja alkali-elektrolyysikennoihin nähden (Mathiesen, Ridjan, Connolly, Nielsen, Hendriksen, Mogenssen, Jensen, Ebbesen, 2013). SOE-elektrolyysilaitteiston ja akseliuunin korkeasta

toimintalämpötilasta syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää tuotantoprosessin muissa vaiheissa yleisen energiatehokkuuden parantamiseksi.

## 4 Johtopäätökset

Tässä työssä perehdyttiin teräksen tuotantoon vetytelkistysmenetelmää käyttäen. Esimerkkitapauksena käytettiin Ruotsissa vuonna 2016 vireille pantua HYBRIT eli Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology- menetelmää. HYBRIT on teräsyhtiö SSAB:n, kaivosyhtiö LKAB:n ja energiayhtiö Vattenfallin yhteistyön tulos (HYBRIT, 2018). Menetelmän tarkoituksena on korvata nykyisen terästuotannon pääpolttoaine, hiili päästöttömällä vedyllä. Tavoitteena on tehdä teräksen tuotantoprosessista täysin päästötöntä. HYBRIT-teräs tuotetaan suorapelkistämällä rautamalmia vetykaasua käyttäen. Pelkistykseen käytettävä vety tuotetaan tuotantolaitoksen sisällä veden elektrolyysiä käyttäen. Elektrolyysi saa virtansa uusiutuvista lähteistä tuotetulla energialla. Pelkistetty rautamalmi eli rautasieni siirretään valokaariuuniin, jossa se lämmitetään ja sulatetaan sähkövirtaa käyttäen. Valokaariuuni mahdollistaa kierrätetyn teräsmateriaalin käytön seoksena rautasienen kanssa uuden teräksen valmistamiseksi vähentäen päästöjä entisestään. Kierrätetyn materiaalin eli niin kutsutun romun käyttö tekee tuotantoprosessista vakaamman muuttuville tekijöille, kuten sähkön hinnalle. Vaikka HYBRIT-prosessin kaikki vaiheet ovat todettu mahdollisiksi ja ovat jopa tänä päivänä osittain käytössä kaupallisen teräksen tuotannossa, ei kuitenkaan kokonaisuutta ole vielä koskaan testattu kaupallisessa mittakaavassa.

Tämän työn tarkoituksena on vertailla ja pohtia kriittisesti HYBRIT-teräksen tuotantoon avautuvia vaihtoehtoja. Tavoitteena on löytää tuotantokokonaisuus, joka on kaikkein tehokain kapasiteetiltaan ja kustannuksiltaan sekä analysoida menetelmän kannattavuutta.

HYBRIT-prosessin kustannustehokkuuden kannalta merkittävä osa on elektrolyysilaitteiston valinta. Työssä vertailtiin korkean- ja matalan lämpötilan elektrolyysilaitteistoja. Vaikka korkean lämpötilan elektrolyysi tutkimusten mukaan lähes puolittaa sähkönkulutuksen, omaa se useita eri heikkouksia matalan lämpötilan elektrolyysiin nähden. Korkean lämpötilan elektrolyysi on vielä tuntematonta kokeellista tekniikkaa, eikä sen toiminnasta ole kokemusta. Menetelmä kuluttaa laitteiston osia nopeammin ja sen investointikustannukset ovat korkeammat kuin tunnetumman alhaisen lämpötilan elektrolyysin. Vaikka korkean lämpötilan elektrolyysi osoittaaakin potentiaalia, on se kuitenkin kokonaiskustannuksiltaan kalliimpi vaihtoehto erityisesti sähkön hinnan ollessa alhainen.

HYBRIT-teräksen yksi tärkeimmistä tuotantokysymyksistä on vedynvarastointilaitteiston tarpeellisuus. Vedyn varastointi on tänä päivänä suuressakin mittakaavassa mahdollista, mutta teknologia on vielä uutta ja kehittyvää. Työssä tutkittiin varastoinnin kannattavuutta kokonaiskustannukset mielessä pitäen. Varastointia puoltaa mahdollisuus tuottaa vetyä ylimäärin varastoon sähkön hinnan ollessa alhainen ja vastustaa varastointilaitteiston korkeat investointi- ja operointikustannukset. Halvimmillaan vetyä voidaan varastoida luonnollisissa suolaluolissa, mutta luolien sijainti tekee menetelmästä Pohjois-Euroopassa mahdotonta. HYBRIT-hankkeen kannalta potentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi ilmeni nestemäisten vedynkantajien käyttö vedyn varastoinnissa. Nestemäisten kantajien avulla vedyn säilytys ja kuljetus on yksinkertaista ja dynaamista. Menetelmän suurin heikkous on investoinnin hinta, mutta osoittaa kuitenkin suurta potentiaalia.

Työssä käy ilmi, että vetypelkistetyn teräksen tuotanto kuluttaa valtavasti energiaa tuotantoprosessin eri vaiheissa. Tiedossa on, että vetyä pelkistimenä käyttäen tuotantoprosessin päästöt katoavat lähes kokonaan. Menetelmän ekologisuus riippuu siis vahvasti käytetyn sähkön puhtaudesta. Sähköverkon puhtaudelle voidaan laskea raja-arvo, jonka ylitettyä HYBRIT-menetelmän päästöt ylittävät perinteisen hiilipohjaisen teräksen päästöt. Mikäli teräsentuotannossa käytetään 50:50 suhteessa rautaromua ja rautamalmia, tämä raja-arvo on noin 900 kgCO<sub>2</sub>/MWh. Ruotsissa ja suuressa osassa Eurooppaa sähköverkon puhtaus alittaa raja-arvon selkeästi ja täten HYBRIT on huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto jopa silloin, kun päästötöntä energiaa ei ole saatavilla. Toisaalta tällöin lupaukseen hiilivapaasta teräksestä ei päästä.

Työssä havaittiin HYBRIT-menetelmän olevan yksinkertaisuudessaan kannattavaa, mikäli hiilipohjaisista menetelmistä aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen rajavähennyskustannukset eli hiilidioksidipäästöistä maksettavat rahalliset korvaukset nousevat liian korkeiksi. Kannattavuuteen vaikuttaa prosessissa käytetyn kierrätetyn romun määrä. Romun käyttö laskee HYBRIT-menetelmän hintaa suhteessa perinteiseen hiilipohjaiseen menetelmään. Kokonaaisuudessaan kannattavuuteen vaikuttaa myös sähkön hinta ja markkinoiden halukkuus maksaa puhtaasta teräksestä premium-hintaa. Kansainväliset päästörajoitteet kuitenkin osaltaan kannustavat puhtaampien tuotantomenetelmien valintaan ja siten tekevät myös HYBRIT-menetelmästä aina kannattavampaa.



## Lähdeluettelo

- Abdul Quader M, Ahmed S, Dawal SZ, Nukman Y (2016) Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 55: 537-549.
- Åhman M, Nilsson LJ, Johansson B (2017) Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Null* 17(5): 634-649.
- Andersson J (2021) Application of Liquid Hydrogen Carriers in Hydrogen Steelmaking. *Energies (Basel)* 14(5): 1392.
- Buttler A, Spliethoff H (2018) Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 82: 2440-2454.
- Caglayan DG, Weber N, Heinrichs HU, Linßen J, Robinius M, Kukla PA, Stolten D (2020) Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(11): 6793-6805.
- FINGRID (2022). Sähköntuotannon CO<sub>2</sub>-päästöarvio. [verkkolähde] [viitattu 1.4.2022] Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/co2/>
- Fischedick M, Marzinkowski J, Winzer P, Weigel M (2014) Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production* 84: 563-580.
- Gajda D, Marcin Lutyński (2021) Hydrogen Permeability of Epoxy Composites as Liners in Lined Rock Caverns—Experimental Study. *Applied Sciences* 11(3885): 3885.
- HYBRIT (2018) HYBRIT – Fossil-Free Steel: Summary of Findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016-2017. [verkkolähde] [viitattu 20.2.2022] Saatavilla: [https://ssa-bwebsitescdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit\\_brochure.pdf?m=20180201085027](https://ssa-bwebsitescdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf?m=20180201085027)
- Krüger A, Andersson J, Grönkvist S, Cornell A (2020) Integration of water electrolysis for fossil-free steel production. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(55): 29966-29977.
- Mathiesen BV, Ridjan I, Connolly D, Nielsen MP, Hendriksen PV, Mogensen MB, Jensen SH, Ebbesen SD (2013) Technology data for high temperature solid oxide electrolyser cells, alkali and PEM electrolyzers.
- Mergel J, Carmo M, Fritz D (2013) Status on technologies for hydrogen production by water electrolysis. *Transition to Renewable Energy Systems*: 423-450.
- Metallinjalostajat. (2021). Suomen metallinjalostuksen tutkimusstrategia. [verkkolähde] [viitattu 1.3.2022] Saatavilla: <https://metallinjalostajat.teknologiateollisuus.fi/fi/suomen-metallinjalostuksen-tutkimusstrategia>

- Otto A, Robinius M, Grube T, Schiebahn S, Praktiknjo A, Stolten D (2017) Power-to-Steel: Reducing CO<sub>2</sub> through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry. *Energies (Basel)* 10(4): 451.
- Park D, Kim H, Ryu D, Choi B, Han K (2013) Probability-based structural design of lined rock caverns to resist high internal gas pressure. *Engineering Geology* 153: 144-151.
- Pérez-Fortes M, Moya JA, Vatopoulos K, Tzimas E (2014) CO<sub>2</sub> Capture and Utilization in Cement and Iron and Steel Industries. *Energy Procedia* 63: 6534-6543.
- Ranzani da Costa A, Wagner D, Patisson F (2013) Modelling a new, low CO<sub>2</sub> emissions, hydrogen steelmaking process. *Journal of Cleaner Production* 46: 27-35.
- Saba SM, Müller M, Robinius M, Stolten D (2018) The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *International Journal of Hydrogen Energy* 43(3): 1209-1223.
- United Nations (2015) Paris Agreement
- Vogl V, Åhman M, Nilsson LJ (2018a) Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production* 203: 736-745.
- Vogl V, Åhman M, Nilsson LJ (2018b) Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production* 203: 736-745.
- Wesseling JH, Lechtenböhmer S, Åhman M, Nilsson LJ, Worrell E, Coenen L (2017a) The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 79: 1303-1313.
- Wesseling JH, Lechtenböhmer S, Åhman M, Nilsson LJ, Worrell E, Coenen L (2017b) The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 79: 1303-1313.
- Wörtler M, Schuler F, Voigt N, Schmidt T, Dahlmann P, Lungen HB, Ghenda J (2013) Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050. *Technical and Economic Analysis of the Sectors CO<sub>2</sub> Abatement Potential, Boston*.