

Verduurzamingsopties voor de binnenvaart



INTRODUCTIE

Deze factsheets zijn opgesteld in opdracht van Topsector Logistiek, met als doel om schippers als eerste oriëntatie een eenvoudig en onafhankelijk overzicht te bieden van de verduurzamingsopties.

Hierbij is de focus gelegd op:

- technische principes;
- commerciële overwegingen;
- regelgeving en randvoorwaarden.

De factsheets zijn geschreven op basis van bestaande publicaties en gesprekken met technische experts. Het is een momentopname van de stand der techniek van begin 2023.

De factsheets beschrijven de belangrijkste hoofdtechnologieën voor de binnenvaart, zoals opgesteld door CCR (Routekaart voor het terugdringen van de emissies in de binnenvaart, maart, 2022) en komen daarmee grotendeels overeen met de overzichtsindeling van de EICB & TNO (Toekomst duurzame binnenvaart, april 2021).

FACTSHEETS

- Factsheet 1: uitlaatgassen nabehandelingssysteem
- Factsheet 2: 'drop-in' brandstoffen
- Factsheet 3: batterij-elektrisch
- Factsheet 4: waterstof
- Factsheet 5: methanol
- Factsheet 6: dieselelektrisch
- Factsheet 7: alternatieve verbrandingsmotor
- Factsheet 8: brandstofcel
- Factsheet 9: liquefied biomethane (LBM/Bio-LNG)
- Factsheet 10: waterstofdragers NaBH₄ & LOHC



Factsheet 1: uitlaatgassen nabehandelingssysteem

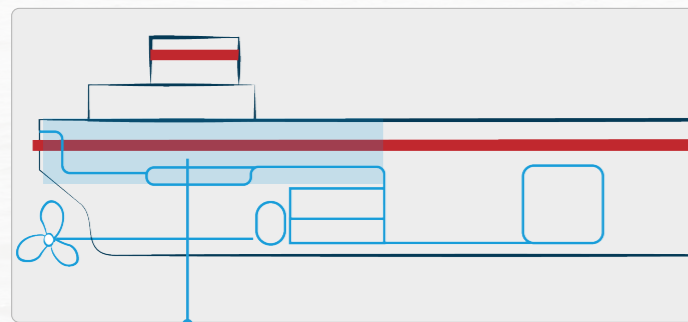
BESCHRIJVING

Een uitlaatgassen nabehandelingssysteem is een systeem waarbij schadelijke stoffen uit de uitlaatgassen worden verwijderd. Dit gebeurt in verschillende stappen en met verschillende onderdelen, vaak gecombineerd in een gezamenlijke behuizing die geïntegreerd wordt in het uitlaatsysteem. Op nieuwe motoren is dit een verplicht onderdeel om te voldoen aan de huidige emissieregelgeving. Bij oudere motoren kan dit achteraf ingebouwd worden. De grootte van component(en) is afhankelijk van de beoogde emissiewaarden, het type motor en het belastingsprofiel.

KENMERKEN

Technology Readiness Level		▲	
Investering (CAPEX)	▲		
Operationele kosten (OPEX)	▲		
Beschikbare infrastructuur		▲	
Noodzakelijke veiligheidseisen	▲		
Benodigde opleiding	▲		
Uitlaatgassen nabehandeling	Laag	Midden	Hoog

IMPACT

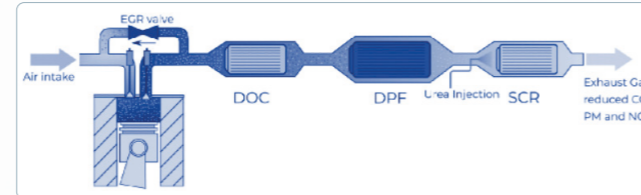


Uitlaatgassen nabehandeling

TECHNISCH

Het uitlaatgassen nabehandelingssysteem bestaat uit de volgende componenten:

- DOC (Diesel Oxidation Catalyst).
- DPF (Diesel Particulate Filter).
- SCR (Selective Catalytic Reduction).



De DOC zorgt voor het terugdringen van de HC- en CO-emissies en is vaak het eerste component van de nabehandeling waar de uitlaatgassen doorheengaan. Het DPF filtert roetdeeltjes (PM) uit de uitlaatgassen. Na verloop van tijd (indien de uitlaattegedruk te ver oploopt) wordt het achtergebleven roet verbrand en omgezet in as. Dit proces noemt men 'regeneratie'. Een DPF is uitgevoerd met een actieve of een passieve regeneratie. De SCR is een katalysator die door middel van toevoeging van Ureum zorgt voor het terugdringen van NO_x (stikstofoxide) concentraties.

Keuzes

- Nieuwe motor die voldoet aan huidige emissie-eisen (Stage V).
- Installatie uitlaatgassen nabehandelingssysteem op oude motor.

Voordelen

- Stage V motoren en nabehandelingssystemen zijn commercieel beschikbaar (TRL9).
- Minder uitstoot.

Nadelen

- Extra installatie aan boord die ruimte in de machinekamer in beslag neemt.
- Er dient rekening gehouden te worden met de toe te passen brandstoffen en smeeroilie. Een te hoog zwavelgehalte kan een schadelijke invloed hebben op de werking en levensduur van de SCR en de DPF. Brandstof volgens de EN590 norm is geschikt voor vrijwel elke nabehandelingssystemen. Voor toepassing van alternatieve brandstoffen zoals (bijmenging van) Biodiesel of HVO of voor toepassing van smeeroilie met een laag zwavelgehalte zal de fabrikant (nu nog) geraadpleegd moeten worden.

COMMERCIEEL

Investerings

- Complete installatie met DOC, SCR, DPF en randapparatuur: € 120K voor een motor met een vermogen van 750 kW.
- Een EU Stage V motor +/- € 375 per kW*.
- Installatie (expert consultation).

Gebruik

- AdBlue: verbruik ligt tussen de 3,5% en 5% t.o.v. brandstofverbruik brandstofverbruik op jaarbasis (+/- €1/liter).

Overwegingen

- Terugverdientijd: op dit moment kan de investering niet zuiver operationeel terug verdiend worden.

* Price level 2021, CCNR

Lokale incentives:

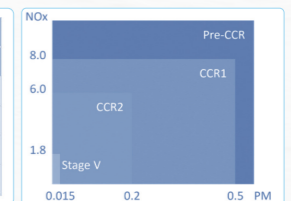
- verschillende havens en instanties zoals Green Awards hebben incentives in het leven geroepen om schepen met minder schadelijke uitstoot te belonen met lagere havengelden (greenaward.org).
- Port of Rotterdam 30% korting op havengelden.
- Port of Amsterdam 15% korting op havengelden.
- North Sea Ports 10% korting op havengelden.
- Toekomstige eisen: de verwachting is dat er in de (nabije) toekomst steeds meer eisen aan uitstoot gesteld zullen worden, zoals toegangsbeperking tot havens, zoals in Rotterdam overwogen wordt, maar ook verladers en klanten kunnen eisen gaan stellen, waardoor een commercieel voordeel ontstaat als aan de nieuwste regelgeving voldaan wordt.
- Bij het plaatsen van een nieuwe motor kan vaak ook geprofiteerd worden van een efficiënter brandstofverbruik door technologische ontwikkeling in de motor.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

De uitstoot van schadelijke stoffen door dieselmotoren, zoals stikstofoxide (NO_x), zwaveloxide (SO_x) en fijnstof (PM) wordt in stappen steeds verder aan banden gelegd door emissieregelgeving (zie afbeelding). Motoren voor binnenvaartschepen dienen vanaf 1 januari 2020 te voldoen aan de EU Stage V emissie-eisen (EU Regelgeving 2016/1628). De emissiewaarden voor EU Stage V zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Category	Net Power kW	Date	CO	HC ^a	NO _x	PM	PN
IWP/IWA-v/c-1	19 ≤ P < 75	2019	5.00	4.70 ^b	0.30	-	
IWP/IWA-v/c-2	75 ≤ P < 130	2019	5.00	5.40 ^b	0.14	-	
IWP/IWA-v/c-3	130 ≤ P < 300	2019	3.50	1.00	2.10	0.10	
IWP/IWA-v/c-4	P ≥ 300	2020	3.50	0.19	1.80	0.015	1 × 10 ¹²



Voor de binnenvaart mogen motoren uit de volgende categorieën worden ingezet:

- IWP (Inland Waterway Propulsion - scheepsmotoren voor voortstuwing).
- IWA (Inland Waterway Auxiliary - scheepsmotoren voor generatorbedrijf).
- NRE* (Non-Road Equipment - Industriële motoren onder de 560 kW).
- EU Euro VI** (gecertificeerde EU-Euro-VI vrachtwagenmotoren).

Infrastructuur

Naast aandacht voor de juiste brandstof en smeeroilie dient ook ureum gebunkerd te worden. Ureum is bij de meeste bunkerstations langs de bekende vaarwegen in Europa verkrijgbaar.

Bemanning

Technische bemanning aan boord van schepen die voorzien zijn van een uitlaatgassen nabehandelingssysteem dienen een speciale training of uitleg te krijgen van de fabrikant.

* De uitlaatgasemissies dienen te voldoen aan de minimale emissie eisen volgens EU-Stage-V voor IWP of IWA motoren.

** Motoren dienen mogelijk aangepast en/of gemariniseerd te worden om te kunnen voldoen aan de ES-TRIN richtlijnen. Door marinisatie kan de motor (uitstoot) veranderen, waardoor het type approval komt te vervallen. Er zijn verschillende bedrijven actief in de markt die gespecialiseerd zijn in het geschikt maken van gecertificeerde EU-Euro-VI vrachtwagenmotoren voor de binnenvaart.

Factsheet 2: 'drop-in' brandstoffen

BESCHRIJVING

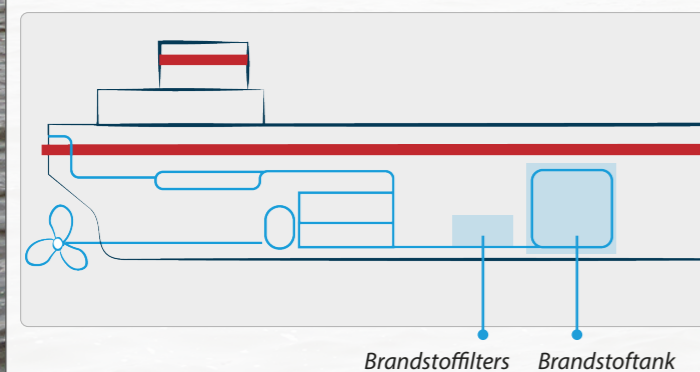
Drop-in brandstoffen zijn alternatieven voor de diesel (fossiele diesel). Ze zijn eenvoudig te vervangen zonder aanpassingen aan de bestaande (motor)installatie. Ze kunnen volledig of in een blend met reguliere diesel worden toegepast. In veel gevallen kan de uitstoot op het vlak van luchtkwaliteit (NO_x/SO_x/fijnstof) drastisch verbeterd worden door het gebruik van deze drop-in brandstoffen. Deze brandstoffen stoten wel alle nog eenzelfde orde van grootte aan broeikasgassen (CO₂) uit, maar afhankelijk van het bronmateriaal waar deze brandstoffen van gemaakt zijn (waarbij biologische bronnen reeds CO₂ uit de omgeving hebben opgenomen), worden deze alsnog als 'klimaatneutraal' beschouwd. Deze worden ook wel 'Renewable fuels' genoemd.

KENMERKEN

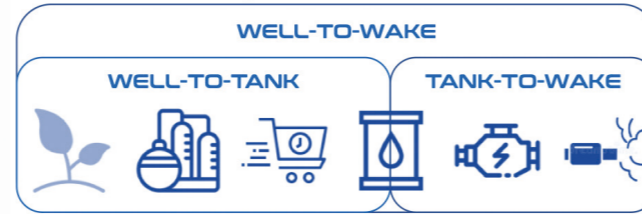
Kenmerk	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)	▲		
Operationele kosten (OPEX)			▲
Beschikbare infrastructuur		▲	
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Drop-in' brandstoffen

IMPACT



TECHNISCH



Bij het beoordelen van de verschillende soorten drop-in brandstoffen op vlak van CO₂-uitstoot, is het daarom van belang om de volgende benaderingen in acht te nemen:

- Well to Tank (van bron naar tank).
- Tank to Wake (van tank naar uitstoot).
- Well to Wake (van bron naar uitstoot).

Hierbij kan algemeen gesteld worden dat de Tank to Wake uitstoot van de meeste drop-in fuels op het vlak van broeikas-gassen gelijkaardig is (alle stoten CO₂ uit), maar door ook

de Well to Tank-uitstoot mee te rekenen wordt deze uitstoot verrekend met een eventuele CO₂-opname van de bron (i.g.v. biologisch) en kan een (bijna) 'klimaatneutrale' brandstof gerealiseerd worden (door de korte koolstofkringloop).

Keuzes

Naast het bronmateriaal is ook het raffinageproces van belang, omdat dit in hoge mate bepalend is voor de kwaliteit en uitstoot eigenschappen van de brandstoffen. Onderstaande producten zijn gangbare alternatieven voor de binnenvaart.

Product	Primaire bron	Proces	Blend met fossiele diesel	Prijs t.o.v. fossiele diesel	Voordelen	Nadelen	Norm
GTL (Gas To Liquid)	Aardgas	Fischer-Tropsch proces: kraakproces waarbij moleculaire heropbouw plaatsvindt tot een brandstof gelijkaardig aan fossiele diesel.	Onbeperkte bijmenging (0-100%).	€ ▲	Reductie NO _x tot 13% (CCNR2). Reductie SO _x tot 100% (CCNR2). Reductie fijnstof tot 60% (CCNR2).	Geen reductie CO ₂ -uitstoot.	EN15940
HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)	Plantaardige oliën, restoliën, dierlijke vetten en vetten zoals afgewerkt frituurvet.	Hydrogenering: kraakproces waarbij moleculaire heropbouw plaatsvindt tot een brandstof gelijkaardig aan fossiele diesel.	Onbeperkte bijmenging (0-100%).	€ € € ▲	Reductie NO _x tot 13% (CCNR2). Reductie fijnstof tot 60% (CCNR2). Reductie SO _x tot 100% (CCNR2). Reductie CO ₂ tot 90% (Well to Wake).	Relatief duur.	EN15940
FAME (Fatty Acid Methyl Esters)	Plantaardige oliën, restoliën, dierlijke vetten en vetten zoals afgewerkt frituurvet.	Transesterificatie: reactie waarbij esters verbroken en opnieuw gevormd worden; na filtering bruikbaar als bio-diesel.	Beperkte bijmenging; typisch 7% FAME voor wegvervoer (diesel B7).	€ ▲ ▼ €	Reductie CO ₂ - tot 90% (Well to Wake).	Trekt water en vuil aan, waardoor bacteriën, algen en schimmels kunnen ontstaan. Nauwelijks reductie schadelijke stoffen voor luchtkwaliteit.	EN14214

COMMERCIEEL

Investerings

- Mogelijke aanpassingen aan het brandstofsysteem (bij gebruik van FAME).

Gebruik

- Kosten van alternatieve brandstoffen zijn hoger dan reguliere diesel. Op termijn is de verwachting dat deze verschillen wegvallen of zelfs in het nadeel komen van reguliere diesel, als gevolg van het meerekenen van de uitstootkosten
- Hogere reinigings- en vervangingsintervallen van water-afscheiders en brandstoffilters (bij gebruik van FAME).
- Hogere reinigingsintervallen voor reinigen van brandstoftanks (bij gebruik van FAME).
- Regelmatigere bemonstering van brandstofkwaliteit (bij gebruik van FAME).

RANDVOORWAARDEN

Toepassing

Bij het toepassen van drop-in brandstoffen moet momenteel nog contact opgenomen worden met de motorleverancier met betrekking tot garantie, het risico van verlies van typegoedkeuring en aanbevelingen voor aangepaste smeermiddelen.

Risico's

Uit een in 2021 in het leven geroepen meldpunt voor de binnenvaart blijkt dat FAME in de praktijk tot technische implicaties (door vervuiling) kan leiden aan boord van schepen. Vandaar dat het verplicht bijmengen van biobrandstoffen voor de binnenvaart op 1 januari 2023 nog niet is ingevoerd. Een nieuwe datum moet nog bepaald worden.

Regelgeving

De huidige kwaliteitseisen/-normen voor brandstoffen blijken niet afdoende om ook voor alternatieve brandstoffen een goede kwaliteitsgarantie te bieden. Daarom wordt gewerkt aan een nieuwe normering die ook de alternatieve brandstoffen dekt en waarmee motorenfabrikanten generieke toestemming kunnen geven voor het gebruik van deze brandstoffen.

Factsheet 3: batterij-elektrisch

BESCHRIJVING

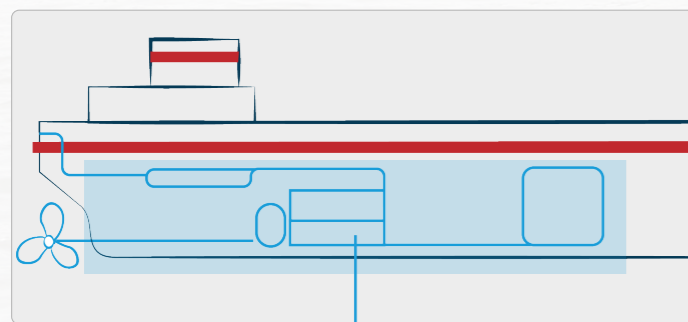
Bij een batterij-elektrisch schip wordt het schip aangedreven door een elektromotor en wordt de energie opgeslagen in batterijen. Regeling van het voortstuwingsvermogen wordt gedaan via elektrische frequentieomvormers. De energie kan geladen worden via een laadstation aan de wal (vaste batterijen) of door uitwisseling van het batterijpakket (batterijen in container). Als de energie die in de batterijen opgeslagen zit opgewekt is uit hernieuwbare bronnen is het mogelijk om klimaatneutraal (zonder uitstoot van CO₂) te varen.

KENMERKEN

Kenmerk	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investing (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding			▲

Batterij elektrisch

IMPACT

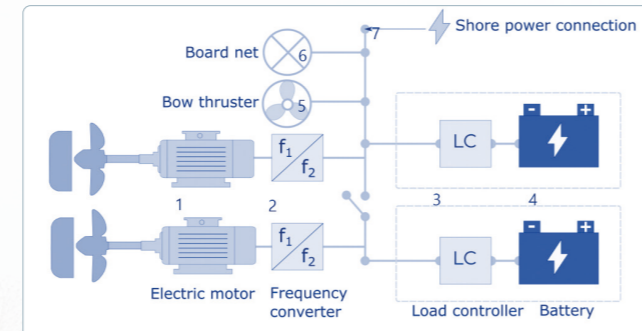


Machinerkamer, hoofdschakelbord & batterij-opslag

TECHNISCH

De installatie aan boord voor het batterij elektrisch varen bestaat uit de volgende componenten:

- 1 De elektromotor
- 2 De frequentieomvormer
- 3 Het hoofdschakelbord
- 4 Batterijen
- 5 en 6 Overige verbruikers
- 7 Walaansluiting



Keuzes

- Geïntegreerde batterijen of Elektriciteit Opslag Systeem (EOS, bv in een container).
- Type batterijen* afhankelijk van aantal laad/ontlaad cycli en beoogde levensduur.

Voordelen

- Batterij-elektrisch varen is commercieel beschikbaar (TRL 9).
- De energie efficiency is hoog; TTW ligt tussen de 88% en 92% (energie omzetting: PM-elektromotor 97%, brandstofcel 55% en verbrandingsmotor 43%).

- Geen verbruik als geen voortstuwing nodig is (geen 'stationair' verbruik).
- Modulaire aanpassing naar andere energiedragers mogelijk bij gebruik uitwisselbare modules (fuel cell op waterstof/methanol of diesel generator set).
- Verhoogd comfort (geluids- en trilling arm, geen geur- en roet overlast).
- Lage onderhoudsbehoefte.

Nadelen

- Batterijen hebben in vergelijking tot dieselbrandstof een zeer lage energiedichtheid (batterij: 0,18-0,26kWh/kg/diesel 12kWh/kg).
- Beperkt vaarbereik op 1 lading (t.o.v. het bereik van een diesel aangedreven schip).
- Batterijtechnologie nog volop in ontwikkeling, waardoor prestaties nog zullen toenemen in de komende jaren.

Vuistregel

100l diesel ≈ 5.000kg batterijen.
100l diesel ≈ 488kWh batterijcapaciteit.

* LFP = Lithium Iron Phosphate
NMC = Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
LTO = Lithium Titanate Oxide

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Batterij-elektrische binnenvaartschepen dienen te voldoen aan een aantal additionele voorschriften en richtlijnen vanuit ES-TRIN. De elektrische hoofdaandrijving van een vaartuig bestaat uit ten minste:

- Twee energiebronnen, onafhankelijk van het aantal hoofdaandrijvingen.
- Bij het uitvallen van één energiebron moet de resterende energiebron in staat zijn om verbruikers die voor de veilige vaart noodzakelijk zijn, gedurende ten minste 30 minuten te voeden.
- Een redundant uitgevoerde vermogensregeling en/of vermogensregeling (al naar gelang de wijze waarop de installatie is uitgevoerd) om er voor te zorgen dat de vereiste manoeuvreerbaarheid gewaarborgd blijft.

Overige technische richtlijnen staan beschreven in het ES-TRIN document. Mogelijk zullen de eisen aan de bemanning (machinist) in de toekomst bijgesteld worden.

Infrastructuur

Door beperktere actieradius van het schip (t.o.v. een standaard diesel aangedreven schip) dient er in de vaarplanning rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van laadinfrastructuur of uitwissellocaties van batterij packs (EOS). Het Alpherium in Alphen aan den Rijn is op dit moment nog het enige openbare wisselstation voor batterijcontainers in Nederland.

Er wordt momenteel gewerkt aan een openbare laadinfrastructuur en uitwisselpunten voor batterijcontainers, onder andere door Zero Emission Services (ZES) met financiële ondersteuning door de overheid (Nationaal Groeifonds) met als doel:

- 75 batterij containers,
- 14 laadstations en
- 45 geëlektrificeerde schepen.



COMMERCIEEL

Investerings

- Elektrificatie en installatiekosten (motoren, aansturing & interface) zijn hoger dan conventionele dieselveertstuwing: € 350K tot € 850K **
- Inbouwkosten zijn vergelijkbaar, maar de ontwikkelkosten van het elektrische systeem zijn sterk afhankelijk van de aanbieder en de mogelijke standaardisatie van de oplossing.
- Kosten batterijen komen bovenop de kosten van de voortstuwing (orde van grootte € 750 /kWh**). Deze komen te vervallen als gekozen wordt voor toepassing van uitwisselbare batterijen/pay-per-use model.

Gebruik

Momenteel zijn de brandstofkosten voor elektrisch varen hoger dan voor varen op diesel, al is dit sterk afhankelijk van de prijschommelingen voor diesel en elektriciteit:

- Diesel: +/- € 0,19/kWh (€ 0,82/l/9,96kWh/l/43%)
- Elektrisch: +/- € 0,31/kWh (€ 0,27/kWh/88%)
- Onderhoudskosten van elektrische aandrijving zijn aanzienlijk lager dan van een dieselveertstuwing. Grofweg kunnen de onderhoudskosten van een dieselmotor geschrapt worden (20ct/l brandstofverbruik; 4ct/kWh).
- Verwachting is dat het verbruik in kWh relatief lager uitvalt dan een rechtstreekse omrekening van dieselveertbruik, in verband met wegval verbruik bij lage vermogens/stationair draaien.

Overwegingen

- Ingebouwd batterijpack vs Elektriciteit Opslag Systeem (EOS).
- Afstemming vaarprofiel - batterijcapaciteit.
- Subsidiemogelijkheden kunnen elektrisch varen commercieel interessant maken.

** Price level 2021, CCNR

Factsheet 4: waterstof

BESCHRIJVING

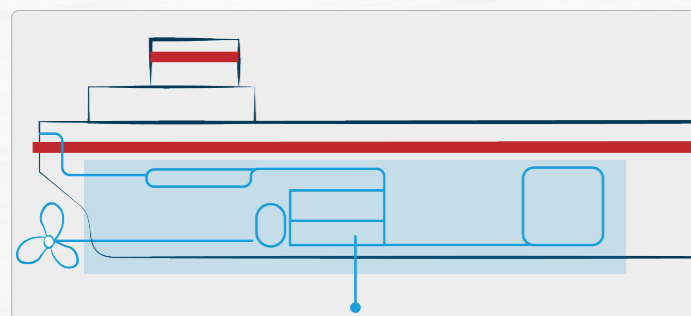
Waterstof is een chemisch element dat op aarde meestal voorkomt in verbindingen zoals water (H₂O) of methaan (CH₄). Waterstof kan worden gebruikt als brandstof (energiedrager) voor de binnenvaart door het te verbranden in een verbrandingsmotor of door het te gebruiken in een brandstofcel. Bij gebruik van waterstof in een brandstofcel wordt de energie van de waterstof rechtstreeks omgezet in elektriciteit voor een elektrische aandrijving. Bij verbranding van waterstof in een verbrandingsmotor komt mechanische energie vrij. Momenteel wordt waterstof voornamelijk gemaakt met aardgas, waarbij CO₂ vrijkomt. Door elektrolyse kan waterstof echter uit water gewonnen worden, wat het (als elektriciteit van duurzame bronnen als zon of wind afkomstig is) een emissieloze brandstof maakt.

KENMERKEN

	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Waterstof

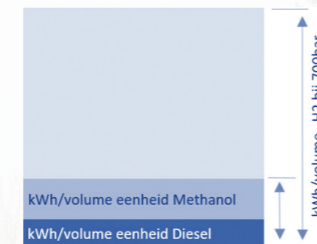
IMPACT



Machinerkamer, brandstofsysteem en opslag

TECHNISCH

Waterstof heeft in gasvorm een zeer hoge energiedichtheid per kilogram (veel energie per gewichtseenheid), maar heeft daarnaast een extreem lage energiedichtheid per m³ (er is extreem veel 'tank-volume' nodig). Door waterstof te comprimeren (typisch 300 tot 700bar) kan het opslagvolume aan boord verhoogd worden. Dit betekent echter ook dat de waterstof dan in drukcilinders opgeslagen moet worden, wat leidt tot aanzien-lijke gewichtstoename en volumegebruik aan boord.



Keuzes

- Als brandstof in een aangepaste verbrandingsmotor.
- Als brandstof voor een fuel cell.

Soorten Waterstof

- **Grijze waterstof:** 95% van de (huidige) wereldwijde productie is gemaakt uit fossiele brandstoffen (aardgas). De Well-to-Wake CO₂-uitstoot hiervan is hoger dan diesel.
- **Blauwe waterstof:** wordt ook gemaakt van aardgas, echter wordt de CO₂ die tijdens het proces vrij komt opgevangen en opgeslagen. Blauwe waterstof heeft daarom een lagere CO₂-voetafdruk dan grijze waterstof.
- **Groene waterstof:** Groene waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, waarbij water in een electrolyser wordt gesplitst in waterstof en zuurstof met behulp van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen, zoals zonne- of windenergie. Dit proces heeft geen uitstoot van broeikasgassen.

Voordelen

- Groene waterstof is emissieloos.
- Hoge energiedichtheid per kg.
- Grondstoffen voor waterstof zijn volop aanwezig (water & zonne- of windenergie).
- Waterstof is niet giftig.

Nadelen

- Beschikbaarheid groene waterstof is laag.
- Voor de opwekking van waterstof is veel (elektrische) energie nodig, waardoor de Well-to-Wake efficiency laag is (20-30%).
- Opslag en transport van waterstof is complex.

COMMERCIEEL

Investerings

- Een brandstofcel in combinatie met elektrische aandrijving.
- Of een specifieke waterstofverbrandingsmotor.
- In geval van verbrandingsmotor ook nabehandelingsinstallatie.
- Aangepast leidingwerk, veiligheid en ventilatiesysteem
- Indicatie Stage V/Euro VI waterstof motor € 650/kW*
- Om de investeringsdrempel voor scheepseigenaren te verlagen werkt men aan uitwisselbare containers met waterstof onder druk met een businessmodel pay-per-use.

* Situatie kan sterk variëren en is afhankelijk van verschillende factoren zoals de marktprijzen van ruwe olie en gas. In de toekomst kunnen mogelijke belastingen op CO₂-uitstoot en incentives voor duurzame brandstoffen de prijs van groene waterstof ten opzichte van diesel verlagen en de vraag stimuleren.

Gebruik

- Kosten van waterstof ten opzichte van reguliere diesel*:
Grijze waterstof: de prijs per energie-eenheid is lager dan die van reguliere diesel.
Blauwe waterstof: prijs per energie-eenheid is lager dan die van reguliere diesel, maar iets hoger dan die van grijze waterstof vanwege de extra kosten die gepaard gaan met het afvangen en opslaan van CO₂.
Groene waterstof: ongeveer 3x dieselprijs (in 2023)

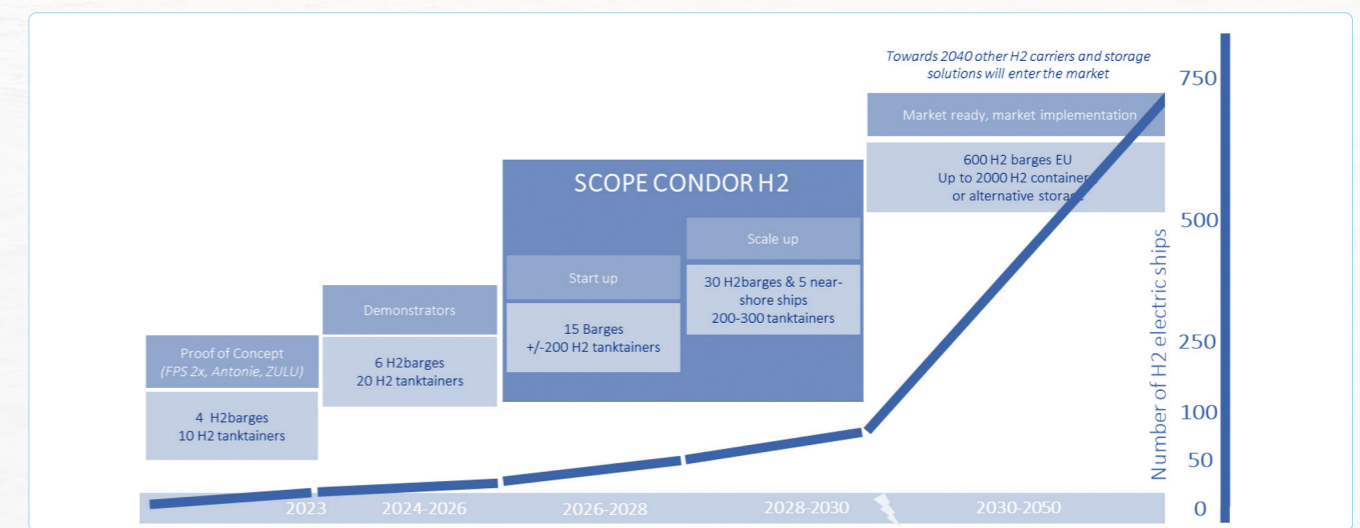
RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Voor het varen op waterstof moet aan additionele richtlijnen en vrijstellingen voldaan te worden. In het ES-TRIN (editie 2021/1) document is nog geen regelgeving voor de toepassing van waterstof opgenomen. Echter, er is een draft voor PEM-FC klaar en de regels voor waterstofopslag worden op dit moment ontwikkeld en zullen begin 2024 klaar zijn. Bij het CCR moet een (tijdelijke) vrijstelling aangevraagd worden. Als de vrijstelling toegekend wordt moet voldaan worden aan een aantal eisen en richtlijnen waarbij verwezen wordt naar Hoofdstuk 30 en Bijlage 8 van het ES-TRIN document. Zie ook factsheet 'brandstofcel' voor een uitgebreidere toelichting.

Infrastructuur

Er is nog geen infrastructuur voor opslag- en transport voor de binnenvaart zoals dat voor het bunkeren van diesel het geval is. Wel zijn er verschillende initiatieven om deze infrastructuur/het waterstof-ecosysteem op gang te helpen. Zo zal er volgens de Routekaart 'Waterstof' van het Nationaal Waterstof Programma van de RVO tot 2030 een basis gelegd worden voor de technologie en standaardisatie voor het varen op waterstof en invoering van wet- en regelgeving. Het grootste programma in Europa dat werkt aan de transitie naar waterstoffbinnenvaartschepen heet RH2INE. Zij voorziet een opschalingspad richting 2050, zoals in het overzicht hieronder is weergegeven. Het CONDOR H2 project zal de opschaling via het pay-per-use model verder uitrollen.



BESCHRIJVING

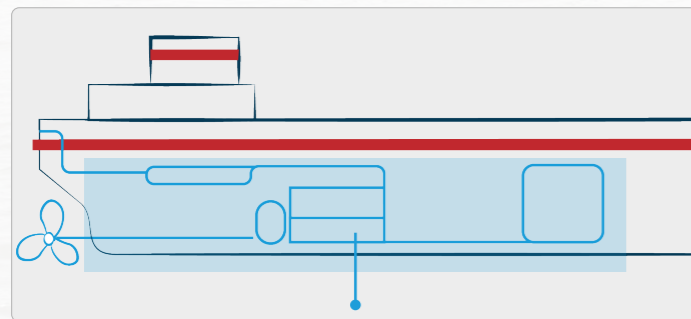
Methanol is een alcohol (methyl alcohol) dat wereldwijd op grote schaal gebruikt wordt in de petrochemische industrie, maar is ook te gebruiken als energiedrager. Methanol wordt op dit moment gemaakt van aardgas of kolen. Het is een kleurloze stof die bij omgevingstemperatuur vloeibaar is en dus vloeibaar gebunkerd en opgeslagen kan worden onder normale druk, maar is licht ontvlambaar en toxisch. Methanol verbrandt vrijwel emissieloos. De energiedichtheid is lager dan die van gasolie maar veel hoger dan van waterstof in opslag tanks of batterijen. Methanol kan gebruikt worden in een verbrandingsmotor of om stroom op te wekken door middel van een Fuel Cell.

KENMERKEN

	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Methanol

IMPACT



Machinerkamer, brandstofsysteem en opslag

TECHNISCH

Omdat het vlampunt laag is (11°C versus 78°C bij dieselolie) en methanol sterk corrosief en toxisch is, vereist dit een andere uitvoering van zowel de tankopslag als van het leidingstelsel:

- Sterke corrosiebestendigheid tankopslag en leidingwerk (RVS).
- Dubbelwandig leidingwerk.
- Inerte opslag en extra ventilatie en lekdetectie.

Keuzes

- Als brandstof in aangepaste verbrandingsmotor.
- Als brandstof voor een fuel cell (al dan niet na omzetting in waterstof).

Soorten Methanol

- **Fossiele methanol:** gemaakt van aardgas (grijs) of kolen (bruin); Well-to-Wake uitstoot vergelijkbaar met fossiele diesel.
- **Biomethanol:** gemaakt van biomassa. Klimaatneutraal doordat de biomassa eerder CO₂ heeft opgenomen en indien geproduceerd met groene energie.
- **E-methanol:** gemaakt van waterstof en CO₂/CO. Klimaatneutraal als benodigde energie voor productie groen is (bijvoorbeeld uit zon of wind).

Voordelen

- Infrastructuur en kennis over gebruik, opslag en transport zijn beschikbaar.
- Klimaatneutraal bij gebruik biomethanol of e-methanol.
- Relatief hoge energiedichtheid t.o.v. andere energiedragers (maar helft van diesel).
- Opslag van methanol en bunkeren kan onder omgevings-temperatuur en druk.

Nadelen

- Sterk toxisch (zowel vloeistof als dampen zijn giftig voor mens en dier).
- Licht ontvlambaar met onzichtbare vlam.
- Beschikbaarheid bio ethanol is laag en productie e-methanol is nog in ontwikkeling.

COMMERCIEEL

Investerings

- Specifieke methanol verbrandingsmotor of brandstofcel in combinatie met elektrische aandrijving.
- In geval van verbrandingsmotor ook nabehandeling-installatie.
- Aangepast leidingwerk en ventilatiesysteem.
- Indicatie Stage V/Euro VI methanol motor +/- € 500/kW*.
- Installatie & methanol-systeem (expert consultation).

* Price level 2021, CCNR

Gebruik

- Brandstofkosten zijn substantieel hoger:
 - **Fossiele methanol:** lijkt gerelateerd aan USA-gasprijs.
 - **Bio-methanol:** ongeveer 1,5x fossiele methanolprijs.
 - **E-methanol:** ongeveer 3x fossiele methanolprijs.
- Onderhoudskosten voor gebruik in een verbrandingsmotor zullen gelijkaardig zijn aan die van een conventionele verbrandingsmotor.
- Onderhoudskosten voor gebruik in een brandstofcel zullen aanzienlijk lager liggen dan een verbrandingsmotor en in lijn liggen met een batterij-elektrische aandrijving.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Op dit moment is er geen beschrijving omtrent methanol in het ES-TRIN reglement opgenomen voor binnenvaartschepen die varen op methanol. De werkgroep CESNI-PT-FC werkt aan aanpassingen van bijlage 8 van ES-TRIN, die oorspronkelijk alleen voor LNG bedoeld was, en nu wordt aangevuld met beschrijvingen over brandstofcellen en aangevuld met waterstof en methanol als brandstof voor binnenvaartschepen. Verwacht wordt dat de implementatie van deze aanpassingen in ES-TRIN op 1 januari 2025 zal plaatsvinden. In internationale regelgeving wordt veelal uitgegaan van de IGF code (voorschriften voor gassen of andere brandstoffen met een laag vlampunt).

Infrastructuur

Er is reeds een uitgebreide infrastructuur aanwezig in en nabij veel havens vanuit de petrochemische industrie. Ook de kennis om deze uit te breiden naar bunkerinfrastructuur voor schepen is aanwezig omdat methanol ook veelvuldig over de wereld getransporteerd wordt met schepen.

Beschikbaarheid motoren en brandstofcellen

Er zijn fabrikanten van medium en low-speed motoren die reeds methanol-motoren in hun programma hebben. Dit zijn motoren met een vermogensrange die veel hoger ligt dan gebruikelijk is in de binnenvaart. Motoren van de meest gangbare motorleveranciers van highspeedmotoren die wel in de vermogensrange voor de binnenvaart liggen, komen pas over enkele jaren beschikbaar. Daarnaast onderzoeken enkele motorfabrikanten ook de mogelijkheid tot het leveren van retrofit-kits, waarbij het mogelijk zou moeten zijn om de huidige geïnstalleerde dieselmotoren om te bouwen naar methanol.

Beschikbaarheid methanol

- **Fossiele methanol:** goed verkrijgbaar.
- **Biomethanol:** beperkt verkrijgbaar.
- **E-methanol:** in ontwikkeling.

Factsheet 6: dieselelektrisch

BESCHRIJVING

Bij een dieselelektrische of hybride voortstuwing wordt de schroef aangedreven door een elektromotor (diselelektrisch) of door een combinatie van een elektromotor en een dieselmotor (hybride). Het doel hiervan is om ook bij sterk variërende vermogensvraag continu een efficiënte voortstuwing te gebruiken. De elektrische aandrijftrein is opgebouwd uit:

- 1 elektrische voortstuwingsmotor(en)
- 2 frequentie omvormer en
- 3 hoofdschakelbord
- 4 dieselgeneratorsets en/of 5 (batterijpakket met BMS*)



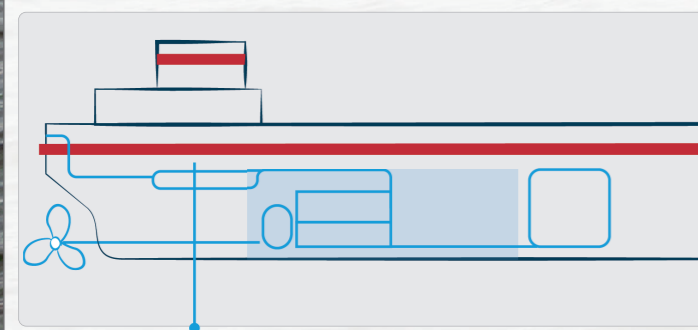
Deze voortstuwingssystemen worden als belangrijke brugtechnologie beschouwd omdat dieselgeneratorsets later eenvoudig vervangen kunnen worden door andere energiebronnen zoals een methanol generator set, een accupakket of een brandstofcel.

KENMERKEN

Kenmerk	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)		▲	
Operationele kosten (OPEX)	▲		
Beschikbare infrastructuur			▲
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Diesel elektrisch

IMPACT

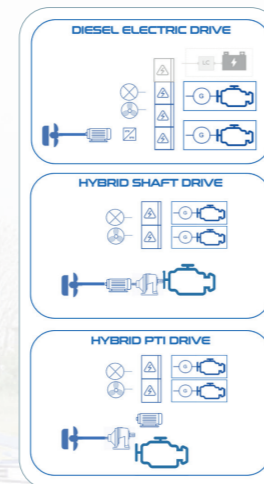


Machinekamer (generatoren, elektromotoren & hoofdschakelbord)

TECHNISCH

Bij toepassing van dieselelektrische of hybride voortstuwing is het vaarprofiel van essentieel belang om de juiste vermogens-/componenten te selecteren. Belangrijk daarbij zijn de volgende aspecten:

- Vaarprofiel (vermogensvraag over de tijd en vaarbereik).
- Redundantie en comforteisen (trillingen/geluid).



Keuzes

Diselelektrisch, hierbij wordt altijd elektrisch gevaren; de stroom wordt opgewekt door een of meerdere generatorsets (afhankelijk van vermogensbehoefte) en kan gecombineerd worden met een batterijpakket, waardoor (tijdelijk) emissieloos varen mogelijk is. Dit wordt het meest toegepast bij nieuwbouwschepen.

Hybride, hierbij kan zowel elektrisch als conventioneel gevaren worden omdat de conventionele diesel gedreven aandrijflijn blijft bestaan, maar aangevuld wordt met een elektrische aandrijving (met elektromotor rechtstreeks op de aandrijf-as - shaft drive - of op de tandwielkast - PTI drive), waardoor (tijdelijk) ook elektrisch gevaren kan worden. Dit is een pragmatische oplossing voor retrofit.

Voordelen

- Technical Readiness Level (TRL): 9 - volwassen techniek.
- Lager brandstofverbruik en minder draaiuren door optimale benutting motoren.
- Elektromotoren kunnen een hoog koppel aan op laag toerental, waardoor efficiëntere (zwaarder belaste) schroeven toegepast kunnen worden.

Nadelen

- Extra gewicht en ruimte nodig (meer componenten aan boord).
- Extra complexiteit (systeemintegratie).
- Lagere efficiëntie dieselelektrisch bij vol vermogen dan dieseldirecte aandrijving.

Optimale elektrische voortstuwingssystemen worden ontworpen op een beoogd operationeel profiel. Een gedetailleerde kennis hiervan is van essentieel belang voor een juiste keuze en ontwerp.

COMMERCIEEL

Investerings

- Diesel-electric genset (Incl. DPF + SCR): +/- 550 €/kW**.
- Electric motor: 240 €/kW**.
- Installatie, conversie & power management (project base).

Gebruik

Door toepassing van (meerdere) kleinere dieselmotoren worden deze relatief hoger belast en draaien daardoor efficiënter.

Overbodig vermogen wordt daarbij automatisch afgeschakeld waardoor draaiuren per motor beperkt worden.

Dit resulteert in:

- Lagere brandstofkosten.
- Lagere onderhoudskosten.

Daartegenover staan elektrische verliezen (door omzetting van mechanisch naar elektrisch en vervolgens weer terug naar mechanisch).

* Batterij Management Systeem
** Price level 2021, CCNR

Overwegingen

Doordat er ook extra omzettingsverliezen optreden is deze opstelling niet per definitie interessant. Dit zal sterk afhangen van het operationele profiel, waarbij geldt dat hoe groter het verschil tussen de gemiddelde en maximale vermogensbehoefte van het schip, hoe interessanter dieselelektrisch of hybride wordt.

Vuistregel

- Als de gemiddelde belasting van de voortstuwingsmotor lager ligt dan 55% van het maximale vermogen is een dieselelektrische of hybride aandrijving commercieel interessant.
- Een geoptimaliseerde installatie kan 10 - 20% brandstofbesparing opleveren en tot wel 60% reductie op de onderhoudskosten.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Regelgeving voor dieselelektrische installaties is vastgelegd in de Europese norm van technische eisen voor binnenvaartschepen (ES-TRIN 2019). Mogelijk zijn er aanvullende regels als een schip onder de regels van een classificatiebureau valt.

Op grond van de ES-TRIN 2019 regelgeving moet een dieselelektrische voortstuwinginstallatie bestaan uit minimaal twee generatorsets, één hoofdschakelbord, één frequentieomvormer en één elektromotor op de schroefas. Een van de generatorsets moet in staat zijn om minimaal 30 minuten een veilige scheepsoperatie te garanderen in geval van uitval van de tweede generatorset.

Toepassing

Sinds 2019 mogen alleen motoren en dieselgeneratorsets met een EU Stage V emissiecertificering (of hoger) geplaatst worden op binnenvaartschepen. Als de motor toe is aan vervanging, zal dus per definitie een forse investering gedaan moeten worden (mede afhankelijk van eventueel beschikbare subsidies).

Afhankelijk van het benodigde maximale vermogen, het vaarprofiel en de gekozen configuratie (volledig dieselelektrisch, met of zonder batterijpakket of hybride), kan de meerprijs beperkt worden en daarmee een terugverdientijd binnen 10 jaar haalbaar zijn ten opzichte van installatie van een nieuwe Stage V motor. Daarnaast wordt hiermee de flexibiliteit gecreëerd om in de toekomst zeer laagdrempelig een volgende stap te maken naar emissieloos varen.

Op dit moment zijn er meer dan 300 dieselelektrische schepen in de vaart op Europese binnenwateren.

Bemannig

Er is geen significante impact aan boord met betrekking tot kennisniveau van de bemanning, omdat de technische principes al aan boord aanwezig zijn (elektrische installatie en motoren). Met name bij hogere voltages en vermogens kunnen aanvullende certificeringen voor de bemanning nodig zijn. Meestal is dat voor de binnenvaart nog niet van toepassing.

Factsheet 7: alternatieve verbrandingsmotor

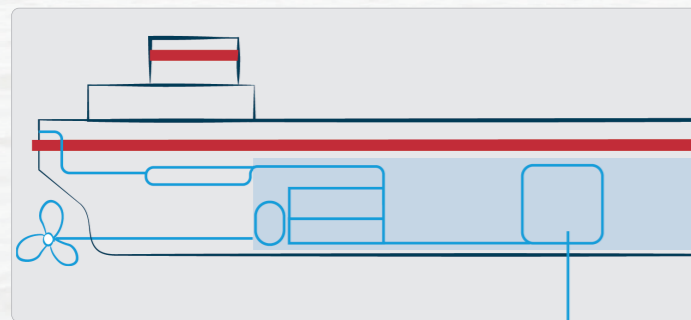
BESCHRIJVING

De verbrandingsmotor is de meest gebruikte manier om een brandstof om te zetten in mechanische energie of elektriciteit (als generatorset). Meestal worden hierbij fossiele brandstoffen (diesel) gebruikt. Alternatieve brandstoffen kunnen in sommige gevallen in een onaangepaste dieselmotor gebruikt worden (de zogenaamde drop-in brandstoffen). Voor andere brandstoffen zijn motoraanpassingen nodig. Deze laatste categorie wordt hier behandeld. Specifiek gaat het dan om verbrandingsmotoren waarin waterstof, methanol en Bio-LNG (LBM) gebruikt kunnen worden. Er is hierbij onderscheid gemaakt tussen single-fuel en dual-fuel motoren. Daarnaast kunnen deze motoren ingezet worden als een direct drive, of voor het opwekken van stroom via een generator.

KENMERKEN

Technology Readiness Level			▲
Investing (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)			▲
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen			▲
Benodigde opleiding			▲
Alternatieve verbrandingsmotor	Laag	Midden	Hoog

IMPACT



Verbrandingsmotoren, brandstofsysteem en opslag

TECHNISCH

Verbrandingsmotor voor alternatieve brandstoffen:

Waterstof, methanol en Bio-LNG kunnen niet in een conventionele verbrandingsmotor worden toegepast omdat deze brandstoffen een veel hogere zelfontbrandingstemperatuur hebben dan reguliere dieselbrandstof.

Keuzes

- **Single-fuel:** geschikt voor 1 brandstof met vonkontsteking.
- **Dual-fuel:** geschikt voor 1 brandstof, met bijmenging van diesel om tot ontbranding te komen (pilot injectie +/- 5% diesel).
- **Dual-fuel:** geschikt voor 2 verschillende brandstoffen, een alternatieve brandstof met pilot injectie dan wel bijmenging van diesel (tussen de 20% - 100% diesel).

Omdat er nog steeds verbranding plaatsvindt, zal er uitstoot van schadelijke stoffen zijn. Afhankelijk van de gekozen brandstof zal daarom een (beperkte) nabehandelinginstallatie toegepast moeten worden. Ook de brandstofleidingen aan boord moeten dubbelwandig uitgevoerd worden om zo lekkages vroegtijdig te signaleren en de mogelijke gevolgen te beperken.

Voordelen

- Zuiverheidsgraad van waterstof kan lager (<99,99% Vol.-%) zijn dan bij brandstofcel.
- Klimaatneutraal is mogelijk (TtW), afhankelijk van brandstof (in geval van dual fuel moet dan ook de diesel hernieuwbaar zijn, bijvoorbeeld door gebruik van HVO).
- Uitstoot van fijnstof (PM) en NO_x-uitstoot zijn fors lager dan diesel.
- Lagere investeringen ten opzichte van een brandstofcel.

Nadelen

- Bij dual fuel motoren en enkele single fuel motoren op waterstof en methanol is alsnog een (weliswaar beperktere) uitlaatgas nabehandelingssysteem nodig om de EU-Stage-V emissiewaarden te halen.
- De ontwikkeling (en daarmee de beschikbaarheid) van geschikte motoren met een vermogensrange voor de binnenvaart is nog zeer laag (m.u.v. LNG motoren, deze hebben een TRL van 9).

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Het gebruik van waterstof en/of methanol is nog niet gereguleerd in ES-TRIN. LNG is dat wel, namelijk in bijlage 8 in ES-TRIN 2019 en hoofdstuk 30 betreffende bijzondere bepalingen die van toepassing zijn op vaartuigen die zijn uitgerust met voortstuwings- of hulpsystemen die werken op brandstoffen met een vlamptpunt gelijk aan of lager dan 55 °C. Binnen CESNI is er een werkgroep (CESNI-PT-FC) die tot taak heeft een voorstel te doen voor technische voorschriften voor het gebruik, bunkeren en opslag van alternatieve brandstoffen aan boord van binnenvaartschepen.

De verwachting is dat de implementatie van deze aanpassingen in ES-TRIN begin 2025 gaan plaatsvinden. Tot die tijd moet voor het gebruik van waterstof of methanol op binnenvaartschepen ontheffing aangevraagd worden. Ook zijn er strengere regels voor onder andere ventilatie en dampdetectie.

Beschikbaarheid

(Bio-)LNG verbrandingsmotoren zijn al een aantal jaren beschikbaar toepasbaar op binnenvaartschepen. Voor waterstof en methanol zijn er al motorfabrikanten die dual-fuel motoren in hun productengamma hebben, maar vaak met een vermogensrange die hoger ligt dan gebruikelijk in de voortstuwings voor binnenvaartschepen. Leveranciers van highspeedmotoren zullen in de komende jaren aangepaste motoren die geschikt zijn voor alternatieve brandstoffen opnemen in hun verkoopprogramma. Daarnaast zullen enkele motorfabrikanten de komende jaren retrofit-kits leveren, waarmee de huidig geïnstalleerde dieselmotoren omgebouwd kunnen worden naar een methanolmotor.

COMMERCIEEL

Investeringen

- **Stage V/Euro VI motor voor waterstof:**
+/- € 650 per kW*.
(Voor de opslag van waterstof aan boord wordt uitgegaan van uitwisselbare containers/pay per use).
- **Stage V/Euro VI motor voor methanol:**
+/- € 500 per kW*.
Daarnaast dient ook het bunker/tankvolume vergroot te worden voor eenzelfde vaarbereik aangezien de energiedichtheid van methanol ongeveer de helft ten opzichte van diesel.
- **Stage V/Euro V motor voor (Bio-)LNG:**
+/- € 450 per kW*.

Gebruik

- De energie-efficiëntie zal gelijkaardig zijn aan een reguliere Stage V dieselmotor, maar lager dan een brandstofcel.
- In de basis liggen onderhoudskosten naar verwachting in lijn met die van een standaard diesel Stage V motor.
- Exacte gegevens zijn nog niet bekend want een groot deel van de fabrikanten is nog in de ontwikkelfase.
- Doordat de gebruikte brandstoffen zuiverder zijn dan fossiele diesel, zouden de onderhoudskosten van de motor zelf iets lager uit kunnen vallen.
- Daarnaast is het aannemelijk dat de onderhoudskosten van het brandstofsysteem zullen toenemen door de complexiteit van hoge druk en/of cryogene-systemen. Hierdoor wordt het moeilijker om werkzaamheden door eigen personeel uit te laten voeren.

* Price level 2021, CCNR

Factsheet 8: brandstofcel

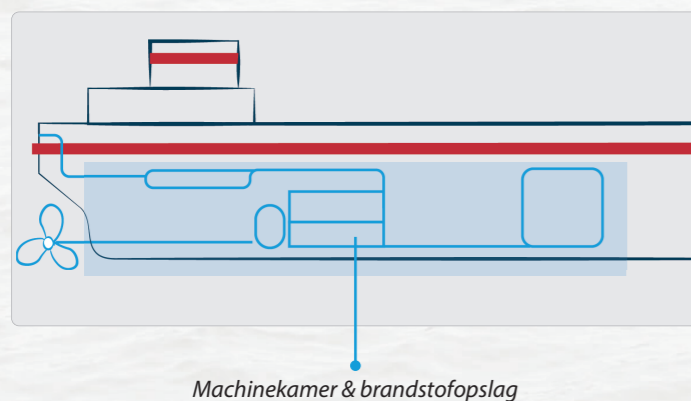
BESCHRIJVING

Een brandstofcel (ook wel FC of Fuel Cell genoemd) is een elektrochemisch apparaat waarin waterstof met zuurstof reageert en elektriciteit opwekt, met als uitstoot water en warmte. Een belangrijk voordeel is dat er geen schadelijke stoffen worden uitstoten, in tegenstelling tot verbrandingsmotoren. Hierdoor heeft de FC een aantrekkelijke technologie voor het opwekken van elektriciteit, waar batterijen niet in voldoende capaciteit kunnen voorzien. Als de waterstof gemaakt wordt met duurzame energie zoals zon of wind, ontstaat een emissieloze energievoorziening. Naast waterstof kan ook methanol als brandstof gebruikt worden. Daarbij wordt de waterstof eerst uit de methanol gehaald via een 'reformer'. Specifieke methanol FC staat nog in de kinderschoenen. Het type brandstofcel dat het meest wordt toegepast in de transportsector is de PEM-FC (waterstof membraan brandstofcel).

KENMERKEN

Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur		▲	
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	
<i>Brandstofcel</i>	Laag	Midden	Hoog

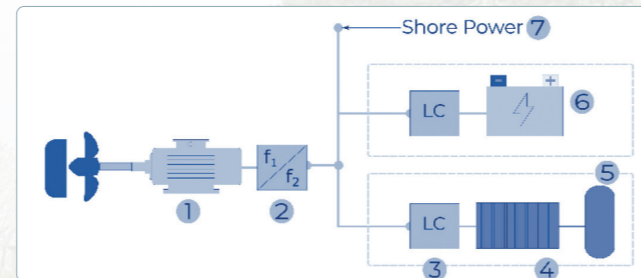
IMPACT



TECHNISCH

De installatie aan boord van een schip met een FC op waterstof bestaat uit de volgende componenten:

- 1 Elektromotor.
- 2 Frequentieomvormer.
- 3 Hoofdschakelbord.
- 4 Brandstofcel.
- 5 Waterstof-opslagtank.
- 6 Batterijpakket.
- 7 Walaansluiting.

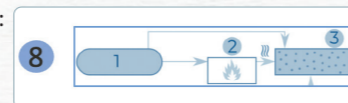


In geval van methanol wordt eerst:

- 8 waterstof uit methanol gehaald en
- 8.1 komt de methanolopslag in plaats van
- 5 waterstofopslag.

Componenten hiervoor zijn:

- 8.1 Methanolopslag.
- 8.2 Verwarmingselement.
- 8.3 Reformer.



Keuzes

- Waterstof of methanol als brandstof.
- Modulaire brandstofcel container of ingebouwd.
- Modulaire waterstofopslag of ingebouwde tanks.
- Modulair batterijpakket.

Voordelen

- De brandstofcel zelf is emissieloos. Afhankelijk van de Well-to-Tank voetafdruk van de brandstof kan dit een volledig emissieloos voortstuwings opleveren.
- Geen mechanische belasting van componenten in de brandstofcel, waardoor slijtage, trillingen en geluid niet of minimaal optreden.
- Efficiëntere energieomzetting dan verbrandingsmotor.

Nadelen

- Hoge zuiverheid van waterstof (99,99%) vereist voor een optimale levensduur van de brandstofcel.
- Energieafgifte kan variëren en de brandstofcel heeft enige tijd nodig om op temperatuur te komen. Daarom moet deze voor gebruik als voortstuwing in een schip altijd gecombineerd te worden met een (beperkt) batterijpakket.

COMMERCIEEL

Investerings

- Brandstofcel: +/- € 2.500 per kW*.
- Elektrificatie en installatiekosten (motoren, aansturing en interface) zijn hoger dan conventionele dieselveertstuwings: € 350K tot € 850K*.
- Batterijpakket naast brandstofcel: +/- € 750 /kWh*.
- De ontwikkelkosten van het elektrische systeem zijn sterk afhankelijk van de aanbieder en de mogelijke standaardisatie van de oplossing.
- Installatie en waterstofsysteem (expert consultation).
- Kosten van de waterstofopslag zijn hoog en sterk project afhankelijk. Voor methanol geldt dit ook, maar in mindere mate.

* Price level 2021, CCNR

Met een elektrische aandrijving kan ook gebruik gemaakt worden van modulaire energieoplossingen, waarbij brandstofcel, waterstofopslag en/of batterijen in containervorm aan boord geplaatst worden. Hierbij wordt het 'energy as a service'/'pay-per-use' model gehanteerd om de investeringsdrempel te verlagen.

Gebruik

- Indicatief verbruik waterstof: 60kg/1.000 kWh.
- Onderhoudskosten zijn lager (geen mechanische belasting en dus minder slijtgedelen en geen smeermiddelen voor energieopwekking).
- Momenteel is de verwachte levensduur \geq 20.000 uur. Fabrikanten werken toe naar een levensduur van 80.000 uur.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Voor het varen met een brandstofcel moet in de basis voldaan worden aan varen met een elektrische aandrijving. Voor varen op waterstof moet aan additionele richtlijnen en vrijstellingen voldaan worden. In het ES-TRIN (editie 2021/1) document zijn nog geen beschrijvingen voor de toepassing van waterstof opgenomen. De draft regulering van PEM brandstofcellen is al wel klaar, de draft regulering voor waterstofopslag wordt begin 2024 verwacht. Bij het CCR moet een (tijdelijke) vrijstelling aangevraagd worden. Als de vrijstelling toegekend wordt moet voldaan worden aan een aantal eisen en richtlijnen waarbij verwezen wordt naar Hoofdstuk 30 en Bijlage 8 van het ES-TRIN document.

De extra richtlijnen hebben onder andere betrekking op:

- Risicobeoordeling en (bouw)richtlijnen van de systemen aan boord.
- Richtlijnen voor de opslag van waterstof.
- Richtlijnen voor het bunkeren van waterstof (alleen van toepassing bij vaste tanks).
- Richtlijnen voor het onderhoud van het brandstofcelsysteem
- Opleidingsvereisten van bemanningsleden m.b.t. de gevaren van het gebruik, het onderhoud en de inspectie van het brandstofcelsysteem.

Infrastructuur

De benodigde infrastructuur is sterk afhankelijk van de gekozen oplossing en hierdoor kan ook flexibiliteit ingebouwd worden. Als gewerkt wordt met modulaire oplossingen in de vorm van verwisselbare containers, kan zowel van batterijcontainer gebruik gemaakt worden als van waterstofcontainers/waterstof infrastructuur. Er zou dus gekozen kunnen worden om te starten met een elektrische aandrijving door batterijcontainers en op een later tijdstip over te schakelen (tijdelijk of permanent) op energievoorziening via een waterstofcontainer, afhankelijk van de infrastructuur op dat moment en de beoogde vaarroutes. In 2023 komen er meer schepen op waterstof in de vaart dan schepen die volledig via batterijencontainers aangedreven worden.

Factsheet 9: liquefied biomethane (LBM/Bio-LNG)

BESCHRIJVING

LNG is een fossiele heldere, kleurloze, niet-giftige vloeistof, die ontstaat als aardgas tot -162°C wordt afgekoeld. LBM (Liquefied Biomethane, in Nederland ook wel Bio-LNG genoemd) is een niet-fossiele variant hierop en wordt geproduceerd uit organisch materiaal, zoals biomassa, landbouwafval, mest, rioolslib en voedselafval. LBM heeft identieke eigenschappen als fossiele LNG en kan dus in een verbrandingsmotor (gasmotor) toegepast worden. LBM kan ook gemengd worden met fossiele LNG als tussenvorm. Bij de verbranding in een verbrandingsmotor komen veel minder schadelijke stoffen (NO_x/SO_x/PM) vrij dan bij een dieselmotor. In tegenstelling tot fossiele LNG kan met LBM ook een forse broeikasgasreductie (Well-to-Wake) gerealiseerd worden.

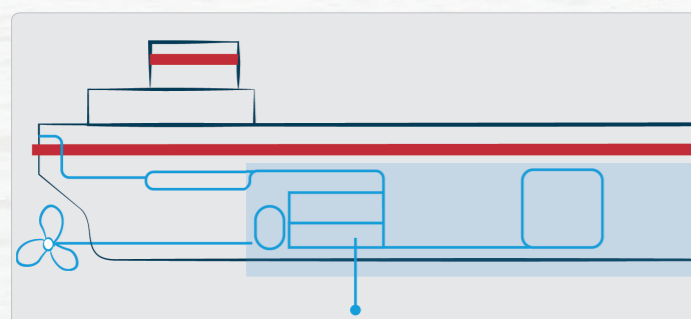
KENMERKEN

Technology Readiness Level			▲
Investing (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)	▲		
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen			▲
Benodigde opleiding			▲

Liquefied methane gas

Laag Midden Hoog

IMPACT



Verbrandingsmotoren, brandstofsysteem en opslag

TECHNISCH

De uitstootreductiepotentie van een gasmotor bij gebruik van LBM ten opzichte van een CCR2 dieselmotor (WtW) is: 65-100% CO₂, 81% NO_x en 97% fijnstof. Daarnaast wordt er geen zwaveloxide uitgestoten.

Keuzes

- **Bio-LNG ontstaan uit organisch materiaal:**
Om Bio-LNG te maken, wordt het organisch materiaal in een vergister omgezet naar biogas. Vervolgens wordt alle mogelijke vervuiling eruit gefilterd.
- **e-LNG geproduceerd uit waterstof en CO₂:**
e-LNG wordt geproduceerd door groene waterstof en afgevangen-CO₂ in een Power-to-Gas (P2G) proces waarin het omgevormd wordt naar methaan.

Door het vervolgens af te koelen naar -162°C wordt het vloeibaar en slinkt het tot 1/600 van zijn oorspronkelijke volume. Hierdoor is het makkelijker te transporteren en ontstaat een hogere energiedichtheid.

Voordelen

- Voldoen aan strenge uitlaatgasemissies (EU Stage V) zonder nabehandelinginstallatie.
- Sterke broeikasgasreductie (Well-to-Wake). De CO₂-uitstoot kan zelfs negatief zijn als de LBM gewonnen wordt uit mest, waarbij de methaan uit de mest anders vrij was gekomen in de atmosfeer.
- Gecertificeerde gasmotoren zijn beschikbaar en betrouwbaar gebleken (TRL 9).
- Hoge energiedichtheid in vergelijking tot waterstof en/of batterij-elektrische energiedragers (maar nog steeds substantieel lager dan diesel)

Nadelen

- Hoge investeringen voor de opslag van LNG/LBM/e-LNG en installatie aan boord.
- Complexe gasinstallatie met bijbehorende veiligheidsmaatregelen
- Risicovolle prijsschommelingen van LNG/LBM/e-LNG.

COMMERCIEEL

Investerings

- Specifieke LNG verbrandingsmotor +/- € 450 /kW*.
- LNG-systeem incl. installatie +/- € 2.200K*.

Gebruik

De prijs van LBM/e-LNG is gekoppeld aan de LNG prijs en daarmee ook afhankelijk van geopolitieke spanningen. Vaak wordt er met een (substantiële) opslag ten opzichte van de LNG-prijs gewerkt. Afhankelijk van de beschikbaarheid, is deze opslag echter ook even negatief geweest. De kosten voor LBM zijn ongeveer de helft per energiehoeveelheid ten opzichte van groene waterstof.

* Price level 2021, CCNR

Het is moeilijk om een concreet waarde-oordeel te geven over de hoogte van onderhoudskosten. Gasmotoren hebben een schonere verbranding en daardoor mogelijk minder koolstofafzettingen en minder interne motorslijtage dan reguliere diesel motoren. Daarnaast is er geen uitlaatgassen nabehandelingssysteem nodig om aan de huidige EU Stage V eisen te voldoen.

LNG-motoren vereisen echter wel specifieke onderhoudsactiviteiten met betrekking tot het LNG-brandstofsysteem, zoals geregelde inspectie, onderhoud en eventuele reparaties aan de LNG-tank, het leidingwerk en de regelsystemen. Deze werkzaamheden kunnen mogelijk niet door eigen bemanning uitgevoerd worden, waardoor ze uitbesteed dienen te worden aan een externe partij.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

In het ES-TRIN zijn in bijlage 8 de aanvullende bepalingen beschreven voor schepen die worden aangedreven met een brandstof met een vlammpunt van 55 °C of minder, hieronder valt de brandstof LNG en dus ook LBM en e-LNG. Voor de bemanning is een gespecialiseerde training vereist. Bij het bunkeren dient met de volgende veiligheidsmaatregelen rekening gehouden te worden: gezichtsmasker, cryogene handschoenen, lange mouwen en broek en schoenen met gesloten neus.

Infrastructuur

De infrastructuur voor bunkeren is niet zo uitgebreid als dat van dieselmotorenstations. In Nederland en in het noorden van België is er reeds een uitgebreide infrastructuur aanwezig in de nabijheid van havens en vaarwegen. Volgens de EU-richtlijn Infrastructuur voor Alternatieve Brandstoffen (AFID) moeten de lidstaten ervoor zorgen dat uiterlijk per 31 december 2030 een passend aantal LNG-tankpunten in binnenhavens beschikbaar is, zodat het mogelijk wordt voor LNG-zee- of binnenschepen binnen het TEN-T-kennetwerk te varen.

De bunkermogelijkheden bestaan uit:

- Ship to ship bunkering.
- Shore to ship bunkering.
- Truck-to-ship bunkering.

Beschikbaarheid van LBM en e-LNG

Er is een groeiend aantal bedrijven dat LBM (Bio-LNG) produceert en aanbiedt, maar het aanbod is op dit moment nog gering. e-LNG is nog minder ontwikkeld, mede vanwege de hoge energiebehoefte om te produceren en de daarbijhorende kosten.

Men kan er voor kiezen om in eerste instantie te varen op reguliere LNG en later over stappen op LBM of e-LNG. Daarnaast kan ook eenvoudig gekozen worden voor het varen op een blend (combinatie van LNG en Bio-LNG om bijvoorbeeld te kunnen voldoen aan tussentijdse uitstootrichtlijnen (bv. 2030 fit for 55).

BESCHRIJVING

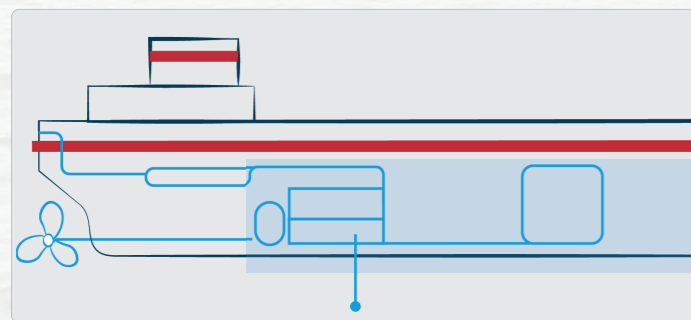
Naast de toepassing van zuivere waterstof als energiedrager, wordt ook gekeken naar bindingen van waterstof met een vaste stof, zoals Natriumboorhydride of een vloeistof, zoals LOHC. Het doel hiervan is enerzijds een hogere energiedichtheid verkrijgen en anderzijds de complexiteit van het omgaan met een licht ontvlambaar (gecomprimeerd) gas zo veel mogelijk te vermijden. Door het chemisch binden van waterstof aan een vaste stof of vloeistof, wordt een nieuwe energiedrager gecreëerd die getransporteerd en opgeslagen kan worden met het gemak en veiligheidsvoorschriften die vergelijkbaar zijn aan die van diesel. Doordat de onttrekking van het waterstof aan boord gedaan wordt op basis van de energiebehoefte van het schip, is er slechts een geringe hoeveelheid gasvormige waterstof aanwezig. Omdat beide technologieën nog in ontwikkeling zijn, worden de commerciële aspecten nu niet behandeld.

KENMERKEN

Kenmerk	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level		▲	
Investing (CAPEX)			
Operationele kosten (OPEX)			
Beschikbare infrastructuur		▲	
Noodzakelijke veiligheidseisen			▲
Benodigde opleiding		▲	

Waterstofdragers

IMPACT



Machinekamer, brandstofsysteem en opslag

TECHNISCH

Vaste vorm - Natriumboorhydride

Natriumboorhydride (NaBH₄) is een natriumzout in de vorm van wit poeder, waarin waterstof chemisch gebonden zit. Het wordt al gebruikt als basis voor wasmiddelen en om geneesmiddelen te maken. Om het waterstof uit natriumboorhydride te halen, wordt het in contact gebracht met zeer zuiver water in een katalysator. Hiermee is de verwachting dat meer dan 95% van de waterstof uit de drager gehaald kan worden. De energiedichtheid van Natriumboorhydride is 27MJ/l, hierbij is geen rekening gehouden met hoeveelheid benodigd water, restproduct en omzettingsefficiëntie.

Vloeibare vorm - LOHC

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) is een vloeibare organische waterstofdrager. Bij deze techniek is het een vloeistof (LOHC) waaraan de waterstof aan de wal wordt toegevoegd. Aan boord kan aan de verrijkte vloeistof de opgeslagen waterstof onttrokken worden. De vloeistof die men hiervoor gebruikt is bij voorkeur niet-giftig en niet geclassificeerd in de categorie 'gevaarlijke stoffen'. Doordat de vloeistof bij omgevingstemperatuur en omgevingsdruk zich gedraagt zoals diesel kunnen bestaande conventionele brandstofinfrastructuur gebruikt worden. De energiedichtheid van LOHC ligt rond 7MJ/l.

Proces

- Waterstof wordt aan wal toegevoegd aan de energiedrager (hydrogenation).
- De drager met waterstof kan onder normale omgevingscondities opgeslagen en getransporteerd worden, zowel aan wal als aan boord.
- Aan boord wordt waterstof aan de energiedrager onttrokken op basis van de op dat moment benodigde energiebehoefte (dehydrogenation).
- Waterstof kan in gasvorm gebruikt worden in een verbrandingsmotor of brandstofcel (mede afhankelijk van de zuiverheid).
- Als restproduct blijft de drager over zonder waterstof (spent fuel) die opgeslagen moet worden en aan wal weer gebruikt kan worden om waterstof aan toe te voegen (zodat een circulair proces ontstaat).

Voordelen

- Emissieloos varen is mogelijk bij gebruik groene waterstof als bron en groene energie voor de binding van waterstof aan de drager.
- Opslag, transport en bunkeren kan bij omgevingscondities.
- Geen complexe tank (hoge druk of cryogeen) vereist aan boord van het schip, daarmee lagere CAPEX en een lagere veiligheidsimpact.
- Opslag kan voor langere tijd zonder verlies door verdamping (zoals bij waterstof in gasvorm).
- De drager kan waterstof kan hergebruikt worden, waardoor een volledig circulair proces ontstaat.

Nadelen

- Technieken zijn pas in ontwikkeling (nog een laag TRL-niveau).
- Specifieke waterstofverbrandingsmotor of brandstofcel nodig.
- Om de waterstof uit de drager te halen is er een hydrogenatie-reactor nodig aan boord.
- Er blijft een restproduct achter dat hergebruikt dient te worden, hierdoor is extra opslag vereist.
- Naast de energie die nodig is om waterstof te produceren, is ook energie nodig om waterstof aan de drager te binden.
- Natriumboorhydride reageert met water, waardoor de opslag droog moet zijn.

RANDVOORWAARDEN

Regelgeving

Er is nog geen specifieke regelgeving beschikbaar, aangezien de techniek zich nog in ontwikkelfase bevindt.

Impact

In het ontwerp van het schip dient rekening houden te worden met een tank voor de opslag van de 'Spent Fuel' en een extra tank voor zuiver water (in het geval van Natriumboorhydride). In geval van meerdere verschillende opslagtanks, zouden deze (deels) hergebruikt kunnen worden.

Veiligheid

- Het vlammpunt van LOHC en Natriumboorhydride ligt een stuk hoger dan bij diesel (55 °C) of waterstof het geval is. Vandaar dat opslag van de energiedrager aan boord minimale brand of explosie gevaren kent.
- De hoeveelheid van de te onttrekken waterstof uit de drager kan afgestemd worden op de energiebehoefte. Hierdoor zal er geen grote hoeveelheid aan gasvormige waterstof aanwezig zijn op het schip.
- Daarnaast zal met detectie- en ventilatiesystemen de veiligheid gewaarborgd worden bij een falend systeem en noodgevallen.

Bunkering en transport

LOHC en Natriumboorhydride kunnen veilig vervoerd worden en kan met behulp van bestaande infrastructuur zoals offshore bulk- of containerschepen, binnenvaart, trein- of wegtransport.

OVERZICHTSINDELING

In de trajecten in aanmerking genomen technologieën	Beschrijving	TRL (1-9) toepassing in schepen	TRL (1-9) brandstof/energie-productie en levering	Potentiële emissiereductie (in een ideale upstream-keten)		
				GES/CO ₂	NO _x	Stofdeeltjes
CCR 2 of lager, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van CCR 2 of oudere motor.	9	9	0%	0%	0%
CCR 2 + SCR, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van CCR 2 en aangevuld met een nabehandelingssysteem.	9	9	0%	82%	54%
Stage V, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V.	9	9	0%	82%	92%
LNG	Vloeibaar gemaakt aardgas in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V.	9	9	10%	81%	97%
Stage V, HVO	HVO in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V. HVO is zuiver "hydrotreated vegetable oil" (dus zonder bijmenging van fossiele brandstoffen) en alle vergelijkbare drop-in-bio-brandstoffen (met inbegrip van e-brandstoffen), alsook synthetische diesel die gemaakt wordt met ingevangen CO ₂ en duurzame elektrische stroom.	9	9	100%	82%	92%
LBM	Vloeibaar gemaakt bio-methaan (of bio-LNG) in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V.	9	8	100%	81%	97%
Batterij	Elektrisch voortstuwingssysteem met ingebouwde batterijen of uitswisselbare batterijsystemen.	8	7	100%	100%	100%
H ₂ FC	Vloeibaar of gasvormig waterstof dat gebruikt wordt in brandstofcellen.	7	7	100%	100%	100%
H ₂ ICE	Vloeibaar of gasvormig waterstof dat gebruikt wordt in interne verbrandingsmotoren.	5	7	100%	82%	92%
MeOH, FC	Methanol dat gebruikt wordt in brandstofcellen.	7	6	100%	100%	100%
MeOH, ICE	Methanol dat gebruikt wordt in interne verbrandingsmotoren.	5	6	100%	82%	92%

Schone verbrandingsmotoren	Motoren	NRMM Stage V IWP, IWA	
		NRMM Stage V NRE	
Hybride combinaties	Brandstoffen	EURO VI	
		SCR & DPF retrofit	
		BioDiesel (FAME, HVO)	E-diesel
		BioMethaan (Bio-LNG)	E-methaan
		BioMethanol	E-methanol
		Blauwe waterstof (H ₂), gas of vloeibaar	E-H ₂ (groene waterstof), gas of vloeibaar
Blauwe ammoniak (NH ₃)	E-ammoniak		
Elektrificatie	Brandstofcel (fuel cell)	Lithium Ion NMC techniek	
		Lithium LiFePO ₄ techniek	
		Flow batteries	
		PEM FC (automotive)	
Elektrificatie	Energiedragers voor brandstofcel	Blauwe ammoniak (NH ₃)	E-ammoniak
		Blauwe waterstof (H ₂), gas of vloeibaar	E-waterstof (groene waterstof), gas of vloeibaar
		BioMethanol	E-methanol

BRONVERMELDING

- KiM- Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Energieketens voor CO2-neutrale mobiliteit; Efficiëntie, kosten en ruimtegebruik in beeld, September 2022
- CCR, Assessment of technologies in view of zero-emission IWT, Part of the overarching study "Financing the energy transition to-wards a zero-emission European IWT sector" Deliverable_RQ_C_Edition1, October 2020
- CCR, Assessment of technologies in view of zero-emission IWT, Part of the overarching study "Financing the energy transition to-wards a zero-emission European IWT sector" Deliverable_RQ_C_Edition2, May 2021
- Routekaart van de CCR voor het terugdringen van de emissies in de binnenvaart, maart 2022
- Rapport toekomst duurzame binnenvaart EICB & TNO, APRIL 2021
- Europese standaard tot vaststelling van de technische voorschriften voor binnenschepen, ES-TRIN, Editie 2021/1
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Aftertreatment, April 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Diesel-electric-propulsion, april 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Drop-in fuels, april 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Fuel-Cell propulsion, April 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Battery electric propulsion, april 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Euro VI truck and NRE engines
- IVR, Paper evaluatie van voortstuwingssystemen in de binnenvaart, december 2022
- IVR, Technisch bulletin, Lithium-ion batterijen in de binnenvaart, februari 2021
- Ministerie van I&W, Visie Duurzame Energiedragers in Mobiliteit, juni 2020
- STEERER, Structuring towards zero emission waterborne transport, WP2, september 2022
- RVO, Veiligheidsaspecten nieuwe energiedragers binnenvaart, april 2021

- ABN-Amro, Decarbonisatie-strategieën voor sectoren, oktober 2022
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, The Carbon & Food Opportunity Costs of Biofuels in the EU+UK, maart 2023
- NesteMy, Renewable diesel a4-factsheet, december 2022
- NEN Energie, Vervolgonderzoek veiligheidsrisico's biobrandstoffen gebruik in binnenvaart, december 2021
- EUROMOT, Inland Waterways Transport Sector Stage-V FAQ, maart 2019
- TNO, Green maritime methanol, a call to action, december 2022
- TNO, Green maritime methanol, towards a zero emission shipping industry, februari 2021
- DKTI, Openbare samenvatting haalbaarheidsstudie H2 verbrandingsmotor
- CE Delft, Verkenning BioLNG voor transport, Fact finding, marktverkenning & businesscases, maart 2018
- DNV GL, LNG in de scheepvaart: verlagen emissies en verhogen efficiency, mei 2018
- TNO, E-Fuels towards a more sustainable future for truck transport shipping and aviation, juli 2020
- TUDelft, Artikel; Waterstof als de sleutel voor een duurzame scheepvaartsector, november 2018
- Port of Amsterdam, HS Neo Orbis, Koers naar circulaire emissievrije scheepvaart, maart 2022
- ROTH, Veiligheidsblad methanol, maart 2022
- EICB, Waterstof in de binnenvaart en short sea, een inventarisatie van innovatieprojecten, juli 2020
- Planbureau voor de Leefomgeving, Waterstof tot nadenken, november 2021
- TU Delft, EICB, TNO, Marin, KBN; Parlement & Wetenschap; Artikel: Factsheet verduurzaming binnenvaart, Augustus 2022
- RVO, Routekaart Waterstof - Nationaal Waterstof Programma, november 2022
- Schuttevaer nieuws site, verschillende artikelen
- NT nieuws site, verschillende artikelen
- Gesprekken met technische experts en specialisten

COLOFON

Factsheets
Verduurzamingsopties voor de binnenvaart

Auteurs
Noud Seegers & Dirk Degroote

In opdracht van
Topsector Logistiek
Oktober 2023

Disclaimer
Deze factsheets zijn met de grootst mogelijke zorg geschreven. Cognaship BV kan echter de juistheid of volledigheid van de informatie niet garanderen. Cognaship BV aanvaardt geen aansprakelijkheid die voortvloeit uit de inhoud van dit document.

