

TNO-rapport**TNO 2016 R10662****Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten
behoefte van opname in de Nationale
Milieudatabase**

Datum	23 mei 2016
Auteur(s)	J. Jochemsen-Verstraeten MSc, Drs. S.E. de Vos-Effting, Drs. E.E. Keijzer, S.N.C. Dellaert MSc, Ir. A.van Horssen, Ing. R.N. van Gijlswijk, Ir. J.H.J. Hulskotte
Aantal pagina's	70 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	Milieuprofiel scheepsbrandstoffen
Projectnummer	060.21917

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

Ten behoeve van duurzaam inkopen heeft RWS TNO gevraagd om milieuprofielen op te stellen van een aantal (scheeps-)brandstoffen te weten:

- Scheepsbrandstoffen, voor toepassing in baggerschepen op de Noordzee en in Nederlandse havens:
 - HFO (Heavy Fuel Oil)
 - MDO (Marine Diesel Oil)
 - GTL (Gas-To-Liquid)
 - HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)
 - LNG (Liquefied Natural Gas)
 - Bio-LNG
- en waterstof in brandstofcellen (algemene toepassing).

De milieuprofielen zijn berekend middels een levenscyclusanalyse (LCA) op basis van de SBK Bepalingsmethode. De milieuprofielen in deze rapportage zijn zogenaamde categorie 2 data; branchegemiddeld en getoetst door een door SBK erkende LCA toetsers. Deze rapportage beschrijft de milieu-impact van (scheeps)brandstoffen *per ton* brandstof. De resultaten worden aangeboden voor opname in de Nationale Milieudatabase (NMD). De gebruikers van de milieuprofielen kunnen op basis van de hoeveelheid brandstof voor een GWW werk de project specifieke milieulast berekenen. Omdat de hoeveelheid brandstof in tonnen (mede) afhangt van de calorische waarde van de brandstof, wordt bij alle brandstoffen vermeld wat de calorische waarde is.

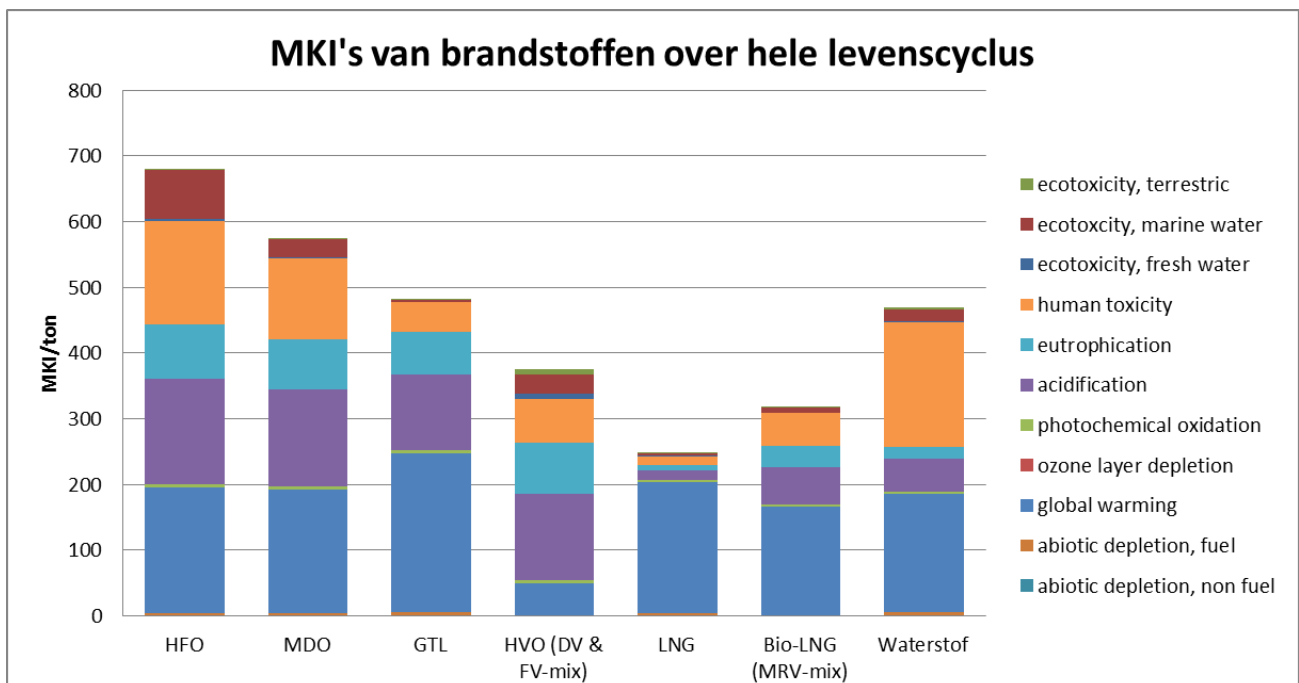
De resultaten in deze studie geven een beeld van de milieu-impacts van scheepsbrandstoffen zoals gebruikt in Nederland in de buurt van zeehavens of op de Noordzee. Het milieuprofiel voor waterstof is berekend voor een algemene toepassing in Nederland. Voor iedere onderzochte brandstof is het meest waarschijnlijke productieprofiel vastgesteld voor brandstoffen zoals aangeboden op de Nederlandse markt. Het milieuprofiel van de biobrandstoffen Bio-LNG en HVO is gebaseerd op tweede generatie biobrandstoffen, omdat RWS aangeeft eerste generatie biobrandstoffen te willen uitsluiten in hun inkoopproces. Deze studie analyseert een aantal brandstoffen die reeds gebruikt worden of op korte termijn (komend decennium) verwacht worden in gebruik te zijn - gebaseerd op de brandstofvisie (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014). Gebruik van deze resultaten voor scheepsbrandstoffen (baggerschepen) in andere landen en andere toepassingen wordt afgeraden, omdat de representativiteit niet geborgd kan worden. Bij toepassing in andere motoren met andere belastingen ontstaan andere emissies. Bovendien geldt voor sommige brandstoffen dat er een grote spreiding is het milieuprofiel is door de grote variatie in herkomst/ productie van de brandstoffen.

De milieuprofielen voor de NMD zijn per brandstof opgenomen in de bijlage van deze rapportage. Figuur 1 toont de MKI's voor de gehele levenscyclus van de brandstoffen, van productie tot gebruik. Aangezien de milieu-impacts voor de biobrandstoffen sterk afhankelijk zijn van de voorketen, gelden deze resultaten specifiek voor de hier onderzochte brandstoffen.

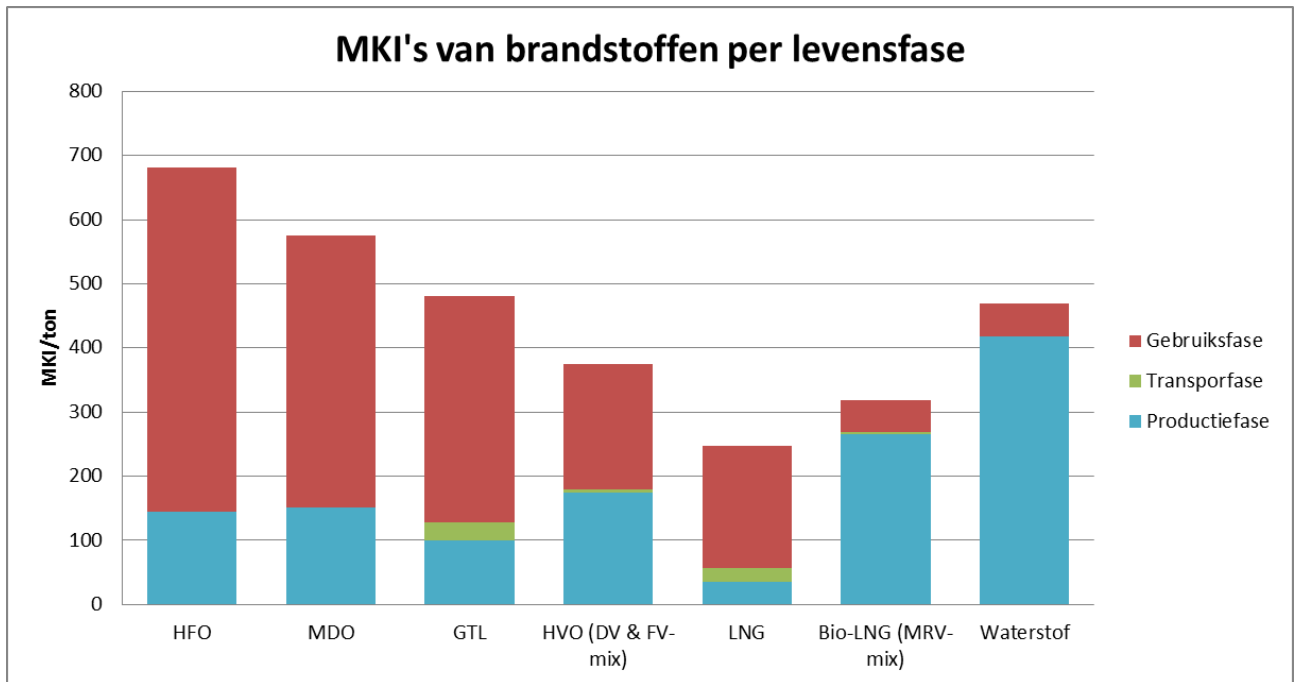
Voor de productie van HVO is gekeken naar een mix van 50% dierlijke vetten en 50% afgewerkt frituurvet (genoemd "DV & FV-mix"), terwijl voor Bio-LNG productie is uitgegaan van een mengsel van biogassen uit mest, RWZI-slib en voedselresten ("MRV-mix").

De traditionele scheepsbrandstoffen HFO en MDO hebben over de hele levenscyclus per ton de grootste milieu-impact, gevolgd door GTL en waterstof. Opvallend is dat de bio-LNG een hogere MKI hebben dan de fossiele LNG. De MKI van bio-LNG is hoog door emissies in de voorketens (vergisting van mest en voedsel) en door worst-case aannames voor zuiveringsprocessen. Biobrandstof HVO heeft echter een lagere milieu-impact in vergelijking met HFO of MDO. Voor biobrandstoffen geldt dat de voorketen bepalend is in het daadwerkelijke milieuprofiel. De gebruiker van deze resultaten wordt gevraagd om te verifiëren of de biobrandstof die wordt ingezet overeenkomt met de biobrandstof en de belangrijkste aannames die daarvoor gedaan zijn in deze rapportage en die vermeld zijn in het commentaarveld in de uiteindelijke milieuprofielen. Verder valt op dat GTL over de gehele levenscyclus een hoger klimaatveranderend effect heeft in vergelijking met HFO en MDO.

Zoals Figuur 2 laat zien, zijn de impacts bij de verschillende brandstoffen niet vergelijkbaar over de levensfasen verdeeld: voor HFO, MDO, GTL en LNG ligt het grootste deel van de milieueffecten in de gebruiksfase, terwijl voor Bio-LNG en waterstof de productiefase de grootste milieu-impact kennen. De impact van transport is alleen voor GTL en LNG relevant, maar draagt bij beide brandstoffen slechts beperkt bij aan de totale milieueffecten.

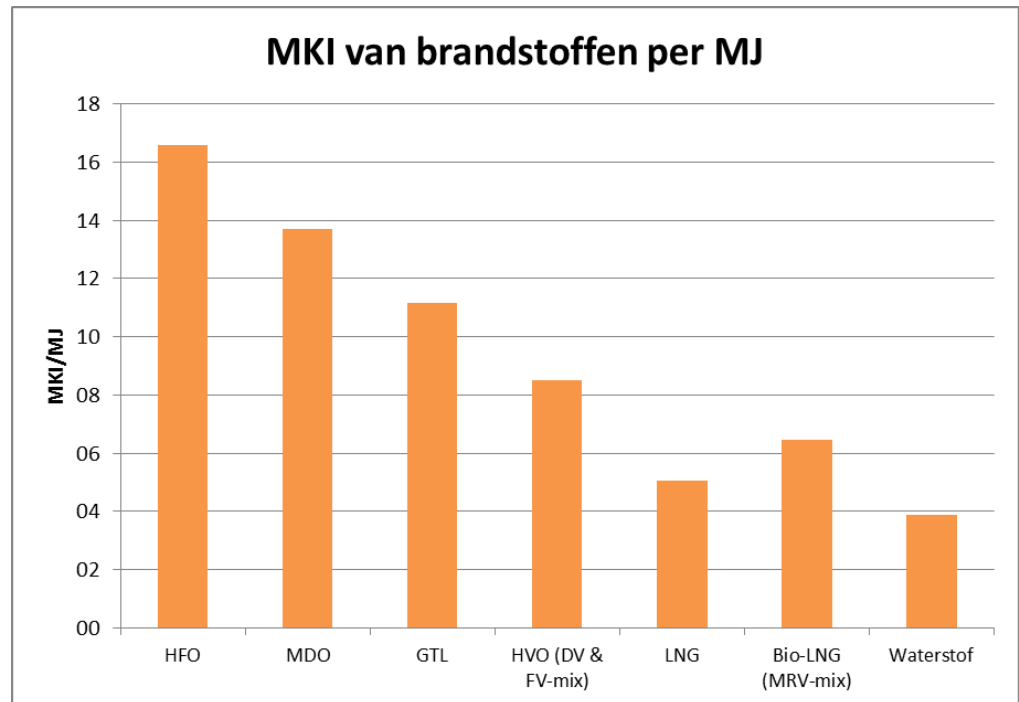


Figuur 1 MKI's van brandstoffen over de gehele levenscyclus.



Figuur 2 MKI's van brandstoffen per levensfase.

Voor deze studie zijn alle resultaten uitgedrukt in milieu-impacts per ton brandstof, maar omdat niet alle brandstoffen dezelfde energie-inhoud hebben, is de vergelijking per ton een niet-functionele vergelijking. Daarom hebben we ook de resultaten per MJ energie-inhoud berekend. Figuur 3 toont dat, wanneer de milieu-impacts per MJ in plaats van per ton worden bekeken, het beeld vooral voor waterstof wordt gewijzigd. Dit wordt verklaard door de zeer hoge energie-inhoud van waterstof van ca. 120 MJ/kg. Voor de overige brandstoffen ligt de energie-inhoud tussen de 41 en 49 MJ/kg en zijn daarom slechts kleine verschuivingen te zien ten opzichte van de voorgaande figuren. Wanneer niet alleen per *energie-inhoud*, maar per hoeveelheid *geleverde energie* zou worden gerekend, zou waterstof wellicht nog lager scoren in vergelijking tot de andere brandstoffen, omdat de efficiëntie van een brandstofcel typisch hoger ligt dan de efficiëntie van een brandstofmotor.



Figuur 3 MKI's van brandstoffen per MJ energie-inhoud.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel en doelgroep	7
1.3	Aanpak	8
1.4	Berekeningsprocedures	9
1.5	Allocatie	11
1.6	Uitvoering en begeleiding	11
1.7	Opzet van de rapportage	11
1.8	Standaarden	12
2	Onderwerp van de studie	13
2.1	(Scheeps)brandstoffen	13
2.2	Rekeneenheid	17
2.3	Databronnen	18
2.4	Reikwijdte	18
2.5	Levenscyclus en systeemgrenzen	19
2.6	Input/-outputgegevens	22
3	Milieuprofielen	48
3.1	Milieueffecten	48
3.2	Gevoeligheidsanalyses	54
4	Ondertekening	60
5	Referenties	61
	Bijlage(n)	
	A Appendix I: Milieuprofielen voor SBK	
	B Appendix II: Milieuprofielen in MKI's	
	C Appendix III: Review statement	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS). Rijkswaterstaat heeft als overheidsorganisatie een voorbeeldfunctie en wil een positieve bijdrage leveren aan de leefbaarheid van de wereld, nu en in de toekomst. Rijkswaterstaat kan het verschil maken op het gebied van duurzaamheid, door zijn invloed op de inrichting van Nederland, zijn taken op het gebied van natuurbeheer en zijn invloed op de markt. Duurzaamheid is dan ook al langer onderdeel van de missie van Rijkswaterstaat.

Ten behoeve van aanleg en onderhoud van de RWS netwerken wordt in opdracht van RWS veel gebaggerd en grond verzet. Onder meer ten behoeve van de kustlijnverzorging. De (aanleg en onderhoud) handelingen baggeren en grondverzet dragen dan ook substantieel (in de orde van 15 %) bij aan de ecologische voetafdruk van Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat heeft de ambitie om zijn voetafdruk in 2020 ten opzichte van het jaar 2010 met 20% te reduceren.

Ten behoeve van duurzaam inkopen heeft RWS TNO gevraagd om milieuprofielen op te stellen van een aantal (scheeps)brandstoffen. Dit rapport heeft betrekking op het bepalen van de MKI (het milieuprofiel) van (scheeps)brandstoffen in lijn met 'Bepalingsmethode Milieuprestaties Gebouwen en GWW-werken' van de Stichting Bouwkwaliiteit (SBK), hierna te noemen: "SBK Bepalingsmethode" (Stichting bouwkwaliiteit, november 2014).

1.2 Doel en doelgroep

Dit rapport behelst het bepalen van de MKI (het milieuprofiel) voor vijf (scheeps)brandstoffen die nog niet zijn opgenomen in de Nationale Milieudatabase (NMD) en het updaten van twee milieuprofielen welke momenteel alleen als ongetoetste (categorie 3) data zijn opgenomen in de NMD, te weten:

- Scheepsbrandstoffen voor toepassing in baggerschepen op de Noordzee:
 - Heavy Fuel Oil (HFO)
 - Marine Diesel Oil (MDO)
 - Gas-To-Liquid (GTL)
 - Hydrotreated Vegetable Oil(HVO)
 - Liquefied Natural Gas (LNG)
 - Biobased Liquefied Natural Gas (Bio-LNG)
- en waterstof in brandstofcellen.

De resultaten kunnen worden gebruikt door zowel RWS als andere partijen voor het bepalen van de materiaal- en energieprestatie van GWW werken (zoals kustsuppletie), en zullen aangeboden worden als input voor de NMD.

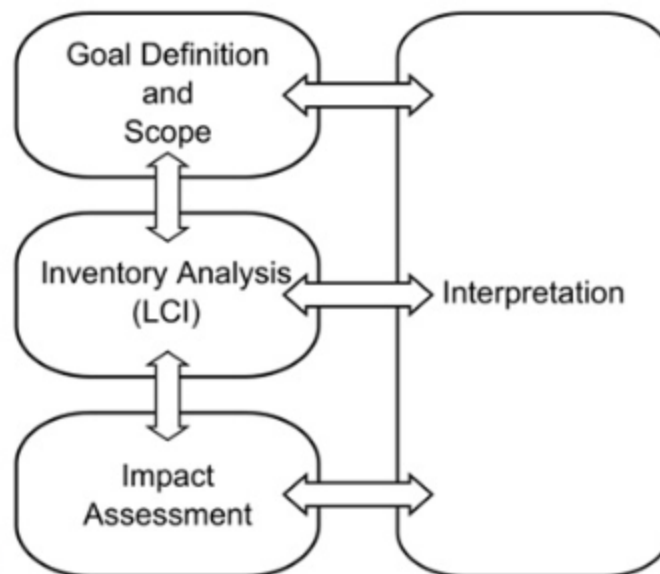
Het milieuprofiel van brandstoffen is mede afhankelijk van het type gebruik omdat de emissies per motortype verschillen en ook afhankelijk zijn van de belasting van de motor. Voor waterstof is een milieuprofiel opgesteld dat representatief is voor verschillende toepassingen. Voor alle andere brandstoffen in deze rapportage is het milieuprofiel berekend voor toepassing van brandstoffen in baggerschepen die ingezet worden op de Noordzee.

De milieuprofielen in deze rapportage zijn zogenaamde categorie 2 data; branchegemiddeld¹ en getoetst door een door SBK erkende LCA toetser.

1.3 Aanpak

De milieuprofielen zijn berekend middels een levenscyclusanalyse (LCA) op basis van de SBK Bepalingsmethode. Figuur 4 illustreert de standaardprocedure van het uitvoeren van een LCA. Globaal bestaat een LCA uit (1) het vaststellen van het doel en de scope, (2) de inventarisatiefase, met definiëring van het productsysteem en kwantificering van inputs en outputs in functionele eenheden, (3) vertalen van inventarisatie en naar milieueffecten en normalisatie van resultaten, en (4) opstellen van evaluatie en conclusies. De afbakening van de studie (stap 1) komt voort uit de opdracht van RWS en de afbakening voorgeschreven door de SBK bepalingmethode. Voor stap 2 (gegevensverzameling) is gebruik gemaakt van eerder uitgevoerde studies naar de (LCA) emissies in de voorketen (productie van de brandstof) en bij de verbranding van brandstof. In Stap 3 wordt gebruik gemaakt van de in de SBK Bepalingsmethode voorgeschreven impact assessment methode en weegfactoren, ofwel schaduwprizen. Het resultaat is de MilieuKostenIndicator (MKI), waarbij de milieubelasting uitgedrukt is in euro's. Des te hoger de MKI-waarde, des te meer milieubelasting.

Life Cycle Assessment Framework



Figuur 4 Standaardprocedure in Life Cycle Assessment.

In deze rapportage zijn algemene milieuprofielen beschreven voor het verbranden van brandstof in baggerschepen, zogeheten categorie 2 data. Deze gegevens zijn gecontroleerd door een externe, SBK-erkende reviewer: Harry van Ewijk van IVAM.

¹ Voor het milieuprofiel van specifieke brandstoffen van specifieke leveranciers, toegepast in specifieke schepen kan een zogenaamd categorie 1 milieuprofiel opgesteld worden.

Daarmee zijn deze milieuprofielen geschikt om opgenomen te worden in de Nationale Milieudatabase en om gebruikt te worden in milieuberekeningen voor Nederlandse Bouw- en GWW-projecten, bijvoorbeeld aan de hand van DuboCalc. Deze rapportage bevat tabellen waarin per voorgeschreven fase van de levenscyclus de inventarisatie gedocumenteerd is, inclusief een verklaring waar de gegevens op zijn gebaseerd, alsmede de volledige milieuprofielen. De milieuprofielen zoals ingediend voor de Nationale Milieudatabase, zijn te vinden in Appendix I: Milieuprofielen voor SBK.

1.4 Berekeningsprocedures

De berekeningsprocedures van deze studie zijn gebaseerd op de SBK Bepalingsmethode, en daarmee indirect op de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013). Expliciet zijn de volgende procedures gehanteerd:

- De milieu-impacts zijn gekarakteriseerd met de methoden die beschreven zijn in de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013); afwijkingen hierbij zijn in deze rapportage beargumenteerd in de inleiding en in dit hoofdstuk.
- Bij de berekening van energiestromen is rekening gehouden met de gebruikte brandstoffen en elektriciteitsbronnen, winning en transport van brandstoffen, omzettingsrendement en verdeling van energiestromen.
- Conform de SBK Bepalingsmethode zijn lange termijnemissies niet meegenomen. Kapitaalgoederen (infrastructuur) zijn wel meegenomen in de berekeningen. Zo is voor de scheepsbrandstoffen de milieu-impact van de materialen van de schepen en havens over de levenscyclus toegerekend aan de brandstof. Voor waterstof zijn de materialen van een brandstofcel toegerekend aan de brandstof.
- Additionele middelen; Bij het verbranden van brandstof in motoren wordt smeerolie gebruikt, dat is inbegrepen in deze studie. Ook het gebruik van koelmiddelen voor de airconditioning om de binnenruimte van baggerschepen te koelen is toegerekend aan de (scheeps-)brandstoffen.
- Voor alle achtergrondprocessen is, zoals voorgeschreven door de SBK Bepalingsmethode, database ecoinvent 2.2 gebruikt.

De milieueffecten die zijn meegenomen in deze studie, zijn de genoemde effecten in tabel 11 in de SBK Bepalingsmethode, welke nodig zijn om MKI's te berekenen. Daarnaast is alle andere milieu-informatie meegenomen die voor opname in de NMD vereist zijn (energie, waterverbruik en afval). Deze milieueffecten en aanvullende informatie zijn gekarakteriseerd op basis van de spreadsheet met karakterisatiefactoren² en de spreadsheet voor afvalberekening³ zoals geleverd door de SBK. Omdat een aantal karakterisatiefactoren in de spreadsheet bleken te missen terwijl deze wel relevant zijn, zijn ze handmatig toegevoegd aan de methode. Het gaat hierbij om:

- Karakterisatiefactoren voor metaalionen naar water; voor de ionen is geen karakterisatiefactor voor HTP, FAETP en MAETP, terwijl voor de metalen wel een karakterisatiefactor is. Daarom zijn dezelfde karakterisatiefactoren voor deze ionen toegevoegd in deze effectcategorieën;
- Karakterisatiefactor voor "dioxins (unspecified)" was afwezig in de spreadsheet, terwijl een specifieke dioxine ("Dioxin, 2,3,7,8

² Spreadsheet getiteld "Method bij NMD1_7.CSV", laatste wijziging gedateerd december 2014. Deze spreadsheet is geïmporteerd als methode in SimaPro 7.3.

³ Spreadsheet getiteld "SBK-Bepalingsmethode-indicator-afval-inclusief-milieuprofielen.xlsm".

Tetrachlorodibenzo-p-“) wel een karakterisatiefactor kent. Daarom heeft de emissie van deze dioxins (unspecified) naar lucht dezelfde karakterisatiefactor gekregen in de categorieën HTP, FAETP en MAETP.

- Karakterisatiefactoren voor metalen met de toevoeging “in ground” miste in de categorie ADP-elementen, terwijl dezelfde metalen zonder compartimentspecificatie wel gekarakteriseerd worden. Daarom hebben we deze metalen met specificatie op dezelfde manier toegevoegd.

De effectcategorie klimaatverandering is niet aangepast ten opzichte van de SBK-voorschriften, maar verdient extra toelichting omdat daar in deze studie een aantal verschillende aspecten een rol in spelen. Klimaatverandering wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten, wat betekent dat alle broeikasgassen op basis van hun effectgrootte worden omgerekend in CO₂-eenheden. Methaan is bijvoorbeeld een veel sterker broeikasgas dan CO₂ en daarom wordt 1 kilogram aan methaanemissies uitgedrukt als 25 kilogram CO₂-equivalenten. De natuurlijke koolstofcyclus, oftewel de opname van CO₂ door vegetatie en het vrijkomen van CO₂ bij de verbranding of vertering ervan, worden niet beschouwd als een milieueffect en daarom niet meegenomen in de berekeningen. Wanneer de biogene koolstof wordt uitgestoten in de vorm van methaan, wordt de periode dat het gas in de atmosfeer verblijft als methaan wel meegerekend als broeikasgasemissie; vanaf het moment dat de methaan vervalft tot CO₂, wordt het weer als onderdeel van de natuurlijke koolstofkringloop beschouwd. Daarom heeft biogene methaan een karakterisatiefactor van 20 CO₂-equivalenten. Dit verschil tussen biogene en fossiele stromen is relevant in de berekeningen van milieueffecten van biobased brandstoffen; in deze studie zijn dat HVO en Bio-LNG.

Deze milieueffecten kunnen op basis van weefactoren omgezet worden in MKI's. Deze weging is uitgevoerd conform de door de SBK Bepalingsmethode voorgeschreven weefactoren. De geanalyseerde milieueffecten en gehanteerde weefactoren zijn getoond in Tabel 1 en Tabel 2.

Tabel 1 Milieueffectcategorieën, afkortingen en eenheden zoals voorgeschreven door de SBK Bepalingsmethode.

Milieueffectcategorie	Afkorting	Eenheid	Weefactor (MKI/kg equivalent)
Uitputting van abiotische grondstoffen, excl. fossiele energiedragers	ADP-elementen	kg antimoon	0,16
Uitputting van fossiele energiedragers	ADP-brandstof	kg antimoon	0,16
Klimaatverandering	GWP-100j	kg CO ₂	0,05
Ozonlaagaantasting	ODP	kg CFC 11	30
Fotochemische oxidantvorming	POCP	kg etheen	2
Verzuring	EP	kg SO ₂	4
Vermesting	AP	kg (PO ₄) ³⁻	9
Humaan-toxicologische effecten	HTP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,09
Ecotoxicologische effecten, aquatisch (zoetwater)	FAETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,03
Ecotoxicologische effecten, aquatisch (zeewater)	MAETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,0001
Ecotoxicologische effecten, terrestrisch	TETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,06

Tabel 2 Andere milieueffecten, afkortingen en eenheden zoals voorgeschreven door de SBK Bepalingsmethode.

Andere milieu-informatie	Afkorting	Eenheid
Totaal hernieuwbare energie	CED _{renew}	MJ
Totaal niet-hernieuwbare energie	CED _{non-renew}	MJ
Totaal energie	CED _{total}	MJ
Netto gebruik van zoet water	WD	m ³
Niet-gevaarlijk afval	NGA	kg
Gevaarlijk afval	GA	kg

1.5 Allocatie

De voorschriften van de SBK Bepalingsmethode en de NEN-EN 15804:2012 + A1(2013) voor allocatie bij multi-input of multi-output processen zijn gevolgd in deze studie. Er is getracht in zoveel mogelijk allocatie te vermijden. In alle berekeningen waar allocatie nodig was (zie paragraaf 2.6 voor de procesgegevens), is de exacte procedure toegelicht.

1.6 Uitvoering en begeleiding

De uitgangspunten voor de berekening zijn opgesteld in nauwe samenwerking met RWS, de LCA toetser en de branchevereniging van Waterbouwers (VvW). De LCA's zijn opgesteld door LCA-experts van TNO, met medewerking van technologische experts van TNO.

- Jan Hulskotte heeft meerdere onderzoeken uitgevoerd naar de emissies van onder andere schepen levert voor deze categorie emissiegegevens aan de nationale emissieregistratie. In deze studie heeft hij de emissieprofielen opgesteld.
- René van Gijlswijk is consultant duurzame mobiliteit met ervaring in LCA van brandstofketens. In deze studie heeft hij de brandstofproductieroutes opgesteld.
- Suzanne de Vos-Effting, Elisabeth Keijzer, Stijn Dellaert en Arjan van Horssen zijn LCA-experts met jarenlange ervaring in het onderzoeken en opstellen van milieuprofielen. Voor deze studie hebben zij gebruik gemaakt van LCA-softwareprogramma SimaPro 7.3.

1.7 Opzet van de rapportage

De onderhavige rapportage is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 1 zijn de aanleiding, het doel en de rekenprocedures uitgelegd. Hoofdstuk 2 zet het onderwerp van deze studie uiteen, beginnende bij een globale beschrijving van de brandstoffen (2.1), gevolgd door de rekeneenheid (2.2) en de reikwijdte van de studie (2.4). Daarna worden de levenscyclus en de systeemgrenzen weergegeven (2.5), gevolgd door de lijst met aannames en input-/outputgegevens van deze studie (2.6) per levenscyclusfase.

Hoofdstuk 3 geeft de resultaten van deze studie weer, met eerst de MKI's voor de gehele levenscyclus (3.1), gevolgd door een uitgebreidere analyse van de MKI's per levensfase. De gevoeligheidsanalyses worden besproken in paragraaf 3.2.

In Appendix I: Milieuprofielen voor SBK zijn de gekarakteriseerde, ongewogen milieuprofielen toegevoegd van alle brandstoffen en in Appendix II: Milieuprofielen in MKI's zijn de gewogen milieuprofielen opgenomen in tabelvorm. In Appendix III: Review statement is het verslag van de reviewer meegenomen.

1.8 Standaarden

Deze rapportage is opgesteld in lijn met de SBK Bepalingsmethode en daarmee dus ook de NEN-EN 15804:012 +A1(2013), afgezien van de afwijkingen zoals toegelicht in deze introductie en in het volgende hoofdstuk.

CEN standard EN 15804 serves as the core PCR ^a
!Independent verification of the declaration and data", according to EN ISO 14025:2010 <input type="checkbox"/> internal x external
(Where appropriate b) Third party verifier: Harry van Ewijk (IVAM)
^a Product category rules ^b Optional for business-to-business communication; mandatory for business-to-consumer communication (see EN ISO 14025:2010, 9.4).

2 Onderwerp van de studie

2.1 (Scheeps)brandstoffen

HFO

Heavy Fuel Oil (HFO) is traditioneel de meest gebruikte brandstof voor zeescheepvaart. HFO is een aardolieproduct waarvan de specificaties beschreven zijn in ISO norm 8217. De Lower Heating Value (LHV) bedraagt 41 MJ/ kg. Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van HFO dat in de buurt van het bunkerpunt wordt geproduceerd. Sinds het instellen van de SO_x Emission Control Areas (SECA's), waarvan de Noordzee er een is, geldt een zwavellimiet voor gebruikte brandstoffen van 0,1% m/m. Het zwavelgehalte van HFO is vele malen hoger. Voor het milieuprofiel wordt daarom uitgegaan van het gebruik van een scrubber.

MDO

Marine Diesel Oil (MDO) is een mengsel van meest gasolie en een kleine hoeveelheid HFO dat wordt gebruikt in zeeschepen (met name voor de kortere afstanden). De ISO norm 8217 beschrijft de specificaties van MDO. De Lower Heating Value (LHV) bedraagt 42 MJ/ kg. Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van MDO met een laag zwavelgehalte van 0,1%. MDO met een hoger zwavelgehalte mag sinds het instellen van de SECA's niet gebruikt worden zonder scrubber. De productie van MDO vindt plaats in de buurt van het bunkerpunt.

GTL

Gas-To-Liquid (GTL) is een synthetische diesel die wordt geproduceerd uit aardgas. Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van GTL dat betrokken wordt van de grootste GTL-productiefaciliteit ter wereld, die door Shell gerund wordt in Qatar. Voor GTL productie wordt aardgas in een steam reforming proces eerst omgezet in syngas (een mengsel van koolstofmonoxide en waterstof), waarna er via het Fischer-Tropsch-proces een dieselachtige brandstof van gemaakt wordt. GTL wordt per olietanker vervoerd naar Rotterdam. Door de zuivere vorm van GTL zijn de emissies van luchtverontreinigende stoffen bij gebruik lager dan bij conventionele scheepsbrandstoffen. Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op GTL met een energie-inhoud (LHV) van 43 MJ/kg.

HVO

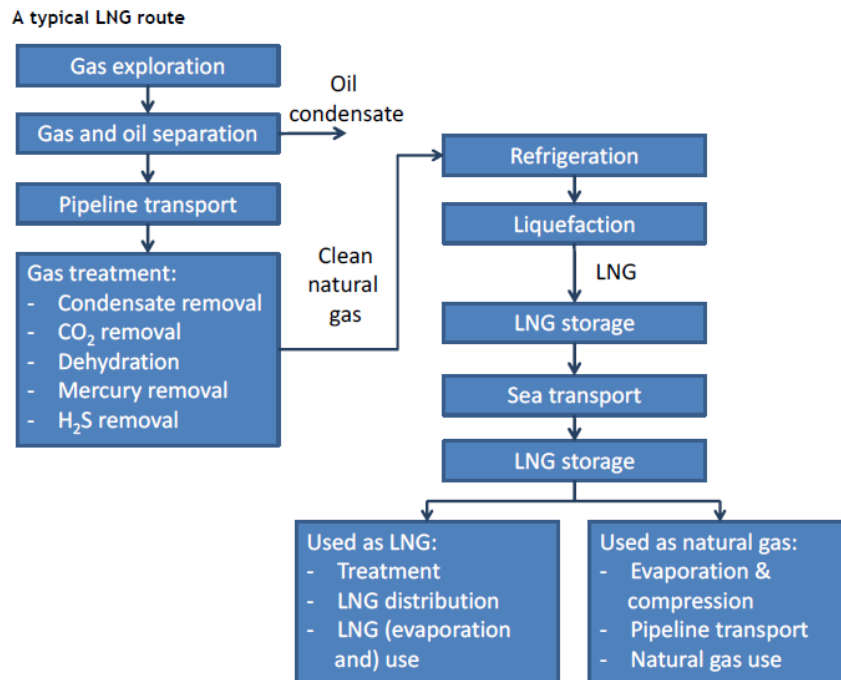
Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) wordt geproduceerd door plantaardige of dierlijke oliën en vetten met waterstof te behandelen. Er is een grote verscheidenheid aan grondstoffen die ingezet kunnen worden om HVO te produceren, met als resultaat dat er ook een grote variatie te verwachten is in het milieuprofiel van HVO. Het milieuprofiel wordt opgesteld voor HVO dat wordt geproduceerd met 50% dierlijke vetten en 50% afgewerkt frituurvet, waardoor een tweede generatie biobrandstof wordt verkregen. Tevens gaan we ervan uit dat de voorbereiding van de dierlijke vetten en de uiteindelijk productie van HVO in Nederland plaatsvinden. Op dit moment heeft Neste Oil een HVO-productie-installatie in Nederland. Hoewel deze HVO geen volledig tweede generatie biobrandstof betreft, wordt hier aangenomen dat, indien gewenst, het wel mogelijk is een volledig tweede generatie biobrandstof te produceren. Aangezien HVO een biobrandstof is, gelden de CO₂-, CO- en methaanemissies uit verbranding als biogeen (zie paragraaf 1.4 voor de betekenis hiervan).

Hierbij moet opgemerkt worden dat dit een aanname is over de toekomstige situatie; de huidige stand van zaken is dat het merendeel van de tweede generatie HVO geïmporteerd wordt uit Singapore. Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op HVO met een energie-inhoud (LHV) van 44 MJ/kg.

LNG

Liquefied Natural Gas (LNG) wordt geproduceerd door aardgas af te koelen en condenseren bij een temperatuur van circa $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Het vloeibare aardgas heeft een volume dat ongeveer 550 maal kleiner is dan in gasvormige toestand. Er is nog geen ISO standaard waarin de specificaties van LNG zijn vastgelegd. Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op LNG met een energie-inhoud (LHV) van 49 MJ/kg.

Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van aardgaswinning en LNG-productie in Qatar, dat de grootste LNG-producent ter wereld is met een marktaandeel van 25%. De LNG wordt vervolgens per (LNG-)tanker vervoerd naar Rotterdam. Het LNG-productieproces wordt schematisch weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 LNG-productieproces (Verbeek, et al., 2013).

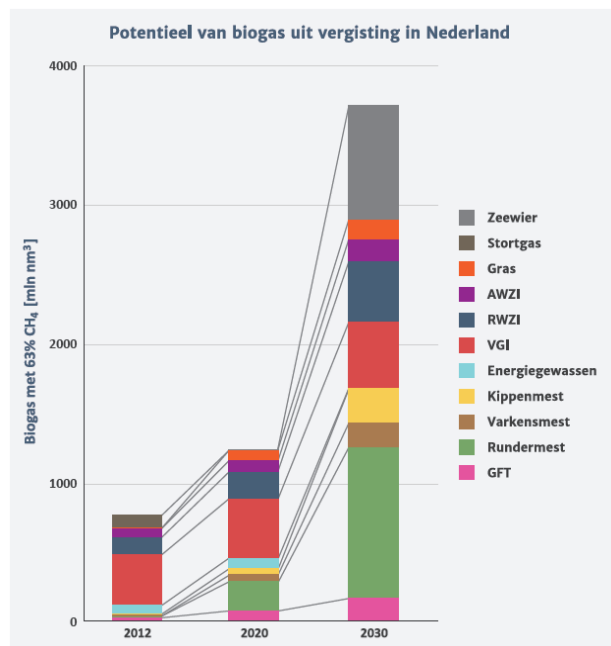
LNG kan worden toegepast in twee type motoren: spark ignition (lean burn) en dual fuel motoren. Het milieuprofiel is opgesteld voor een dual fuel systeem, omdat de verwachting is dat dit systeem aantrekkelijker is in de transitie naar LNG. Retrofit dual fuel is namelijk ook mogelijk op bestaande motoren, en het blijft mogelijk om desgewenst op MGO te varen. Door onvolledige verbranding in de motor vindt bij gebruik van aardgas in (scheeps-)motoren in meer of mindere mate methaanslip plaats. Door de sterke broeikaswerking van methaan is dit methaanslip een belangrijke factor voor de milieu-impact van LNG-motoren.

Bio-LNG

Bio-LNG is vloeibaar aardgas (Liquid Natural Gas) dat geproduceerd wordt uit biomassastromen.

Deze biomassastromen kunnen energiegewassen zijn (eerste generatie) of reststromen (tweede generatie). In het buitenland worden voornamelijk energiegewassen gebruikt (maïs), maar in Nederland nauwelijks. RWS heeft het voornemen om bij duurzaam inkopen als aanvullende eis te stellen dat alleen tweede generatie biobrandstoffen mogen worden ingezet.

We beperken ons tot Bio-LNG op basis van de drie voornaamste bronnen in het scenario voor Nederlands biogas in de nabije toekomst (2020): voedselresten, RWZI-slib en mest (zie Figuur 6). Later zal houtvergassing een milieuvriendelijker optie worden, maar vergassingstechnologie voor biomassa op deze schaal bevindt zich mondiaal nog in de ontwikkelingsfase.



Figuur 6 Potentiële vergistbare grondstoffen, 2012 – 2020 – 2030 (De Gemeynnt, ECN, Groen Gas Nederland, RVO, 2014).

Het biogas bevat ca. 55-50% methaan en dient ontdaan te worden van CO₂, H₂O en sporen van andere stoffen; het gas wordt op dezelfde (calorische) kwaliteit gebracht) als conventioneel LNG. De emissie van de afgescheiden gassen wordt toegekend aan het product. Het gas wordt vloeibaar gemaakt en getransporteerd naar de haven per vrachtwagen, niet via het conventionele aardgasnet. Door de beperkte schaal wordt voor liquefactie een energiegebruik gerekend dat 70% hoger ligt dan bij LNG (Steinigeweg & Meyer, 2015).

Voor de emissies wordt aangenomen dat deze identiek zijn aan die van conventionele LNG, met uitzondering van de koolstofemissies: CO₂ en CH₄ emissies worden aangemerkt als biogene emissies (zie paragraaf 1.4 voor de betekenis hiervan). Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op bio-LNG met een energie-inhoud (LHV) van 49 MJ/kg.

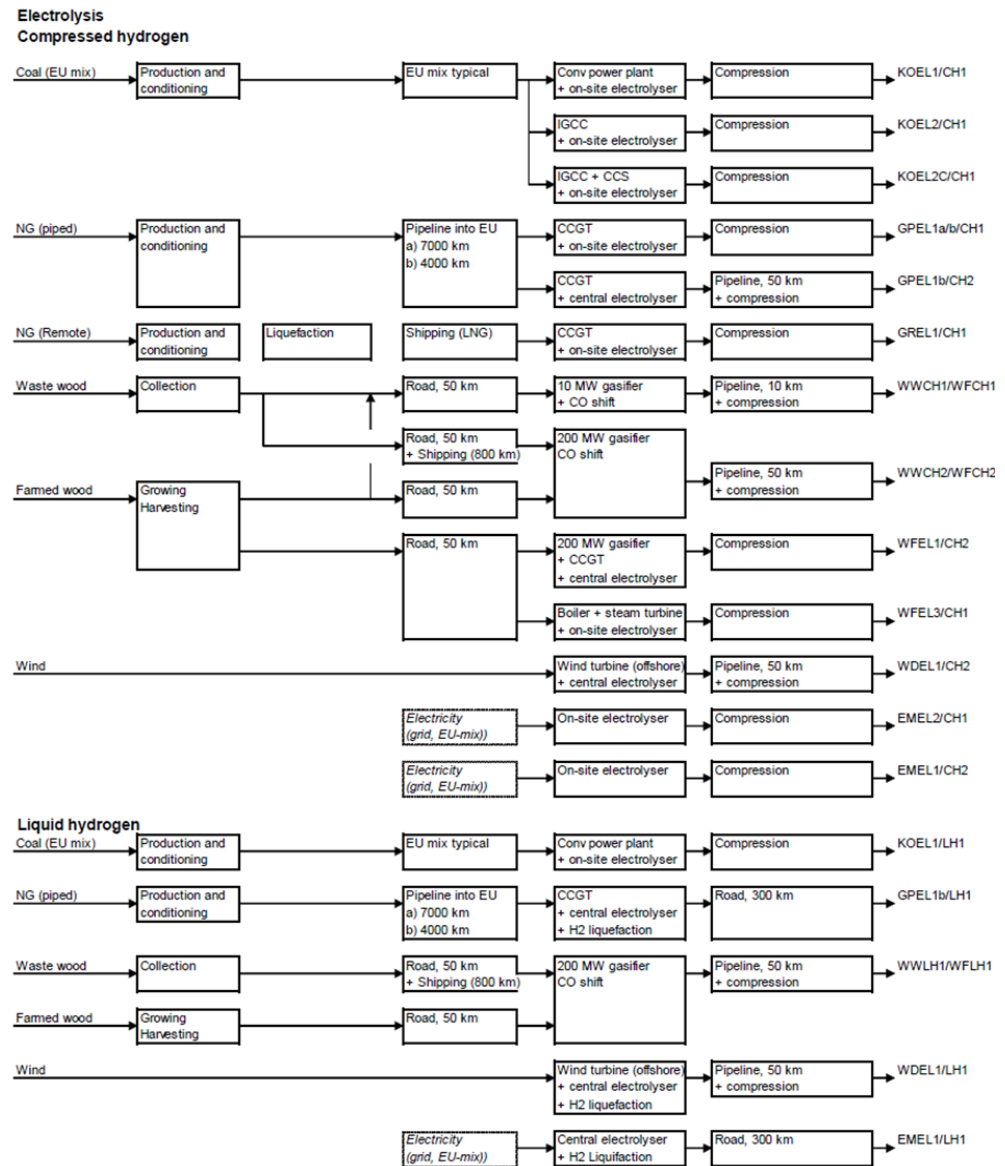
Waterstof

De transitie naar waterstof moet nog op gang komen. Waterstof kan worden geproduceerd via elektrolyse of via een thermisch proces. Er zijn veel mogelijkheden (zie Figuur 7) en de milieu-impacts van de verschillende voorkeuren verschilt sterk.

Op dit moment wordt waterstof vrijwel uitsluitend geproduceerd voor industriële toepassingen, door middel van steam reforming van aardgas. Voor schepen zijn nog geen waterstofvulstations bekend. Voor wegtransport zijn op dit moment vier stations aanwezig in Nederland. In Rhooon is een station dat op de waterstofpijplijn van Air Liquide naar Noord-Frankrijk is aangesloten. In Arnhem komt de waterstof uit een kleine, lokale reformer. De andere twee stations in Amsterdam en Helmond produceren lokaal waterstof door middel van elektrolyse met groene stroom. Er is op dit moment een Green Deal Waterstof in de maak, waarin wordt afgesproken om 20 openbare waterstof-tankstations voor wegtransport aan te leggen voor het jaar 2020. Gezien de gewenste verspreiding over Nederland zullen deze niet allemaal op een waterstofpijpleiding worden aangesloten. Waterstof wordt ook vaak genoemd als element voor de transitie naar duurzame elektriciteit bij het opvangen van overcapaciteit (meer opwekking dan vraag).

Samenvattend: elektrolyse of lokale steam reforming lijken de waarschijnlijkste oplossingen, ook al omdat transport van waterstof per vrachtwagen in termen van kosten per kilogram weinig aantrekkelijk is. Voor het gebruik van waterstof in de zeescheepvaart ligt het voor de hand om dit te betrekken van de productiefaciliteit in het Rotterdamse havengebied. Voor ander gebruik is het waarschijnlijk dat de productie van het waterstof plaatsvindt op of nabij een tankstation.

Voor gebruik is het aannemelijk dat waterstof op druk gebracht moet worden met een compressor tot 350 bar of 700 bar, dat wil zeggen de standaarden voor zware voertuigen respectievelijk personenauto's. Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op waterstof met een energie-inhoud (LHV) van 120 MJ/kg.



Figuur 7 Illustratie van mogelijke productieroutes van waterstof (JRC, 2014).

2.2 Rekeneenheid

Deze rapportage beschrijft de milieu-impact van (scheeps)brandstoffen *per ton* brandstof. De milieuprofielen voor scheepsbrandstoffen zijn berekend voor toepassing *in baggerschepen*, waarbij infrastructuur (kapitaalgoederen) en additionele hulpstoffen toegerekend zijn aan de brandstof.

De gebruikers van de milieuprofielen kunnen op basis van de hoeveelheid brandstof voor een GWW werk de project specifieke milieulast berekenen. Omdat de hoeveelheid brandstof in tonnen (mede) afhangt van de calorische waarde van de brandstof, wordt bij alle brandstoffen vermeld wat de calorische waarde is.

2.3 Databronnen

De informatie die gebruikt is om deze milieu-impact te bepalen is voornamelijk gebaseerd op:

- Milieudatabase ecoinvent v 2.2 (Frischknecht, et al., 2007);
- JRC-studie “Well-to-wheels analysis of future automotive fuels”, versie 4a (JRC, 2014);
- Analyses van brandstofketens door TNO en CE Delft (Verbeek, et al., 2013);
- LNG fact analysis (Verbeek & Verbeek, 2015);
- Documenten bij Duurzame brandstofvisie (zie o.a. (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014));
- Factsheets brandstoffen wegverkeer (Verbeek, Zyl, Grinsven, & Essen, 2014).
- Openbare bronnen van emissiefactoren, waaraan het EMS-rapport ten grondslag ligt (Klein J. , et al., 2015) plus de bijbehorende tabellen⁴;
- Rapporten van emissieregistratie en monitoring scheepvaart (Hulskotte, Bolt, & Broekhuizen, 2003).

Een volledige lijst van alle referenties en gebruikte bronnen is te vinden achter in deze rapportage.

2.4 Reikwijdte

Vooraf is vastgesteld welke reikwijdte deze studie beslaat. Hierin spelen geografische, temporele, technische en andere aspecten een rol.

Geografie

De resultaten in deze studie geven een beeld van de milieu-impacts van scheepsbrandstoffen zoals gebruikt in Nederland in de buurt van zeehavens of op de Noordzee. Het milieuprofiel voor waterstof is berekend voor een algemene toepassing in Nederland. Voor iedere onderzochte brandstof is het meest waarschijnlijke productieprofiel vastgesteld voor brandstoffen zoals aangeboden op de Nederlandse markt. Dit betekent in sommige gevallen ook dat de desbetreffende brandstof is geproduceerd in Nederland, maar dit hoeft niet altijd zo te zijn. Waterstof kan bijvoorbeeld eenvoudig in Nederland geproduceerd worden, maar grootschalige aardoliewinning en –raffinage vindt niet in Nederland plaats. Gebruik van deze gegevens voor scheepsbrandstoffen (baggerschepen) in andere landen en andere toepassingen wordt afgeraden, omdat de representativiteit niet geborgd kan worden. Bij toepassing in andere motoren met andere belastingen ontstaan andere emissies. Bovendien geldt voor sommige brandstoffen dat er een grote spreiding is het milieuprofiel is door de grote variatie in herkomst/ productie van de brandstoffen.

Tijd en technologie

Deze studie analyseert een aantal brandstoffen die reeds gebruikt worden of op korte termijn (enkele jaren) verwacht worden in gebruik te zijn. RWS heeft de keuze van de brandstoffen in deze rapportage gebaseerd op de brandstofvisie (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014).

⁴ “Meth-Verkeer-tabellen-2016ENG_nieuwe stijl_v4.xlsx”, januari 2016.

Voor de meeste processen in de brandstofketen (zoals bijvoorbeeld elektriciteitsverbruik en oliewinning) is de huidige stand van zaken als richtlijn genomen. Wanneer het nodig was om in de berekeningen een richtjaar te kiezen omdat de productie nog niet volledig marktrijp is, bijvoorbeeld wat betreft verschillende biobronnen voor LNG-productie, zijn de voorspellingen voor het jaar 2020 gevolgd. Deze temporele en technologische afbakening betekent dat deze data geschikt is om berekeningen te doen voor de huidige situatie en de komende tien jaar; na circa 2025 kan de markt en de technologie sterk veranderd zijn en zijn de milieuberekeningen wellicht achterhaald. Deze data zijn dus niet geschikt om bijvoorbeeld toekomstvoorspellingen te doen over milieueffecten van brandstofgebruik in de gehele 21^e eeuw.

Datakwaliteit, compleetheid en consistentie

De focus in dit project ligt bij de brandstoffen. Ondersteunende processen en materialen, zoals de schepen, smeerolie, havens en machines, zijn niet in detail geanalyseerd maar enkel op hoofdlijnen geanalyseerd en gekwantificeerd. In paragrafen 2.6 is uitgebreid toegelicht welke processen wel en niet zijn meegenomen.

Er is gestreefd om zoveel mogelijk voorgronddata (zoals emissiekentallen) uit een klein aantal literatuurbronnen van hoge kwaliteit te halen, dat wil zeggen bronnen die internationaal bekend en geaccepteerd zijn. Waar nodig zijn primaire databronnen aangevuld met informatie uit andere bronnen, bijvoorbeeld wanneer de primaire bron niet volledig was. Dit is zoveel mogelijk vermeden om inconsistenties in de modellering of aanpak te voorkomen.

Voor de achtergronddata, zoals het modelleren van schepen en havens, zijn meer algemene en openbare bronnen zoals productsheets van producenten gebruikt indien geen betere bronnen beschikbaar waren.

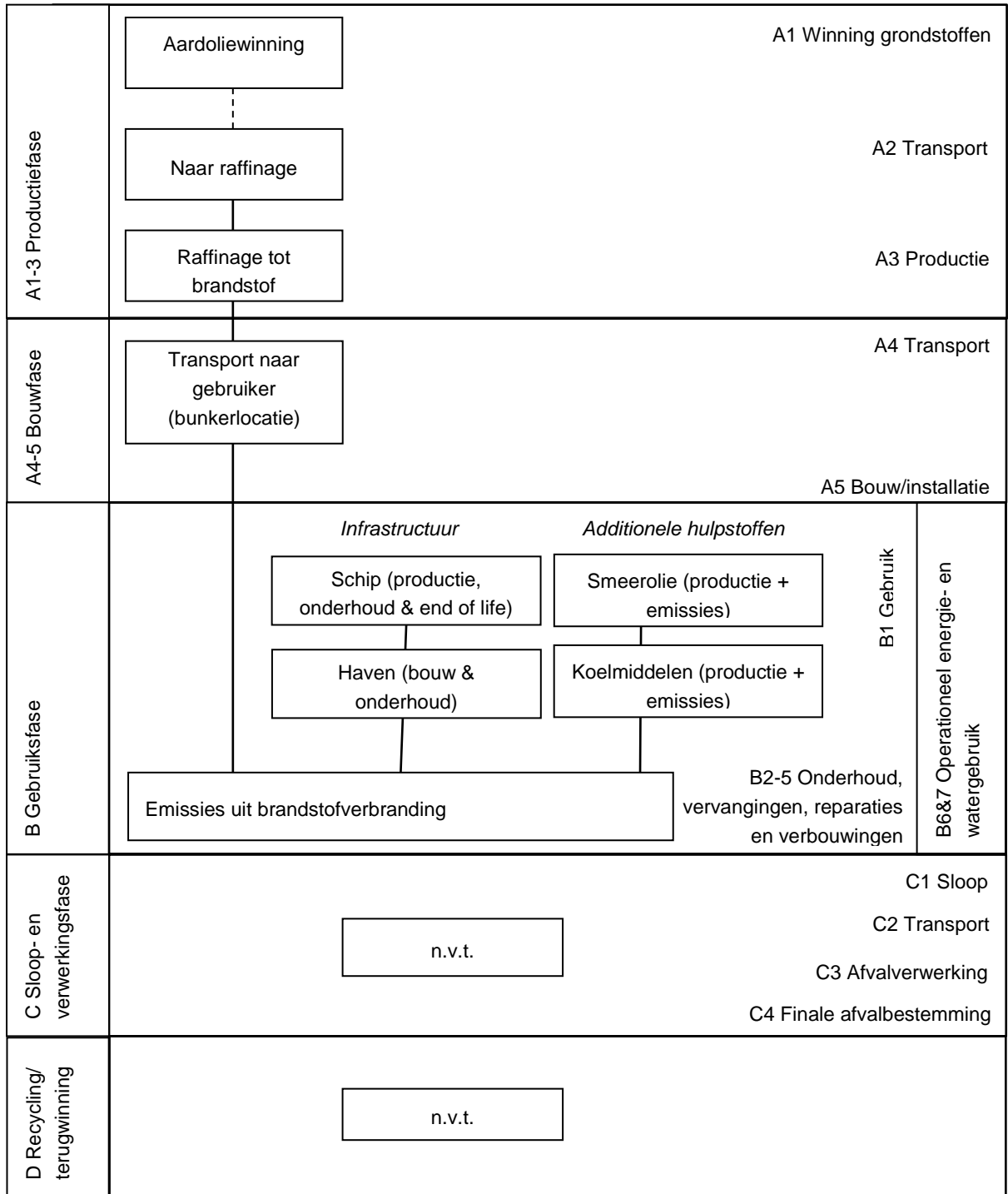
2.5 Levenscyclus en systeemgrenzen

De SBK Bepalingsmethode schrijft voor om de levenscyclusfasen te benaderen volgens de door de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013) beschreven indeling. Deze indeling is weergegeven in Figuur 8, met daarin de keten van het te analyseren product. De volgende levenscyclusfasen worden door de SBK Bepalingsmethode genoemd:

- A1-3: productiefase, inclusief:
 - A1: winning en verwerking grondstoffen, verwerking secundaire materiaal input (product van recycling processen)
 - A2: transport naar de producent
 - A3: productie
- A4-5: bouwfase, inclusief:
 - A4: transport naar de bouwlocatie
 - A5: installatie van het product in het beoogde object
- B: gebruiksfase, inclusief:
 - B1: gebruik van het geïnstalleerde product
 - B2: onderhoud van het geïnstalleerde product
 - B3: reparatie aan het geïnstalleerde product
 - B4: vervanging van het geïnstalleerde product
 - B5: renovatie van het geïnstalleerde product
- C: sloop- en verwerkingsfase (end of life), inclusief:
 - C1: sloop, de-installatie
 - C2: transport naar afvalverwerking

- C3: Afvalverwerking voor hergebruik, terugwinning en/of recycling
- C4: afdanking/ finale afvalverwerking
- D: hergebruik, terugwinning en/of recycling potentieel en voordelen/lasten welke buiten het systeem vallen.

Deze bovenstaande classificatie is ter illustratie schematisch weergegeven voor het verbranden van een op aardolie gebaseerde brandstof in baggerschepen in Figuur 8. Vooral de fases A1-A3, A4 en B1 zijn relevant voor de bepaling van de milieueffecten van brandstoffen. De fases B2 tot en met D zijn niet van toepassing voor brandstoffen, omdat de stoffen in fase B1 reeds opbranden. In fase B1 zijn tevens alle infrastructuur zoals schepen en havens en alle additionele materialen zoals smeerolie meegenomen.



Figuur 8 Levensfasen , zoals onderscheiden door de SBK Bepalingsmethode voor een aardolie gebaseerde brandstof gebruikt in baggerschepen.

In de volgende paragrafen worden de gebruikte inputgegevens per brandstof per levensfase beschreven. De additionele processen in de gebruiksfase B die van toepassing zijn op alle scheepsbrandstoffen worden beschreven in paragraaf 2.6.7.

2.6 Input-outputgegevens

2.6.1 HFO

A1-A3 Productiefase

We gaan ervan uit dat de productie van HFO plaatsvindt in (de haven van) Rotterdam. Voor de productie is gekozen voor de ecoinventkaart "Heavy fuel oil, at refinery/RER" die representatief is voor het productieproces in Nederland. De productie is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Productie van 1 ton HFO.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
HFO-productie	Heavy fuel oil, at refinery/RER U	1	ton	

A4 Transport naar gebruiker

Voor de opslag van HFO is de ecoinventkaart "Heavy fuel oil, at regional storage/RER" gebruikt, waarbij de input van HFO is verwijderd zodat geen dubbeltellingen ontstaan bij het combineren van de HFO productiefase en het transport. Tevens is de transportafstand op 0 km gezet omdat productie in Rotterdam plaatsvindt, nabij het bunkerpunt. Verder is aangenomen dat de baggerschepen voor al hun werk op de Noordzee bunkeren in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen. De transportstap is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Transport van 1 ton HFO van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
HFO-opslag	Heavy fuel oil, at regional storage/RER (aangepast)	1	ton	HFO inzet en transport verwijderd uit ecoinventkaart

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van HFO zijn beschreven in Tabel 5 (processen) en Tabel 6 (emissies).

HFO wordt met een boiler verwarmd aan boord van het schip (tussen de tank en de motor). Ongeveer 1% van het HFO gebruik is voor het verwarmen van HFO met een boiler. De emissies worden niet gecorrigeerd voor verbranding in een boiler omdat dit in de marges valt.

Bij het gebruik van HFO ontstaan twee afvalstromen: een "sludge"-stroom uit de scrubber die dient te worden verwerkt als chemisch afval, en een HFO-sludgestroom uit de brandstoftank, die wordt verwerkt en verbrand. De sludgestroom uit de brandstoftank wordt in (Bolt, 2003) geschat op 2% van het brandstofverbruik. Hier gebruiken we een hoeveelheid van 15 kg/ton omdat we aannemen dat de brandstof sinds dat rapport iets schoner is geworden en de hoeveelheid sludge derhalve lager is.

Volgens (den Boer & 't Hoen, 2015) ligt de hoeveelheid sludge uit de scrubber typisch iets lager dan 10% van de hoeveelheid sludge uit de brandstoftank. Voor dit milieuprofiel nemen we 1,1 kg scrubbersludge per ton brandstof aan. Door het hoge zwavelgehalte van HFO wordt voor het milieuprofiel uitgegaan van het gebruik van een scrubber om aan de geldende limieten te kunnen voldoen. Voor het gaswassen gebruikt een scrubber zeewater, dat later weer op het zeewater wordt geloosd inclusief enkele milieuverontreinigende stoffen. Deze emissies naar water zijn weergegeven in Tabel 7.

Tabel 5 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton HFO. Emissies naar lucht en water zijn apart getoond in Tabel 6 en Tabel 7.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,57	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Baggerschip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenfaciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenonderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	p	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	Kg	Zie paragraaf 2.6.7
Behandelde afval en emissies				
Afvalverwerking scrubber sludge	Disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration/CH	1,1	kg	
Afvalverwerking HFO-sludge	Disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration/CH	15	kg	

De emissiefactor voor CO₂ is gebaseerd op het koolstofgehalte vermeld in de derde IMO-broeikasgassenstudie (Smith, et al., 2014).

De emissiefactoren van CO, NMVOS, Methaan, SO₂, N₂O en NH₃ zijn gelijkgesteld aan die van MDO. Hierbij is aangenomen dat de hoeveelheid SO₂ door een scrubber teruggebracht is tot het vereiste niveau van 0,2 kg/ton. De emissie van NO_x is gebaseerd op de NO_x emissiefactor van MDO, waarbij is aangenomen dat, door de aanwezigheid van organische stikstofverbindingen in HFO (0,3 w% N leidt tot 9,86 g NO_x/kg) er een hogere emissiefactor geldt dan voor MDO.

Daarnaast is aangenomen dat de scrubber ongeveer 5% (ruwweg de NO₂-fractie in NO_x) van de NO_x verwijderd. Bij PM₁₀ is uitgegaan van de emissiefactor van stookolie waarbij is aangenomen dat de helft van de PM₁₀ door de scrubber verwijderd zal worden (Klein J. , et al., 2016). Hierdoor is de uiteindelijke emissiefactor van HFO slechts 0,1 g PM₁₀/kg hoger dan van MDO. Voor metaalemissies is uitgegaan van de metingen aan brandstoffen in zeeschepen uitgevoerd door het RIVM (Broekman, Gerlofs-Nijland, & Swart, Metingen van de luchtemissie en de samenstelling van brandstoffen op zeeschepen, 2008) (Mooij, Gerlofs-Nijland, & Swart, 2010) (Broekman, 2007), waarbij een verwijderingspercentage van 50% is aangenomen in verband met het gebruik van een scrubber (evenals bij PM₁₀). Voor de PAK's en koolwaterstoffen zijn de standaardemissiefactoren van de taakgroep Verkeer en Vervoer voor stookolie gebruikt.

Tabel 6 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton HFO met scrubber.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide	3206,0	kg	
Koolstofmonoxide	13,5	kg	
NMVOS	2,1	kg	
NO _x	63,3	kg	
PM ₁₀	1,8	kg	
Zwavel dioxide	2,0	kg	
Methaan	0,1	kg	
Distikstofoxide	0,08	kg	
Ammonia	0,01	kg	
Arseenverb. (als As)	2,23E-04	kg	
Cadmiumverb. (als Cd)	7,05E-06	kg	
Chroomverb. (als Cr)	8,82E-05	kg	
Koperverb. (als Cu)	1,76E-04	kg	
Kwikverb. (als Hg)	1,76E-05	kg	
Loodverb. (als Pb)	5,29E-05	kg	
Nikkelverb. (als Ni)	1,41E-02	kg	
Seleenverb. (als Se)	1,06E-05	kg	
Vanadiumverb. (als V)	3,53E-02	kg	
Zinkverb. (als Zn)	1,76E-04	kg	
Acroleïne	3,36E-02	kg	
Benzeen	4,48E-02	kg	
Etheen	2,69E-01	kg	
Formaldehyde	1,34E-01	kg	
Tolueen	3,27E-02	kg	
Xylenen (Totaal)	4,48E-02	kg	
Fenanthreen	7,93E-04	kg	
Anthraceen	6,07E-05	kg	
Fluorantheen	9,33E-05	kg	
Chryseen	4,20E-05	kg	
Benzo(a)Anthraceen	1,45E-05	kg	
Benzo(a)Pyreen	1,28E-05	kg	

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Benzo(b)Fluorantheen	1,07E-05	kg	
Benzo(k)Fluorantheen	5,37E-06	kg	
Benzo(ghi)Peryleen	4,20E-06	kg	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	2,33E-09	kg	
Naftaleen	5,60E-03	kg	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	2,33E-10	kg	
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

Tabel 7 Emissies naar water bij de verbranding van 1 ton HFO met scrubber.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Arseen	0,237	mg	
Lood	2,763	mg	
Cadmium	0,026	mg	
Koper	34,211	mg	
Kwik	0,013	mg	
Nikkel	5,658	mg	
Vanadium	23,684	mg	
Zink	59,211	mg	
Benzeen	0,263	mg	
Koolwaterstoffen (C10-C35)	43,421	mg	
Naftaleen	0,075	mg	
Benzo(a)pyreen	0,004211	mg	
Benzo(b)fluorantheen	0,000658	mg	
Benzo(k)fluorantheen	0,000658	mg	
Benzo(g,h,i)peryleen	0,002763	mg	
Indeno(1,2,3-cd)pyreen	0,002763	mg	

2.6.2 MDO

A1-A3 Productiefase

We gaan ervan uit dat de productie van MDO plaatsvindt in (de haven van) Rotterdam. Voor de productie is gekozen voor de ecoinventkaart "Light fuel oil, at refinery/RER" die representatief is voor het raffinageproces in Nederland. De raffinage is weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 Productie van 1 ton MDO.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
MDO raffinage	Light fuel oil, at refinery/RER	1	ton	

A4 Transport naar gebruiker

Voor de opslag van MDO is de ecoinventkaart "Light fuel oil, at regional storage/RER" gebruikt, waarbij de input van MDO is verwijderd zodat geen dubbelstellingen ontstaan bij het combineren van de MDO-productiefase en -transportfase. Tevens is de transportafstand op 0 km gezet omdat raffinage in Rotterdam plaatsvindt.

Verder is aangenomen dat de baggerschepen voor al hun werk op de Noordzee bunkeren in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen. Het proces voor fase A4 wordt weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9 Transport van 1 ton MDO van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Opslag MDO	Light fuel oil, at regional storage/RER (aangepast)	1	ton	MDO-inzet en -transport verwijderd uit ecoinventkaart

B1 Gebruiksfase

Om te voldoen aan de geldende zwavellimiet wordt voor het milieuprofiel uitgegaan van MDO met een laag zwavelgehalte van 0,1%. De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van MDO, zijn beschreven in Tabel 10 (processen) en Tabel 11 (emissies).

Tabel 10 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton MDO. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 11.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,06	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Baggerschip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenfaciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenonderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	p	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	Kg	Zie paragraaf 2.6.7

De emissiefactor voor CO₂ is gebaseerd op het koolstofgehalte vermeld in de derde IMO-broeikasgassenstudie (Smith, et al., 2014).

De emissiefactoren voor CO, NMVOS en NO_x, PM₁₀ en SO₂, N₂O en NH₃ zijn gebaseerd op het gemiddelde van de emissiefactoren voor “diesel fuel” die zijn vastgesteld door de taakgroep Verkeer en Vervoer van de landelijke emissieregistratie (Klein J. , et al., 2016). Schepen die gebruik maken van diesel zijn meestal uitgerust met “medium-speed” dieselmotoren. Dit type motoren wordt ook het meest gebruik door baggerschepen.

De emissiefactoren zijn gebaseerd op een mix van motoren van verschillende ouderdom (IMO Tier 1 en ouder, en IMO Tier 2) en bevatten zowel de emissies van de hoofmotoren als van de hulpmotoren. Hierdoor kunnen de emissiefactoren worden beschouwd als een goed gebalanceerd gemiddelde voor “medium-speed” motoren. Methaanemissies worden door de taakgroep Verkeer en Vervoer geschat op 4% van de totale VOS emissies. Voor metaalemisies is uitgegaan van de metingen aan brandstoffen in zeeschepen uitgevoerd door het RIVM (Broekman, Gerlofs-Nijland, & Swart, 2008) (Mooij, Gerlofs-Nijland, & Swart, 2010) (Broekman, 2007). Voor de overige stoffen (PAK's en koolwaterstoffen) zijn de standaardemissiefactoren voor diesel van de taakgroep Verkeer en Vervoer gebruikt.

Tabel 11 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton MDO.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide	3114,0	kg	
Koolstofmonoxide	13,5	kg	
NMVOS	2,1	kg	
NO _x	56,8	kg	
PM ₁₀	1,7	kg	
Zwavel dioxide	2,0	kg	
Methaan	0,1	kg	
Distikstofoxide	0,08	kg	
Ammonia	0,01	kg	
Arseenverb. (als As)	1,80E-04	kg	
Cadmiumverb. (als Cd)	2,10E-03	kg	
Chroomverb. (als Cr)	2,74E-03	kg	
Koperverb. (als Cu)	7,30E-04	kg	
Loodverb. (als Pb)	3,70E-04	kg	
Nikkelverb. (als Ni)	5,30E-04	kg	
Vanadiumverb. (als V)	2,38E-03	kg	
Zinkverb. (als Zn)	2,45E-04	kg	
Acroleïne	3,11E-02	kg	
Benzeen	4,15E-02	kg	
Etheen	2,49E-01	kg	
Formaldehyde	1,24E-01	kg	
Tolueen	3,02E-02	kg	
Xylenen (Totaal)	4,15E-02	kg	
Fenanthreen	7,34E-04	kg	
Anthraceen	5,61E-05	kg	

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Fluorantheen	8,64E-05	kg	
Chryseen	3,89E-05	kg	
Benzo(a)Anthraceen	1,34E-05	kg	
Benzo(a)Pyreen	1,19E-05	kg	
Benzo(b)Fluorantheen	9,93E-06	kg	
Benzo(k)Fluorantheen	4,97E-06	kg	
Benzo(ghi)Peryleen	3,89E-06	kg	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	2,16E-09	kg	
Naftaleen	5,18E-03	kg	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	2,16E-10	kg	
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

2.6.3 GTL

A1-A3 Productiefase

De productie van GTL is gemodelleerd naar de GTL-productie-installatie van Shell in Qatar zoals beschreven in (JRC, 2014). Bij GTL-productie wordt aardgas gebruikt als feedstock en tevens om het proces van energie te voorzien. Aardgaswinning in Qatar zit niet in de database van ecoinvent. De beschikbare kaarten voor onshoregasproductie zijn voor Nederland, Rusland, Duitsland en Algerije. Omdat we aannemen dat het productie in Algerije het meeste lijkt op het productieproces in Qatar is hier de proceskaart "Natural gas, at production onshore/DZ" (Algerije) gebruikt. Tevens is de proceskaart "Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER" aangepast zodat aardgas uit Algerije wordt gebruikt. Aangenomen wordt, dat de benodigde elektriciteit lokaal wordt opgewekt met aardgas. Het gehele proces wordt weergegeven in Tabel 12.

Het energieverbruik van dit gemodelleerde proces ligt zeer dicht bij de resultaten van (JRC, 2014) en de broeikasgasemissies liggen in de buurt van schattingen uit de literatuur (Marano & Ciferno, 2001).

Tabel 12 Productie van 1 ton GTL.

Proces-stap	Ecoinvent-kaart	Hoeveel-heid	Een-heid	Bron/ Toelichting
Aardgas feedstock	Natural gas, at production onshore/DZ	1100	m ³	Gebaseerd op energie-inhoud van 43 MJ/kg voor GTL en 39,1 MJ/m ³ voor aardgas uit Algerije.
Infrastructuur	Chemical plant, organics/RER/I	0,0000000 004	p	Gebaseerd op ecoinventproces "Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/RER"
Elektriciteitsverbruik GTL depot	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE	36,12	MJ	(JRC, 2014)
Warmte voor proces	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/DZ	23154	MJ	Van de totale aardgasinzet wordt 65% gebruikt als feedstock en 35% voor de opwekking van proceswarmte (JRC, 2014)

A4 Transport naar gebruiker

GTL wordt per olietanker van Qatar naar Rotterdam getransporteerd. Via het Suezkanaal is dit een afstand van ongeveer 11 800 km.

Voor dit transport is in een bestaande ecoinventproceskaart ("Transport, transoceanic tanker/OCE") het energieverbruik verhoogd zodat het energieverbruik per tonkilometer overeenkomt met de resultaten uit (JRC, 2014). Voor zowel de opslag aan boord de olietanker en de opslag van GTL aan land rekent JRC een elektriciteitsverbruik van 36,12 MJ/ton GTL, opgewekt met een Europese medium voltage elektriciteitsmix. Deze inputs zijn meegenomen in deze processtap, gebruik makend van een Nederlandse medium voltage elektriciteitsmix. Verder is aangenomen dat de baggerschepen voor al hun werk bunkeren in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen. Het A4 transportproces wordt weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 Transport van 1 ton GTL van de productielocatie naar de gebruiker.

Proces-stap	Ecoinventkaart	Hoeveel-heid	Een-heid	Bron/ Toelichting
GTL-transport van Qatar naar haven Rotterdam	Transport, transoceanic tanker/OCE (aangepast)	11800	tkm	Energieverbruik ecoinventkaart met factor 1,4 verhoogd, zie boven
GTL-opslag op schip	Electricity, medium voltage, at grid/NL	36,12	MJ	(JRC, 2014)
GTL-opslag aan land	Electricity, medium voltage, at grid/NL	36,12	MJ	(JRC, 2014)

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van GTL, zijn beschreven in Tabel 14 (processen) en Tabel 15 (emissies).

Tabel 14 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton GTL. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 15.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,16	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Baggerschip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Haven-faciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Haven-onderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	p	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	Kg	Zie paragraaf 2.6.7

De emissiefactor van CO₂ is gebaseerd op het koolstofpercentage vermeld in (Verbeek, 2014). De overige emissiefactoren zijn gelijk verondersteld aan die van HVO. Dit is in lijn met de uitkomsten die in (Verbeek, 2014) staan vermeld.

Tabel 15 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton GTL.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide	3124	kg	(Verbeek, 2014)
Koolstofmonoxide	11,5	kg	Zelfde als HVO
NMVOS	1,7	kg	Zelfde als HVO
NO _x	51,1	kg	Zelfde als HVO
PM ₁₀	1,3	kg	Zelfde als HVO
Zwavel dioxide	0,2	kg	Zelfde als HVO
Methaan	0,07	kg	Zelfde als HVO
Distikstofoxide	0,08	kg	Zelfde als HVO
Ammonia	0,01	kg	Zelfde als HVO
Acroleïne	0,024874	kg	Zelfde als HVO
Benzeen	0,033166	kg	Zelfde als HVO
Etheen	0,198995	kg	Zelfde als HVO
Formaldehyde	0,099497	kg	Zelfde als HVO
Tolueen	0,024183	kg	Zelfde als HVO
Xylenen (Totaal)	0,033166	kg	Zelfde als HVO
Fenanthreen	0,000587	kg	Zelfde als HVO
Anthraceen	0,000045	kg	Zelfde als HVO
Fluoranthreen	0,000069	kg	Zelfde als HVO
Chryseen	0,000031	kg	Zelfde als HVO
Benzo(a)Anthraceen	0,000011	kg	Zelfde als HVO
Benzo(a)Pyreen	0,000010	kg	Zelfde als HVO

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Benzo(b)Fluorantheen	0,000008	kg	Zelfde als HVO
Benzo(k)Fluorantheen	0,000004	kg	Zelfde als HVO
Benzo(ghi)Peryleen	0,000003	kg	Zelfde als HVO
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	1,73E-09	kg	Zelfde als HVO
Naftaleen	0,004146	kg	Zelfde als HVO
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	1,73E-10	kg	Zelfde als HVO
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

2.6.4 HVO

A1-A3 Productiefase

Voor de productie van HVO wordt uitgegaan van een mix van 50% dierlijke vetten en 50% afgewerkt frituurvet. Dierlijke afvalproducten dienen eerst verwerkt te worden tot dierlijke vetten in een zogenaamd "rendering"-proces voordat deze gebruikt kunnen worden in HVO productie. De data voor dit proces en het HVO-productieproces zijn gehaald uit (Nikander, 2008). Een deel van de warmte voor het proces wordt weer doorgeleverd aan een warmtenetwerk. Om de energie-inhoud van de dierlijke producten mee te nemen, wordt de ecoinventkaart "Biomass, feedstock" gebruikt. Transport van de verwerkte dierlijke vetten naar de HVO-productiefaciliteit is meegenomen met de door SBK voorgeschreven forfaitaire afstand van 150 km voor niet-bulkgoederentransport binnen Nederland. Het renderingproces wordt weergegeven in Tabel 16.

Tabel 16 Verwerking van dierlijk afval tot 1 ton dierlijke vetten.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Water voor proces en koeling	Water, process and cooling, unspecified natural origin	4,14	m ³	
Dierlijke vetten	Biomass, feedstock	37455	MJ	1000 kg * 37,455 MJ/kg
Warmte voor proces	Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER	10950	MJ	
Transport naar HVO-fabriek	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER	150	tkm	Binnenlands transport van 150 km
Uitgespaarde producten				
Proceswarmte naar netwerk	Heat, natural gas, at boiler modulating >100kW/RER	3580	MJ	
Behandelde afval en emissies				
Afvalwater	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH	7,33	m ³	

De verwerkte dierlijke vetten vormen een deel van de input voor het HVO-productieproces zoals weergegeven in Tabel 17.

Tabel 17 Productie van 1 ton HVO.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Water voor proces en koeling	Water, process and cooling, unspecified natural origin	0,029	m ³	
Input dierlijke vetten	A0 Pre-processed (rendered) animal fats	591	kg	Proces beschreven in Tabel 16
Input frituurvet	Vegetable oil, from waste cooking oil, at plant/CH	600	kg	
Input waterstof	Hydrogen, liquid, at plant/RER	42	kg	
Elektriciteit voor proces	Electricity, medium voltage, at grid/NL	107	MJ	
Benzine voor proces	Petrol, low-sulphur, at refinery/RER	25	kg	
Stoom voor proces	Steam, for chemical processes, at plant/RER	9	kg	
Uitgespaarde producten				
Procesoutput	Propane/ butane, at refinery/RER	72	kg	
Procesemissies				
Emissie naar lucht	Carbon dioxide, biogenic	48	kg	
Behandelde afval en emissies				
Afvalwater	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH	0,113	m ³	

A4 Transport naar gebruiker

Voor het transport van HVO binnen Nederland wordt de door SBK voorgeschreven afstand van 150 km voor niet-bulkgoederentransport binnen Nederland aangenomen. Verder is aangenomen dat HVO gebunkerd wordt in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen. Het A4 transportproces is weergegeven in Tabel 18.

Tabel 18 Transport van 1 ton HVO van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Transport HVO naar bunkerpunt	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER	150	tkm	

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van HVO zijn beschreven in Tabel 19 (processen) en Tabel 20 (emissies).

Tabel 19 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton HVO. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 20.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,21	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Baggerschip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenfaciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenonderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	P	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	Kg	Zie paragraaf 2.6.7

De emissiefactor van CO₂ is gebaseerd op het koolstofpercentage vermeld in (Aatola, Larmi, Sarjoavaara, & Mikkonen, 2008). De emissiefactoren zijn berekend op basis van de emissiefactoren voor MDO, waarbij voor verschillende stoffen een reductie is aangenomen gebaseerd op (Aatola, Larmi, Sarjoavaara, & Mikkonen, 2008). Voor de stof CO 15%, voor NMVOS, methaan en PAKs 20%, voor NO_x 10%, voor PM₁₀ 25% en voor SO₂ 90%. De emissies van CO₂, CO en methaan uit HVO zijn biogene emissies (zie paragraaf 1.4 voor de betekenis hiervan).

Tabel 20 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton HVO.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide	3109,3	kg	Biogene emissie
Koolstofmonoxide	11,5	kg	Biogene emissie
NMVOS	1,7	kg	
NO _x	51,1	kg	
PM ₁₀	1,2	kg	
Zwavel dioxide	0,20	kg	
Methaan	0,07	kg	Biogene emissie
Distikstofoxide	0,08	kg	
Ammonia	0,01	kg	
Acroleïne	0,024874	kg	
Benzeen	0,033166	kg	
Etheen	0,198995	kg	
Formaldehyde	0,099497	kg	
Tolueen	0,024183	kg	
Xylenen (Totaal)	0,033166	kg	
Fenantheen	0,000587	kg	
Anthraceen	0,000045	kg	

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Fluorantheen	0,000069	kg	
Chryseen	0,000031	kg	
Benzo(a)Anthraceen	0,000011	kg	
Benzo(a)Pyreen	0,000010	kg	
Benzo(b)Fluorantheen	0,000008	kg	
Benzo(k)Fluorantheen	0,000004	kg	
Benzo(ghi)Peryleen	0,000003	kg	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	1,73E-09	kg	
Naftaleen	0,004146	kg	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	1,73E-10	kg	
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

2.6.5 LNG

A1-A3 Productiefase

Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van LNG-productie in Qatar. Omdat aardgaswinning in Qatar niet in de ecoinventdatabase zit, is de proceskaart "Natural gas, at production onshore/DZ" (Algerije) gebruikt. Elektriciteit voor het proces wordt lokaal opgewekt in een gasgestookte installatie met een efficiëntie van 58% (JRC, 2014). Het productieproces is gemodelleerd zoals beschreven in (JRC, 2014) en wordt weergegeven in Tabel 21.

Tabel 21 Productie van 1 ton LNG.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Feedstock	Natural gas, at production onshore/DZ	1255	m ³	Gebaseerd op energie-inhoud van 49 MJ/kg voor LNG en 39,1 MJ/m ³ voor aardgas. 2 m ³ verlies aangenomen
Elektriciteit voor liquefactie	Natural gas, burned in power plant/UCTE	3041,4	MJ	
Machines e.d.	Production plant, natural gas/GLO/I	1,75333E-12	p	Gebaseerd op ecoinventproces "Natural gas, liquefied, at liquefaction plant/DZ"
Aardgasfakkel	Natural gas, sweet, burned in production flare/MJ/GLO	551,25	MJ	
Elektriciteit voor loading terminal	Natural gas, burned in power plant/UCTE	71,81	MJ	

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Energie voor loading terminal	Natural gas, burned in gas motor, for storage/DZ	490	MJ	
Procesemissies				
Methaanemissie naar lucht	Methane, fossil	1,666	kg	

A4 Transport naar gebruiker

Voor het transport van LNG uit Qatar naar Rotterdam wordt de ecoinvent proceskaart "Transport, liquefied natural gas, freight ship/OCE" gebruikt. De afstand over zee via het Suezkanaal is ongeveer 11.800 km. Tevens is elektriciteits- en energieverbruik voor de bunkerterminal hier meegenomen zoals beschreven door JRC (JRC, 2014). Net als voor de andere brandstoffen is ook voor LNG aangenomen dat LNG gebunkerd wordt in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen LNG bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen. Het A4 transport proces wordt weergegeven in Tabel 22.

Tabel 22 Transport van 1 ton LNG van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Transport per LNG-tanker	Transport, liquefied natural gas, freight ship/OCE	11800	tkm	
Elektriciteitsverbruik terminal	Electricity, medium voltage, at grid/NL	41,65	MJ	
Energieverbruik terminal	Natural gas, burned in gas motor, for storage/NL	490	MJ	

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van LNG zijn beschreven in Tabel 23 (processen) en Tabel 24 (emissies).

Tabel 23 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton LNG. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 24.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,46	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Baggerschip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenfaciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Havenonderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	p	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	Kg	Zie paragraaf 2.6.7

De emissiefactor van CO₂ is gebaseerd op het koolstofpercentage van methaan (75%). De emissiefactoren voor CO, NMVOS, NO_x en methaan zijn gebaseerd op metingen aan een schip uitgerust met dual fuel LNG aangedreven “medium-speed” motoren van het type Wärtsilä 8L 50 DF (Anderson, Salo, & Fridell, 2015). Hierbij is op grond van een uitspraak van de auteurs aangenomen dat de gemeten koolwaterstoffen voor 90% uit methaan bestaan. De gemeten hoeveelheid methaanslip komt uit op ongeveer 1%. Dit percentage is gebaseerd op een gewogen gemiddelde bij diverse motorbelastingen. De hoogste percentages methaanslip tot 2,5% werden gevonden bij lage motorbelasting terwijl bij hoge belasting het gemeten percentage soms daalde tot minder dan 0,5%. De motorbelasting van een normale werkcyclus van baggerschepen zal vrij hoog liggen.

Voor PM₁₀, koolwaterstoffen en PAK's is uitgegaan van 95% emissiereductie ten opzichte van MDO. Voor metalen is 100% emissiereductie aangenomen. Er is verondersteld dat bij het gebruik van de kentallen de invoer van de pure brandstoffen apart zal plaatsvinden. Er is dus geen rekening mee gehouden dat LNG vrijwel altijd in combinatie met een andere brandstof (met name MDO) gebruikt zal worden.

Tabel 24 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton LNG.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide	2750	kg	
Koolstofmonoxide	14,8	kg	
NMVOS	1,5	kg	
NO _x	4,50	kg	
PM ₁₀	0,08	kg	
Zwavel dioxide	0,1	kg	
Methaan	13,3	kg	Inclusief methaanslip
Distikstofoxide	0,08	kg	
Ammonia	0,01	kg	
Acroleïne	0,001555	kg	
Benzeen	0,002073	kg	
Etheen	0,012437	kg	
Formaldehyde	0,006219	kg	
Tolueen	0,001511	kg	
Xylenen (Totaal)	0,002073	kg	
Fenanthreen	0,000037	kg	
Anthraceen	0,000003	kg	
Fluorantheen	0,000004	kg	
Chryseen	0,000002	kg	
Benzo(a)Anthraceen	0,000001	kg	
Benzo(a)Pyreen	0,000001	kg	
Benzo(b)Fluorantheen	4,97E-07	kg	
Benzo(k)Fluorantheen	2,48E-07	kg	
Benzo(ghi)Peryleen	1,94E-07	kg	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	1,08E-10	kg	
Naftaleen	0,000259	kg	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	1,08E-11	kg	

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

2.6.6 Bio-LNG

A1-A3 Productiefase

Zoals beschreven in paragraaf 2.1, zijn er drie biobronnen als basis voor biogas meegenomen in de berekeningen: RWZI-slib, voedselresten en mest. De verdeling tussen deze drie stromen is gemaakt op basis van de Routekaart Hernieuwbaar Gas⁵ (De Gemeynt, ECN, Groen Gas Nederland, RVO, 2014).

De opwerking van biogas tot Bio-LNG is gemodelleerd door de proceskaart "methane, 96 vol-%, from biogas, at purification/m3/CH" in ecoinvent aan te passen naar de Nederlandse situatie, dus met de Nederlandse biogasmix zoals hierboven beschreven en de Nederlandse elektriciteitsmix.

Tot slot is elektriciteitsverbruik voor liquefactie toegevoegd op basis van de "LNG Fact Analysis" van TNO (Verbeek & Verbeek, 2015), met een correctie voor de lagere efficiëntie van kleinere biogasinstallaties op basis van (Steinigeweg & Meyer, 2015)⁶.

De voornaamste databron voor de productie van Bio-LNG was dus ecoinvent, omdat deze completere informatie bood dan de JRC-emissierapportage. Deze keuze heeft invloed op de resultaten. In tegenstelling tot de gegevens van het JRC hebben we de productie-emissies van biogas wel meegenomen (JRC, 2014); JRC stelt dat dit productieproces juist een vermindering van methaanemissies (uit bijv. mest) is, maar dit vinden wij te optimistisch gezien de mogelijkheden voor vermindering van deze emissies en nuttige toepassing van mest en dergelijke. In plaats van de JRC-processen zijn de ecoinventprocessen voor biogasproductie gebruikt, welke geen vermindering van emissies bevat. Voordeel van deze benadering is een meer complete set van gegevens in ecoinvent (JRC biedt alleen CO₂-kentallen, andere emissies moeten worden bijgeschat) en een meer transparante benadering (in tegenstelling tot de optelsom van voor- en nadelen bij JRC). Nadeel van deze benadering is dat de ecoinventgetallen lastig te vergelijken en dus valideren zijn met de JRC-kentallen en dat gunstige neveneffecten (vermeden methaanemissies) niet zijn meegenomen.

⁵ Verdeling van 1 m³ biogas:

- 3,9 PJ dus 21% van RWZI-slib (Biogas, from sewage sludge, at storage/CH)
- 8,7 PJ dus 46% voedselresten (Biogas, from biowaste, at storage/CH)
- 4,3+1+0,9 = 6,2 PJ dus 33% mest (Biogas, from slurry, at agricultural co-fermentation, covered/CH).

Bron: routekaart Hernieuwbaar gas, Tabel 7, Biogaspotentieel per type biomassa, 2020 scenario.

Tabel 25 Productie van 1 ton Bio-LNG.

Proces- stap	Ecoinventkaart	Hoeveel- heid	Een- heid	Bron/ Toelichting
Bio-LNG productie	Bio-LNG [Methane 96 vol-%, from biogas, at purification]	1330	m ³	Dichtheid = 0,752 kg/Nm ³ volgens ecoinvent. Kaart voor methaan en biogas ⁵ aangepast zoals beschreven in tekst hierboven
Liquefactie	Electricity, medium voltage, at grid/NL	559	kWh	381 kg CO ₂ -emissies ⁶ , aangenomen dat dit van elektriciteit is ⁷

A4 Transport naar gebruiker

Het transport naar de gebruiker is beschreven in Tabel 26. Bio-LNG kan gewoon in Nederland geproduceerd worden maar het is niet bekend waar en daarom is de transportafstand niet bekend; daarom is de forfaitaire transportafstand van de SBK aangehouden (150 km). Er zijn geen extra voorzieningen meegerekend zoals speciale tanks, omdat dit niet bekend was en omdat het ook niet meegerekend is bij de modellering van het LNG-schip door ecoinvent (Transport, liquefied natural gas, freight ship/OCE), en dus ook niet meegenomen is bij de LNG-berekeningen (zie paragraaf 2.6.5).

Over verliezen bij wegtransport van LNG is niets bekend. Bij transport per schip in ecoinvent (transport, liquefied natural gas, freight ship/tkm/OCE) is er een verlies van 0,00935 Nm³ LNG per tkm getransporteerd gas. Bij gebrek aan specifieke informatie over verliezen bij wegtransporten, hebben we dezelfde waarde gehanteerd. Ook voor Bio-LNG is aangenomen dat de baggerschepen Bio-LNG bunkeren in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen bunkerschepen nodig zijn die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen.

Tabel 26 Transport van 1 ton Bio-LNG van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Transport per vrachtwagen	Transport, lorry >16t, fleet average/RER	150	tkm	Forfaitaire transportafstand en –middel conform SBK
Methaanverlies tijdens transport	Emissie van Methane, biogenic naar lucht	1,05	kg	0,00935 Nm ³ verlies per tkm; 0,752 kg/Nm ³ en 150 km

⁶ Het gebruik van energie voor liquefactie leidt tot 5,6 g CO₂/MJ voor conventioneel LNG, maar als gevolg van de kleine schaal bij biogasinstallaties zou het energieverbruik voor liquefactie 70% hoger zijn bij Bio-LNG (Steinigeweg & Meyer, 2015), dus 9,52 g CO₂/MJ. Compressie is dan echter niet meer nodig, wat betekent dat er 1,2 gram afgaat en netto 8,32 g CO₂/MJ overblijft. Met een LHV van 34,45 MJ/Nm³ en een dichtheid van 0,752 kg/m³ volgens ecoinvent betekent dit 381 kg CO₂/ton.

⁷ 1 kWh elektriciteit (Electricity, medium voltage, at grid/NL) = 0,683 kg CO₂.

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van Bio-LNG, zijn beschreven in Tabel 27 (processen) en Tabel 28 (emissies).

Tabel 27 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton Bio-LNG. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 28.

Proces-stap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil, at plant/RER	2,46	kg	Zie paragraaf 2.6.7
Bagger-schip	Baggerschip incl EoL	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Machines	Machines incl. EoL (per vervangingsmoment)	7,11 E-5	p	Zie paragraaf 2.6.7
Haven-faciliteiten	Port facilities/RER/I	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 2.6.7
Haven-onderhoud	Operation, maintenance - no electricity, port/RER/I	5,08 E-7	p	Zie paragraaf 2.6.7
Koelmiddel	Refrigerant R134a, at plant/RER	0,016	kg	Zie paragraaf 2.6.7

De emissiefactoren voor de verbranding van Bio-LNG zijn gebaseerd op de emissiefactoren voor conventioneel LNG (zie paragraaf 2.6.5); de enige aanpassing is dat de emissies van CO₂, CO en CH₄ tijdens de verbranding als biogeen zijn aangemerkt (zie paragraaf 1.4 voor de betekenis hiervan). Hierbij is verondersteld dat de samenstelling van Bio-LNG niet significant afwijkt van fossiel LNG. Deze emissiefactoren gelden alleen voor het hierboven beschreven proces waarbij de Bio-LNG is opgewerkt tot het dezelfde kwaliteit heeft als conventioneel LNG, wat wil zeggen dat er een grote hoeveelheid CO₂ is verwijderd uit het Bio-LNG gedurende het opwerkproces.

Tabel 28 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton Bio-LNG.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Koolstofdioxide, biogeen	2750	kg	
Koolstofmonoxide, biogeen	14,8	kg	
NMVOS	1,5	kg	
NO _x	4,50	kg	
PM ₁₀	0,08	kg	
Zwavel dioxide	0,1	kg	
Methaan, biogeen	13,3	kg	Inclusief methaanslip
Distikstofoxide	0,08	kg	
Ammonia	0,01	kg	
Acroleïne	0,001555	kg	
Benzeen	0,002073	kg	
Etheen	0,012437	kg	
Formaldehyde	0,006219	kg	
Tolueen	0,001511	kg	
Xylenen (Totaal)	0,002073	kg	
Fenanthreen	0,000037	kg	
Anthraceen	0,000003	kg	
Fluorantheen	0,000004	kg	
Chryseen	0,000002	kg	
Benzo(a)Anthraceen	0,000001	kg	
Benzo(a)Pyreen	0,000001	kg	
Benzo(b)Fluorantheen	4,97E-07	kg	
Benzo(k)Fluorantheen	2,48E-07	kg	
Benzo(ghi)Peryleen	1,94E-07	kg	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	1,08E-10	kg	
Naftaleen	0,000259	kg	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)	1,08E-11	kg	
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,016	kg	Koelmiddel (zie paragraaf 2.6.7). 45 kg/jaar, gedeeld door aantal ton brandstof per jaar (2812)

2.6.7 *Algemene processen in de gebruiksfase toegerekend aan de scheepsbrandstof*
Een aantal processen is relevant voor meerdere brandstoffen en is consequent hetzelfde gemodelleerd. In deze paragraaf worden ze besproken.

2.6.7.1 *Infrastructuur* *Algemeen*

Met "infrastructuur" wordt in deze studie bedoeld: de (transport)middelen die primair gebruikt worden om de brandstof te verbranden. Voor scheepsbrandstoffen gaat het dan om de schepen en om de havens waar de schepen verblijven (bijvoorbeeld om te bunkeren). Systeem-infrastructuur voor de brandstof zoals tankstations, worden in geen van de gevallen meegenomen, om consistent te zijn met de andere brandstofprofielen in de NMD. Infrastructuur voor de schepen, d.w.z. vaarwegen, sluisen e.d., zijn ook niet meegenomen in deze rapportage om dezelfde reden.

In de SBK bepalingmethode is beschreven dat alles dat minder dan 1% op basis van massa bijdraagt en niet meer dan 5% aan de milieu-impact niet meegenomen hoeft te worden in de LCA.

Schepen

De brandstoftoepassing vindt plaats in schepen die ingezet worden voor baggerwerkzaamheden en kustsuppletie. De materialen van het schip (productie, onderhoud en verwerking einde levensduur) worden toegerekend aan de brandstof, op basis van de totale hoeveelheid brandstof die gedurende de levensduur van het schip gebruikt worden.

Ecoinvent heeft gegevens om de materialen van schepen toe te rekenen aan transport schepen, maar heeft geen relevante gegevens voor het type schepen dat relevant is voor deze opdracht (baggerschepen etc.). Het milieuprofiel voor baggerschepen is gebaseerd op de materiaalsamenstelling van een zeeschip uit ecoinvent met correctiefactoren⁸ voor grootte van het schip (3900 ton in plaats van 7500 ton) en toevoeging van de specifieke machines zoals pompen (circa 100 ton, op basis van verschillende factsheets). De specifieke machines zijn gemodelleerd als "slurry tanker, production/kg/CH/I".

De hoeveelheid schip per ton brandstof is gebaseerd op een gemiddelde levensduur (20 jaar) en een jaarlijks brandstofverbruik⁹ van 2812 ton brandstof. De hoeveelheid extra machines is gebaseerd op een veronderstelde levensduur van 5 jaar.

Havens

Havens zijn gemodelleerd op basis van de algemene havens zoals beschikbaar in ecoinvent. We hebben twee aanpassingen gedaan op de ecoinventprocessen:

1. De hoeveelheid haven is in ecoinvent gelinkt aan een bepaalde hoeveelheid transport, uitgedrukt in tkm. Wij hebben deze hoeveelheid omgerekend naar ton brandstof, op basis van het brandstofverbruik dat in ecoinvent bij 1 tkm transport hoort in zeeschepen ("Transport, transoceanic freight ship/OCE").
2. Het onderhoud van de haven ("Operation, maintenance, port/RER/I") is aangepast. In deze proceskaart zit elektriciteitsverbruik, wat gemodelleerd is op basis van informatie van de haven van Hamburg.

⁸ Op basis van figuur 2-18 in Vlasblom (Vlasblom, 2007) kan gesteld worden dat het scheepsgewicht ("licht gewicht") = $0,464 \times \text{Dry Weight Tonnage (DWT, laadvermogen excl. licht gewicht)}$. DWT van een typisch baggerschip zoals de Shoreway is 8362 ton, dus het scheepsgewicht is $0,464 \times 8362 \text{ ton} = 3.879.968 \text{ kg}$.

Aangezien een zeeschip in ecoinvent (transoceanic freight ship/p/OCE/I) circa 7500 ton aan materialen bevat, zijn alle materiaalhoeveelheden met correctiefactor $7.500.000/3.879.968 = 0,516$ vermenigvuldigd.

⁹ Jaarlijks brandstofverbruik is gebaseerd op

- Het aantal kilo's brandstof dat per cyclus verbruikt wordt:
 - o Tijdens varen: $2,5 \text{ u (150 min.)} \times 4000 \text{ kW vermogen} \times 0,19 \text{ kg/kWh specifiek verbruik} = 1900 \text{ kg}$
 - o Tijdens lossen: $0,25 \text{ u (15 min.)} \times 700 \text{ kW vermogen} \times 0,19 \text{ kg/kWh} = 33,25 \text{ kg}$
 - o Totaal per cyclus: $1900 + 33,25 = 1933,25 \text{ kg}$
- 1 cyclus = $2,5 + 0,25 = 2,75 \text{ uur}$, dus verbruik per uur = $1933,25/2,75 = 703 \text{ kg/uur}$.
- Aantal uren per jaar = 4000, op basis van vacatureomschrijvingen voor baggerpersoneel.
- Totaal jaarverbruik is dan $4000 \text{ uur} \times 703 \text{ kg/uur} = 2812000 \text{ kg brandstof}$.

In het duurzaamheidsrapport van de haven (HHLA, 2014) wordt echter gesteld dat dit elektriciteitsverbruik voornamelijk voor overslag is, hetgeen voor baggerschepen niet relevant is. Daarom is het elektriciteitsverbruik (en de bijbehorende emissie van warmte naar de lucht) verwijderd uit deze kaart.

Recycling van metalen

Er zijn zes recyclingprocessen gemodelleerd omdat deze ontbraken in de standaardkaarten van ecoinvent (bijvoorbeeld voor een schip) terwijl het wel waarschijnlijk is dat deze metalen gerecycled worden en omdat er in een aantal kaarten waar het recyclen van de metalen na de levensduur van een installatie waarschijnlijk is.

In de recycling is zowel het verzamelen van metalen meegenomen als ook het omsmeltproces en de producten die daardoor vermeden worden. De recyclingprocessen voor aluminium, koper en nikkel zijn als volgt gemodelleerd, per kg gerecycled metaal:

- Voor het inzamelen van de metalen: 1 kg "iron scrap, at plant/kg/RER"¹⁰
- Voor de verwerking van de metalen: 1 kg van het secundaire productieproces (dus Aluminium, secondary, from old scrap, at plant/RER, Copper, secondary, at refinery/RER en Nickel, secondary, from electronic and electric scrap recycling, at refinery/SE)
- Als vermeden producten, beide met een 90% efficiëntie (dus 0,9 kg vermeden product per 1 kg gerecycled metaal):
 - De primaire fractie uit de oorspronkelijke mix (dus de mix zoals gebruikt in het schip/de machine) wordt geteld als vermeden primair product. Dus: Aluminium, primary, at plant/RER, Copper, primary, at refinery/GLO en Nickel, 99.5%, at plant/GLO.
 - De secundaire fractie wordt geteld als vermeden secundair product (zoals hierboven genoemd).

De recycling van staal en roestvrij staal is iets anders gemodelleerd, omdat hier andere processen een rol spelen. Electric steel wordt hier beschouwd als het secundaire proces en converter steel als het primaire proces. Dat is als volgt gemodelleerd in SimaPro, per kg gerecycled staal:

- Voor het verwerkingsproces: 1 kg Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER voor staal en 1 kg steel, electric, chromium steel 18/8, at plant/kg/RER (met aanpassing¹¹) voor roestvrij staal.
- Als vermeden product, met een efficiëntie van 90% (dus 0,9 kg vermeden product per 1 kg gerecycled metaal):
 - Voor de primaire fractie uit de oorspronkelijk mix: Steel, converter, unalloyed, at plant/RER voor staal en Steel, converter, chromium steel 18/8, at plant/RER voor roestvrij staal.
 - Voor de secundaire fractie (indien van toepassing¹²): Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER voor staal en Steel, electric, chromium steel 18/8, at plant/RER voor roestvrij staal.

¹⁰ Deze proceskaart bevat alleen processen voor het inzamelen van schroot, transport naar de verwerkingsplek, sorteren en samenpersen.

¹¹ Het oorspronkelijke record bevat namelijk 50% iron scrap en 50% nikkel (ferronickel) en chroom (ferrochromium), terwijl we hier een proces willen modelleren voor roestvrij staal dat al nikkel en chroom bevat. Daarom zijn de hoeveelheden in deze kaart aangepast naar: 1 kg iron scrap, 0 kg nikkel en 0 kg chroom.

2.6.8 Hulpstoffen in de gebruiksfase A4

Smeerolie

Alle motoren¹³ die beschouwd worden in deze studie, worden gesmeerd met smeerolie. Viertaktmotoren zoals in baggerschepen kennen een verbruik tussen 0,3 en 0,5 g/kWh (vastgesteld op basis van (Aabo, 2002)). Dit is echter het verbruik van de motor; de omrekening van g smeerolie per kWh naar g smeerolie per kg brandstof is weergegeven in Tabel 29. Dit smeerolieverlies is in alle proceskaarten gemodelleerd als smeerolieverbruik, oftewel "Lubricating oil, at plant/RER" in ecoinvent.

Tabel 29 Omrekening van smeerolieverliezen per kWh in een standaardmotor (brandstofverbruik 0,19 kg smeerolie per kWh) met MDO (42 MJ/kg) naar de smeerolieverliezen met andere brandstoffen. De omrekenfactor* is berekend als omrekenfactor = $[\text{energieinhoud}_x / \text{energieinhoud}_{\text{MDO}}] * [1 / \text{brandstofverbruik}_{\text{MDO}}]$.

Brandstof	Smeerolieverlies (g/kWh)	Energieinhoud (MJ/kg)	Bron energieinhoud	Omrekenfactor* (kWh/kg)	Smeerolieverlies (kWh/kg)
HFO	0,5	41	(Hulskotte, Bolt, & Broekhuizen, 2003)	5,14	2,57
MDO	0,4	42	(Hulskotte, Bolt, & Broekhuizen, 2003)	5,26	2,11
GTL	0,4	43	(Aatola, Larmi, Sarjovaara, & Mikkonen, 2008)	5,39	2,16
HVO	0,4	44	(Aatola, Larmi, Sarjovaara, & Mikkonen, 2008)	5,51	2,21
LNG en Bio-LNG	0,4	49	(Æsøy, Einang, Stenersen, Hennie, & Valberg, 2011)	6,14	2,46

De verliezen van de smeerolie komen deels terecht in de lucht en worden deels opgevangen en bewaard. Ongeveer 10% van de olie verdwijnt als PM in de uitlaatgassen (Aabo, 2002). Dit is reeds meegenomen in de emissieprofielen van de verschillende brandstoffen. De overige 90% wordt later aan land opgewerkt en wordt vervolgens elders als brandstof ingezet. Deze opwerking en verbranding valt buiten de scope van deze studie, daarom is de analyse afgekapt op dit punt. De overgebleven smeerolie wordt niet beschouwd als een afvalproduct (omdat het later nog nuttig hergebruikt wordt) en de verdere verwerking is dus ook niet meegenomen.

¹² In één geval (extra onderdelen baggerschip, zie vorige paragraaf) wordt er 100% primair staal toegepast. Door dit 100% primair staal te recyclen wordt dus ook enkel primair staal vermeden; van secundair staal is geen sprake.

¹³ Bij waterstof is geen motor gemodelleerd maar enkel een brandstofcel, omdat de specifieke toepassing in een transportmiddel onbekend is. Hier is dus ook geen smeerolie meegenomen in de berekeningen.

Koelmiddelen

De schepen zijn voorzien van airconditioning om de binnenruimten te koelen. Deze installaties hebben een reservoir met ongeveer 150 kilogram koelmiddel R-134a (1,1,1,2-tetrafluorethaan), waaruit jaarlijks circa 30% ontsnapt (Smith, et al., 2014). Deze emissie is meegenomen in de emissiefactoren voor alle brandstoffen die in een schip worden verbrand (dus niet bij waterstof). Daarnaast is de jaarlijkse productie van dit koelmiddel meegenomen in de berekeningen (dus 45 kg per jaar).

2.6.9 *Waterstof*

A1-A3 Productiefase

Zoals gemeld in de beschrijving van waterstof (paragraaf 2.1), is er nog geen data of specifieke voorspelling voor de bronnen waaruit waterstof in de nabije toekomst gewonnen zal worden, maar lijken elektrolyse (op basis van groene stroom) en lokale steam reforming de meest waarschijnlijke opties. Daarom is een verhouding van 50% voor beide verondersteld.

Het steam reformingproces is gebaseerd op de ecoinventkaart die afkomstig is van Plastics Europe. Hierbij moet opgemerkt worden dat Plastics Europe Russisch gas gebruikt heeft, hetgeen een andere energie-inhoud heeft dan Nederlands gas; dit maakt alleen uit voor de berekening van (CH_4 en CO_2) emissies tijdens transport naar Nederland. Dit is echter niet aan te passen omdat deze proceskaart een zogenaamde systeemkaart is, die geen inzicht geeft in onderliggende processen. Ook het oorspronkelijke rapport van Plastics Europe geeft geen mogelijkheid tot meer inzicht en/of snelle aanpassing (Boustead, 2005); daarom is de proceskaart niet gewijzigd door ons.

De elektrolyse is grotendeels gebaseerd op de HySTATTM30 van Hydrogenics (Hydrogenics, 2016). Deze installatie bestaat grofweg uit twee containers, elektrodes en elektrolyt. We hebben aangenomen dat de containers voornamelijk uit roestvrij staal bestaan en de elektrodes uit nikkel; overige materialen zijn buiten beschouwing gelaten bij gebrek aan meer informatie.

Na de productie is nog een compressiestap nodig, want elektrolyse levert 10 bar waterstof op terwijl een tankstation op 350/700 bar werkt. Na steam reforming is ook compressie nodig. Het energieverbruik voor deze compressie is afgeleid uit de JRC-spreadsheet voor waterstof, variant GPCHx (JRC, 2014). JRC geeft het energiegebruik voor een compressie van 15 bar naar 880 bar; we hebben aangenomen dat dit vergelijkbaar is met het energieverbruik voor compressie van 10 naar ~500 bar. Tabel 30 toont hoe deze productieroutes gemodelleerd zijn.

Tabel 30 Productie van 1 ton waterstof.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Productie uit steam reforming	Hydrogen, cracking, APME, at plant/RER	0,5	Ton	Natural gas cracking is hetzelfde als steam reforming.
Productie uit elektrolyse (voor 0,5 ton H ₂)	Groene stroom (productie NL) ¹⁴	25000	kWh	4.2-4.8 kWhe/Nm ³ (JRC, 2014). Aanname: groene stroom.
	Water, ultrapure, at plant/GLO	5556	Kg	Gedemineraliseerd water voor elektrolyt, ~1 kg per m ³ waterstof.
	Potassium hydroxide, at regional storage/RER	16,7	Kg	KOH = 30% t.o.v. water. KOH wordt niet opgebruikt maar dient om de geleiding van water beter te maken. Aanname: na 100x moet KOH vervangen
	Installatie voor elektrolyse ¹⁵	0,0037	stuk	Productie is 30 Nm ³ H ₂ per uur (Hydrogenics, 2016), levensduur van de IMET® Cell stack is minimaal 50.000 uur, dus 1.500.000 m ³ oftewel 135 ton H ₂ gedurende hele levensduur.
Compressie	Electricity, medium voltage, at grid/NL	11000	MJ	Proxy op basis van JRC, zie tekst. 0,0917 MJel/MJ H ₂ . LHV _{H₂} = 10,8 MJ/m ³ (Verbeek, et al., 2013) en dichtheid = 0,09 kg/m ³ .

¹⁴ Mix samengesteld op basis van CBS-rapport over bruto hernieuwbare energieproductie, tabel 2.2.1, genormaliseerde waarden (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2015). Biomassa niet meegenomen omdat hierbij wel veel CO₂-emissies optreden.

De groene stroommix wordt dan: 76% (5080 x10⁶ kWh) windenergie onshore (electricity, at wind power plant 800kW/RER), 11% (746 x10⁶ kWh) windenergie offshore (Electricity, at wind power plant 2MW, offshore/OCE), 2% (102 x10⁶ kWh) waterkracht (Electricity, hydropower, at power plant/NL) en 12% (773 x10⁶ kWh) zonne-energie (Electricity, production mix photovoltaic, at plant/NL).

¹⁵ 2 containers van 20 voet; leeg gewicht van container is 1900 kg (<http://www.freightgate.com/resources/container.tet>), dus 3800 kg totaal. Aanname: voornamelijk roestvast staal (Chromium steel 18/8, at plant/RER) en aan einde levensduur grotendeels te recycleren (zie paragraaf 2.6.7). Hoeveelheid elektrodemateriaal is geschat op basis van illustratie: 4 cellen in een container van 6m lengte nemen ongeveer de helft van de lengte in beslag, dus 3m, dus diameter per cel = 3/4=0,75m. Aanname dat cellen parallel geschakeld zijn, dus oppervlakte cel = oppervlakte per elektrode = $\pi r^2 = 0,44 \text{ m}^2$. Aanname dikte = enkele cm, bijv. 2 cm en materiaal = nikkel (8900 kg/m³), dan volume = 0,0088 m³ = 78,6 kg nikkel per elektrode. 64 elektrodes in totaal betekent 5030 kg. Aanname: grotendeels recyclebaar (zie wederom paragraaf 2.6.7)

A4 Transport naar gebruiker

Het is onwaarschijnlijk dat het waterstof getransporteerd wordt van een productielocatie naar een tankstation, omdat dit financieel relatief duur is gezien de lage energie-inhoud van het gas (veel volume voor weinig energie). Er is daarom verondersteld dat de productie plaatsvindt op de afnamelocatie en dat er geen transport plaatsvindt.

B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van waterstof, zijn beschreven in Tabel 31 (processen) en Tabel 32 (emissies). In de gebruiksfase is geen schip of ander transportmiddel meegenomen in de berekeningen, omdat er een milieuprofiel opgesteld is voor verbranding in een niet-specifiek voertuig (zie paragraaf 2.4). Smeerolieverbruik is dus ook niet meegenomen.

De brandstofcel is wel meegenomen. Deze is gemodelleerd op basis van de (toekomstige) PEM-brandstofcel zoals gemodelleerd in ecoinvent. Deze is geprefereerd boven een zelf samengestelde proceskaart op basis van materiaalinschattingen, omdat ecoinvent uitgebreidere, recentere en meer consistente data bevat dan de combinatie van verschillende LCA-artikelen die beschikbaar zijn (bijv. (Ribau, Silva, & Sousa, 2014) of (Bartolozzi, Rizzi, & Frey, 2013)).

De hoeveelheid brandstofcel per ton brandstof is bepaald door te berekenen hoeveel brandstof er gedurende de gehele levensduur van een brandstofcel verbruikt wordt. Deze berekening is gebaseerd op de case-informatie van Ballard-waterstofbussen in Londen (Ballard, 2016).

- Ballard bussen rijden 16-18u op een dag en rijden daarmee 250 à 300 km.
- De bussen verbruiken 9 kg H₂ per 100 km, dus 0,09 kg H₂/km.
- Levensduur van de fuel cell is ten minste 32.000 uur volgens ecoinvent.
- De bussen rijden circa 16 km/u, dus 512000 km in hun hele leven.
- 512000 km x 0,09 kg H₂/km = 46080 kg H₂ = 46 ton H₂ over hele levensduur.

Een fuel cell bestaat echter uit een aantal stacks, en dat aantal is ook aangepast. Voor een bus is 100 kW nodig oftewel 50 fuel stacks dus, aangezien ecoinvents fuel stacks een vermogen van 2 kWe hebben.

Tabel 31 Processen gedurende de gebruiksfase van 1 ton waterstof. Emissies naar lucht zijn apart getoond in Tabel 32.

Processtap	Ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Brandstofcel	Stack PEM fuel cell 2kWe, future/p/CH/I	1,09	Stuk	50 stacks verbruiken 46 ton over hele levensduur, dus 50/46 = 1,09 stack per ton H ₂
Brandstofcel EoL	Recycling van roestvast staal en aluminium	1,09	Stuk	Zie paragraaf 2.6.7

De enige emissie die optreedt bij waterstofverbranding is die van water. Het is nog onbekend of dit water gewoon de lucht in gaat, of wordt afgevangen en voor andere doeleinden ingezet. In de berekeningen zijn we er van uitgegaan dat er geen apart systeem voor is en dat het water de lucht in gaat.

Tabel 32 Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton waterstof.

Emissie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Water	9	ton	Molmassa H ₂ = 2, molmassa H ₂ O = 18

3 Milieuprofielen

In Appendix I: Milieuprofielen voor SBK zijn alle milieueffecten per levensfase van iedere brandstof getoond en in Appendix II: Milieuprofielen in MKI's zijn alle milieueffecten per levensfase en per brandstof opgenomen in MKI's.

In dit hoofdstuk bespreken we de resultaten van de milieu-analyses in MKI's van alle brandstoffen in paragraaf 3.1. In paragraaf 3.2 zijn de voornaamste gevoeligheden nader onderzocht en beschreven.

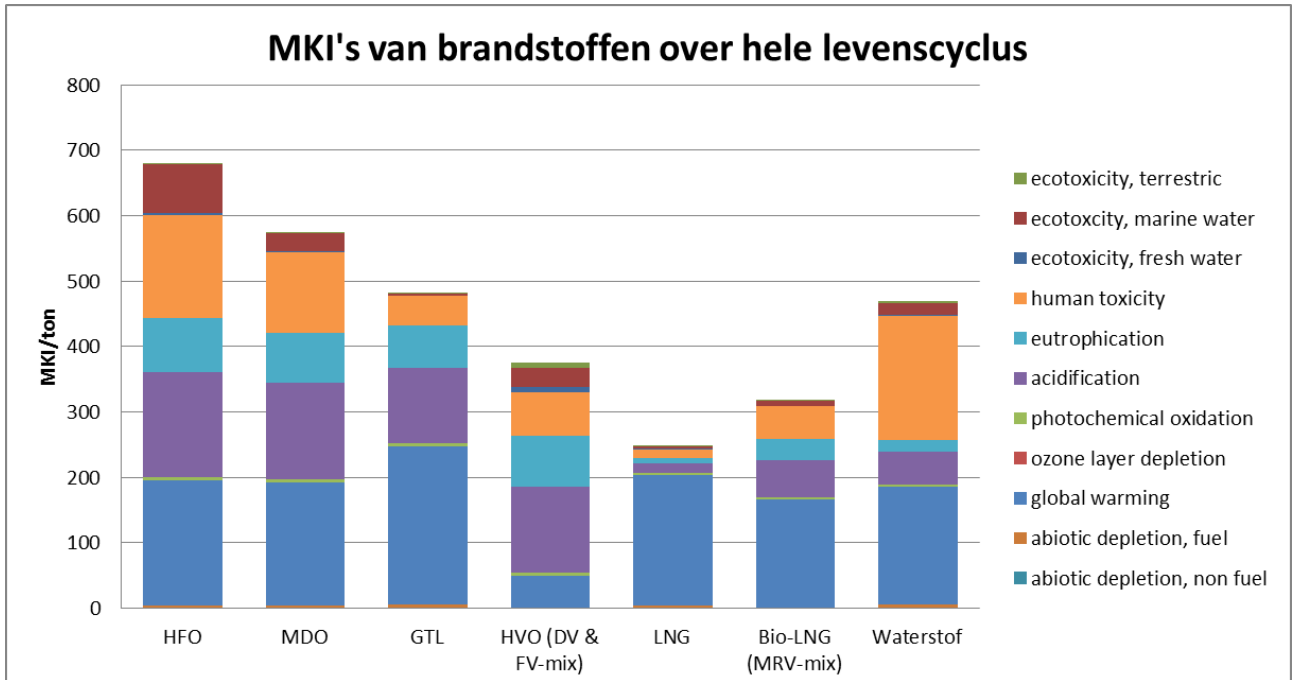
3.1 Milieueffecten

Gehele levenscyclus

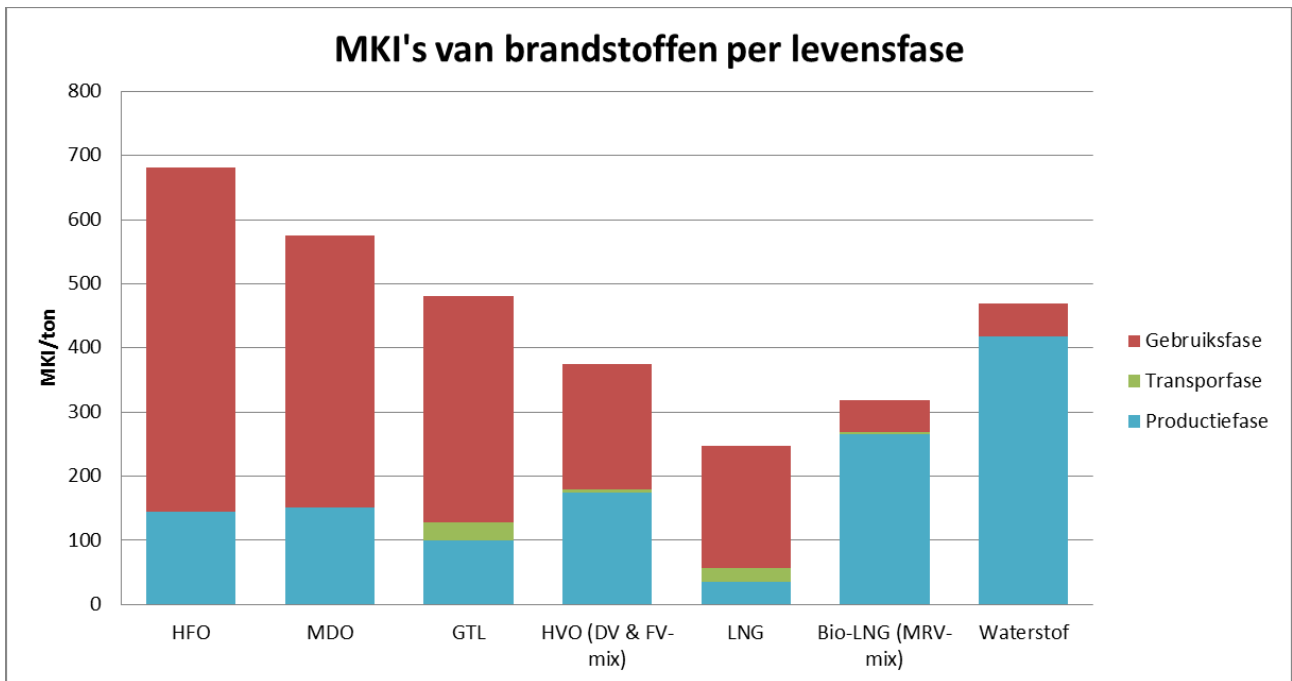
Figuur 10 toont de MKI's voor de gehele levenscyclus van de brandstoffen, van productie tot gebruik. De traditionele scheepsbrandstoffen HFO en MDO hebben over de hele levenscyclus per ton de grootste milieu-impact, gevolgd door GTL en waterstof. Opvallend is dat de Bio-LNG (op basis van mest, RWZI-slib en voedselresten: "MRV-mix") een hogere MKI heeft dan de fossiele LNG. Biobrandstof HVO (op basis van dierlijke vetten en afgewerkt frituurvet: "DV & FV-mix") heeft echter een lagere milieu-impact in vergelijking met HFO of MDO. Verder valt op dat GTL over de gehele levenscyclus een hoger klimaatveranderend effect heeft in vergelijking met HFO en MDO.

Zoals Figuur 11 laat zien, zijn de impacts bij de verschillende brandstoffen niet vergelijkbaar over de levensfasen verdeeld: voor HFO, MDO, GTL en LNG ligt het grootste deel van de milieueffecten in de gebruiksfase, terwijl voor Bio-LNG en waterstof de productiefase de grootste milieu-impact kennen. De impact van transport is alleen voor GTL en LNG relevant, maar draagt bij beide brandstoffen slechts beperkt bij aan de totale milieueffecten.

In de volgende paragrafen worden de brandstoffen in meer detail per fase vergeleken.



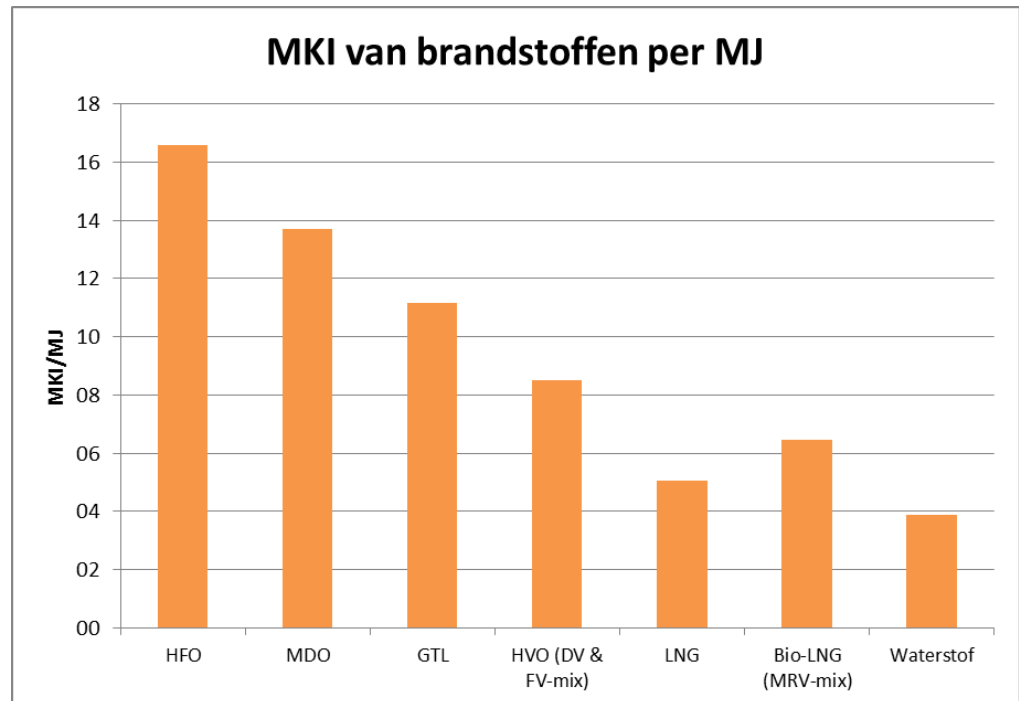
Figuur 10 MKI's van brandstoffen over de gehele levenscyclus.



Figuur 11 MKI's van brandstoffen per levensfase.

Voor deze studie zijn alle resultaten uitgedrukt in milieu-impacts per ton brandstof, maar omdat niet alle brandstoffen dezelfde energie-inhoud hebben, is de vergelijking per ton een niet-functionele vergelijking. Daarom hebben we ook de resultaten per MJ energie-inhoud berekend. In Figuur 12 toont dat, wanneer de milieu-impacts per MJ in plaats van per ton worden bekeken, het beeld vooral voor waterstof wordt gewijzigd.

Dit wordt verklaard door de zeer hoge energie-inhoud van waterstof van ca. 120 MJ/kg. Voor de overige brandstoffen ligt de energie-inhoud tussen de 41 en 49 MJ/kg en zijn daarom slechts kleine verschuivingen te zien ten opzichte van de voorgaande figuren. Wanneer niet alleen per *energie-inhoud*, maar per hoeveelheid *geleverde energie* zou worden gerekend, zou waterstof wellicht nog lager scoren in vergelijking tot de andere brandstoffen, omdat de efficiëntie van een brandstofcel typisch hoger ligt dan de efficiëntie van een brandstofmotor.



Figuur 12 MKI's van brandstoffen per MJ energie-inhoud.

Vergelijking resultaten met DuboCalc

Zowel HFO als MDO zitten al met een milieuprofiel in DuboCalc. In Tabel 33 staan de MKI's van de huidige DuboCalc-profielen (zonder de onzekerheidstoeslag¹⁶) en de MKI's zoals in dit rapport gepresenteerd naast elkaar.

Tabel 33 Vergelijking MKI's HFO en MDO met DuboCalc.

Effectcategorie	HFO (DuboCalc)	HFO	MDO (DuboCalc)	MDO
ADP	0	4	0	4
GWP	180	191	191	187
ODP	0	0	0	0
POCP	7	6	3	6
AP	231	160	134	148
EP	76	83	67	75

¹⁶ De huidige profielen die in DuboCalc zitten zijn zogenaamde categorie-3-profielen, wat betekent dat er een onzekerheidsmarge van 30% bij opgeteld wordt. De waarden in Tabel 32 bevatten echter slechts het product van de milieuprofielen en de MKI-waardes (zie Tabel 1). De waarden die een DuboCalc-gebruiker zal tegenkomen bij het berekenen van project-MKI's ligt dus nog 30% hoger voor HFO en MDO, oftewel respectievelijk 1037 MKI/ton en 649 MKI/ton.

Effectcategorie	HFO (DuboCalc)	HFO	MDO (DuboCalc)	MDO
HT	269	158	77	123
FAETP	1	4	1	2
MAETP	25	74	25	29
TETP	0	2	0	1
Totaal	798	681	499	575
Totaal incl. toeslag¹⁶	1037	n.v.t.	649	n.v.t.

Voor MDO komt de huidige studie op een iets hogere MKI in vergelijking met de eerdere berekening. Dit heeft met name te maken met andere aannames voor de emissieprofielen. Deze studie neemt een emissie van 57 g NO_x/kg, terwijl de studie waarop de huidige DuboCalc-waarden gebaseerd zijn, een emissie van 50 g NO_x/kg hanteert (Roijen, 2013). De studie van Roijen neemt ook hogere benzeenemissies aan, die leiden tot een de hogere score voor humane toxiciteit. De resultaten voor HFO laten een grotere afwijking zien ten opzichte van de huidige DuboCalc-waarden. Omdat in (Roijen, 2013) dezelfde ecoinventkaarten worden gebruikt voor het productieproces, worden de verschillen ook hier vooral veroorzaakt door andere aannames omtrent de emissieprofielen, deels te verklaren door het gebruik van een scrubber in de voorliggende studie – in relatie tot de wetgeving voor zwavel emissies zoals die van toepassing is op de Noordzee (SECA). Hierdoor liggen onder andere de emissies van zwaveldioxide en metalen fors lager dan aangenomen in (Roijen, 2013). Emissies van vanadium, die in de voorliggende studie een groot aandeel hebben in de mariene ecotoxiciteit, zijn in (Roijen, 2013) niet meegenomen.

A1-A3 Productiefase

Figuur 13 toont de MKI per brandstof voor de productiefase. Hier valt op dat de biobrandstoffen (Bio-LNG en HVO) en waterstof de grootste impact hebben, vooral in de categorieën humane toxiciteit, klimaatverandering en verzuring.

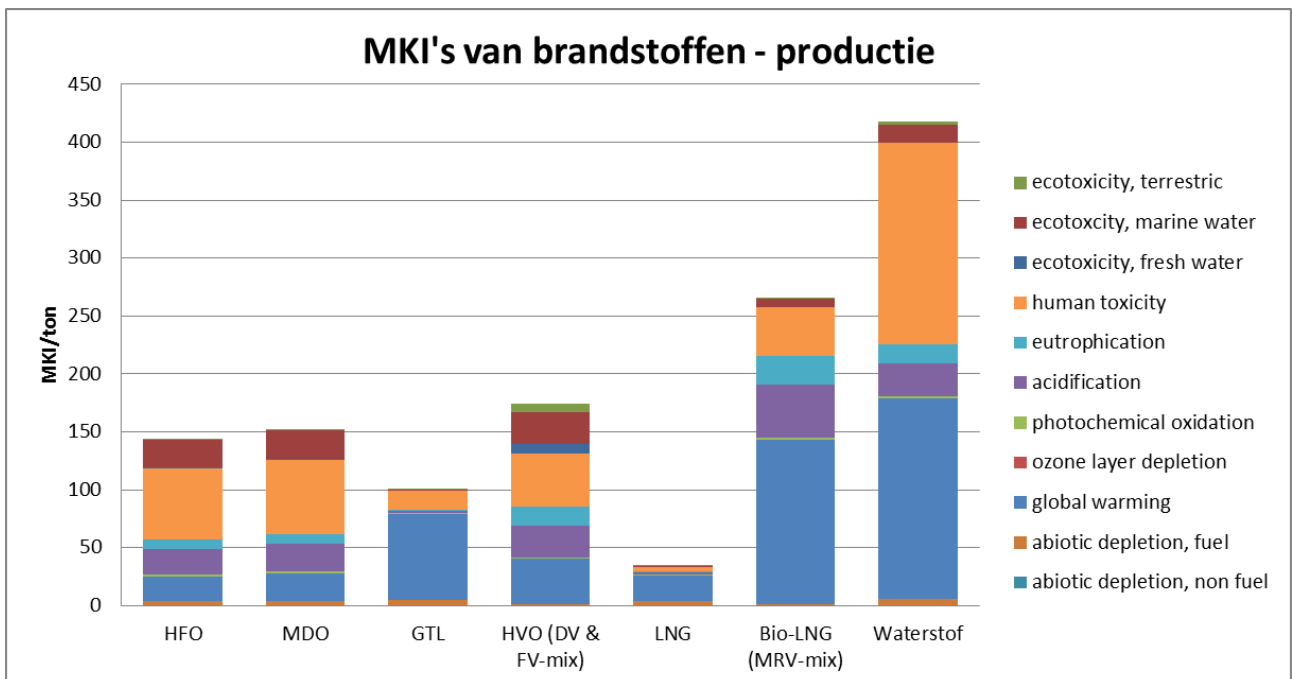
Ongeveer een kwart van de impacts van Bio-LNG-productie komt van de gebruikte elektriciteit, de overige impacts zijn vooral toe te schrijven aan de productie van biogas. De grootste bijdragen aan het klimaatveranderende effect komen van methaan en N₂O emissies gedurende het biogasproductieproces, met name door de methaanemissies van voedselafvalvergisting en de N₂O emissies van mestvergisting. Het verzurende effect wordt voornamelijk veroorzaakt door ammoniakemissies bij mestvergisting. De humane toxiciteit is vooral te wijten aan een achtergrondproces: de emissies van chroom VI en PAKs als gevolg van de metaalproductie voor de productie installatie (chemical plant, organics/RER). De emissies bij vergisting zijn onzeker en de aannames voor energieverbruiken emissies bij zuivering kunnen gezien worden als een worst-case benadering. Bij de productie van HVO wordt meer dan de helft van de impact veroorzaakt door het verbranden van zware stookolie tijdens het renderingproces. De vanadiumemissies die hierbij vrijkomen leveren bovendien een grote bijdrage aan de hoogte van de mariene ecotoxiciteit.

De productie van waterstof door middel van elektrolyse heeft een significant hogere impact dan de productie uit kraken. Voor beide processen wordt een groot deel van de impacts veroorzaakt door het elektriciteitsverbruik; de energie voor het comprimeren vormt circa 40% van de milieu-impact van de productiestap.

Ondanks dat het elektrolyseproces van een Nederlandse groene stroom mix gebruik maakt, is dit elektriciteitsverbruik toch verantwoordelijk voor bijna 70% van de milieueffecten als gevolg van de benodigde materialen voor windmolens die groene stroom leveren.

De hoge effecten op humane toxiciteit worden veroorzaakt door emissies van chroom VI en PAKs ten gevolge van het grote staalgebruik voor de bouw van windmolens voor de opwekking van groene stroom.

De milieu-impacts van de productie van traditionele scheepsbrandstoffen HFO en MDO zijn gemiddeld terwijl de impact van GTL- en LNG-productie in verhouding laag te noemen zijn. Dit komt omdat tijdens deze productieprocessen vrijwel alleen aardgas wordt gebruikt als feedstock en om het productieproces van energie te voorzien.

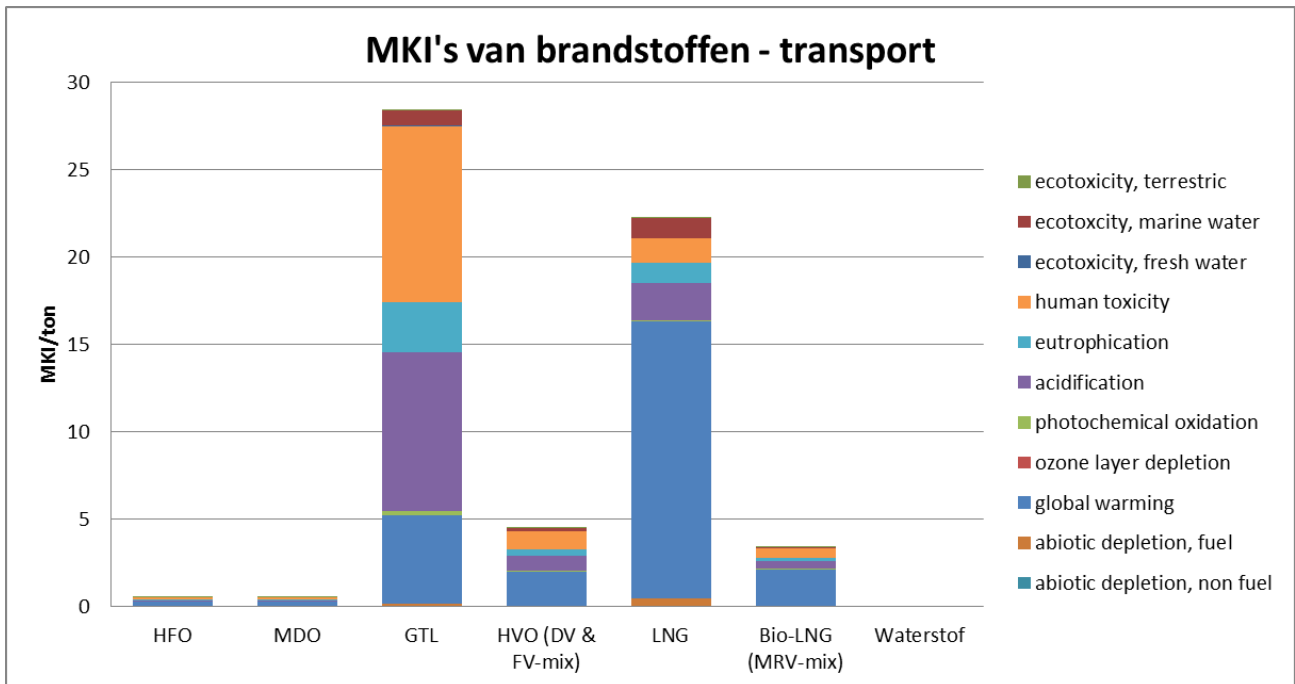


Figuur 13 MKI's van brandstoffen voor het productieproces.

A4 Transport naar gebruiker

Figuur 14 toont de milieu-impact van het transport van de brandstoffen naar het bunkerpunt in de Rotterdamse haven. Alleen voor GTL en LNG zijn hier significante impacts te zien. Deze twee brandstoffen worden in Qatar geproduceerd en vervolgens per schip naar Nederland getransporteerd, in tegenstelling tot de andere brandstoffen, die in Nederland worden geproduceerd en daardoor een zeer kleine transportafstand hebben. Overigens zit het transport van ruwe olie naar Nederland bij HFO en MDO reeds in de proceskaarten van de productiefase; dit levert een enigszins vertekent beeld.

De milieueffecten van het GTL-transport zijn voornamelijk gerelateerd aan de zwaveldioxide-emissies (verzuring) en emissies van olie naar water en PAKs naar lucht (humane toxiciteit) tijdens het transport. De milieu-impacts van het LNG-transport hebben een andere oorzaak. Omdat het LNG-transport ook op LNG vaart zijn er beperkte emissies van NO_x en zwaveldioxide. Het klimaatveranderende effect wordt veroorzaakt door CO₂-emissies uit de verbranding van LNG.



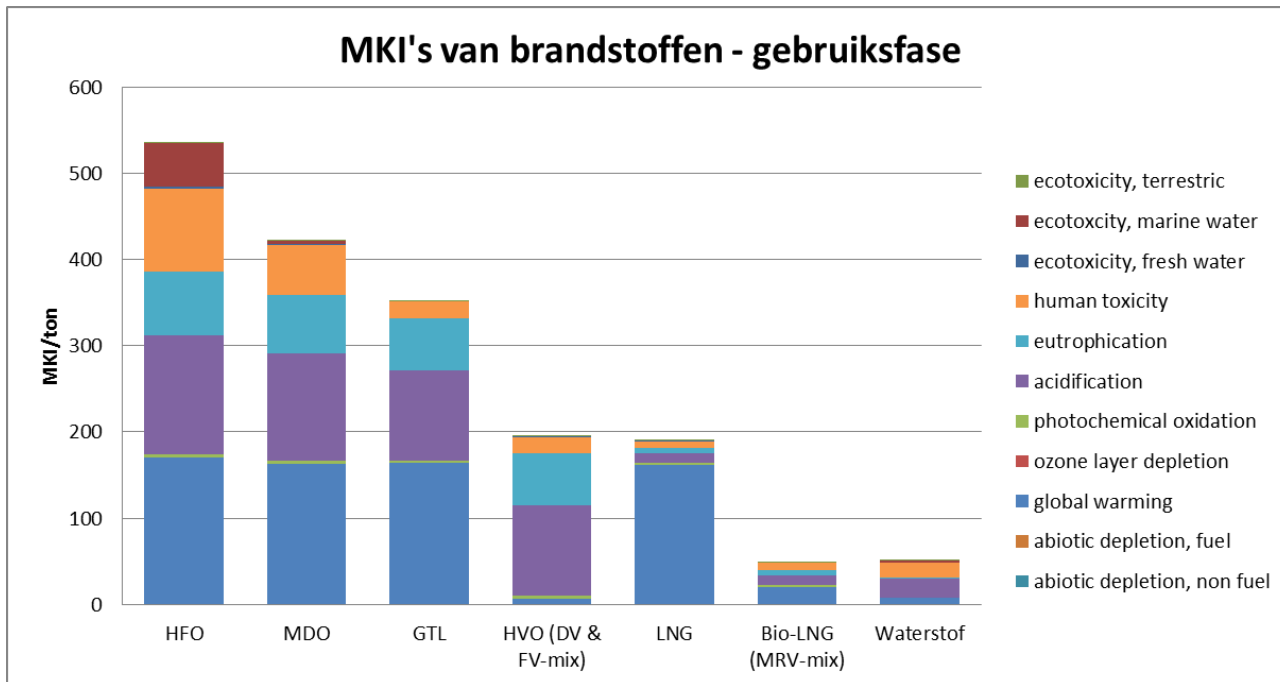
Figuur 14 MKI's van brandstoffen voor het transport.

B1 Gebruiksfase

Figuur 15 toont de milieueffecten van het gebruik van 1 ton brandstof aan boord van een baggerschip en 1 ton waterstof in een brandstofcel. De traditionele (fossiele) scheepsbrandstoffen HFO en MDO hebben de hoogste impacts. Het schonere GTL heeft weliswaar lagere impacts dan HFO en MDO maar zit nog steeds significant boven de overige brandstoffen.

De impacts van Bio-LNG en waterstof liggen het laagst, wat voor Bio-LNG vooral te danken is aan de beperkte verzurende emissies en de biogene oorsprong van de optredende emissies van methaan en CO₂ (zie paragraaf 1.4). Bij de verbranding van waterstof komt alleen water vrij, waardoor de impacts voor waterstof enkel veroorzaakt worden door de materialen voor de brandstofcel.

De effecten van verzuring en eutrofiëring bij HFO, MDO, HVO en GTL worden voor het grootste deel veroorzaakt door de emissie van NO_x. De hoge impacts voor humane toxiciteit en mariene ecotoxiciteit bij HFO hebben voornamelijk te maken met de verbrandingsemissies van nikkel en vanadium. De emissies naar water uit de scrubber zijn maar voor een klein deel verantwoordelijk voor de mariene ecotoxiciteit. Met name kobalt en bariet dragen hieraan bij.



Figuur 15 MKI's van brandstoffen tijdens gebruiksfase.

De milieu-impacts van de gebruiksfase zijn inclusies de toegerekende emissies van de infrastructuur en additionele hulpstoffen. De haveninfrastructuur, het smeermiddel en de koelmiddelen blijken voor alle brandstoffen minder dan 1% bij te dragen aan de totale MKI, wat het gebruik van meer algemene data voor deze analyse rechtvaardigt. De infrastructuur van het schip draagt minder dan 3% bij aan de totale MKI van de brandstoffen. De brandstofcel draagt 10% bij aan de MKI van waterstof.

3.2 Gevoeligheidsanalyses

Om de gevoeligheid van de resultaten voor enkele belangrijke aannames te testen laten we hier de resultaten zien voor enkele alternatieve scenario's. De alternatieve scenario's die we bekijken hebben betrekking op:

- Productiefase:
 - o Voor waterstof bekijken we wat het gevolg is van een keuze voor de individuele productieroutes in plaats van een mix van productieroutes.
 - o Voor de biobrandstoffen (HVO en Bio-LNG) bekijken we wat het gevolg is van een keuze voor één grondstof in plaats van een mix van verschillende grondstoffen.
- Gebruiksfase:
 - o Voor LNG en Bio-LNG bekijken we wat het effect is van een lagere of hogere methaanslip. Een lagere methaanemissie zou kunnen voorkomen bij het gebruik van een spark ignition motor (i.p.v. een dual fuel motor), terwijl een slecht afgestelde dual fuel motor wellicht hogere methaanemissies heeft dan aangenomen in deze studie. We nemen hier 50% lagere (6,6 g/kg), en 100% hogere (27 g/kg) methaanemissies aan.

- Voor HFO bekijken we wat het effect is van lagere metaalemissies uit het brandstofverbruik. Als HFO in de toekomst in steeds grotere mate ontzwaard wordt, zullen ook de metaalconcentraties lager worden. Hier nemen we een reductie van 50% voor emissies van metalen naar lucht en water aan.

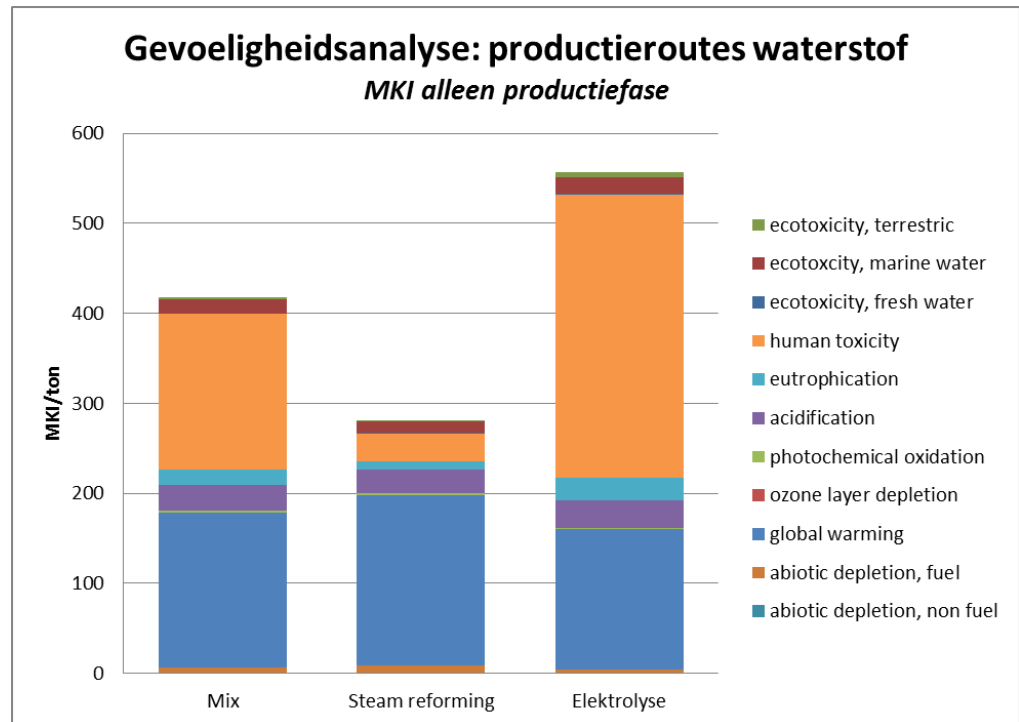
Een potentieel onderwerp voor een gevoeligheidsanalyse in de gebruiksfase is NO_x . Voor toekomstige projecten is het wellicht van belang dat Nederland aangevraagd heeft om van de Noordzee een NO_x Emission Control Area (NECA) te maken. Indien dit wordt doorgezet, zou de nieuwe NO_x emissielimiet voor scheepsmotoren circa een factor vijf lager liggen dan nu het geval is. Echter, in tegenstelling tot de bij SECA's geldt deze nieuwe limiet alleen voor nieuwe schepen en motoren, en niet voor de huidige vloot. Deze ontwikkeling zou dan slechts op langere termijn invloed hebben op de scheepsemissies van NO_x en is op dit moment niet relevant voor het sectorgemiddelde milieuprofiel.

De transportfase is buiten beschouwing gelaten in de gevoeligheidsanalyses, omdat deze fase slecht een beperkte impact heeft op de totale milieu-impacts van de brandstoffen (zie Figuur 11).

Waterstofproductieroutes

Figuur 16 laat de resultaten voor de milieueffecten van de productiefase voor verschillende waterstofproductieprocessen. Waterstofproductie met behulp van elektrolyse heeft significant hogere impacts dan productie via steam reforming. Deze milieueffecten liggen voornamelijk op het vlak van humane toxiciteit, veroorzaakt door emissies van chroom VI, PAK's en arseen. Deze emissies zijn gerelateerd aan de elektriciteitsproductie uit windenergie, als gevolg van het chroomstaal dat in de windturbines gebruikt wordt.

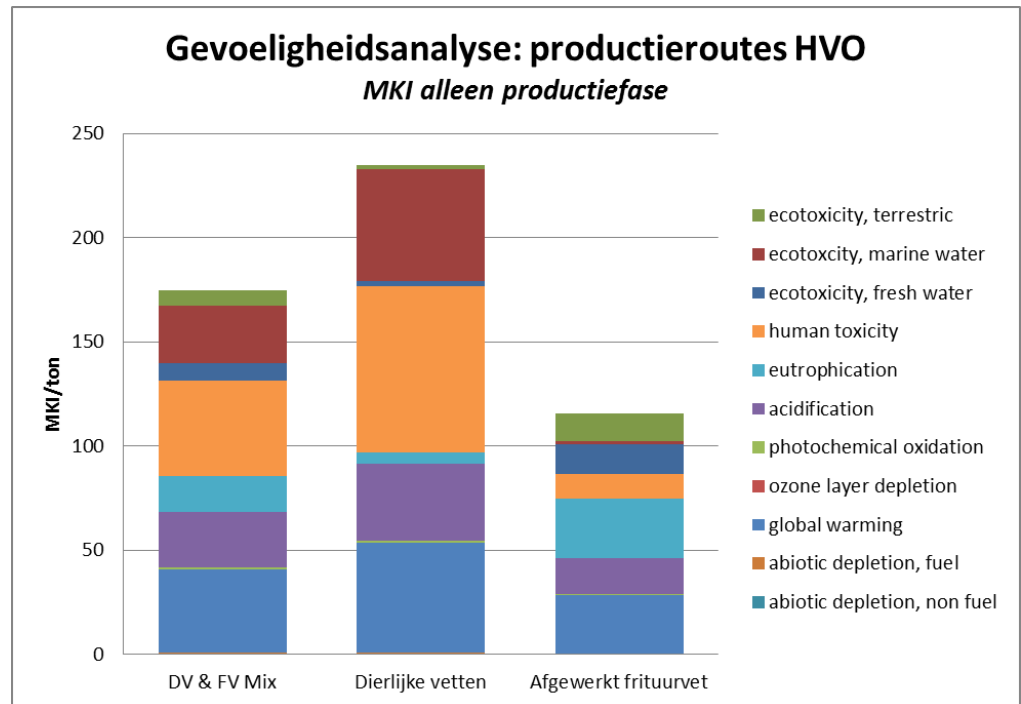
Opvallend is dat de broeikasgasuitstoot vergelijkbaar is voor beide varianten. Voor steam reforming wordt ruim de helft van de broeikasgasemissies veroorzaakt door compressie met behulp van elektriciteit. Diezelfde hoeveelheid is nodig voor compressie na elektrolyse. Daarnaast is voor de steam reforming zelf veel energie nodig. Bij elektrolyse is de energievraag ook hoog, waardoor zelfs door groene stroom een hoge CO_2 -emissie wordt veroorzaakt door productie van onder meer windturbines.



Figuur 16 Gevoeligheidsanalyse - waterstofproductieroutes – productiefase.

HVO-productieroutes

In Figuur 17 staan de milieueffecten van de productiefase van HVO voor verschillende productieroutes die in deze studie meegenomen zijn in de mix. De milieu-impact van de productie met dierlijke vetten is ongeveer twee keer zo hoog als wanneer afgewerkt frituurvet gebruikt wordt. Dit wordt vooral veroorzaakt door een hoge impact in verzuring, humane toxiciteit en mariene ecotoxiciteit, welke verband houden met de verbranding van zware stookolie. De hoge impacts door eutrofiëring in het productieproces met frituurvet wordt veroorzaakt door nitraatmissies naar water, terwijl de hoge terrestrische ecotoxiciteit wordt veroorzaakt door emissies van cypermetrine naar de bodem.

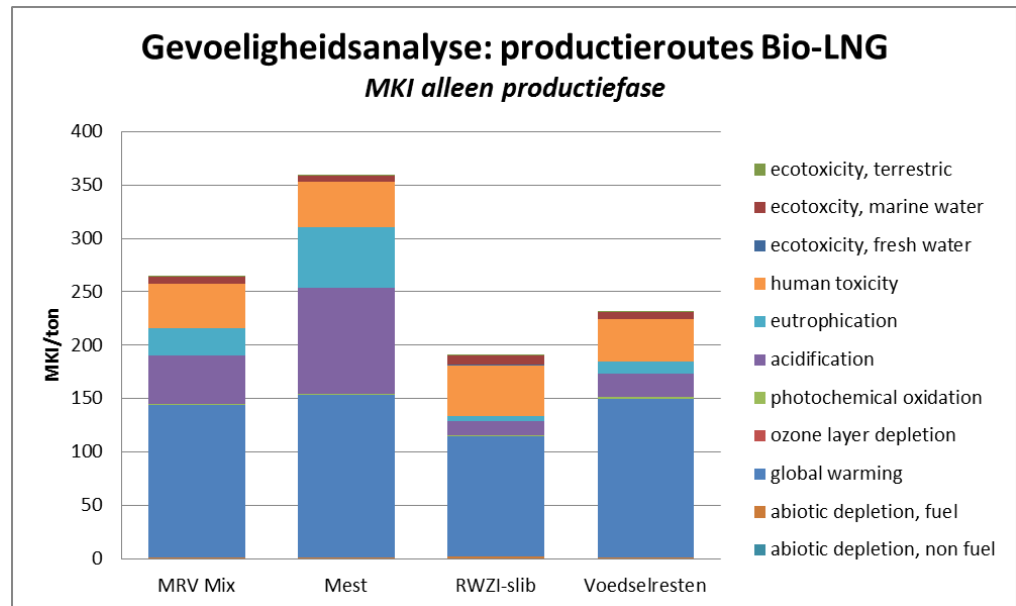


Figuur 17 Gevoeligheidsanalyse - HVO productieroutes – productiefase.

Behalve deze twee productie voorketens zijn er nog talloze andere voorketens voor HVO. Het is bekend dat de klimaat veranderende effecten sterk verschillen, en er zijn routes bij waarvan de milieu-impact hoger is in vergelijking met fossiele brandstoffen. Het milieuprofiel dat in deze rapportage is berekend is dan ook uitsluitend representatief voor HVO van vergelijkbare oorsprong.

Bio-LNG productieroutes

De verschillende productieroutes voor Bio-LNG hebben variërende impacts op het milieu, zoals te zien in Figuur 18. Vooral de productieroute via mestvergisting heeft hogere impacts dan de andere productieroutes op het gebied van verzuring en eutrofiëring, welke voornamelijk veroorzaakt worden door ammoniakemissies.

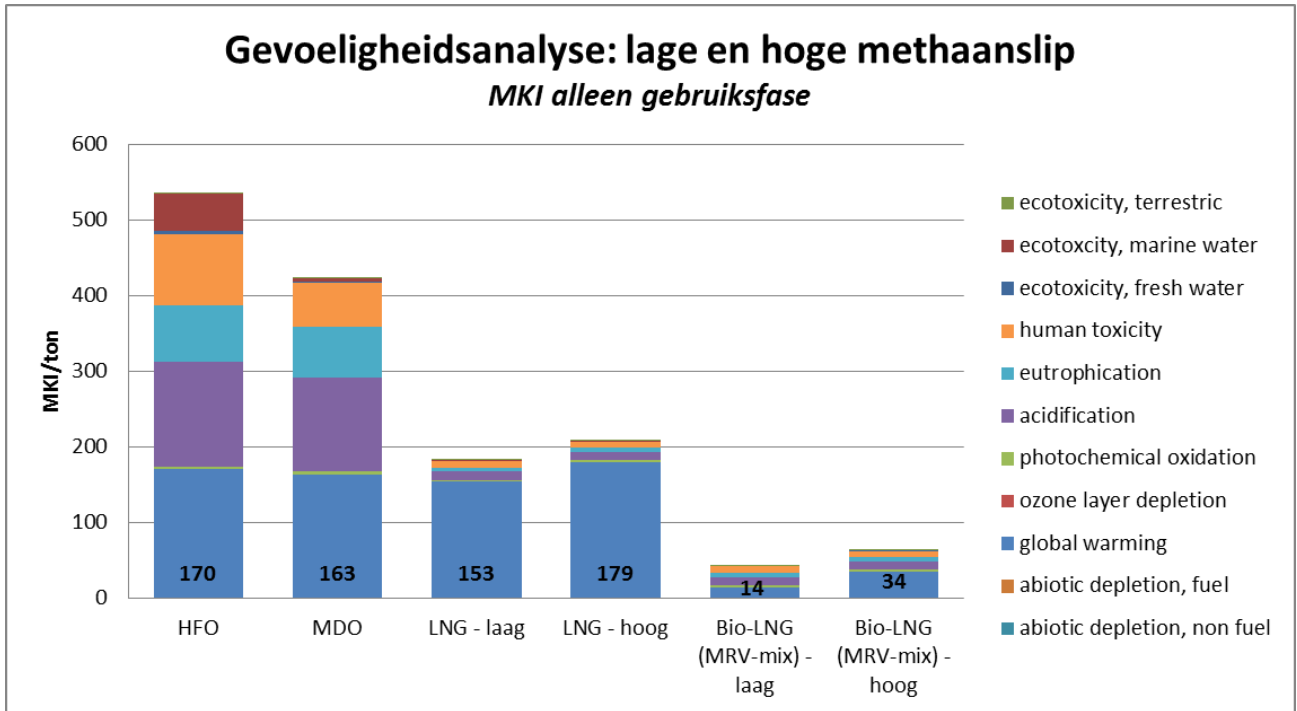


Figuur 18 Gevoeligheidsanalyse - Bio-LNG productieroutes – productiefase.

Methaanslip gebruiksfase LNG en Bio-LNG

Als we de emissiefactoren van methaan aanpassen naar 6,6 g/kg, wat haalbaar is met spark ignition motoren, of naar 27 g/kg, wat mogelijk is bij slecht afgestelde dual fuel motoren, krijgen we de resultaten zoals te zien in Figuur 19. Ter vergelijking zijn ook de gebruiksfases van HFO en MDO afgebeeld. Het valt op dat de klimaatveranderende effecten van LNG, HFO en MDO zeer dicht bij elkaar liggen. Daarnaast valt op dat LNG met een hoge methaanslip (2,7% oftewel 27 g/kg) een grotere broeikasgasemissie veroorzaakt dan HFO en MDO. Omdat LNG veel minder verzurende, vermestende en toxische emissies geeft in vergelijking met HFO en MDO is de totale MKI van de gebruiksfase van LNG lager, ook in het geval dat er relatief veel methaanslip ontstaat.

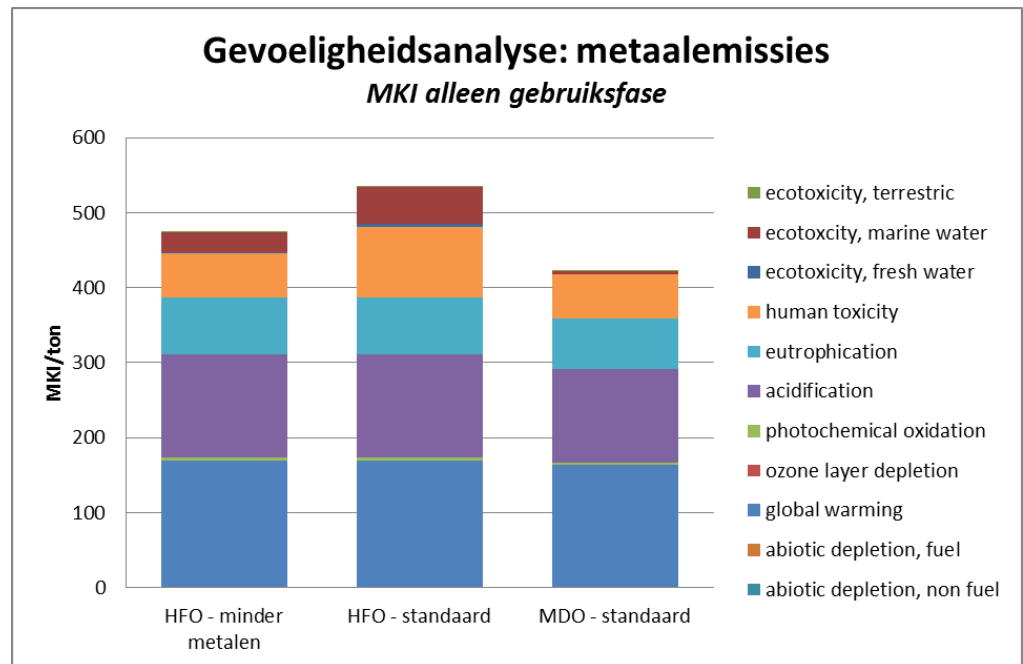
Bio-LNG heeft een lagere MKI dan gewone LNG, met name doordat CO₂ het grootste aandeel heeft in de klimaatveranderende effecten van LNG, en het bij Bio-LNG biogene CO₂-emissies betreft die kortcyclisch zijn (betrekkelijk kort geleden opgenomen uit de atmosfeer; zie paragraaf 1.4). Hoge methaanslip emissies doen het voordeel van Bio-LNG in de gebruiksfase niet teniet. De productiefase van Bio-LNG geeft echter meer milieubelasting, waardoor de totale MKI van Bio-LNG hoger is dan die van LNG.



Figuur 19 Gevoeligheidsanalyse - LNG en Bio-LNG methaanslip – gebruiksfase.

Metaalemissies HFO

Indien de concentraties metalen in HFO in de toekomst lager worden, bijvoorbeeld door toenemende ontzwaveling, zullen de milieueffecten van het gebruik van HFO ook lager worden. Figuur 20 laat zien wat het effect zou zijn van een vermindering van 50% in de metaalemissies naar lucht en water. Hoewel het effect significant is (circa 60 MKI), blijft HFO hoger scoren dan MDO.



Figuur 20 Gevoeligheidsanalyse - HFO metaalemissies – gebruiksfase.

4 Ondertekening

Naam van de opdrachtgever
Rijkswaterstaat
T.a.v. de heer Schweitzer (inhoudelijk begeleider)
Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht

Naam en functies van de medewerkers:
Drs. E.E. Keijzer,
S.N.C. Dellaert MSc
Ir. A. van Horssen
Ing. R.N. van Gijlswijk
Ir. J.H.J Hulskotte

Periode waarin het onderzoek plaatsvond
Maart 2016- mei 2016

Naam en paraaf tweede lezer



Drs. S.E. de Vos-Effting

Ondertekening



J. Jochemsen-Verstraeten
Projectleider

Autorisatie vrijgave



Ir. R.A.W. Albers MPA
Research Manager

5 Referenties

- Aabo, K. (2002). Marine Transport Fuels and Emissions. *Third Nordic-Japan Environmental Conference*.
- Aatola, H., Larmi, M., Sarjoavaara, T., & Mikkonen, S. (2008). *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine*, SAE-paper 2008-01-2500. Helsinki: SAE.
- Æsøy, V., Einang, P., Stenersen, D., Hennie, E., & Valberg, I. (2011). *LNG-fueled Engines and Fuel Systems for Medium Speed Engines in Maritime Applications*. SAE-paper 2011-01-1998. SAE.
- Anderson, M., Salo, K., & Fridell, E. (2015). Particle- and gaseous emissions from an LNG powered ship. *Environmental Science & Technology*, 12568-12575.
- Ballard. (2016, 01). Case Study – Fuel Cell Zero-Emission Transit for the City of London. Burnaby, British Columbia, Canada: Ballard Power Systems Inc.
- Bartolozzi, I., Rizzi, F., & Frey, M. (2013). Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. *Applied Energy*, 103-111.
- Bolt, E. (2003). *EMS: Inventarisatie emissies door zeescheepvaart: afvalstoffen*. Rotterdam: Adviesdienst verkeer en vervoer.
- Boustead, I. (2005). *Eco-profiles of the European Plastics Industry. CRACKER HYDROGEN*. Brussels: Plastics Europe.
- Broekman, M. (2007). *Luchtemissie van schadelijke stoffen bij zeeschepen*. Bilthoven: RIVM 609121002/2007.
- Broekman, M., Gerlofs-Nijland, M., & Swart, D. (2008). *Metingen van de luchtemissie en de samenstelling van brandstoffen op zeeschepen*. Bilthoven: RIVM 609021075/2008.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2015). *Hernieuwbare energie in Nederland 2014*. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- De Gemeynt, ECN, Groen Gas Nederland, RVO. (2014). *Routekaart hernieuwbaar gas*. Groen Gas Forum.
- den Boer, E., & 't Hoen, M. (2015). *Scrubbers: an economic and ecological assessment*. Delft: CE Delft.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Heck, T., Hellweg, S., . . . Wernet, G. (2007). *Overview and methodology. ecoinvent report no. 1*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- HHLA. (2014). *Sustainability Report 2014*. Hamburg: Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft.
- Hulskotte, J., Bolt, E., & Broekhuizen, D. (2003). *EMS-protocol Emissies door verbandingsmotoren van zeeschepen op het Nederlands Continentaal Plat*. Rotterdam: Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer.
- Hydrogenics. (2016, 05 02). *HySTAT 30 outdoor*. Opgehaald van Hydrogenics: <http://hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/industrial-hydrogen-generators-by-electrolysis/outdoor-installation/hystat-trade-30>
- JRC. (2014). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*.
- Klein, J., Molnár-in 't Veld, H., Geilenkirchen, G., Hulskotte, J., Ligterink, N., Kadijk, G., & Boer, R. d. (2015). *Methods for calculating the emissions of transport*

- in the Netherlands*. Statistics Netherlands, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, TNO & RWS Centre for Transport & Navigation (NVL).
- Klein, J., Molnár-in 't Veld, H., Geilenkirchen, G., Hulskotte, J., Ligterink, N., Kadijk, G., & de Boer, R. (2016). *Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands 2015*. Task Force on Transportation of the Dutch Pollutant Release and Transfer Register.
- Marano, J. J., & Ciferno, J. P. (2001). *Life-cycle greenhouse-gas emissions inventory for Fischer-Tropsch fuels*. US DOE.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2014). *Een duurzame brandstofvisie met LEF. De belangrijkste uitkomsten uit het SER-visietraject naar een duurzame brandstoffenmix in Nederland*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Mooij, M., Gerlofs-Nijland, M., & Swart, D. (2010). *Zeeschepen: metingen van chemische stoffen in rookgassen en brandstoffen*. Bilthoven: RIVM 609021090/2010.
- NEN. (2014). NEN-EN 15804:2012 + A1(2013). *Duurzaamheid van bouwwerken - Milieuverklaringen van producten - Basisregels voor de productgroep bouwproducten*.
- Nikander, S. (2008). *Greenhouse gas and energy intensity of product chain: case transport biofuel*. Helsinki: Helsinki University of Technology.
- Ribau, J., Silva, C., & Sousa, J. (2014). Efficiency, cost and life cycle CO₂ optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. *Applied Energy*, 320-335.
- Roijen, B. (2013). *Milieuprofielen verbranding van HFO en MDO in scheepsmotoren*. Sittard.
- Smith, T., Jalkanen, J., Anderson, B., Raucchi, C., Traut, M., Ettinger, S., . . . Pandey, A. (2014). *Third IMO GHG study*. London: International Maritime Organization (IMO).
- Steinigeweg, S., & Meyer, F. (2015). *Perspektiven und Potentiale von Low-Emission-LNG im Nordwesten*. Emden & Leer: Hochschule Emden-Leer, EUTEC Institut & Fachbereich Seefahrt.
- Stichting bouwkwiteit. (november 2014). *Bepalingsmethode milieuprestatie gebouwen en GWW-werken*. Versie 2.0 definitief.
- Verbeek, R. (2014). *Beoordeling van verontreinigende emissies met Shell GTL Fuel bij middelzware en zware voertuigen, binnenvaartschepen en mobiele machines*. Delft: TNO R10588.
- Verbeek, R., & Verbeek, M. (2015). *LNG for trucks and ships: fact analysis. Review of pollutant and GHG emissions. Final*. Delft: TNO.
- Verbeek, R., Ligterink, N., Meulenbrugge, J., Koorneef, G., Kroon, P., Wilde, H. d., . . . Aarnink, S. (2013). *Natural gas in transport*. Delft: TNO, CE Delft, ECN.
- Verbeek, R., Zyl, S. v., Grinsven, A. v., & Essen, H. v. (2014). *Factsheets Brandstoffen voor het wegverkeer. Kenmerken en perspectief. Tweede versie*. TNO & CE Delft.
- Vlasblom, W. (2007). *Designing Dredging Equipment. Lecture Notes*. Delft: Delft University of Technology.

A Appendix I: Milieuprofielen voor SBK

Deze bijlage toont de milieuprofielen voor alle onderzochte brandstoffen, zoals ingediend bij de SBK ter opname in de Nationale Milieudatabase. De milieuprofielen zijn apart bij deze rapportage gevoegd als excelbestanden; in deze bijlage wordt alleen LNG als voorbeeld getoond.

Selecteer: 'profiel' of 'profielset'	profielset productkaart
Naam 'profielset'	LNG (in baggerschip)
NMD-categorie -> selecteer!	Categorie 2
Toepassing -> selecteer!	GWW

Basisprofielen	Productie	Transport->bouw	Emissies
Fase(n) EN 15804	A1 + A2 + A3 (+ A5)	A4	B1
Naam basisprofiel	LNG (in baggerschip)	LNG (in baggerschip)	LNG (in baggerschip)
Eenheid basisprofiel -> selecteer!	kg	kg	kg
Commentaar (optioneel)	<p>Algemeen: Dit is een milieuprofiel voor productie, transport en gebruik (verbranding) van LNG in baggerschepen. Wanneer deze brandstof wordt toegepast in andere schepen zal de gebruiksfase (het emissieprofiel) anders zijn. De productie- en transportfase zijn onafhankelijk van de toepassing.</p> <p>Geografische scope: brandstofgebruik in Nederland (Noordzee).</p> <p>Temporele scope: huidige situatie (2016) tot en met circa 2025.</p> <p>Beschrijving: Liquefied Natural Gas (LNG) wordt geproduceerd door aardgas af te koelen en condenseren bij een temperatuur van circa -162 °C. Het milieuprofiel per ton is gebaseerd op LNG met een energie-inhoud (LHV) van 49 MJ/kg. Het milieuprofiel is opgesteld voor een dual fuel systeem.</p> <p>Productiefase: Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van LNG-productie in Qatar, gebaseerd op het productieproces zoals beschreven in JRC (2014).</p> <p>Transport: LNG wordt per schip vervoerd van Qatar naar Rotterdam Er is aangenomen dat LNG gebunkerd wordt in de haven van Rotterdam, en dat er voor het werk geen LNG bunkerschepen nodig zijn.</p> <p>Gebruiksfase: Door onvolledige verbranding in de motor vindt bij gebruik van aardgas in (scheeps-)motoren in meer of mindere mate methaanslip plaats. Door de sterke broeikaswerking van methaan is dit methaanslip</p>		

		<p>een belangrijke factor voor de milieu-impact van LNG-motoren. Er is verondersteld dat bij het gebruik van de kentallen de invoer van de pure brandstoffen apart zal plaatsvinden. Er is dus geen rekening mee gehouden dat LNG vrijwel altijd in combinatie met een andere brandstof (met name MDO) gebruikt zal worden.</p> <p>Infrastructuur: Als infrastructuur zijn havens, havengebruik en -onderhoud, baggerschepen en scheepsonderhoud meegenomen. Bij de scheepsmotoren is tevens het gebruik en verlies van smeerolie meegenomen, alsmede het gebruik (en emissie) van koelmiddelen voor airconditioning. Systeem-infrastructuur voor de brandstof zoals tankstations, worden in geen van de gevallen meegenomen, om consistent te zijn met de andere brandstofprofielen in de NMD.</p> <p>Meer achtergrondinformatie over dit milieuprofiel is te vinden in de TNO-rapportage 'Milieuprofielen van Scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase' (2016).</p>		
Ook opnemen in Processendatabase? -> selecteer!		Ja	Ja	Ja
Abiotic depletion, non fuel	kg antimoon eq.	4,76E-09	2,63E-09	1,95E-07
Abiotic depletion, fuel	kg antimoon eq.	2,64E-02	2,57E-03	7,02E-04
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq.	4,38E-01	3,18E-01	3,23E+00
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFK-11 eq.	3,21E-08	1,92E-09	1,74E-07
Photochemical oxidation	kg ethyleen eq.	1,69E-04	3,24E-05	1,32E-03
Acidification	kg SO2 eq.	4,98E-04	5,34E-04	2,69E-03
Eutrophication	kg PO4- eq.	1,03E-04	1,30E-04	6,61E-04
Human toxicity	kg 1,4-dichloorbenze en eq.	3,84E-02	1,52E-02	9,10E-02
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-dichloorbenze en eq.	1,51E-03	2,99E-04	7,17E-03
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-dichloorbenze en eq.	1,50E+01	1,16E+01	4,76E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-dichloorbenze en eq.	8,11E-04	2,13E-04	6,18E-03
Total renewable energy	MJ	1,08E-01	2,99E-02	6,82E-02

Total non renewable energy	MJ	5,70E+01	5,58E+00	1,66E+00
Total Energy	MJ	5,71E+01	5,61E+00	1,73E+00
Water, fresh water use	m3	9,84E-02	2,31E-01	3,85E-01
Waste, non hazardous	kg	5,32E-03	2,36E-03	2,42E-02
Waste, hazardous	kg	3,34E-02	7,55E-02	2,08E-01

B Appendix II: Milieuprofielen in MKI's

De MKI's van de levensfasen van alle brandstoffen zijn getoond in Tabel 34 tot en met Tabel 40. Deze resultaten zijn besproken en vergeleken in paragraaf 3.1.

Tabel 34 MKI van de levenscyclus van 1 ton HFO.

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	3,7	0,0	0,1	3,8
GWP-100j	21,4	0,2	169,7	191,3
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	1,7	0,0	4,0	5,7
AP	21,8	0,1	137,7	159,5
EP	8,0	0,0	74,8	82,9
HTP	62,1	0,1	95,3	157,5
FAETP	0,8	0,0	3,1	4,0
MAETP	24,0	0,0	49,7	73,7
TETP	0,2	0,0	2,0	2,2
MKI totaal	143,8	0,5	536,4	680,7

Tabel 35 MKI van de levenscyclus van 1 ton MDO.

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	3,8	0,0	0,1	3,9
GWP-100j	24,2	0,2	163,0	187,5
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	1,8	0,0	3,9	5,7
AP	23,5	0,1	124,5	148,1
EP	8,3	0,0	67,1	75,4
HTP	64,0	0,1	58,6	122,7
FAETP	0,9	0,0	1,0	1,8
MAETP	24,7	0,0	3,9	28,7
TETP	0,2	0,0	1,0	1,2
MKI totaal	151,4	0,5	423,2	575,1

Tabel 36 MKI van de levenscyclus van 1 ton GTL.

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	5,2	0,1	0,1	5,4
GWP-100j	74,0	5,1	163,4	242,6
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	0,4	0,2	3,1	3,7
AP	2,3	9,1	104,4	115,9
EP	1,1	2,8	60,5	64,4
HTP	15,8	10,1	19,2	45,1
FAETP	0,1	0,0	0,7	0,8
MAETP	0,8	0,9	0,5	2,2
TETP	0,1	0,0	0,4	0,5
MKI totaal	99,9	28,4	352,3	480,6

Tabel 37 MKI van de levenscyclus van 1 ton HVO (DV & FV-mix).

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	0,8	0,0	0,1	0,9
GWP-100j	40,1	1,9	6,9	49,0
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	0,8	0,1	3,0	3,8
AP	26,8	0,8	104,4	132,1
EP	17,2	0,4	60,5	78,0
HTP	45,8	1,0	19,2	66,0
FAETP	8,4	0,0	0,7	9,0
MAETP	27,4	0,2	0,5	28,1
TETP	7,5	0,0	0,4	7,9
MKI totaal	174,7	4,5	195,7	374,9

Tabel 38 MKI van de levenscyclus van 1 ton LNG.

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	4,2	0,4	0,1	4,8
GWP-100j	21,9	15,9	161,5	199,4
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	0,3	0,1	2,6	3,0
AP	2,0	2,1	10,8	14,9
EP	0,9	1,2	6,0	8,0
HTP	3,5	1,4	8,2	13,1
FAETP	0,1	0,0	0,2	0,3
MAETP	1,5	1,2	0,5	3,2
TETP	0,0	0,0	0,4	0,4
MKI totaal	34,4	22,3	190,4	247,1

Tabel 39 MKI van de levenscyclus van 1 ton Bio-LNG (MRV-mix).

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	1,4	0,0	0,1	1,5
GWP-100j	142,2	2,1	20,3	164,5
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	1,3	0,0	2,6	4,0
AP	45,6	0,4	10,8	56,8
EP	25,0	0,2	6,0	31,1
HTP	42,2	0,5	8,2	51,0
FAETP	0,2	0,0	0,2	0,4
MAETP	6,7	0,1	0,5	7,3
TETP	0,6	0,0	0,4	1,0
MKI totaal	265,1	3,4	49,2	317,7

Tabel 40 MKI van de levenscyclus van 1 ton waterstof.

Milieueffect-categorie	A1-A3 Productiefase	A4 Transport naar gebruiker	B1 Gebruiksfase	Totaal (hele levenscyclus)
ADP-elementen	0,0	0,0	0,0	0,0
ADP-brandstof	5,8	0,0	0,1	5,9
GWP-100j	172,7	0,0	7,0	179,7
ODP	0,0	0,0	0,0	0,0
POCP	2,4	0,0	0,5	2,9
AP	28,2	0,0	22,7	50,9
EP	16,9	0,0	1,3	18,2
HTP	173,4	0,0	16,6	189,9
FAETP	0,5	0,0	0,6	1,1
MAETP	15,6	0,0	1,6	17,2
TETP	2,9	0,0	0,0	2,9
MKI totaal	418,3	0,0	50,4	468,7

C Appendix III: Review statement



Plantage Muidergracht 24
P.O. Box 18180
1001 ZB Amsterdam
The Netherlands

tel +31 (0)20 525 5080
E-mail: office@ivam.uva.nl
www.ivam.uva.nl

Rijkswaterstaat
Water, Verkeer en Leefomgeving

Betreft: toetsing LCA Milieuprofiel scheepsbrandstoffen

Amsterdam, 20 mei 2016

IVAM heeft het LCA rapport "Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase" (versie 3 van 19 mei 2016; met Excel bijlagen), opgesteld door TNO - Earth, Life & Social Sciences in opdracht van Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving, TNO-Projectnummer 060.21917, op 20 mei 2016 finaal getoetst. Dit na toetsing van versie 2 in eerste ronde op 12 mei 2016.

De toetsing is door IVAM conform de opdracht uitgevoerd aan de hand van de Bepalingsmethode Milieuprestatie van Gebouwen en GWW werken, versie november 2014 (onderliggend o.m. EN 15804) en het 'SBK Toetsingsprotocol opname data in de nationale milieudatabase' versie november 2014.

Het rapport beschrijft helder en bondig de uitgangspunten, de modellering en de resultaten.

Onze conclusie luidt:

De methodologie, dataverzameling en rapportage voldoen aan de eisen van de "Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken" van november 2014, met onderliggende normen ISO 14040/44, ISO 14025, ISO 21930 en EN 15804. Daarmee kan het resultaat worden aangeboden aan de Nationale Milieudatabase (NMD) en worden gebruikt in DuboCalc.

Met vriendelijke groet,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Harry van Ewijk', written over a thin horizontal line.

Ir Harry van Ewijk
IVAM UvA BV