

Kennisdocument

Emissiereductietechnologieën voor de binnenvaart

Een overzicht van verschillende technieken, energiedragers en hun toepasbaarheid

Schone Lucht Akkoord Fase 2 – deelproject 2

EICB, versie 13 februari 2023

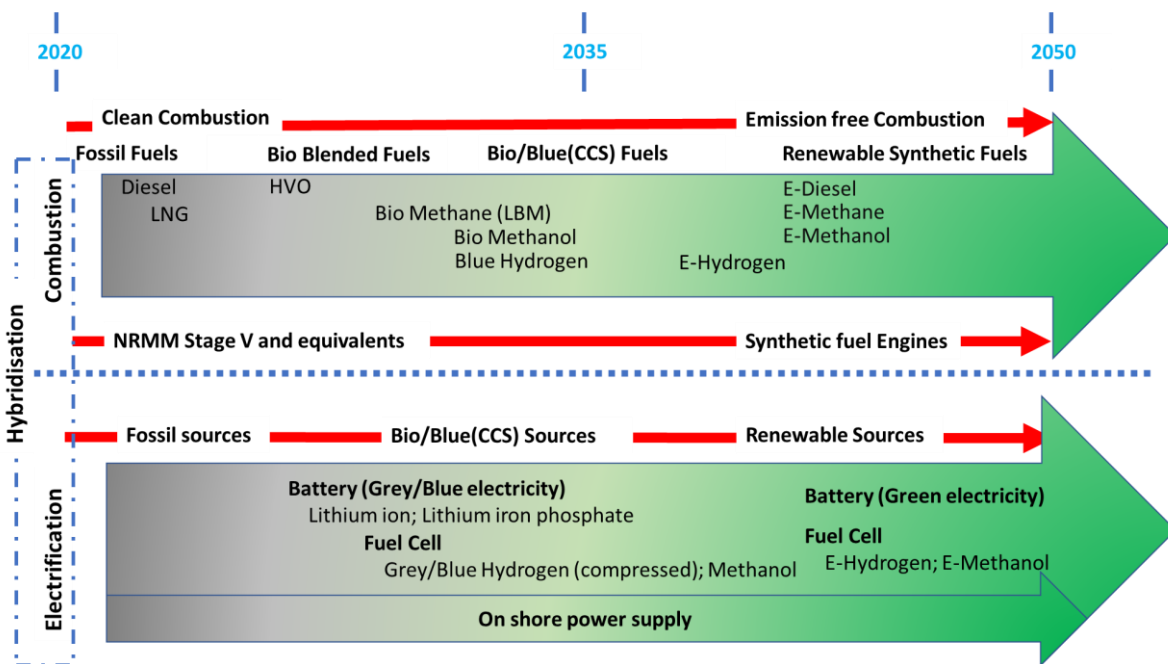
Samenvatting

Dit kennisdocument geeft een overzicht van de technieken en energiedragers die passen in de transitie naar nabij zero-emissie binnenvaart en de toepasbaarheid van deze technieken. De doelstelling van de Rijnlanden, inclusief Nederland, is het behalen van minimaal 90% emissiereductie in 2050 ten opzichte van het jaar 2015. Dit is een zeer uitdagende doelstelling gezien de huidige staat van de vloot, en het huidige regelgevende kader, dat geen tot weinig verplichtingen of incentives biedt aan de binnenvaartondernemers om te investeren in schonere technieken noch om klimaat-neutrale energie te gebruiken.

Een reductiedoelstelling van 90% betekent dat, op de totale vloot, de uitstoot niet persé absoluut-nul hoeft te zijn in het jaar 2050. Het is daarmee mogelijk om geavanceerde verbrandingsmotoren toe te passen die draaien op klimaat-neutrale brandstoffen zoals hernieuwbare diesel, methanol en/of waterstof.

Overzicht technieken en energiedragers

In het volgende figuur worden schematisch de mogelijke technologieën en energiedragers geschetst:



Figuur nummer 1

Er zijn, in dit figuur, twee hoofdsporen te onderscheiden voor de ontwikkeling naar nabije zero-emissie en klimaat neutrale binnenvaart:

- **Schone verbrandingsmotoren**, met toenemende inzet van biobrandstof en duurzaam geproduceerde synthetische brandstoffen.
- **Elektrificatie** van de aandrijving en gebruik van brandstofcellen (fuel cells) of batterijen, waarbij een toenemend deel van de energie (waterstof, elektriciteit) duurzaam wordt opgewekt (bijvoorbeeld uit wind en zonne-energie).

Van deze twee sporen zijn uiteraard combinaties mogelijk, we hebben het hier dan over **hybride toepassingen**. Denk aan de elektrificatie van de motoren voor het schip dat gevoed wordt door een batterij met daarnaast één of meerdere generatorsets (verbrandingsmotoren) die dienen als back-up of range-extender. Het gebruik van verbrandingsmotoren voor de opwekking van elektriciteit aan boord zal waarschijnlijk nog veel voorkomen in de praktijk, vooral op de korte- en middellange termijn. Voor de toekomst is het belangrijk om de aandrijving van de schepen modulair in te richten, zeker van nieuwbouwschepen.

Toepasbaarheid verduurzamingsoplossingen

De volgende indicatieve tabel geeft een beeld van de toepasbaarheid van de technische oplossingen en het type energie(drager). Belangrijke aspecten zijn:

- Afmetingen van het schip in relatie tot fysiek benodigde ruimte aan boord, voor opslag van (hernieuwbare) energie; kan er voldoende energie worden opgeslagen aan boord en wat zijn de consequenties voor de hoeveelheid lading die kan worden meegenomen?
- Afhankelijkheid van de infrastructuur aan wal; gaat het om een voorspelbare vaste lijnvaartdienst waarbij telkens dezelfde bunkerplaatsen benut kunnen worden of om inzet voor de spotmarkt, waarbij op willekeurige punten gebunkerd moet kunnen worden of is een grotere autonomie nodig?
- Type exploitatie; is er tijd beschikbaar om, zonder tijdverlies, energievoorraden aan boord bij te vullen? Bijvoorbeeld gedurende de nacht. Of vaart het schip 24/7 en zou dit leiden tot verlies van productiviteit van het schip?

Tabel 1:

Oplossing	Vaarprofiel	Scheepstype	Markt	Beschikbaar	Termijn voor uitrol	Kosten
ICE ¹ HVO ² en e-diesel	Alle	Alle	Alle	Ja	Nu	€€
ICE BioLNG	Grootverbruik, lange afstand	Tankers	ARA ³ en Rijn	BioLNG nog niet voldoende	Vanaf 2025	€€
ICE Methanol	Intensief & lange afstand	Tankers, duwboten	ARA en Rijn	Motoren niet beschikbaar	Vanaf 2027	€€
ICE Waterstof	Middellange afstand & intensief	Tankers	ARA en Rijn	Motoren en groene waterstof niet beschikbaar	Vanaf 2030	€€€
Batterij-varen	Korte afstand & intensief, vaste routes	Containerschepen, ferries	ARA - inland container terminals	Afhankelijk van oplaad- en wissel punten	Nu	€€
Fuel Cell Waterstof	Middellange afstand &	Containerschepen	ARA - inland container terminals	Alleen voor pilots	Vanaf 2030	€€€€

¹ ICE: verbrandingsmotor (Internal Combustion Engine)

² HVO: Hydrotreated Vegetable Oil is hernieuwbare en fossielvrije diesel, dit is een zogenaamde 'drop-in' brandstof die vrijwel altijd in de huidige dieselmotoren kan worden toegepast

³ ARA: vaargebied Amsterdam- Rotterdam – Antwerpen

	intensief, vaste routes					
Gebruik walstroom	Vooraf dagvaart en semi-continu vaart	Alle	Alle	Ja (op veel plekken)	Nu	€

In de basis is de **toepassing van een verbrandingsmotor, met “drop-in” HVO of duurzame synthetische e-diesel, de gemakkelijkste oplossing die nu reeds ingezet en toegepast kan worden.** Deze oplossing past in de bestaande vloot en er kan relatief veel energie meegenomen worden zodat er een lage afhankelijkheid is van de beschikbare infrastructuur voor het bunkeren.

Een tweede oplossing is de inzet van **Bio-methaan en synthetisch methaan** in een verbrandingsmotor. Methaan (in vloeibare vorm LNG) wordt reeds toegepast als brandstof. Tevens is het een beschikbare oplossing. Het risico op methaanslip (ontsnappend methaan) is onder controle. Het verlies aan energiedichtheid van de brandstof ten opzichte van diesel is beperkt. Methaan kan op termijn ook in een fuel cell (brandstofcel) toegepast worden om aan boord elektriciteit te genereren voor de aandrijving van schepen. Er is echter een beperkt aanbod en van BioLNG op de markt. De Nordsol Bio -LNG plant in Amsterdam is één van de leveranciers die dit wel produceert.

Een derde oplossing is de inzet van bio-methanol en synthetische methanol in een **verbrandingsmotor**. Methanol heeft het voordeel dat het verlies aan energiedichtheid van de brandstof ten opzichte van diesel beperkt is. De energiedichtheid is min of meer gelijk aan het gebruik van BioLNG, maar de op- en overslag kan sneller en makkelijker verlopen dan bij BioLNG. Daardoor is bio-methanol in de toekomst een mogelijke oplossing voor de inzet op schepen. Ook zou methanol in een fuel cell toegepast kunnen worden om elektriciteit op te wekken voor elektrisch aangedreven schepen. De fuel cells en motoren (nog) niet op de markt. Deze oplossing is dus nog niet ‘volwassen’.

Een vierde oplossing is **waterstof in een verbrandingsmotor**. is de opslag van waterstof minder compact dan van bio-methanol of bioLNG. Ook de motoren zijn nog niet op de markt. Inzet ligt voor de hand bij verladers die zelf waterstof produceren of dit als bijproduct genereren. In tegenstelling tot inzet in een brandstofcel, is de kwaliteit van de waterstof minder kritisch als waterstof wordt toegepast in een verbrandingsmotor.

Een vijfde oplossing is **batterijvaren**. Batterijvaren is geschikt voor vaste lijndiensten op korte afstanden in het containertransport. Batterijvaren is geheel zero-emissie vanuit “tank-to-wake” perspectief, en bovendien is dit veruit de meest energie-efficiënte oplossing. Er gaat in de gehele energieketen relatief weinig energie verloren aan warmte of andere conversieverliezen. Dit in tegenstelling tot het gebruik van verbrandingsmotoren of brandstofcellen. Met name bij eventuele zorgen over een tekort aan groene elektriciteit is dit dus een groot voordeel. Er is één concreet commercieel demonstratieproject en een commerciële partij actief om dit uit te rollen (ZES) op basis van een ‘pay-per-use’ business model (betalen per kWh geleverde energie). Beperking is de afhankelijkheid van terminals waar containers kunnen worden gewisseld en opgeladen. Daarnaast moeten schepen geschikt zijn voor het gebruik van batterijcontainers en moeten deze elektrische aandrijving hebben. Er wordt een grote ontwikkeling verwacht in de toename van opslagcapaciteit en verlaging van kosten van batterijen waardoor de marktpotentie toeneemt.

Een zesde oplossing is de toepassing van **brandstofcellen in combinatie met waterstof** als energiedrager. Demonstratieprojecten zijn gepland voor 2023 en de komende jaren. Qua

energiedichtheid scoort waterstof beter dan batterijvaren. Echter, de techniek en brandstof is duurder. Bovendien zijn er vraagtekens over de beschikbaarheid van voldoende hoeveelheden groene waterstof voor de binnenvaart. Deze oplossing kan, op termijn, aanvullend zijn op batterijvaren en geheel elektrisch varen mogelijk maken, bijvoorbeeld in geval van operaties die een grotere autonomie vragen. Dan biedt de hogere energiedichtheid van waterstof, in vergelijking met batterijen, een voordeel.

Inhoud

Samenvatting	2
Overzicht technieken en energiedragers	2
Toepasbaarheid verduurzamingsoplossingen	3
1. Inleiding	8
2. Beschrijving per type brandstof en techniek	10
2.1 Biodiesel en hernieuwbare diesel	10
Algemene omschrijving	10
Technische toepasbaarheid.....	10
Bijdrage aan milieu.....	11
Economische haalbaarheid	11
Financierbaarheid.....	12
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	12
Aantal schepen, voorbeelden.....	13
2.2 Biomethaan (cryogeen of onder druk)	13
Algemene omschrijving	13
Technische toepasbaarheid.....	13
Bijdrage aan milieu.....	14
Economische haalbaarheid	14
Financierbaarheid.....	14
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	15
Aantal schepen, voorbeelden.....	15
2.3 Biomethanol	15
Algemene omschrijving	15
Technische toepasbaarheid.....	15
Bijdrage aan milieu.....	17
Economische haalbaarheid	17
Financierbaarheid.....	17
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	17
Aantal schepen, voorbeelden.....	18
2.4 Waterstof (cryogeen of onder druk)	18
Algemene omschrijving	18
Technische toepasbaarheid.....	18
Bijdrage aan milieu.....	19
Economische haalbaarheid	20

Financierbaarheid.....	20
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	20
Aantal schepen, voorbeelden.....	20
2. 5 Batterij varen	21
Algemene omschrijving	21
Technische toepasbaarheid.....	21
Bijdrage aan milieu.....	22
Economische haalbaarheid	22
Financierbaarheid.....	22
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	23
Bijlage 1: E-fuels	24
Algemene omschrijving	24
Technische toepasbaarheid.....	24
Bijdrage aan milieu.....	23
Economische haalbaarheid	25
Financierbaarheid.....	25
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	25
Aantal schepen, voorbeelden.....	25
Bijlage 2: Fuel cell / brandstof cell.....	26
Algemene omschrijving	26
Technische toepasbaarheid.....	26
Bijdrage aan milieu.....	26
Economische haalbaarheid	27
Financierbaarheid.....	27
Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven	27
Aantal schepen, voorbeelden.....	27
Bijlage 3: vergelijkende kostenanalyse uit studie Provincie Zuid-Holland	28

1. Inleiding

Dit document is opgesteld door EICB op basis van een onderzoek⁴ uitgevoerd in 2021 voor Provincie Zuid-Holland (samen met TNO) en op basis van het STEERER-project dat is gefinancierd vanuit het Horizon 2020 programma van de Europese Commissie. Het is geactualiseerd met nieuwe inzichten en de stand huidige van de techniek. Het document geeft een overzicht van de technieken en energiedragers die passen in de transitie naar zero-emissie binnenvaart en hun toepasbaarheid in de vloot binnenschepen. In dit document (shortlist) wordt meer aandacht besteed aan de meest ver ontwikkelde technieken.

Emissiereductie wordt in dit kader breed geïnterpreteerd, en wel vanuit een “well to wake” benadering voor de broeikasgassen. Hierbij wordt bij de energiedragers het complete keten meegenomen, van productie tot gebruik in het schip (volgens de Europese richtlijnen zoals RED 2 revisie en Taxonomy). We beperken ons dus niet tot emissies die op het schip zelf plaatsvinden (“tank to wake” benadering). We merken hierbij op dat de Rijksbenadering voor het klimaatakkoord gebaseerd is op de IPCC-berekeningsmethode in combinatie met tank to wake benadering.

We gaan uit van de doelstelling, van de Europese Commissie (EC) en Centrale Rijnvaart Commissie (CCR), om minimaal 90% van de klimaat- en luchtvervuilende emissies te reduceren in 2050. CCR hanteert daarbij de reductie van de absolute hoeveelheid emissies in het jaar 2050 ten opzichte van jaar 2015, die dus met minimaal 90% gereduceerd moet zijn in de CCR-landen. Het gaat dan vooral om de uitstoot van CO₂, NO_x en fijnstof. Fijnstof wordt daarbij zowel uitgedrukt in de massa (Particulate Matter) als het aantal fijne deeltjes (Particulate Number).

De doelstelling van minimaal 90% reductie betekent dat de uitstoot van de totale vloot niet absoluut nul hoeft te zijn in het jaar 2050. Het is daardoor ook mogelijk om geavanceerde verbrandingsmotoren toe te passen die draaien op klimaat neutrale brandstoffen zoals hernieuwbare diesel, methanol en/of waterstof. HVO als drop-in fuel voor verbrandingsmotoren kan ook 90% emissiereductie bereiken, zeker als dit wordt gecombineerd met een lager energieverbruik.

Schematisch worden de mogelijke technologieën en energiedragers geschetst in figuur 1 uit de samenvatting.

Zoals uit figuur 1 blijkt, zijn er twee hoofdsporen te onderscheiden voor de ontwikkeling naar een bijna zero-emissie en klimaat neutrale binnenvaart:

- **Schone verbrandingsmotoren** die in toenemende mate gaan draaien op biobrandstoffen en duurzaam geproduceerde synthetische brandstoffen die klimaatneutraal zijn. Deze brandstoffen zijn circulair (gebruikmakend van duurzame feedstocks zoals algen) of worden gefabriceerd op basis van afgevangen CO₂ uit de lucht, met wind- en zonne-energie om vervolgens om te zetten naar brandstofmoleculen (syn-fuels).
- **Elektrificatie** van de aandrijving en gebruik van brandstofcellen (fuel cells) of batterijen, waarbij een groeiend deel van de energie (waterstof, elektriciteit) duurzaam wordt opgewekt (bijvoorbeeld uit wind en zonne-energie).

⁴ Zie voor het onderzoek: <https://staging-kennis-zuid-holland.ability.nl/wp-content/uploads/2022/05/rapporttoekomstduurzamebinnenvaart1-2.pdf>

Uiteraard zijn combinaties mogelijk van deze twee sporen: **hybride toepassingen**. Denk hierbij aan een gedeeltelijke elektrificatie van motoren op het schip. Bijvoorbeeld, een schip waarbij de motoren voor de aandrijving elektrisch zijn. De voeding voor deze elektrische motoren komt in de basis uit batterij-containers, maar er is een back-up systeem dat bestaat uit verbrandingsmotoren die dienen als generatorset. Deze generatoren kunnen worden ingezet voor het geval het accupakket leeg is en er nog naar een terminal gevaren moet worden, waar vervolgens het accupakket opgeladen of gewisseld kan worden.

Het gebruik van verbrandingsmotoren voor elektriciteitsopwekking aan boord zal waarschijnlijk nog gebruikelijk zijn in de praktijk, vooral op de korte- en middellange termijn. Dit mate waarin er volledig met batterijen en brandstofcellen kan worden gevaren ligt aan diverse omstandigheden. Het gaat dan om de energiedichtheid van de alternatieve energie, de ontwikkeling van de infrastructuur en de rijping van techniek en van de businesscase. Verbrandingsmotoren en generatoren zijn nuttig als back-up tijdens pieken in de vraag naar vermogen en om flexibel te zijn ten aanzien van de volwassenheid van alternatieve oplossingen langs een bepaalde vaarroute en de prijzen van energiedragers en technologieën. Wanneer deze motoren en generatoren draaien op klimaat neutrale brandstoffen en zijn uitgerust met nabehandelingstechnieken (zoals katalysatoren en roetfilters) dan past dit ook in het doel voor 2050.

Voor de toekomst is het belangrijk om de aandrijving van de schepen modulair in te richten, zeker van de nieuwbouwschepen, om te kunnen inspelen op de ontwikkelingen in de energieconversietechnieken en energiedragers. Daarbij wordt verwacht dat, het effect van Europees en nationale duurzaamheidsbeleid, zal leiden tot een betere concurrentiepositie van brandstofcellen en batterijen. Tenslotte zal inzet van walstroom toenemen, zodat het minder vaak nodig is om generatoren aan boord te gebruiken.

2. Beschrijving per type brandstof en techniek.

2.1 Biodiesel en hernieuwbare diesel

Algemene omschrijving

Biodiesel is een dieselachtige brandstof bestaande uit biocomponenten als methyl – en ethylesters van plantaardige olie en van gebruikte plantaardige/dierlijke olie en vetten (vb. UCOME, RME en SME). De algemene namen hiervoor zijn FAME (Fatty Acid Methyl Ester), en FAEE (Fatty Acid Ethyl Ester). Deze groep zal in het vervolg aangeduid worden met FAME.

Daarnaast is er het type HVO, afkorting van Hydrotreated Vegetable Oil, ook wel hernieuwbare diesel genoemd. Dit type maakt gebruik van dezelfde grondstoffen als FAME/FAEE, maar het verwerkingsproces is anders. Hierdoor ontstaat een synthetische, paraffine-achtige brandstof die in tegenstelling tot FAME vrij is van zuurstof en daardoor meer lijkt op fossiele diesel dan FAME. Voor deze synthetische brandstof die gemaakt wordt volgens het Fischer-Tropsch-Synthese proces is ook een aparte normering waaronder ook gas-to-liquid (GTL) valt: EN15940.

FAME en HVO worden gekenmerkt als 'drop-in fuels'; equivalent aan fossiele diesel en compatibel met de bestaande equipment aan boord van het schip. Vanuit regelgeving zijn er wel beperkingen en er dienen voorzorgsmaatregelen genomen te worden voor hoge blends (hoge aandelen gemengd in diesel). Hierop wordt nader ingegaan.

In de toekomst wordt verwacht dat er aanbod zal komen van 'e-fuel', een synthetische diesel gemaakt van groene waterstof verkregen door elektrolyse van water en afgevangen CO₂ uit industrieprocessen of de atmosfeer. Met deze basisgrondstoffen kan er een zuivere diesel geproduceerd worden die vrijwel klimaatneutraal kan zijn. Het kost echter wel veel energie om een dergelijke e-diesel te produceren, om CO₂ af te vangen uit de atmosfeer en water te splitsen in waterstof en zuurstof. Hiervoor zijn grootschalige elektrolysefaciliteiten en voldoende groene stroom nodig. Op dit moment is deze infrastructuur nog niet beschikbaar, waardoor wordt verwacht dat het nog een tijd zal duren voordat e-fuels grootschalig op de markt komen, en de prijs waarschijnlijk hoger zal zijn dan van bijvoorbeeld HVO.

Technische toepasbaarheid

Biodiesel (FAME/HVO) bevindt zich op TRL-niveau 9 (schaal 1-9 Technology Readiness Levels, de schaal die aangeeft in welke ontwikkelingsfase het nieuwe innovatietraject zich bevindt) voor zowel de aandrijflijn als de brandstofproductie. De brandstoffen worden commercieel aangeboden voor toepassingen in de binnenvaart en kunnen gedistribueerd worden via de huidige dieselinfrastructuur.

FAME wordt al enkele jaren op een grotere schaal toegepast dan HVO. Wel wordt FAME bijna altijd in een lage blendvorm (max 7%) toegepast. Dit heeft te maken met de beperkingen vanuit de regelgeving (het blijven binnen de EN590-specificatie) en, in het geval van FAME, de mogelijke technische implicaties.

Volgens de emissieregelgeving (CCR I en CCR II), is het gebruik van biobrandstoffen in CCR I en CCR II type, goedgekeurde motoren mogelijk, zolang de eigenschappen van deze brandstoffen overeenkomen met de eigenschappen van de geharmoniseerde EN590-normen. Dit betekent dat de gebruikte brandstof een FAME-aandeel mag bevatten van max 7% en een HVO-aandeel van max 30%.

NRMM Stage V biedt hier meer mogelijkheden. In de verordening (EU) 2016/ 1628 worden, in tegenstelling tot CCR I en II, meerdere referentiebrandstoffen vermeld (waaronder diesel, aardgas en LPG). Een motor kan afhankelijk van de typegoedkeuring op één of meerdere brandstoffen draaien, waaronder zowel de vermelde referentiebrandstoffen als andere brandstoffen die verkrijgbaar zijn op de markt. Wat betreft diesel is het maximale toegestane FAME aandeel 8%. Hoge blends tot 100% FAME en HVO (EN15940) zijn toegestaan indien dat door de motorfabrikant wordt aangemeld bij de typegoedkeuring.

De toepassing van bio- of hernieuwbare diesel heeft geen impact op de fysieke inpassing op het schip. Een bestaand schip kan gebruik blijven maken van de bestaande brandstoftank, motor, etc. Wel dienen er, indien niet aanwezig, brandstoffilters met waterafscidders aangebracht te worden. Verder moet uit voorzorg de brandstoftank eenmalig schoongemaakt worden, wanneer voor het eerst overgeschakeld wordt op de toepassing van biodiesel of hernieuwbare diesel. Ook filters zullen met hogere regelmaat geïnspecteerd of vervangen moeten worden, vooral tijdens de beginfase en bij kouder weer. Deze maatregelen moeten uit voorzorg getroffen worden om eventuele technische problemen te voorkomen (bacteriegroei, verstopte filters, corrosie, etc.). 'Good housekeeping' is dus met name van belang bij de toepassing van FAME-brandstof in binnenvaartschepen.

Bijdrage aan milieu

Volgens de well-to-wake benadering resulteren FAME en HVO in een CO₂-equivalente uitstoot (CO₂-equivalent, of CO₂e, is een maatstaf die wordt gebruikt om de totale hoeveelheid broeikasgassen die in de atmosfeer worden uitgestoten en hun invloed op het milieu uit te drukken:

- 11,3 gram CO₂e per MJ-energie voor FAME
- 10,3 gram CO₂e per MJ-energie voor HVO

Fossiele diesel genereert een uitstoot van 95,1 gram CO₂ per MJ. De reductie betreft dus ongeveer 90%. Dit zijn de officiële cijfers die de Nederlandse Emissie Autoriteit (NEA) hanteert voor de jaarrapportages. De waarden zijn gebaseerd⁵ op Annex 5 van de Renewable Energy Directive 2.

Volgens de Tank-to-Propellor benadering, die volgens de IPCC-methodiek wordt gehanteerd, wordt verondersteld dat de toepassing van biobrandstoffen geen klimaatemissies aan binnenvaart in nationale CO₂-emissie-rapportages worden toegeschreven. Ten opzichte van het gebruik van fossiele diesel draagt de toepassing van HVO over het algemeen ook bij aan een (geringe) reductie in luchtverontreinigende emissies (PM en NO_x).

Economische haalbaarheid

Biodiesel (FAME) is vooral gevoelig voor koud weer en heeft beperkte een houdbaarheid. Verder spelen zomerkwaliteit en winterkwaliteit een rol. Wanneer een schip veel diesel verbruikt en 24/7 vaart, zijn er veel minder problemen te verwachten dan bij schepen waarbij de diesel lang in de brandstoftank aanwezig is en er mogelijk winterkwaliteit nodig is terwijl er nog zomerkwaliteit diesel aanwezig is in de tank. Als schepen relatief snel brandstofvoorraden moet verversen (bij hoog en continue verbruik), is FAME biodiesel dus goed inzetbaar. Dit is bijvoorbeeld van toepassing in de grootschalige duwvaart en bij de containervaart. In deze situatie heeft de toepassing van biodiesel vrijwel geen impact op de investeringskosten (CAPEX).

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

Bij de toepassing van biodiesel (FAME) wordt aanbevolen om de bunkeroperaties aan te passen; frequenter te bunkeren om eventuele problemen in de brandstoftank te voorkomen (bijvoorbeeld vochtvorming/bacteriegroei). Dit lijkt geen significante impact op de operaties van het schip. Ook wordt voor de veiligheid aangeraden dat een schip uitgerust is met hoge kwaliteit brandstoffilters, zoals filters die water kunnen afvoeren.

FAME is dus goed inzetbaar bij grootverbruikers, maar veel minder geschikt voor inzet op kleinere schepen die varen op kanalen en minder frequent bunkeren. HVO is daarentegen een hoogwaardige brandstof die vrijwel zonder problemen kan worden toegepast. Wel wordt aangeraden om uit voorzorg de brandstoftank éénmalig schoon te maken wanneer er voor het eerst gevaren wordt op HVO of FAME-blends.

De toepassing van biodiesel heeft wel een impact op de operationele kosten (OPEX). De bunkerprijs van vooral HVO ligt doorgaans aanzienlijk hoger dan de bunkerprijs van fossiele diesel.

Financierbaarheid

Voor de toepassing van biodiesel geldt er geen bottleneck voor de CAPEX. Enkel de OPEX ligt hoger dan bij het gebruik van fossiele diesel. Er is daarom geen noodzaak voor een innovatieve financieringsconstructie zoals een leasing/pay-per-use constructie. Verwaarding van het CO₂ (resp. GHG) voordeel voor de klanten van de binnenvaart is mogelijk. Klanten van de binnenvaart worden vanuit verplichtingen vanuit de Corporate Sustainability Reporting Directive gedwongen om te rapporteren over de CO₂-uitstoot, ook voor diensten die zij inhuren zoals transport via binnenvaart. Verder dienen zij plannen te maken voor de CO₂-reductie. Dit kan impact hebben op financieringen, vanwege criteria voor bedrijven om voor groenfinanciering in aanmerking te komen. De EU heeft hier criteria voor opgesteld (EU Taxonomy). Via dit mechanisme kan besparing van CO₂ in binnenvaart gewaardeerd worden door de klanten.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

Het gebruik van bio- en hernieuwbare brandstoffen in de binnenvaart wordt gestimuleerd in het kader van de Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en havens. De EU-richtlijn 'Fuel Quality Directive' verplicht lidstaten een CO₂-reductie van 6% te behalen in de brandstof geleverd voor transportdoeleinden. De Renewable Energy Directive II (RED II) bevat een verplichting om biobrandstoffen in transport algemeen te mengen, met een streefdoel van 14% in 2030. Het Fit for 55 voorstel voor de herziening van RED II stuurt aan om een CO₂-reductie van 13% te behalen in de brandstof geleverd voor transportdoeleinden.

Brandstof die aan de binnenvaart geleverd wordt, wordt meegeteld in de totale hoeveelheid omvang van het volume geleverde brandstof die voor transportdoeleinden per lidstaat is geleverd. Lidstaten hebben echter zelf de verantwoordelijkheid om te beslissen in welke deelsector van transport ze specifieke verplichtingen of maatregelen oplegt, zoals bijmengverplichtingen of het invoeren van een handelssysteem voor hernieuwbare energie. In Nederland is hiervoor bijvoorbeeld het 'HBE'-ticketsysteem. Tot nu toe zijn voor de binnenvaart in Nederland, België en Duitsland nog geen specifieke doelen of maatregelen opgelegd. Hiervoor is eerst een gecoördineerde aanpak nodig tussen deze buurlanden om verstoring van het speelveld te voorkomen. Als één land namelijk niks doet en het andere wel, dan zal een significant deel van de vloot kunnen besluiten daar te gaan bunkeren waar geen maatregelen zijn om zo prijsvoordeel te behalen. Dergelijk 'uitwijkgedrag' zorgt daarmee ook voor een beperkte effectiviteit van dergelijk beleid.

Aantal schepen, voorbeelden

Er varen behoorlijk wat schepen op HVO, vooral ook schepen die actief zijn in de natte aannemerij (waterbouwers) omdat hun CO₂-reductie gewaardeerd wordt in aanbestedingen van opdrachtgevers. De exacte aantallen zijn niet bekend.

2.2 Biomethaan (cryogeen of onder druk)

Algemene omschrijving

Biomethaan is qua chemische samenstelling hetzelfde als fossiel methaan. Het molecuul is CH₄ en bestaat dus uit 1 koolstofatoom met 4 waterstofatomen. De grondstof is echter heel anders. Biomethaan wordt gewonnen uit biogas. Biogas is een gasmengsel dat ontstaat als gevolg van biologische enzymatische processen. Gemiddeld bestaat biogas uit 65% methaan en 35% koolstofdioxide (CO₂). Het biogas ontstaat als gevolg van vergisting (een anaeroob proces) van organisch materiaal zoals mest, rioolslib, actief slib, GFT-afval (gescheiden opgehaald organisch huisafval), gras, maïs, glycerine et cetera. Als restproduct blijft digestaat over (het natte eindproduct).

Een voorbeeld van een biogas dat op natuurlijke wijze ontstaat is moerasgas. Ook ontstaat biogas uit gestort huisvuil (stortgas). Vanwege de biologische oorsprong kan biogas een duurzame energiebron zijn. Door het commercieel exploiteren van het biogas, via afvanginstallaties, wordt het vrijkomen van methaan beperkt. Zonder afvanginstallatie zou immers toch methaan in de lucht worden geëmitteerd, een sterk broeikasgas. Zodoende kan de exploitatie van biogas voor productie van biomethaan vanuit well-to-wake perspectief zelfs leiden tot een netto afname van broeikasgas in de atmosfeer. Dit laatste geldt vooral voor het winnen van biomethaan uit mest afkomstig uit de veeteelt.

De binnenvaart is al bekend met de toepassing van aardgas als brandstof. Op grotere schepen wordt het aardgas aan boord opgeslagen in vloeibare vorm (Liquid Natural Gas -LNG) om ruimte te besparen ten opzichte van aardgas in druktanks (Compressed Natural Gas - CNG). Op kleinere schepen wordt ook wel CNG toegepast. Bestaande LNG-installaties aan boord kunnen gebruikt worden voor de toepassing van biomethaan, ook wel BioLNG genoemd. BioLNG heeft vanwege het proces van vervloeiing een hoge mate van zuiverheid.

Technische toepasbaarheid

Biomethaan is toepasbaar in de bestaande (gas)motoren die momenteel commercieel in binnenvaart al commercieel worden ingezet. Op dit moment zijn er in Europa binnenschepen die varen op LNG. Het TRL-niveau ligt op 9. Er zijn zowel dual fuel motoren en motoren die enkel op gas draaien. De nieuwste motoren hebben een lage methaanslip (een samenstelling van onverbrande gassen (methaan) dat vrijkomt bij een onvolledige verbranding van een gasmengsel). In de toekomst zou ook overweging kunnen worden gegeven aan het gebruik van biomethaan in brandstofcellen als brandstof voor elektrisch aangedreven schepen. Deze fuel cells zijn echter nog niet beschikbaar.

De lagere energiedichtheid van gas heeft impact op de fysieke inpassing: in geval van LNG is de waarde 14,7 MJ per liter ruimteslag. Ten opzichte van diesel betekent dit dat aan boord een factor 2,3 meer aan ruimte nodig is om dezelfde hoeveelheid energie mee te nemen.

Er zijn wettelijke kaders aanwezig voor het toepassen van LNG (Bio-LNG) aan boord van schepen. Hier ligt geen belemmering. Ook is er stimulerend beleid vanuit overheid om Bio-LNG te produceren, bijvoorbeeld vanuit de RED2 richtlijn en de EU Green Deal. Het toepassen van CNG is minder gebruikelijk en hiervoor ontbreekt de technische regelgeving (ES-TRIN) waardoor er een uitzondering gevraagd dient te worden om op CNG te mogen varen. TESO (veerdienst Texel) is de enige partij die met een groot schip vaart op CNG.

Bijdrage aan milieu

Luchtkwaliteit emissies: Aardgas verbrandt over het algemeen veel schoner dan diesel in een verbrandingsmotor. Ook zonder nabehandelingssysteem kan een gasmotor de nieuwe Stage V emissie-eisen halen (deze bedraagt maximaal 1.8 gram NOx per kWh en 0.01 gram fijnstof per kWh). Door toepassing van een uitlaatgasnabehandelingssysteem, zoals een roetfilter en SCR-katalysator, kunnen de luchtvervuilende emissies nog verder worden gereduceerd. In het wegvervoer zijn er gasmotoren die nog nauwelijks NOx, fijnstof en methaanslip uitstoten (bijvoorbeeld de Volvo HPDI motor) in combinatie met een laag brandstofverbruik, wat gunstig is voor de CO₂-uitstoot. Dergelijke Euro VI motoren kunnen na marinisatie ook worden toegepast in de binnenvaart. Op dit moment zijn er echter nog geen leveranciers die deze HPDI-gasmotoren aanbieden voor toepassing in de binnenvaart.

Klimaatemissies: de klimaatwinst van biomethaan ligt in het voorkómen van methaanemissies op andere plaatsen. Door biogas 'af te vangen' wordt vermeden dat CO₂ er methaan in de atmosfeer komt. Het afgevangen methaan wordt vervolgens nuttig ingezet als brandstof. Op basis van RED 2 wetgeving (bijlage 5) is aangegeven dat dit kan leiden tot een winst van 220% aan broeikasgasemissies (in geval van BioLNG die gewonnen wordt uit mest via een gesloten systeem). In andere voorbeelden zijn CO₂e-reducties mogelijk van 80%. NEA hanteert voor Nederland voor biogas een gemiddelde CO₂e-uitstoot van 20 gram per MJ, ten opzichte van 95,1 gram CO₂e per MJ voor diesel.

Economische haalbaarheid

De investeringskosten (CAPEX) zijn hoog door de aanwezigheid van een cryogene tank, verdamper (voor het omzetten van vloeibaar aardgas) en de specifieke gasmotor die noodzakelijk is. Daarbij zijn er strenge veiligheidseisen aan de installatie aan boord van de binnenvaartschepen. De meerkosten in de investering, ten opzichte van een aandrijflijn op diesel met gelijk vermogen, zijn doorgaans 1 tot 2 miljoen euro (o.a. afhankelijk van het aantal motoren, de grootte van de LNG-tank en de veiligheidsmaatregelen).

Na investering zijn de operationele kosten (OPEX) beperkt. Verwacht wordt dat biomethaan een lagere brandstofprijs heeft dan HVO. De OPEX zal daarbij afhankelijk zijn van het stimulerende beleid van de overheid, de herziening van RED 2 beleid en ander de maatregelen die voortkomen uit de EU Green Deal en Nederlandse klimaatakkoord.

Aangezien het ruimtebeslag aan boord groter is dan bij diesel, is er mogelijk een kleinere autonomie van het schip (uitgaande van dezelfde volume). Mogelijk zal er vaker gebunkerd moeten worden, of wordt er laadruimte opgeofferd om plaats te maken voor een grotere tank. Daarbij kost het bunkeren van (Bio)LNG veel meer tijd dan het bunkeren van diesel. Het bunkeren van diesel kan zelfs plaatsvinden tijdens het varen van het schip en hoeft dus niet tot tijdverlies te leiden. Soms moet er ook worden omgevaren om (Bio)LNG te kunnen bunkeren omdat het aantal plekken beperkt is waar

gebunkerd kan worden. De extra bunkertijd en de (huidige) beperkte infrastructuur zijn dus negatieve effecten voor de exploitatie van een schip dat vaart op (Bio)LNG.

Financierbaarheid

Er zijn uitdagingen met de financierbaarheid vanwege de hogere investering waarbij de terugverdientijd afhangt van onzekere brandstofprijzen. Daardoor zijn de banken terughoudend in het financieren van de investeringen. Tot nu toe gaat het om vaste installaties aan boord, die niet gemakkelijk in aanmerking komen voor een leaseconstructie.

Een ontwikkeling naar modulaire energiecontainers (generatorsets op biomethaan) in combinatie met elektrische motoren aan boord zou eventueel een betere financierbaarheid betekenen, waarbij ook het 'pay-per-use' model toegepast kan worden. Maar dit betekent wel dat de schepen uitgerust moeten worden met elektrische motoren. Eventuele ombouwkosten van een schip om deze elektrisch aangedreven te maken vormen hierbij een factor die nadelig kan werken op de terugverdientijd en de economische haalbaarheid en daarmee de financierbaarheid

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

De steun voor nieuwbouw of ombouw naar (fossiel) LNG is vrijwel afgebouwd. Verder zijn er in Nederland, tot op heden, weinig concrete voorbeelden voor het opwekken en toepassen van biomethaan (BioLNG) als brandstof voor binnenvaart. In het wegvervoer zijn er wel voorbeelden, bijvoorbeeld met Rolande, Shell en verladere als Albert Heijn. Er is productie van BioLNG in Nederland, bijvoorbeeld in Amsterdam.

Aantal schepen, voorbeelden

Er varen ongeveer 14 binnenvaartschepen op LNG en 1 schip op CNG. Voor zover bekend wordt er nog geen biomethaan gebruikt als brandstof voor binnenschepen, wel voor een veerboot in Zweden. Leverancier TITAN is zich voor de zeevaart wel aan het voorbereiden op levering van biomethaan.

2.3 Biomethanol

Algemene omschrijving

Methanol is de eenvoudigste variant van de groep alcoholen en heeft de moleculaire formule CH_3OH . Het is rijk aan waterstof met slechts een enkele koolstofbinding. Het kan geproduceerd worden van fossiele bronnen (vb. aardgas), maar ook uit hernieuwbare bronnen (vb. biomassa). Productie uit hernieuwbare bronnen middels een vergassing of fermentatieproces resulteert in biomethanol. Het wordt ook geproduceerd als bijproduct van het kraft-pulpproces door de procesindustrieën.

Biomethanol kan toegepast worden in verbrandingsmotoren of als energiedrager in een brandstofcel/Fuel Cell (FC) installatie.

In tegenstelling tot biodiesel kan biomethanol niet als een drop-in fuel gebruikt worden in een bestaande dieselmotor. Een bestaande motor zou uitgerust moeten worden met een retrofit-installatie om op mono/dual fuel methanol te kunnen varen. Een alternatief is de ontwikkeling van een nieuwe motor.

Biomethanol kan als energiedrager gebruikt worden in een brandstofcelinstallatie aan boord van een binnenvaartschip. Methanol wordt in een dergelijke installatie bij 300 °C omgezet in waterstofrijk

gas. Afhankelijk van de gebruikte type FC's (bijv. lage temperatuur PEM FC's) kan de zuiverheid van het gereformeerde gas een technische beperking zijn. Verder heeft de reformer een nadelige impact op de systeemefficiëntie van de FC-installatie.

Technische toepasbaarheid

Biomethanol in verbrandingsmotoren:

Biomethanol in verbrandingsmotoren wordt nog niet commercieel toegepast in de binnenvaart. Er zijn meerdere voorbeelden van onderzoeksprojecten (vb. MENENS, Fastwater en Greenpilot), zowel lopend als afgerond, waarin onderzoek verricht wordt om bestaande motoren uit te rusten met een retrofitpakket zodat ze kunnen draaien op methanol en/of diesel, en ook naar nieuwe specifieke motoren. Momenteel werken diverse partijen in het Green Maritime Methanol Project en het MENENS project aan de mogelijkheden van methanol als scheepsbrandstof. Het TRL-van biomethanol in verbrandingsmotoren in binnenvaart ligt op 6. Voor de brandstofproductie ligt het niveau op 9.

Biomethanol is vloeibaar bij omgevingstemperatuur en kan niet zonder aanpassingen (coating) opgeslagen worden in een bestaande conventionele brandstoftank van een binnenvaartschip. Het retrofitten van een bestaande motor is noodzakelijk. Een alternatief is de installatie van nieuwe motoren die ontwikkeld zijn voor de toepassing van methanol, maar deze zijn momenteel niet op de markt, gezien de beperkte afzetmarkt en hoge kosten voor motorfabrikanten om deze voor Stage V te certificeren.

Ook de wettelijke kaders vormen een barrière voor de toepassing van biomethanol in de binnenvaart, deze staan de toepassing van (bio)methanol in verbrandingsmotoren namelijk (nog) niet toe. Wel is er regelgeving (ADN) beschikbaar voor het vervoer en overslag van (bio)methanol als lading voor de binnenvaart.

De opslag van biomethanol heeft een waarde van 16,2 MJ/liter. Dit betekent dat een factor 2 meer ruimte nodig is dan voor biodiesel (33,3 MJ/liter). Het is daarmee iets gunstiger dan biomethaan als dat cryogeen wordt opgeslagen.

Biomethanol in brandstofcellen/Fuels Cells:

Biomethanol in een brandstofcel installatie wordt nog niet commercieel toegepast in de binnenvaart. Ook hiermee wordt nog geëxperimenteerd in pilots. Het TRL-van biomethanol in fuel cells ligt op 5. Voor de brandstofproductie ligt het niveau op 9.

De toepassing van biomethanol in FC's heeft een grotere impact op de fysieke inpassing in het schip, dan wanneer het als verbrandingsbrandstof wordt gebruikt. Er dient namelijk een complete FC-installatie aangebracht te worden (FC's, elektromotor, batterijen en reformer).

De wettelijke kaders staan ook de toepassing van biomethanol in FC's in de binnenvaart (nog) niet toe. Dit is wel in voorbereiding en zal ingaan per januari 2026. Het is mogelijk om ontheffing te krijgen van de Centrale Rijnvaart Commissie voor pilotprojecten, mits de veiligheid kan worden bewezen middels studies en beoordelingen van klassebureau's.

Bijdrage aan milieu

De toepassing van biomethanol in zowel een verbrandingsmotor als in een FC-installatie draagt sterk bij aan de milieu- en klimaatdoelstellingen. Met verbranding in een motor kan de uitstoot vrijwel klimaatneutraal zijn, maar zal er wel uitstoot zijn van NO_x vanwege een hoge verbrandingstemperatuur waarbij zuurstof in de lucht gaat reageren met de stikstof in de lucht. Eventuele NO_x-emissie kan worden gereduceerd met de inzet van een katalysator (SCR). Ook kan er sprake zijn van geringe fijnstofuitstoot, als smeerolie in de motor langs de zuigerveren in de verbrandingskamer kan komen en verbrandt samen met de methanolbrandstof. Goed onderhoud is dus van belang om dit soort emissies te voorkomen.

Ook met de toepassing van biomethanol als een energiedrager in een FC-installatie is er sprake van uitstoot van luchtvervuilende emissies (vooral NO_x). Deze emissies ontstaan in het reforming proces van biomethanol naar H₂.

NEA hanteert voor biomethanol een CO₂e-uitstoot van 11,1 gram per MJ, ten opzichte van 95,1 gram CO₂e per MJ voor diesel.

Economische haalbaarheid

Biomethanol in verbrandingsmotoren:

De toepassing van biomethanol in een verbrandingsmotor maakt het noodzakelijk om een bestaande dieselmotor uit te rusten met een retrofitpakket of een nieuwe motor aan te schaffen die speciaal is ontwikkeld voor de toepassing van (bio)methanol.

De prijs van biomethanol ligt hoger dan de bunkerprijs van fossiel diesel.

De energiedichtheid van biomethanol ligt ongeveer de helft lager dan de dichtheid van fossiel diesel. Dit heeft een impact op de bunkeroperaties van een schip: het bunkeren dient frequenter plaats te vinden. Met een nieuwbouw kan eventueel gekozen worden voor grotere brandstoftanks, maar dit kan ten koste gaan van vrachtruimte. Ook bestaat er nog geen volwassen bunkernetwerk voor (bio)methanol leveringen aan de binnenvaart.

Biomethanol in Fuels Cells:

Een FC-installatie met biomethanol als energiedrager brengt hoge CAPEX-investeringen met zich mee t.o.v. een conventionele dieselaandrijving.

Net als bij biomethanol in verbrandingsmotoren zal de toepassing van biomethanol in FC's resulteren in hogere OPEX, vooral vanwege de hogere bunkerprijs.

De hierboven genoemde logistieke implicaties voor de toepassing van biomethanol in verbrandingsmotoren gelden ook voor de toepassing van biomethanol in FC's.

Financierbaarheid

Investeringen in biomethanoltoepassingen in zowel verbrandingsmotoren als FC's zouden in theorie ondergebracht kunnen worden in een innovatieve financieringsconstructie zoals pay-per-use en leasing. Echter, in tegenstelling tot batterijen lenen de genoemde biomethanoltoepassingen zich minder voor dit soort constructies, zeker niet in bestaande schepen. Met bestaande schepen kan geen gebruik gemaakt worden van de bestaande brandstoftank, wel van de bestaande motor als

deze wordt geretrofit. Verder is het zo dat een nieuwe verbrandingsmotor of FC-installatie sloop specifieke investeringen zijn en aan boord worden gemonteerd. In tegenstelling tot een bestaand schip biedt een nieuw modulair schip uiteraard meer mogelijkheden voor pay-per-use en leasingconstructies.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

Het gebruik van biobrandstoffen, waaronder biomethanol, in de binnenvaart wordt gestimuleerd in het kader van zowel de Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en havens, de RDM-regeling, DKTI en RED II en de revisie daarvan.

In tegenstelling tot biodiesel is er echter nog niet op grote schaal aandacht voor de toepassing van biomethanol in de binnenvaart, dit geldt vooral voor de toepassing van biomethanol in FC's.

Aantal schepen, voorbeelden

Methanol in verbrandingsmotoren: 1 (Green Pilot)

Methanol in Fuels Cells: 1 (Motschip Innogy, inmiddels gestopt)

2.4 Waterstof (cryogeen of onder druk)

Algemene omschrijving

Waterstof is de schoonste brandstof voor een brandstofcel (fuel cell) of verbrandingsmotor. Het molecuul is H_2 . Er is onderscheid tussen grijze waterstof (gemaakt uit fossiele bron zoals aardgas), blauwe waterstof (gemaakt uit fossiele bron waarbij CO_2 wordt afgevangen) en groene waterstof (uit elektrolyse van water met behulp van groene stroom). Bij de verbranding van H_2 komt water vrij (H_2O) en geen CO_2 , aangezien er geen koolstofatoom in de brandstof zit. Waterstof is echter kostbaar om te produceren en ook lastig op slaan aan boord in pure vorm. Er wordt daarom ook gedacht aan de inzet van de zogenaamde 'waterstofdragers' zoals ammoniak, mierzuur of methanol, waarbij waterstof lokaal op het schip ontbonden wordt van andere atomen (reforming process) zodat er pure waterstof beschikbaar is voor de aandrijving. Dit leidt echter tot meer installaties op het schip. Voor dit document wordt uitgegaan van pure waterstof, opgeslagen in een druktank (350 of 500 bar) of vloeibaar gemaakt op een temperatuur van $-253\text{ }^\circ\text{C}$ onder een druk van 1 bar (cryogeen LH_2).

Technische toepasbaarheid

Waterstof kan niet zomaar worden toegepast in bestaande verbrandingsmotoren, deze moeten specifiek worden aangepast of er moeten nieuwe motoren voor worden ontwikkeld. Echter de Stage V regelgeving voorziet niet in waterstof als brandstof. Voor zeevaart zijn wel eerste schepen met waterstofverbrandingsmotoren toegelaten.

Een andere mogelijkheid is het toepassen van een brandstofcel. Het nadeel van de brandstofcel is dat deze hoge investeringskosten met zich meedraagt en een beperkte levensduur kent in vergelijking met een verbrandingsmotor. De kapitaalkosten zijn dus veel hoger voor brandstofcellen dan voor verbrandingsmotoren. Daar staat tegenover dat de efficiency van brandstofcellen mogelijk iets gunstiger is. Verder zijn de huidige brandstofcellen onvoldoende dynamisch in de

vermogensafgifte, waardoor er een accu nodig is om te kunnen omgaan met wisselingen in de vermogensvraag. Op dit moment zijn er slechts enkele kleinere schepen op waterstof, zoals opleidingsschip Emili (fuel cell) en passagierschip Hydrovill, de HydroTug en Windcat (dual fuel verbranding) dat feitelijk zeeschepen zijn (onder IMO). De Emili is wel een binnenvaartschip, maar heeft echter geen vergunning. Het TRL ligt nog op een 7 voor de aandrijflijn waarbij de brandstof wordt opgeslagen in een tank onder 350 bar druk en een TRL-6 voor een tank onder 700 bar druk. Voor de productie van groene waterstof ligt het TRL op 8.

Er zijn wel projecten in de pijplijn om ook grotere binnenschepen te gaan laten varen met waterstofbrandstofcellen. Bedrijven als Nedstack, Future Proof Shipping en NRPC zijn bezig met dit soort ontwikkelingen. Het eerste commerciële vrachtschip met waterstof fuel cell aandrijving, de Maes van Future Proof Shipping, wordt verwacht in de vaart in het eerste kwartaal van 2023.

De impact op fysieke inpassing is groot. De energiedichtheid bedraagt:

In geval van 350 bar (gasvormig): 1,6 MJ per liter

In geval van 700 bar (gasvormig): 3,8 MJ per liter

In geval van cryogeen (vloeibaar): 6,1 MJ per liter

Ten opzichte van diesel betekent dit dat **een factor 5,5 tot 21 meer ruimte nodig is aan boord om dezelfde hoeveelheid energie mee te nemen**. Dit is dus duidelijk minder gunstig dan biomethanol en bio-LNG.

De wettelijke kaders voor het varen op waterstof ontbreken nog, waardoor er nu nog een specifieke ontheffing moet worden aangevraagd voor het varen op waterstof. Het staat wel op de agenda van CCNR/CESNI om dit uit te werken in de komende jaren. Aangegeven is dat de regelgeving per 1 januari 2026 compleet is afgerond en van kracht zal zijn. In de tussentijd kan de CCR ontheffingen verstrekken na toetsing op veiligheid waarbij klasse bureaus ingeschakeld worden om de veiligheid aan te tonen.

Bijdrage aan milieu

De milieuprestatie van waterstof is uitmuntend wanneer dit wordt toegepast in een brandstofcel. Er is op het schip géén uitstoot van klimaatemissies en emissies die de luchtkwaliteit negatief beïnvloeden. Belangrijk is uiteraard wel dat de waterstof dan ook duurzaam is geproduceerd. Daarbij dienen voor de volledigheid ook de totale milieueffecten in aanmerking worden genomen (life cycle analyses).

Wanneer waterstof wordt verbrand in een mono-fuel verbrandingsmotor zijn er ook geen klimaatemissies op het schip (geen CO₂). Wel kan er uitstoot zijn van NO_x vanwege een hoge verbrandingstemperatuur waarbij zuurstof in de lucht gaat reageren met de stikstof in de lucht. Eventuele NO_x-emissie kan worden gereduceerd met de inzet van een SCR. Ook kan er sprake zijn van geringe fijnstofuitstoot, omdat smeerolie in de motor langs de zuigerveren in de verbrandingskamer kan komen en kan meebranden met de waterstof. Goed onderhoud is dus van belang om dit soort emissies te voorkomen. Met dual fuel motoren (zoals op de Hydroville) kan er sprake zijn van hogere emissies, doordat er dan een deel diesel verbrand wordt. Echter met inzet van SCR en DPF-technieken (katalysatoren en filters in het uitlaatgassysteem) kunnen NO_x en fijnstof uitstoot sterk gereduceerd worden.

Economische haalbaarheid

De prijs van waterstof is hoog, zowel qua investering als operationele kosten. Vooral als gebruik gemaakt wordt van de emissievrije brandstofcel zijn er hoge investeringen nodig bij een beperkte levensduur. Maar ook is er een speciale motor nodig om waterstof effectief en schoon te kunnen verbranden. Ook de opslag aan boord is een aandachtspunt. In gasvorm neemt dit veel ruimte in, dat ten koste kan gaan van laadruimte. In vloeibare vorm (cryogeen) neemt het minder ruimte in, maar de investeringskosten bij een cryogene tank liggen veel hoger dan bij een druktank. Bovendien is de technische volwassenheid van deze cryogene opslag nog niet duidelijk.

Er zijn logistieke complicaties bij het overslaan van waterstof in bulkvorm, aangezien dit in de maritieme sector nog in de kinderschoenen staat en er nog weinig ervaring mee is. Er is nog geen netwerk van bunkerpunten of truck-to-ship bunkering aan geselecteerde kades voor het overpompen van waterstof. Er mag dus vanuit gegaan worden dat de verliestijden voor bunkeren en het verlies aan payload substantieel kan zijn en een nadelig effect kan hebben op de exploitatiekosten.

Een ander concept is het werken met wisselbare containers waarin de waterstof wordt opgeslagen, die op de bestaande containerterminals kunnen worden overgeslagen. Dit beperkt echter wel de inzetbaarheid. Schepen zullen geschikt moeten zijn om containers een plek te geven op het dek en moeten bij containerterminals langs voor de overslag. Logischerwijs is dit vooral toepasbaar bij schepen die actief zijn in de containerbinnenvaart en toch al bij de betreffende containerterminals komen voor het overslaan van ladingcontainers. Dit is ook het concept waar Future Proof Shipping mee werkt voor de Maes. Verder is het concept afhankelijk van planning van afhandeling van schepen op containerterminals en zal er een grote pool van waterstofcontainers nodig zijn.

Financierbaarheid

Op dit moment is de financierbaarheid slecht vanwege een ontbrekende business case. De prijs van het gebruik van groene waterstof is momenteel erg hoog in vergelijking met het gebruik van bijvoorbeeld HVO. Alleen als verladers de meerkosten willen betalen is een toepassing mogelijk op dit moment. De business case kan verbeteren in geval van grootschalige subsidies of de toepassing van 'vervuiler betaalt' principe.

Op de langere termijn ligt de financierbaarheid sterk aan de mate waarin waterstof als modulaire oplossing kan worden toegepast. Te denken valt aan het vervangen van batterijcontainers door containers met daarin waterstofopslag en eventueel een aparte unit met de brandstofcel. In dat geval kan er een 'pay-per-use' model worden toegepast voor de waterstofcontainer en eventueel een leasemodel voor de brandstofcellen, zodat de binnenvaartondernemer niet meer de CAPEX draagt.

Dit is een concept dat daarmee schaalbaar is en zich ook leent voor toepassing van nieuwe businessmodellen die de economische haalbaarheid verbeteren. Dit wordt nader uitgewerkt in het CONDOR project onder leiding van Havenbedrijf Rotterdam, in het kader van programma RH2INE. Het doel is om begin 2023 een grote aanvraag te doen voor -subsidie, van het Klimaatfondsnationaal groeifonds.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

Het kabinet ziet waterstof als een cruciale 'Zero Emission' energiedrager en zet bij de energietransitie in op een grootschalige uitrol van de productie en de toepassing van 'klimaatvriendelijke' waterstof

(Kabinetsvisie Waterstof, maart 2020). Naast de sectoren 'Industrie' en 'Gebouwde omgeving' leent ook de sector 'Mobiliteit' zich voor de toepassing van waterstof, met name in de logistieke sector (met zwaardere vermogens).

De Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens wil 150 zero-emissie schepen in 2030. Daarvan zou een deel kunnen bestaan uit waterstofaangedreven schepen die werken met fuel cells.

Aantal schepen, voorbeelden

Hydroville, Hydrotug, Hydrocat (verbrandingsmotor), MS Emeli, Elektra, Hydra (FC). In 2023 de Maes van Future Proof Shipping en motorschip Antonie dat is aangesloten bij coöperatie NPRC

2.5 Batterijvaren

Algemene omschrijving

Het gaat hier om het varen op elektriciteit vanuit het elektriciteitsnet dat in batterijen wordt opgeslagen. Deze batterijen kunnen vervolgens gewisseld worden wanneer deze leeg zijn door volle batterijen. Het gaat om een standaardafmeting van een container met batterijen gelijk aan de afmeting van maritieme containers die voor transport van goederen worden gebruikt. Het gaat dan om de ISO-20 voet of 40 voet standaard. Daardoor kan bestaande infrastructuur (container kranen) en equipment (reach stackers, container vrachtwagens) worden gebruikt om deze batterijen te laden, lossen en transporteren. Containerschepen zijn daardoor de eerste doelgroep om op batterijen te gaan varen, vooral wanneer deze varen op vaste routes over korte afstanden. De volgende batterijtypes worden momenteel aangeboden aan de binnenvaart: Lithium Ion NMC (Li-Ion-NMC) en Lithium iron phosphate (LiFePO₄). Lithium Ion NMC heeft een betere prestatie en hogere energiedichtheid. Deze batterij wordt toegepast in auto's. De LiFePO₄ batterij scoort beter op veiligheid en levensduur dan de Li-Ion-NMC, maar heeft een lagere energiedichtheid.

Een andere variant is het varen met de zogenaamde 'flow batteries'. De flow battery werkt, net als een gewone batterij, met twee polen. De batterij bestaat uit twee tanks gevuld met een vloeibaar elektrolyt, bijvoorbeeld op basis van vanadium. De ene kant is negatief geladen, de andere positief. Vervolgens wordt de vloeistof door elektrochemische cellen gepompt. Afhankelijk van of de batterij moet laden of ontladen, kan de vloeistof hierbij lading afstaan of opnemen. Een voordeel is dat er een lager veiligheidsrisico is door oververhitting (thermal runaway). Ook zou de levensduur groter kunnen zijn. Daarbij moet de gebruikte (ontladen) vloeistof dus aan boord blijven en is er ook hier een logistiek nodig om regelmatig de vloeistof te vervangen. De Nederlandse firma Port-Liner ziet de Vanadium Redox flow-batterij (VRFB) als kansrijke oplossing voor elektrisch varen.

Technische toepasbaarheid

De basistechniek is beschikbaar en wordt al een behoorlijk aantal jaren toegepast in de automobiellindustrie (o.a. TESLA). Innovatief is het principe van de wisselbare gecontaineriseerde batterij en het business model van 'pay-per-use'. In 2021 is het bedrijf Zero Emission Services gestart met een eerste schip dat werkt met batterijcontainers die op de containerterminal bij Alphen a/d Rijn gewisseld en opgeladen worden. Het TRL-van de aandrijftechniek is 8 voor Li Ion NMC en LiFePO₄ en 5 voor de flow batteries. Voor de brandstofproductie (productie groene elektriciteit) ligt het TRL-op 9.

De impact op de fysieke inpassing is groot: qua energiedichtheid scoren de batterijen het laagste van de energiedragers. Uitgaande van 1,7MWh (6120 MJ) voor een 20 voet accubatterij (38,7m³ = 38700 liter) komt de MJ/liter waarde op 0,16 MJ/liter ten opzichte van 33,3 MJ/liter voor diesel. Dit is dus een factor 210 meer ruimte nodig voor energieopslag (!!). Echter, de energie -efficiency van een aandrijving op batterij-elektriciteit is veel hoger dan bij een verbrandingsmotor. Een verbrandingsmotor heeft een rendement van circa (90% versus 40-45% terwijl een aandrijving op energie batterij veel minder warmte verlies kent en een rendement haalt van 85-90%. Daardoor kan ervan worden uitgegaan dat een aandrijving op diesel een factor 100 meer energie kan meenemen per liter dan een accucontainer. Bovendien zijn de batterijen zwaar, waardoor er gekeken moet worden naar plaatsing, stabiliteit en het al snel zal leiden tot enig verlies van de payload. Daarbij speelt er momenteel een discussie binnen de regelgevers (CESNI/PT) die ertoe leidt dat het waarschijnlijk niet wordt toegestaan om normale ladingcontainers te stapelen op wisselbare batterijcontainers en dat batterijcontainers niet in het normale laadruim geplaatst kunnen worden. Het verlies aan ruimte en payload kan daardoor significant zijn.

De technische toepasbaarheid voor de flow batteries ligt aanzienlijk lager. Het wettelijke kader ontbreekt en er is geen ervaring met flow batteries in de transportsector. Het TRL wordt daarom ingeschat op 5.

Bijdrage aan milieu

Batterijvaren heeft een uitstekende score op gebied van het bereiken van de emissiedoelstellingen, aangezien het niet leidt tot enige emissie aan boord van het schip. Wel dient rekening gehouden te worden met de emissies die eventueel vrijkomen bij de productie van de elektriciteit (groen, blauw, grijs) en de vervaardiging van batterijcontainers (Life Cycle Assessment), mede gezien de schaarse grondstoffen die voor sommige soorten accu's gebruikt worden.

Economische haalbaarheid

De aanschafprijs voor batterijcontainers is zeer hoog, dit leidt tot een hoge CAPEX.

De operationele kosten van de batterijcontainer zijn relatief beperkt. Een belangrijk aspect is de prijs van stroom voor het herladen van de batterijcontainers en de servicekosten voor beheer en logistiek van de batterijcontainers. Vooralsnog liggen de operationele kosten op een hoger niveau dan de prijs van diesel.

Voor flow batteries zijn er geen betrouwbare cijfers beschikbaar over de economische haalbaarheid, gezien de lage TRL.

De logistieke implicaties zijn substantieel. Met batterijvaren is er in veel gevallen een relatief groot verlies van payload en tijdverlies. Alleen op korte afstanden en bij een vaste dienstregeling zijn de meerkosten beperkt.

Financierbaarheid

Batterijcontainers lenen zich bij uitstek voor een 'pay-per-use' model. Een knelpunt bij de financierbaarheid is echter de business case. Op dit moment is batterijvaren duurder dan doorgaan op de conventionele manier. Slechts een klein deel van de verladers is bereid om meerkosten voor haar rekening te nemen. Met subsidies vanuit de overheid zijn echter wel business cases te

realiseren. ZES werkt momenteel aan de verder uitrol van het gebruik van batterijen in de binnenvaart dankzij een subsidie van 50 miljoen uit het coronaherstelfonds. Dit geld zal deels ook gebruikt worden voor het ombouwen van schepen naar elektrische aandrijving.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

In het kader van Green Deal wordt batterijvaren actief ondersteund door beleid, mede met subsidies (middelen uit het herstelfonds en andere regelingen).

Aantal schepen, voorbeelden

Tot nu toe is er 1 schip dat commercieel actief is en vaart met wisselbare batterijcontainers (ZES). Er zijn wel diesel-hybride containerschepen in de vaart die voorbereid zijn op voor batterijvaren.

Bijlage 1: E-fuels

Algemene omschrijving

E-fuels zijn synthetische brandstoffen die zijn geproduceerd met duurzame elektriciteit. In de literatuur wordt ook wel verwezen naar electrofuels, power-to-X (PtX), power-to-liquids (PtL) en power-to-gas (PtG). Het productieproces begint met duurzaam opgewekte elektriciteit, bijvoorbeeld uit wind- en zonne-energie.

De groene stroom wordt gebruikt voor de elektrolyse van water dat wordt opgesplitst in zuurstof en (groene) waterstof. Een aantal elektrolyse technieken kan voor dit proces gebruikt worden, o.a.:

- Lage temperatuur (50 tot 80°C) technieken zoals alkaline electrolysis cells (AEC) en proton exchange membrane cells (PEMC).
- Hoge temperatuur (700 tot 1000°C) technieken zoals solid-oxide electrolysis cells (SOEC).

De ontstane groene waterstof kan gezien worden als feedstock voor de productie van e-fuels. Maar het kan ook een eindproduct zijn. Vervolgens kan middels een chemische reactie tussen groene waterstof en opgevangen CO₂ e-fuels geproduceerd worden. Er zijn diverse conversieroutes voor dit proces, o.a.:

- Fischer-Tropsch synthesis voor e-vloeibare koolwaterstoffen zoals e-diesel en e-benzine
- methanisation voor e-methaan
- methanol synthesis voor e-methanol, e-DME, e-OME, e-diesel, e-benzine
- Reverse water-gas shift (RWGS) voor syngas

Afhankelijk van de motor die zich aan boord van het schip bevindt, kan de e-fuel als drop-in fuel gebruikt worden in een verbrandingsmotor. Zo kan e-diesel als drop-in fuel gebruikt worden in een bestaande dieselmotor. E-hydrogen, oftewel groene waterstof, kan uiteraard ook gebruikt worden in een FC-installatie.

Technische toepasbaarheid

Het TRL van e-fuels hangt af van zowel de productie als de toepassing. Zo worden er nog weinig e-fuels op een commerciële schaal geproduceerd. Voor pilots is er wel al een aantal bekend in Weltré voor methaan door Audi en E-methanol in IJsland. In de Verenigde Staten zijn er op dit moment ook al een aantal lopende projecten. Wat betreft de toepassing hangt de TRL af van de specifieke e-fuel, e-diesel zou in theorie als een drop-in fuel gebruikt kunnen worden in een dieselmotor, terwijl voor e-ammonia de techniek nog niet volwassen is (de motor zelf en de opslag van brandstof is nog niet ontwikkeld). Het TRL van de aandrijflijn voor e-fuels is daarmee gelijk aan het TRL van de aandrijflijn van de bio/blauwe variant van de brandstof. Het TRL voor de brandstofproductie ligt echter lager.

De impact op de fysieke inpassing op het schip hangt af van het type e-fuel. De impact die geldt voor de fossiele en biologische varianten gaan ook op voor de technisch gelijkwaardige e-fuel varianten.

Ook de wettelijke kaders zijn afhankelijk van het type e-fuel. Er zijn geen beperkingen voor de toepassing van e-diesel, zolang dit binnen de specificaties van EN15940 valt. In het geval van bijvoorbeeld e-methanol is er net als met biomethanol en fossiele methanol nog geen wettelijk kader beschikbaar die de verdere uitrol van de brandstof in de binnenvaart mogelijk maakt. Wel zijn er algemene kaders beschikbaar die vergelijkbaar zijn met H₂.

Bijdrage aan milieu

De toepassing van e-fuels in een FC-installatie draagt sterk bij aan de milieu- en klimaatdoelstellingen. De uitstoot van PM, NOx en GHG is namelijk gelijk aan nul in geval van toepassing in een FC. In geval van een verbrandingsmotor zijn er emissies te verwachten van NOx en fijnstof, te vergelijken met verbranding van GTL (synthetische diesel gemaakt uit aardgas). Er zal SCR en DPF nodig zijn om de luchtkwaliteit emissies te reduceren.

Economische haalbaarheid

De CAPEX voor de toepassing van e-fuels is afhankelijk van het type e-fuel. E-diesel kan gebruikt worden in een conventionele bestaande en nieuwe dieselmotor en resulteert dus niet in hogere CAPEX. De hoge CAPEX die gelden voor bijvoorbeeld waterstof en ammoniak gelden ook voor hun 'e'-variant.

Een hogere OPEX is voorzien voor alle e-fuels. Volgens de projecties kan de bunkerprijs in 2030 ongeveer 3x zo hoog liggen als de bunkerprijs van fossiel diesel nu, afhankelijk van de specifieke e-fuel kan dit iets hoger/lager zijn.

De logistieke implicaties zijn afhankelijk van de gebruikte e-fuel. De logistieke implicaties voor de fossiele/biologische varianten gelden in grote lijnen ook voor de 'e'-varianten.

Financierbaarheid

De potentie van innovatieve financieringsconstructies hangen af van het schip en de specifieke e-fuel. Een modulair opgebouwd (nieuw) schip kan in theorie uitgerust worden met een gecontaineriseerd energiesysteem voor e-fuels die een hoge CAPEX met zich meebrengen, bijv. de toepassing van e-waterstof/groene waterstof en e-ammoniak.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

Net als bij biobrandstoffen is er vanuit overheden een sterke stimulus voor de productie en het gebruik van hernieuwbare brandstoffen.

In tegenstelling tot biobrandstoffen is er echter minder aandacht voor de productie en het gebruik van e-fuels in de binnenvaart. De techniek is in principe ver genoeg om e-fuels te produceren. Er zijn al voorbeelden van pilots met fabrieken. De verwachting is dat er echter pas op grote schaal geproduceerd zal worden als er een positieve business case is. De periode voor commercialisatie kan duren tot 2050.

Aantal schepen, voorbeelden

Er varen nog geen schepen op e-fuels.

Bijlage 2: Fuel cell / brandstofcel

Algemene omschrijving

Een brandstofcel zet waterstof (H_2) om naar energie, gebruikmakend van zuurstof (O_2) in de lucht. De reactie leidt tot water (H_2O), elektriciteit en warmte met een efficiency van ongeveer 60%, afhankelijk van het type fuel cell. De efficiency neemt echter af naarmate de levensduur toeneemt, waardoor de brandstofcel over de gehele levensduur een efficiëntie haalt van ongeveer 50-55%.

Pure waterstof moet gevoed worden aan de brandstofcel. Dit stelt daarmee eisen aan de zuiverheid van de waterstof. Een aandrijflijn met brandstofcel bestaat doorgaans uit verschillende componenten. Het gaat dan om: eventueel een 'reformer' om pure waterstof te genereren uit waterstofdragers (bijvoorbeeld methanol, ammoniak), de brandstofcel (of combinatie van cellen), een batterij als buffer om direct piekvermogen te kunnen leveren en uiteraard de elektromotoren voor mechanische aandrijving van de schroef in het water. Een nadeel van de brandstofcel is dat deze langzaam reageert en een bepaalde bedrijfstemperatuur nodig heeft om effectief te werken. Een batterij is nodig om dit op te vangen zodat er dynamische vermogensafgifte mogelijk is (o.a. nodig voor manoeuvreren van het schip).

Technische toepasbaarheid

Het TRL voor de aandrijflijn wordt ingeschat op 3-7 afhankelijk van de energiedrager. Voor de brandstofproductie van de energiedragers ligt het TRL in de range 5-8, afhankelijk van de specifieke energiedrager. Er zijn pilots met schepen, zoals de Emeli (waterstof) en de Innogy (methanol). Het gaat hierbij om met een klein vermogen (30-35 kW) op basis van techniek die wordt toegepast in de automotive industrie. Veel interessanter en relevanter zijn de projecten van Future Proof Shipping met het schip de Maes en NPRC met het schip de Antonie. In een nieuw Europees project RH2IWER zullen de komende jaren 6 aanvullende binnenschepen op waterstof fuel cell in de vaart worden gebracht.

Het ruimtebeslag van een aandrijving met een brandstofcel ligt sterk aan de manier waarop waterstof wordt opgeslagen aan boord.

Specifieke wettelijke kaders voor de toepassing van waterstof als brandstof voor binnenvaartschepen ontbreken. Wel zijn er veel algemene wettelijke kaders zoals algemene veiligheidsprincipes voor scheepvaart, voorschriften voor het transport van H_2 als lading (Directive 2008/68/EC, ADR, RID, ADN). Daarnaast bieden CESNI/ES-TRIN en EU Directive 2016/1628 kaders voor nieuwe technologieën.

Ook zijn er wettelijke kaders voor de elektrische equipment.

Bijdrage aan milieu

De brandstofcel geeft geen emissie op het schip als gebruik wordt gemaakt van pure waterstof als brandstof, enkel water en warmte zijn het bijproduct van de opwekking van elektriciteit uit waterstof dat met zuurstof reageert.

Wel dient rekening gehouden te worden met de emissies die eventueel vrijkomen bij de productie van de waterstofdrager en de vervaardiging van brandstofcellen (Life Cycle Assessment), mede gezien de schaarse grondstoffen die voor sommige soorten brandstofcellen gebruikt worden.

Bij gebruik van NH₃ of methanol als brandstof zullen over het algemeen wel vaak NO_x, CO₂ en andere emissies uitgestoten worden, met name door de reformer welke de waterstof voor de fuel cell produceert. Bij directe fuel cells (zonder aparte reformer) zullen ook sommige van deze emissies optreden.

Economische haalbaarheid

De investering (CAPEX) in brandstofcellen is hoog in vergelijking met een verbrandingsmotor met een vergelijkbaar vermogen. Daarbij is de levensduur van een brandstofcel aanmerkelijk lager dan van een verbrandingsmotor (minder dan de helft). Naast een hogere aanschafprijs zal deze dus ook sneller zijn afgeschreven en vervangen moeten worden. Bovendien vereist de brandstofcel aandrijflijn aanvullende componenten, zoals een bufferbatterij, eventueel een reformer en uiteraard elektromotoren, inclusief voldoende back-up systemen in geval van uitval.

De operationele kosten (OPEX) van een aandrijflijn met een brandstofcel zijn hoog vanwege de hoge kosten van waterstof als brandstof, zeker wanneer deze waterstof (of waterstofdrager) duurzaam wordt geproduceerd.

Wanneer er een grote autonomie nodig is, zal er behoorlijk wat ruimte verloren gaan aan boord voor de opslag van waterstof. De bunkertijd zal afhankelijk zijn van het soort opslag en waterstof(drager). Met wisselbare containers zal de tijd beperkt zijn. En in geval van ammoniak en biomethanol zijn de verliestijden waarschijnlijk kleiner dan bij het overpompen van pure vormen van waterstof (gasvorming onder druk of vloeibaar (cryogeen)).

Financierbaarheid

De economische haalbaarheid staat voorlopig onder druk en heeft een sterke invloed op de business case en de financierbaarheid. Projecten zijn op dit moment zeer sterk afhankelijk van overheidssubsidies.

In geval van een modulaire en wisselbare brandstofcel met waterstofopslag is de financierbaarheid gunstiger, omdat de risico's gespreid kunnen worden en verwacht wordt dat een 'pay-per-use' model kan worden toegepast. Een modulaire opzet zal wel in wet- en regelgeving moeten passen.

Steun vanuit beleid en aansluiting op initiatieven

Er is veel aandacht voor de toepassing van brandstofcellen in combinatie met waterstof. Er zijn veel initiatieven, zoals bleek uit een recent EICB-rapport⁶.

Aantal schepen, voorbeelden

2 binnenvaartschepen tot nu toe, zoals al genoemd.

⁶ <https://www.eicb.nl/wp-content/uploads/2020/07/2020-07-EICB-Rapport-Waterstof-in-de-binnenvaart-en-short-sea.pdf>

Bijlage 3: Vergelijkende kostenanalyse uit studie Provincie Zuid-Holland

Meer informatie: <https://kennis.zuid-holland.nl/onderzoeken/toekomst-duurzame-binnenvaart/>

Directe link naar sheetrapport: <https://staging-kennis-zuid-holland.ability.nl/wp-content/uploads/2022/05/rapporttoekomstduurzamebinnenvaart1-2.pdf>

De volgende tabellen geven een vereenvoudigd overzicht van de jaarlijkse kosten voor de aandrijflijn, energie en overige kosten voor mogelijke alternatieve technieken/energiedragers. Dit is uitgedrukt in een factor ten opzichte van een basissituatie, waarbij is uitgegaan van aandrijving met een CCRII-dieselmotor en gebruik van fossiele diesel. Er is onderscheid gemaakt tussen de periode 2020-2030 en de periode 2030-2040, waarin rekening is gehouden met prijsontwikkelingen en technische ontwikkelingen.

Matrix 2020 – 2030, kostenvergelijk hoofdaandrijving schip

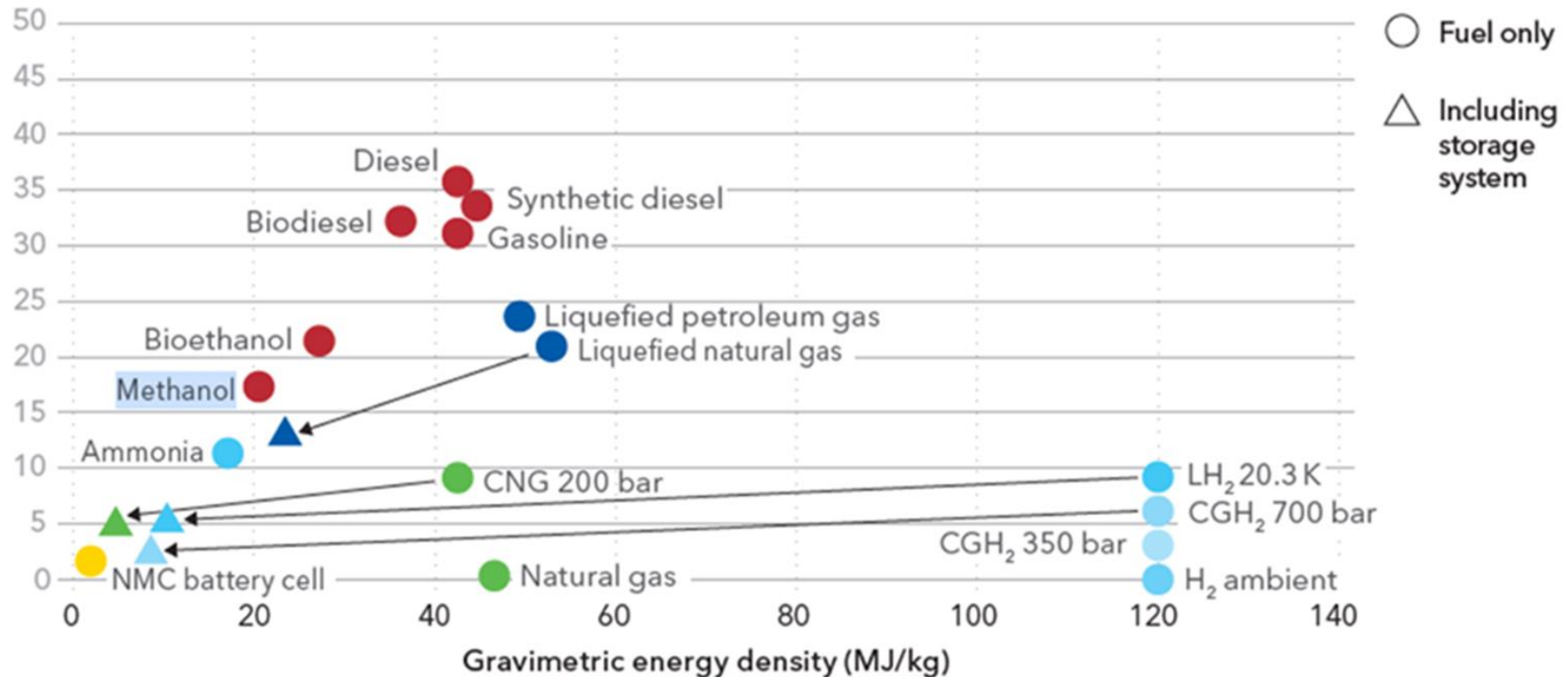
Case Studies	Stage V+ / Euro VI	BioDiesel Stage V+ / Euro VI	BioLNG Stage V+ / Euro VI	Batterij varen container (lage frequentie)	Batterij varen container (hoge frequentie)	H2 500b (container) FC (lage frequentie)	H2 500b (container) FC (hoge frequentie)	Bio-Methanol FC	H2 500b (container) ICE (lage frequentie)	H2 500b (container) ICE (hoge frequentie)	Bio-Methanol ICE
Case 1 Alphen-Moerdijk containervaart (90m schip/104TEU)	1,1	1,5	1,8	1,8	1,5	3,5	3,7	3,0	3,0	3,2	1,6
Case 2 Rotterdam-Bovenrijn containervaart (185m koppelverband/342TEU)	1,1	1,5	1,9	8,3	2,4	4,9	4,0	3,6	3,7	2,8	1,6
Case 3 Rotterdam-Duisburg containervaart (135m schip / 336TEU)	1,2	1,5	2,1	7,7	2,2	5,2	3,9	4,5	3,4	2,1	1,7
Case 4 Rotterdam-Duisburg duwvaart (duwboot met 4 of 6 bakken/gemiddeld 12.000 ton)	1,1	1,4	1,9					3,6			1,6
Case 5 Den Haag-Rotterdam afvaltransport (67m schip/500ton)	1,1	1,5	2,1	3,3	3,3	4,3	4,3	3,3	3,7	3,7	1,9
Case 6 Trierveld-Den Haag zand-en grindvaart (70m schip/1010ton)	1,2	1,6	2,0	6,5	3,7	4,3	4,2	3,7	3,3	3,2	1,8
Case 7 ARA tankvaart (135m schip/6280ton)	1,1	1,5	2,0	3,8	2,5	4,2	4,0	3,8	3,1	2,9	1,7

Matrix 2030-2040, kosten hoofdaandrijving schip

Case Studies	Stage V+ / Euro VI	BioDiesel Stage V+ / Euro VI	BioLNG Stage V+ / Euro VI	Batterij varen container (lage frequentie)	Batterij varen container (hoge frequentie)	H2 500b (container) FC (lage frequentie)	H2 500b (container) FC (hoge frequentie)	Bio-Methanol FC	H2 500b (container) ICE (lage frequentie)	H2 500b (container) ICE (hoge frequentie)	Bio-Methanol ICE
Case 1 Alphen-Moerdijk containervaart (90m schip/104TEU)	1,1	1,5	1,6	1,04	1,05	2,3	2,4	2,4	2,0	2,1	1,4
Case 2 Rotterdam-Bovenrijn containervaart (185m koppverband/342TEU)	1,1	1,5	1,6	4,5	1,6	3,3	2,7	2,9	2,5	1,8	1,4
Case 3 Rotterdam-Duisburg containervaart (135m schip / 336TEU)	1,1	1,5	1,8	4,3	1,4	3,6	2,7	3,5	2,3	1,4	1,5
Case 4 Rotterdam-Duisburg duwvaart (duwboot met 4 of 6 bakken/gemiddeld 12.000 ton)	1,1	1,5	1,6					2,9			1,4
Case 5 Den Haag-Rotterdam afvaltransport (67m schip/500ton)	1,1	1,6	1,8	2,7	2,7	2,9	2,9	2,7	2,5	2,5	1,7
Case 6 Trierveld-Den Haag zand-en grindvaart (70m schip/1010ton)	1,2	1,6	1,7	4,2	3,0	2,9	2,8	2,9	2,2	2,1	1,5
Case 7 ARA tankvaart (135m schip/6280ton)	1,1	1,5	1,7	2,3	1,6	2,9	2,8	3,0	2,1	2,0	1,5

Comparison of gravimetric and volumetric storage density for fuels

Units: Volumetric energy density (MJ/l)



Note: Arrows show shifts in energy density when storage is required.

Key: CGH₂, compressed gaseous hydrogen; CNG, compressed natural gas; H₂ ambient, hydrogen at ambient temperature; LH₂ 20.3 K, liquefied hydrogen at 20.3 kelvin; NMC, lithium nickel manganese cobalt oxide

Source: Inspired by Shell (2017) and MariGreen (2018)