



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Future environmental impacts of hydrogen production and its use in container shipping

Wei, S.

Citation

Wei, S. (2026, February 11). *Future environmental impacts of hydrogen production and its use in container shipping*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4289906>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4289906>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

Waterstof-gebaseerde brandstoffen (H_2 -brandstoffen) worden beschouwd als veelbelovende opties voor de decarbonisatie van de maritieme scheepvaart. De onzekerheid rond de ontwikkeling van de waterstofeconomie, in combinatie met de complexiteit van het gebruik van H_2 -brandstoffen in de scheepvaart, onderstreept echter de noodzaak van een levenscyclusperspectief om hun rol in de decarbonisatie en de eventuele afwenteling van milieu-effecten beter te begrijpen. Een dergelijk perspectief kan bijdragen aan de ontwikkeling van een effectieve benadering om, naast de reductie van broeikasgasemissies, ook andere milieueffecten van H_2 -brandstoffen in de maritieme sector te beperken. Daarom richt dit proefschrift zich op de volgende overkoepelende onderzoeksvraag:

Wat zijn de toekomstige milieueffecten van waterstofproductie en het gebruik van op waterstof-gebaseerde brandstoffen in de containerscheepvaart?

Om deze vraag systematisch te beantwoorden, behandelt dit proefschrift vier deelvragen in Hoofdstukken 2 tot en met 5.

RQ1: Wat zijn de toekomstige milieueffecten van de mondiale waterstofproductie?

Hoofdstuk 2 kwantificeert de milieueffecten over de levenscyclus van waterstofproductie op zowel regionaal als mondiaal niveau tot 2050, onder drie door het Internationaal Energieagentschap (IEA) ontwikkelde scenario's: (1) het Stated Policies Scenario (STEPS), (2) het Announced Pledges Scenario (APS), dat naast bestaande beleidsmaatregelen ook aangekondigde ambities omvat, en (3) het Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE). De resultaten tonen aan dat de gemiddelde mondiale broeikasgasemissies per kilogram waterstof zullen dalen van geschat 14 kg CO_2 -eq vandaag naar 9–14 kg CO_2 -eq in 2030 en 2–12 kg CO_2 -eq in 2050 (in respectievelijk het NZE- en STEPS-scenario). Productie van waterstof gebaseerd op fossiele energiedragers heeft een beperkt emissiereductiepotentieel zonder toepassing van koolstofafvang en -opslag (Carbon Capture and Storage; CCS). Tegelijkertijd wordt elektrolyse van water voor de productie van waterstof steeds minder koolstofintensief naarmate de elektriciteitssector verduurzaamt. Zo kan deze technologie tegen 2050 vrijwel koolstofneutraal worden. Hoewel de mondiale waterstofproductie naar verwachting met een factor vier tot acht zal toenemen tegen 2050, kunnen de totale jaarlijkse broeikasgasemissies al tussen 2025 en 2035 pieken. Niettemin kunnen de cumulatieve emissies tussen 2020 en 2050 oplopen tot 39 (APS) tot 47 (NZE) Gt CO_2 -eq, wat overeenkomt met bijna 12% van het resterende koolstofbudget om de 1.5 °C-doelstelling te behalen. Dit benadrukt de noodzaak van een snellere en verdergaande decarbonisatie van waterstofproductie. Een versnelde opschaling van waterstofproductie met elektrolyse, gecombineerd met een uitbreiding van koolstoneutrale elektriciteitsopwekking, is hiervoor essentieel. Investerings in aardgas-gebaseerde stoommethaanreforming met CCS, zoals voorzien door het IEA, zijn

risicovol en kunnen leiden tot een lock in met nog steeds relatief hoge koolstofemissies, tenzij zeer hoge afvangpercentages worden gerealiseerd. Om zowel klimaateffecten als andere milieueffecten te minimaliseren, is een snelle overgang van fossiele brandstoffen naar elektrolyse op basis van hernieuwbare energie noodzakelijk, in combinatie met technologie- en materiaalinnovatie.

RQ2: Wat zijn de toekomstige milieueffecten per ton-zeemijl van het gebruik van H₂-brandstoffen in verbrandingsmotoren van containerschepen?

Hoofdstuk 3 beoordeelt de milieueffecten over de levenscyclus van vloeibare waterstof, vloeibare ammoniak (NH₃) en methanol die worden gebruikt in verbrandingsmotoren op een Post-Panamax containerschip voor de periode tussen 2020 en 2050. Hiervoor wordt een geïntegreerd raamwerk ontwikkeld waarin we een LCA uitvoeren voor een schip dat is ontworpen voor dual-use aandrijving door op waterstof gebaseerde danwel fossiele brandstoffen. Dit raamwerk houdt rekening met veranderingen in laadcapaciteit, de decarbonisatie van elektriciteit en de transitie van waterstofproductie onder de STEPS- en NZE-scenario's van het IEA. De resultaten laten zien dat H₂-gebaseerde propulsiesystemen, in vergelijking met conventionele schepen op zware stookolie (HFO), een vermindering van de laadcapaciteit tussen 0.3% en 25% kunnen veroorzaken. In het NZE-scenario kunnen H₂-brandstoffen de broeikasgasemissies per ton-zeemijl tegen 2050 met 48%–65% verminderen ten opzichte van HFO. Zelfs bij volledig koolstofneutrale productie van waterstof blijft er echter een restemissie van 18%–31% bestaan.

RQ3: Wat zijn de toekomstige milieueffecten per ton-zeemijl van het gebruik van brandstofcellen in de containerscheepvaart?

Hoofdstuk 4 analyseert de milieueffecten over de levenscyclus van twee toonaangevende brandstofcellensystemen op een Post-Panamax containerschip voor de periode tussen 2020 en 2050: vloeibare waterstof met protonuitwisselingsmembraan-brandstofcellen (liquid-H₂ PEMFC) en vloeibare ammoniak met vaste-oxide-brandstofcellen (liquid-NH₃ SOFC). Het hoofdstuk ontwikkelt een methode om de effecten van inbouw van brandstofcellen op laadcapaciteit en energieverbruik te kwantificeren. Voortbouwend op de berekeningen ten aanzien van waterstofproductie uit Hoofdstuk 3 wordt onderzocht welke broeikasgasemissie optreden onder verschillende scenario's. Tevens worden trade-offs met betrekking tot andere milieuproblemen geanalyseerd. De resultaten tonen aan dat liquid-H₂ PEMFC, afhankelijk van vaarafstand en snelheid, leidt tot een toename van de laadcapaciteit met 2% of een afname tot 10%, terwijl liquid-NH₃ SOFC resulteert in een afname van de laadcapaciteit tussen de 4% en 23%. Tegen 2050 kunnen deze systemen in het NZE-scenario de broeikasgasemissies per ton-zeemijl met respectievelijk 69%–75% en 65%–71% verminderen ten opzichte van conventionele schepen. Het gebruik van brandstofcellen levert echter ook een beperkte afwenteling naar andere milieu-effecten.

RQ4: Wat is het decarbonisatiepotentieel van de mondiale containerscheepvaartvloot met H₂-brandstoffen?

Voortbouwend op de databases voor mondiale waterstofproductie uit Hoofdstuk 2 en de beoordelingskaders voor alternatieve aandrijfsystemen uit Hoofdstukken 3 en 4, onderzoekt Hoofdstuk 5 het decarbonisatiepotentieel van de mondiale containerscheepvaart tussen 2020 en 2050 voor drie scenario's met verschillende niveaus van waterstofproductie, gebruik van op H₂ gebaseerde brandstoffen en transportvraag. De resultaten geven aan dat de broeikasgasemissies per ton-zeemijl kunnen dalen van 22 g CO₂-eq in 2020 tot 21 g, 9 g en 3 g CO₂-eq in 2050 onder respectievelijk het Less Ambitious, Ambitious en Very Ambitious scenario. De cumulatieve emissies van de mondiale containerscheepvaart tussen 2020 en 2050 bedragen respectievelijk 9–12 Gt, 7–10 Gt en 4–5 Gt CO₂-eq, wat overeenkomt met 1%–3% van het resterende mondiale koolstofbudget. De vervanging van HFO door H₂-brandstoffen leidt niet altijd tot emissiereducties: in het Less Ambitious scenario nemen de cumulatieve emissies toe met 0.4–0.6 Gt CO₂-eq door de trage decarbonisatie van waterstofproductie, terwijl ze in de andere scenario's dalen met respectievelijk 1–2 Gt en 3–5 Gt CO₂-eq. Diepe decarbonisatie van de scheepvaart vereist het oplossen van knelpunten ten aanzien van het vernieuwen van de vloot, de opschaling van ammoniakproductie en elektrolysecapaciteit, en het realiseren van voldoende koolstofneutrale elektriciteitsvoorziening.

Uit dit werk kunnen we de volgende generieke conclusies trekken. Decarbonisatie van de containerscheepvaart met op H₂ gebaseerde brandstoffen vereist een snelle transitie naar koolstofneutrale productie van waterstof. De mate waarin waterstofproductie wordt gedecarboniseerd is de belangrijkste bepalende factor voor het bereiken van significante emissiereducties. Zelfs in het NZE-scenario blijven restemissies uit waterstofproductie en scheepsoperaties een significant deel van het resterende koolstofbudget voor de 1.5 °C-doelstelling verbruiken. Indien H₂-brandstoffen volledig uit hernieuwbare elektriciteit worden geproduceerd, kunnen zij de broeikasgasemissies van de containerscheepvaart aanzienlijk verminderen, maar zelfs dan wordt netto-nul niet volledig bereikt. Negatieve-emissietechnologieën, zoals bio-energie met CCS of Direct Air Capture, zouden dan kunnen worden ingezet om de resterende emissies te compenseren. De decarbonisatie van de containerscheepvaart gaat gepaard met positieve en negatieve afwenteling naar andere typen milieueffecten. Zij kan nevenvoordelen opleveren, zoals een vermindering van ozonafbraak en ecotoxiciteit, maar kan ook milieudruk verhogen bijvoorbeeld ten aanzien van humane toxiciteit, ioniserende straling, mineraal- en metaalgebruik en landgebruik. Dit laatste is vooral het gevolg van de grootschalige productie van waterstof via elektrolyse met behulp van koolstofarme elektriciteit.

Om de containerscheepvaart effectief te decarboniseren met H₂-brandstoffen en tegelijkertijd andere milieueffecten te beperken, doet dit proefschrift de volgende beleidsaanbevelingen. Prioriteit moet worden gegeven aan productie van waterstof via elektrolyse met behulp van koolstofarme elektriciteit. Waterstofproductie gebaseerd op

fossiele brandstoffen met CCS is een inferieure oplossing. Het levert wegens de hoge investeringen een lock-in op in een technologie met significante restemissies van koolstof. Daarnaast zijn coherente beleidsmaatregelen nodig om coördinatie tussen maritieme scheepvaart, H₂-brandstofproductie en elektriciteitsopwekking te bevorderen. Tot slot kan een hogere productie van op H₂ gebaseerde brandstoffen tot afwenteling naar andere milieuproblemen leiden. Dit vergt zorgvuldige analyse, en vereist mogelijk gerichte technologische verbetering om dergelijke afwenteling te minimaliseren.