

**Circular, Economy &
Environment**Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport**TNO 2021 R11430a****Update milieuprofielen van
scheepsbrandstoffen ten behoeve van
opname in de Nationale Milieudatabase;
Deel A: fossiele brandstoffen**

Datum	23 maart 2022
Auteur(s)	Tim van der Kruk Mark Bolech
Aantal pagina's	61
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	MKI scheepsbrandstoffen als toekomstige BPKV-criterium
Projectnummer	060.40625

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.

© 2022 TNO

Samenvatting

Ten behoeve van duurzaam inkopen heeft RWS TNO gevraagd om milieuprofielen op te stellen voor de productie van een aantal brandstoffen en voor de toepassing ervan in baggerschepen op de Noordzee en in Nederlandse havens.

Het betreft hierbij een update van een eerder uitgebrachte rapportage in 2016, TNO-R10662 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016). De brandstoffen die in deze update zijn meegenomen zijn:

- MGO (Marine Gas Oil)
- LNG (Liquefied Natural Gas)
- HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)

RWS voorziet in een update van deze rapportage. De LCA voor biobrandstof is hierin niet opgenomen. Vanwege verschillende EU-normen is nader onderzoek nodig voor de toekomstige omgang met LCA-berekeningen voor biobrandstof. De uitkomst daarvan zal resulteren in een update van een LCA-rapportage.

Voor MGO is hierbij onderscheid gemaakt tussen drie verschillende motortypen die typisch op baggerschepen worden ingezet, namelijk:

- Een van net voor de invoering van IMO tier I (uit 1997, ongeveer de mediaan van de Nederlandse baggervloot), hierna “pré Tier I” genaamd.
- Een van vergelijkbaar motorvermogen (in totaal 3,4 MW), maar veel moderner, IMO tier II (uit 2018).
- Een van een pré Tier I motor in combinatie met (retrofit) SCR (Selective Catalytic Reduction), waardoor de motor voldoet aan de Tier III limiet.

Deze drie combinaties van brandstof en motortypen zijn gekozen omdat deze combinaties veel worden toegepast. De milieu-impact verschilt afhankelijk van inzet in een ouder of nieuwer motortype en het al dan niet gebruik van SCR. Voor LNG gaat het slechts één profiel, namelijk de toepassing in een dual-fuel motor, waarbij 80% LNG en 20% MGO als pilot-fuel wordt ingezet. In het vervolg van deze rapportage wordt er met het LNG profiel altijd de mix van 80% LNG en 20% MGO bedoeld. De gekozen motorisering markeert in zekere zin een “slechtste geval”. Wanneer een grotere of modernere dual-fuel motor wordt ingezet is een lagere klimaat- en milieu-impact haalbaar.

De bovenstaande brandstofprofielen zijn onderdeel van de reikwijdte van deze studie, die is afgestemd met Rijkswaterstaat. Profielen voor de brandstoffen, HFO, GTL, waterstof en Bio-LNG, die in de eerder uitgebrachte rapportage wél waren opgenomen, zijn buiten beschouwing gelaten in deze studie, evenals de toepassing in andere verbrandingsmotoren dan de bovengenoemden.

Bij publicatie van deze rapportage vervallen de milieuprofielen voor MDO en LNG uit de vorige rapportage R10662. MDO wordt dus vervangen door MGO. Het gebruik van de resultaten voor scheepsbrandstoffen (baggerschepen) in andere landen dan Nederland en andere toepassingen wordt afgeraden, omdat de representativiteit niet geborgd kan worden. Bij toepassing in andere motoren met andere belastingen ontstaan andere emissies en dus zal het milieuprofiel in die situaties afwijken.

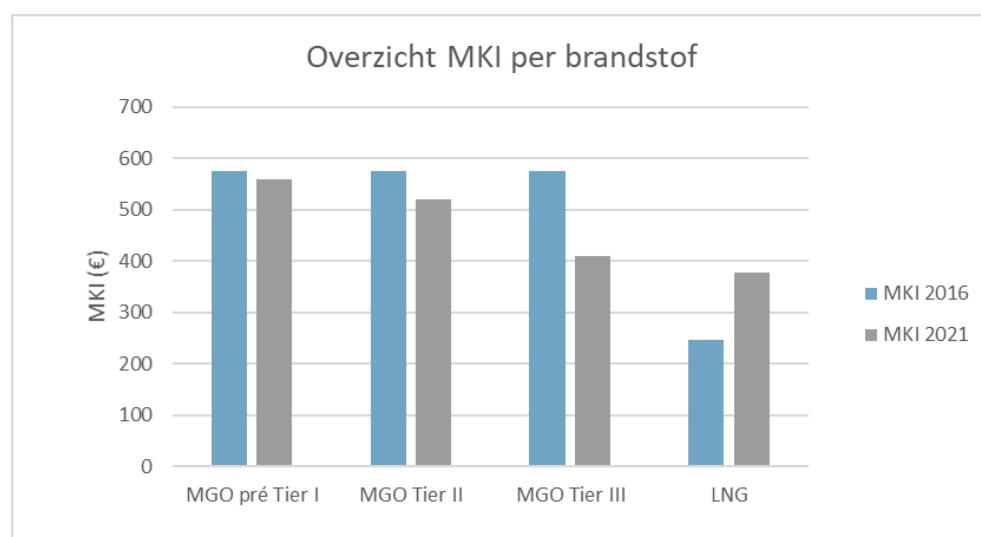
De milieuprofielen zijn berekend middels een levenscyclusanalyse (LCA) op basis van de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. Deze LCA-methode geeft een breed inzicht in verschillende milieu-thema's, waarmee een reductie van de impact op het milieu én klimaat kan worden gestimuleerd.

De milieuprofielen in deze rapportage zijn zogenaamde categorie 3 data; merkongebonden data (merkloos), in eigendom en beheer van Stichting NMD en niet getoetst volgens het NMD Toetsingsprotocol. Deze rapportage is wel getoetst volgens het NMD toetsingsprotocol, om een hogere kwaliteit te garanderen. Dit sluit aan bij de wens van RWS om goede kwaliteit categorie 3 data beschikbaar te hebben. Bij wijzigingen in de externe (bijv. ecoinvent) databases kunnen de profielen eenvoudig in de NMD worden aangepast.

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 projectspecifieke milieulast berekenen.

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, in een tijd van krachtig streven naar verduurzaming door de maritieme sector en wet- en regelgeving (WWF & IMO, 2021), (The European commission, 2021). Voor iedere onderzochte brandstof is het meest waarschijnlijke productieprofiel vastgesteld voor brandstoffen zoals aangeboden op de Nederlandse markt.

In Figuur 1 wordt er een vergelijking gemaakt tussen de vier milieuprofielen voor de brandstoffen die in deze studie zijn opgesteld met de overeenkomende brandstoffen uit het TNO-rapport R10662.



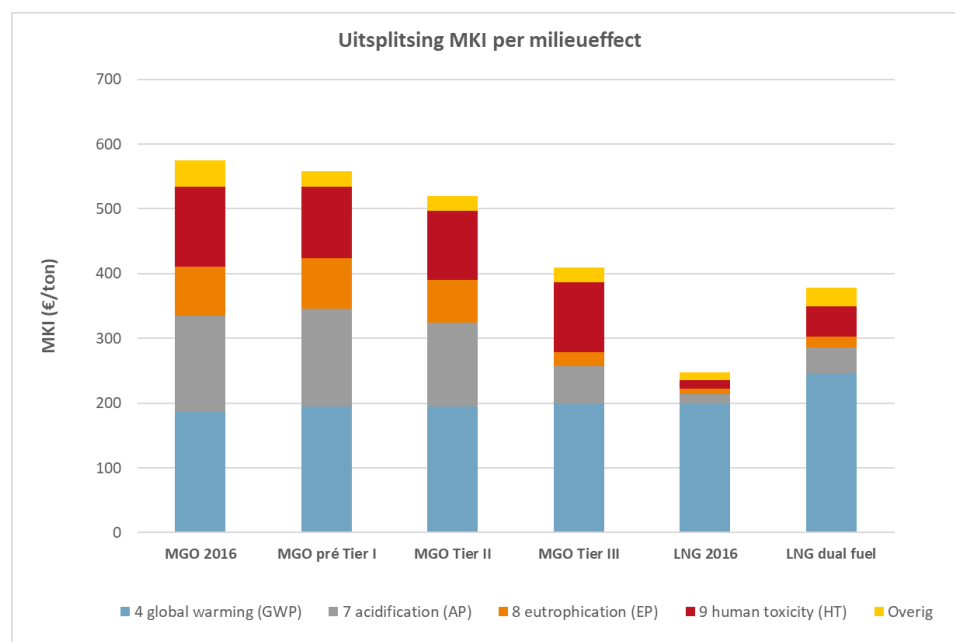
Figuur 1: Overzicht van de MKI per ton brandstof en vergelijking met het TNO-rapport R10662 uit 2016. NB: in 2016 werd slechts 1 profiel voor MGO opgesteld, en geen onderscheid gemaakt tussen Pré Tier I en Tier II.

Voor MGO pré Tier I en Tier II zijn de verschillen relatief klein. Het kleine verschil is met name te verklaren doordat Tier II motoren iets gunstiger uitvallen dan het gemiddelde profiel uit het TNO-rapport R10662. Het Tier III profiel valt substantieel lager uit dan het Tier II profiel, vanwege de aanzienlijk verlaagde uitstoot van NO_x.

Voor LNG zijn de verschillen ten opzichte van de vorige rapportage aanzienlijk, wat te maken heeft met de volgende twee punten:

- Er zijn nieuwe inzichten uit 2019 over de methaanslip (methaan dat vrij komt bij onvolledige verbranding van LNG) bij de verbranding van LNG in een dual-fuel motor. Deze is ongeveer 190% hoger dan dat er in 2016 aangenomen werd (toen 13,3 kg, nu 38,9 kg per ton brandstof). Deze nieuwe inzichten zijn gebaseerd op de publicatie van Ushakov, Stenersen en Einang (Ushakov & Stenersen, 2019). Deze publicatie is momenteel het beste met data onderbouwde overzicht over methaanslip dat beschikbaar is.
- De winning van aardgas is in deze studie veel representatiever gemaakt voor LNG in Europese context. Waar er in 2016 werd gewerkt met winning in Qatar wordt er nu met verschillende winningslocaties gewerkt, overeenkomstig met herkomstlocaties van LNG in Europa. Dit veroorzaakt een hogere impact dan in de vorige studie verondersteld werd, doordat het type aardgas en daarmee de MKI van winning van aardgas sterk varieert tussen winningslocaties. Daarnaast variëren de transportafstanden van de winningslocaties naar Nederland sterk.

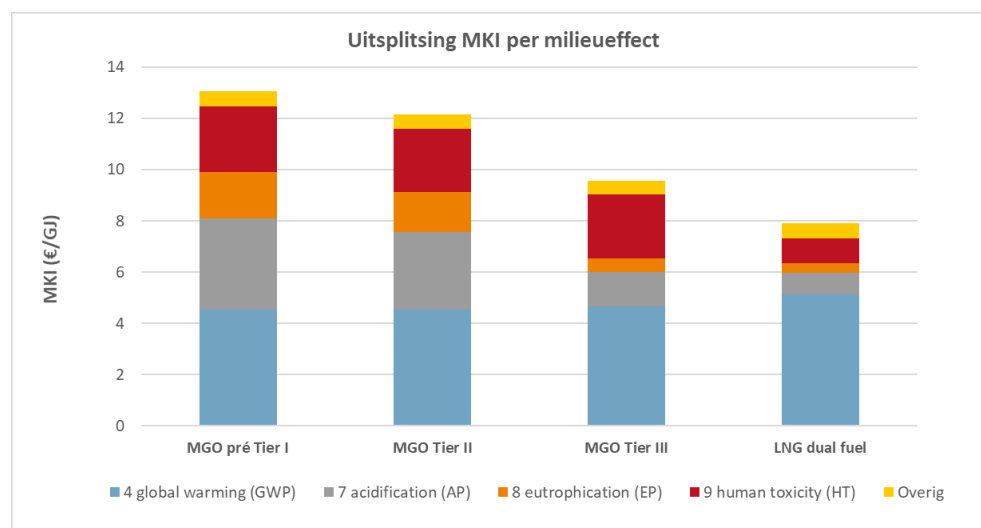
In onderstaande figuur zijn nogmaals de profielen uit het TNO-rapport R10662 en de profielen uit deze studie weergegeven, maar ditmaal uitgesplitst per milieueffect. Het valt op dat het LNG-profiel (met 20% MGO) over de gehele levenscyclus een hoger klimaatveranderend effect heeft dan MGO, deels veroorzaakt door de hogere emissie van methaan. Verder scoort het LNG-profiel het laagst op verzuring en vermesting.



Figuur 2: Uitsplitsing van de MKI per ton brandstof per milieueffect.

In vergelijking met het TNO-rapport R10662 blijven de milieueffecten die veel bijdragen aan de totale MKI min of meer gelijk, met uitzondering van LNG: Voor LNG gaat de bijdrage van human toxicity, verzuring, vermisting en global warming significant omhoog (>20% stijging voor global warming, >100% stijging voor de overige effecten). Belangrijk om hierbij op te merken is dat in het TNO-rapport R10662 gewerkt werd met 100% LNG, waar er in deze studie gewerkt wordt met 80% LNG en 20% MGO.

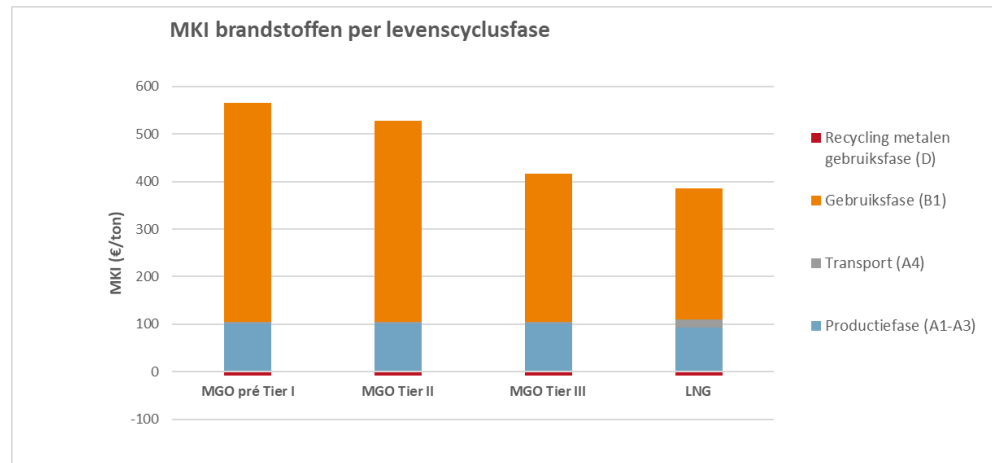
Aangezien de brandstoffen enigszins verschillen in calorische waarde (42,8 tot 49 MJ/ton), zal de vergelijking van de milieu-impacts van de brandstoffen per hoeveelheid geleverde energie licht afwijken van het beeld in bovenstaande grafiek (per ton). Daarom wordt de MKI over de gehele levenscyclus ook per GJ weergegeven in onderstaande grafiek. De verhoudingen tussen de brandstoffen verschillen nauwelijks, maar LNG komt per GJ relatief nog iets lager uit dan per ton brandstof. Omdat alleen de verhouding tussen de verschillende brandstoffen, en niet de verhouding tussen de waarden uit 2016 en deze nieuwe studie zal afwijken, worden de waarden uit 2016 niet getoond.



Figuur 3: Uitsplitsing MKI per milieueffect per GJ brandstof.

Zoals Figuur 4 laat zien, zijn de impacts bij de verschillende brandstoffen op vergelijkbare wijze over de levensfasen verdeeld: het grootste deel van de milieueffecten ligt in de gebruiksfase. Het transport van de brandstof naar de gebruiker (A4) heeft bij alle brandstoffen geen significante impact (<5%).

Het recyclen van de metalen uit het baggerschip na de einde levensduur zorgt ervoor dat er een negatieve MKI optreedt in module D. Dit is het gevolg van het doorgeven van een netto hoeveelheid secundair materiaal aan een nieuwe levenscyclus. Deze netto hoeveelheid kent een grondstofequivalent, waarmee bepaald wordt wat de vermeden productie van primair materiaal is. De bijdrage van module D aan de totale MKI is klein (<5%) en compenseert deels de MKI gerelateerd aan de productie van de kapitaalgoederen.



Figuur 4: Uitsplitsing MKI per levenscyclusfase per ton brandstof.

In deze studie zijn twee gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de onderzochte onzekerheden voor MGO en LNG weinig invloed hebben op de resultaten (respectievelijk <1% en <5%).

De resultaten van deze studie veroorzaken significante wijzigingen (>10%) ten opzichte van de vorige studie (Verstraeten-Jochems, 2016). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door updates in de gehanteerde databases en methaanslip in LNG-schepen. De nieuwe resultaten bieden beter inzicht in de gevoeligheden en bepalende factoren in de milieuprestatie van de verschillende brandstoffen. De resultaten uit de voorgaande studie dienen niet meer gebruikt te worden, omdat ze zowel qua methodiek, database als datakwaliteit sterk verouderd zijn.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Onderwerp van deze studie.....	8
1.3	Opzet van de rapportage	9
2	Doel en reikwijdte	11
2.1	Doel en doelgroep	11
2.2	Omschrijving brandstoffen	11
2.3	Rekeneenheid.....	13
2.4	Berekeningsprocedures en standaarden.....	13
2.5	Effectbeoordeling	14
2.6	Allocatie	16
2.7	Reikwijdte	16
3	Levenscyclusinventarisatie	21
3.1	MGO (pré Tier I en Tier II)	21
3.2	MGO (Tier III).....	26
3.3	LNG.....	28
3.4	Kapitaalgoederen & hulpmiddelen voor gebruiksfase	35
4	Effectbeoordeling	41
4.1	Milieueffecten.....	41
4.2	Levenscyclusfasen	42
5	Interpretatie	44
5.1	Zwaartepuntanalyse	44
5.2	Gevoeligheidsanalyses.....	45
5.3	Vergelijking met voorgaande onderzoek	47
6	Ondertekening	49
7	Bibliografie	50
	Bijlage(n)	
	A Appendix I: Gekarakteriseerde milieueffecten op basis van set 1 (Bepalingsmethode)	
	B Appendix II: MKI	
	C Appendix III: Gekarakteriseerde milieueffecten op basis van set 2 (EN 15804/A2:2019)	
	D Appendix III: Review statement	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS) en is een update van de eerder uitgebrachte rapportage “Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase” (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016). De belangrijkste aanleidingen voor deze update zijn het actualiseren van de gebruikte rekenmethodes, databases en achtergronddata.

RWS voorziet in een update van deze rapportage. De LCA voor biobrandstof is hierin niet opgenomen. Vanwege verschillende EU-normen is nader onderzoek nodig voor de toekomstige omgang met LCA-berekeningen voor biobrandstof. De uitkomst daarvan zal resulteren in een update van een LCA-rapportage.

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. Ten behoeve van duurzaam inkopen heeft RWS TNO gevraagd om milieuprofielen te actualiseren van een aantal (scheeps)brandstoffen. Dit rapport heeft betrekking op het bepalen van de MKI (het milieuprofiel) van (scheeps)brandstoffen in lijn met 'Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken, versie 1.0 (juli 2020)' (Milieudatabase, 2020a).

1.2 Onderwerp van deze studie

Deze rapportage beschrijft de milieu-impact gerelateerd aan het gebruik van twee scheepsbrandstoffen voor toepassing in baggerschepen op de Noordzee, te weten:

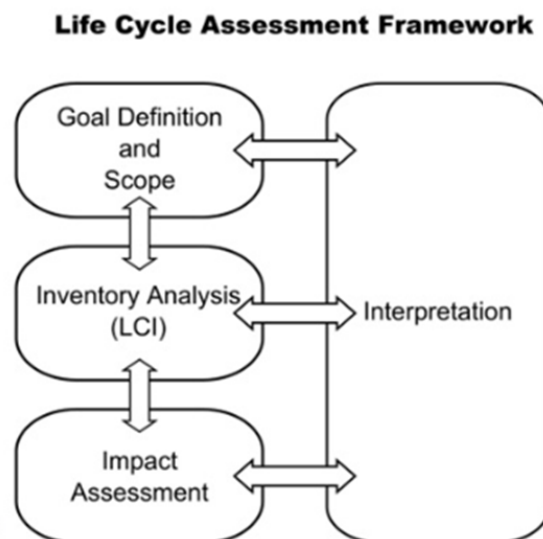
- Marine Gas Oil (MGO): een fossiele brandstof die veel lijkt op diesel. Deze brandstof wordt in meer detail toegelicht in paragraaf 2.2.1.
- Liquefied Natural Gas (LNG): een fossiele brandstof die verkregen wordt door aardgas te koelen, waardoor het vloeibaar wordt. In deze studie wordt er gewerkt met een profiel dat representatief is voor 80% LNG en 20% MGO in een dual-fuel motor, omdat het niet mogelijk is om deze twee brandstoffen los van elkaar te beschouwen qua verbrandingsemissies. Bij toepassing in een dual-fuel motor worden deze brandstoffen namelijk altijd gecombineerd ingezet. In paragrafen 2.2.2 en 2.7.2. wordt uitgelegd waarom deze motor is gekozen.

In paragraaf 2.2 worden deze brandstoffen in meer detail beschreven.

Er is in oktober 2020 in overleg met RWS prioriteit gegeven aan profielen voor de brandstoffen MGO, HVO en LNG. Profielen voor de brandstoffen HFO, GTL, waterstof en Bio-LNG, die in de eerder uitgebrachte rapportage wél waren opgenomen, zijn daarom buiten beschouwing gelaten in deze studie, evenals de toepassing in andere verbrandingsmotoren dan de bovengenoemden. Bij publicatie van deze rapportage vervallen de milieuprofielen voor MDO en LNG uit de vorige studie (Jochemsen-Verstraeten et al. 2016).

1.3 Opzet van de rapportage

Deze rapportage volgt de structuur van een LCA, zoals gespecificeerd door de ISO 14040, die uiteenvalt in vier fasen (Nederlands Normalisatie-instituut (NEN), 2006). Deze vier fasen zijn weergegeven in Figuur 5. Globaal bestaat een LCA uit (1) het vaststellen van het doel en de reikwijdte, (2) de inventarisatiefase: kwantificering van inputs en outputs in functionele eenheden en binnen de scope die is vastgelegd in de vorige stap, (3) vertalen van inventarisatie en naar milieueffecten en eventuele normalisatie en weging van resultaten, en (4) Interpretatie, waaronder het opstellen van evaluatie en conclusies. Deze vier hoofdonderdelen vormen elk een hoofdstuk in deze rapportage.



Figuur 5: Standaardprocedure in Life Cycle Assessment.

De onderhavige rapportage is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 1 is de aanleiding, een overzicht van de beschouwde brandstoffen en de opzet van dit rapport beschreven. Hoofdstuk 2 beschrijft het doel en de reikwijdte van deze studie. Hieronder vallen een beschrijving van het doel en de doelgroep (2.1), een globale beschrijving van de brandstoffen (2.2), de rekeneenheid (2.3), de standaarden en rekenprocedures die gevolgd zijn (2.4), Een uitleg van manier waarop effectbeoordeling plaatsvond (2.5), allocatieprocedures (2.6) en de reikwijdte van de studie, met aandacht voor geografische, temporele, technologische relevantie, datakwaliteit en de systeemgrenzen (2.7).

Hoofdstuk 3 beschrijft de verzamelde data, berekeningen en gekozen referenties uit milieudatabases. In hoofdstuk 4 worden de belangrijkste resultaten weergegeven en de verschillende brandstoffen met elkaar vergeleken. In hoofdstuk 5 worden de resultaten geïnterpreteerd, en wordt er gereflecteerd of de studie goed is uitgevoerd en de vier verschillende levenscyclusstappen uit Figuur 5 correct met elkaar samenhangen. Een onderdeel hiervan is de zwaartepuntanalyse, die onderzoekt waar de impacts door veroorzaakt worden, en een gevoeligheidsanalyse, die toetst in welke mate belangrijke aannames invloed hebben op de resultaten en conclusies.

Appendix A t/m C bevatten de gekarakteriseerde milieuprofielen volgens set 1 (SBK bepalingmethode), de gewogen milieuprofielen tot MKI en de gekarakteriseerde milieuprofielen volgens set 2 (EN 15804+A2). In Appendix D is het verslag van de reviewer opgenomen.

2 Doel en reikwijdte

2.1 Doel en doelgroep

Deze studie behelst het actualiseren van de MKI (het milieuprofiel) van drie brandstoffen voor toepassing in baggerschepen op de Noordzee en in Nederlandse havens die reeds zijn opgenomen in de Nationale Milieudatabase (NMD), te weten:

- Marine Gas Oil (MGO)
- Liquefied Natural Gas (LNG)
- Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)

De resultaten van de studie komen in twee delen beschikbaar. Deze rapportage betreft het eerste deel, waarin de fossiele brandstoffen MGO en LNG aan bod komen. De resultaten voor de biobrandstof HVO worden in een afzonderlijke rapportage uitgediept.

De resultaten kunnen worden gebruikt door zowel RWS als andere partijen voor het bepalen van de milieueffecten 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 alle brandstoffen in deze rapportage is het milieuprofiel berekend voor de toepassing van brandstoffen in baggerschepen die ingezet worden op de Noordzee. De milieuprofielen in deze rapportage zijn zogenaamde categorie 3 data; merkongebonden data (merkloos), in eigendom en beheer van Stichting NMD als proceskaarten in de processendatabase en niet getoetst volgens het NMD Toetsingsprotocol. Deze rapportage is wel getoetst volgens het NMD toetsingsprotocol, om een hogere kwaliteit te garanderen. Dit sluit aan bij de wens van RWS om goede kwaliteit categorie 3 data beschikbaar te hebben. Bij wijzigingen in de externe (bijv. ecoinvent) databases kunnen de profielen eenvoudig in de NMD worden aangepast. Daarmee zijn deze milieuprofielen geschikt om gebruikt te worden in milieuberekeningen voor Nederlandse Bouw- en GWW-projecten, bijvoorbeeld aan de hand van DuboCalc.

Bij publicatie van deze rapportage vervallen de milieuprofielen voor MDO en LNG uit de vorige studie (Jochemsen-Verstraeten et al. 2016).

2.2 Omschrijving brandstoffen

De brandstofprofielen die binnen de reikwijdte van deze rapportage vallen (MGO en LNG) worden in deze paragraaf nader omschreven.

2.2.1 MGO

Marine Gasoil (MGO) is een brandstof verkregen door destillatie van aardolie, die veel lijkt op diesel voor wegtransport, maar heeft een hogere dichtheid en lower heating value. MGO wordt veel ingezet in de buurt van kustgebieden in Europa en wordt daarmee ook veel gebruikt bij baggerschepen. De LHV bedraagt 42,8 MJ / kg en is, samen met andere specificaties, vastgelegd in de ISO norm 8217 (International Organization for Standardization, 2017).

Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van MGO met een laag zwavelgehalte van maximaal 0,1 m% (IMO, 2020). In deze studie is gerekend met een (gemiddeld) zwavelgehalte van 700 ppm (m/m). MGO met een hoger zwavelgehalte mag sinds het instellen van de SECA's (Sulphur Emission Control Area's) niet gebruikt worden zonder scrubber en is daarom geen realistische optie om te onderzoeken. Voor de productielocatie van MGO wordt in deze studie uitgegaan van Rotterdam.

Er worden drie profielen opgesteld in deze studie: één voor een oudere pré-Tier I motor, één voor een nieuwere Tier II motor en één voor een pré Tier I motor in combinatie met SCR om aan de Tier III limiet te voldoen. Hiermee wordt het oude profiel voor MDO uit de voorgaande studie vervangen.

2.2.2 LNG

Liquefied Natural Gas (LNG) wordt geproduceerd door aardgas af te koelen en te condenseren bij een temperatuur van circa -162 °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 en een dichtheid van 0,428 kg/dm³ (The Engineering Toolbox, n.d.).

Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van een combinatie van LNG en MGO met 80% LNG en 20% MGO, omdat LNG meestal in een zogenoemde dual-fuel motor wordt ingezet. Dat is een speciaal op LNG ingeregelde dieselmotor, waarbij op lage toeren (en bij het starten) MGO als een zogenoemde pilot-fuel wordt gebruikt, terwijl bij hogere toerentallen de motor vrijwel volledig op vloeibaar gas loopt. LNG kan in dit soort motoren dus alleen in combinatie met een pilot-fuel worden toegepast. Omdat 80% LNG en 20 % MGO in 'kleinere' dual-fuel motoren (typisch in de binnenvaart) het meest gangbaar is, en de verbrandingsemissies ook voor die combinatie van brandstoffen gemeten wordt (en dus niet zomaar los te koppelen zijn), is ervoor gekozen om een profiel voor deze combinatie (die in zekere zin als *worst case* kan gelden) op te stellen, in plaats van een profiel voor 100% LNG. Er bestaan inmiddels moderne dual-fuel motoren die nog maar luttele procenten pilot-fuel nodig hebben (Pavlenko et al., 2020). De verbrandingsemissies zijn ook voor die situatie alleen te bepalen voor die specifieke combinatie van de twee brandstoffen. In deze studie worden er geen andere verhoudingen dan 80% LNG en 20% MGO beschouwd.

In de dataverzameling zal extra aandacht worden besteed aan methaanemissies. Door onvolledige verbranding in de motor vindt bij gebruik van LNG in (scheeps-) motoren in meer of mindere mate methaanslip plaats. Door de sterke broeikaswerking van methaan is dit methaanslip (methaan dat vrij komt bij onvolledige verbranding van LNG) een belangrijke factor voor de milieu-impact van LNG-motoren. In geval een schip een heel moderne motor heeft waarbij eventuele methaanslip wordt omgezet in CO₂, bijvoorbeeld door middel van een Methane Oxidation Catalyst, is waarschijnlijk een beter emissieprofiel van toepassing dan dat voor LNG, dat in dit rapport wordt gepresenteerd. Verder wordt er uitgegaan van aardgaswinning en LNG-productie in verschillende landen, die samen het grootste gedeelte van de Europe LNG import omvatten (Zimmer & Choukatli, 2019). De LNG wordt vervolgens per (LNG-)tanker vervoerd naar Rotterdam. Het LNG profiel uit deze studie vervangt het oude profiel voor LNG uit de voorgaande studie. In het TNO-Rapport R10662 werd er ook een profiel opgesteld voor Bio-LNG. Hoewel er daarvan nog weinig geproduceerd wordt, is Bio-LNG een nieuwe ontwikkeling die potentieel de CO₂-uitstoot verder kan beperken.

2.3 Rekeneenheid

Deze rapportage beschrijft de milieu-impact van (scheeps)brandstoffen per ton brandstof, toegepast in een baggerschip. 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 projectspecifieke 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.

2.4 Berekeningsprocedures en standaarden

De berekeningsprocedures van deze studie zijn gebaseerd op de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken v1.0 (hierna te noemen "de Bepalingsmethode"), en daarmee indirect op de NEN-EN 15804:2019 +A2 (Nederlands Normalisatie-instituut (NEN), 2019). Expliciet zijn de volgende procedures gehanteerd:

- De milieu-impacts zijn gekarakteriseerd met de methoden die beschreven zijn in de Bepalingsmethode. Dit houdt in dat de resultaten worden bepaald aan de hand van twee sets impactcategorieën. Voor set 1 is de EN 15804/A1:2013 van kracht. Voor set 2 is de EN 15804/A2:2019 van kracht.
- De input- en outputdata is zoveel mogelijk gebaseerd op de gemiddelde praktijksituatie van de brandstoffen op de Nederlandse markt.
- Lange termijnemissies (>100 jaar) zijn niet meegenomen.
- In lijn met de Bepalingsmethode zijn alle kapitaalgoederen (infrastructuur) meegenomen in de berekeningen die meer bijdragen dan 5% van de milieu-impact per module of meer dan 1% van de massa en energie input zijn. Zo is voor de scheepsbrandstoffen de milieu-impact van de productie en afvalverwerking na afschrijving van schepen en het gebruik van havens (via bunkerschepen) over de levenscyclus toegerekend aan de brandstof. Daarnaast is de milieu-impact van kapitaalgoederen in de brandstofketen (raffinaderijen, pijpleidingen etc.) meegenomen, doordat de gehanteerde proceskaarten uit ecoinvent deze bevatten. Alleen voor kapitaalgoederen die significant bijdragen aan de totale MKI (alleen de schepen) wordt een end of life scenario toegevoegd, waarbij er door recycling van metalen in module D een deel van de productie van kapitaalgoederen weer uitgespaard wordt.
- 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 de database ecoinvent v3.5 of de NMD v3.2 gebruikt.

2.5 Effectbeoordeling

Zoals in paragraaf 2.3 genoemd, worden de resultaten bepaald aan de hand van twee sets impactcategorieën, die hier nader worden toegelicht. Tabel 1 omschrijft de indicatoren die onder set 1 vallen. Deze milieueffecten kunnen op basis van weegfactoren omgerekend worden naar de MilieuKostenIndicator (MKI). Deze weging is uitgevoerd conform de door de Bepalingsmethode voorgeschreven weegfactoren. De geanalyseerde milieueffecten en gehanteerde weegfactoren zijn getoond in Tabel 1.

Tabel 1: Indicatoren die milieu-impact beschrijven behorende bij de EN 15804/A1:2013 (set 1) met bijbehorende weegfactor om de MKI te bepalen.

Milieu-impactcategorie	Indicator	Eenheid	Weegfactor MKI (€ / eenheid)
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

Naast de weegset behorende bij de MKI, zoals beschreven in de Bepalingsmethode, wordt er in Appendix B van dit rapport ook een aangepaste weegset gehanteerd, met een hogere weegfactor voor Klimaatverandering: 103 euro per ton CO₂-eq, in plaats van 50 euro per ton CO₂-eq. De reden hiervoor is dat Rijkswaterstaat deze aangepaste MKI, de zogeheten MKI_{CO₂-103}, toepast in hun tender procedures voor baggerwerkzaamheden en kustlijnverzorging om CO₂-reductie hoger te belonen. Alle MKI-resultaten die in dit rapport getoond worden betreffen de reguliere weegset met 50 euro per ton CO₂-eq, met uitzondering van Tabel 26 in Appendix B.

Tabel 2 beschrijft de indicatoren die horen bij de EN 15804/A2:2019 (set 2). Omdat er nog geen weegset is vastgelegd in de normering behorende bij set 2, worden alleen de individuele impactcategorieën gerapporteerd in dit document en niet als een gewogen geheel.

Tabel 2: Indicatoren die milieu-impact beschrijven behorende bij de EN 15804/A2:2019 (set 2).

Milieu-impactcategorie	Indicator	Eenheid
Klimaatverandering - totaal	GWP-totaal	kg CO ₂ -eq.
Klimaatverandering - fossiel	GWP-fossiel	kg CO ₂ -eq.
Klimaatverandering - biogeen	GWP-biogeen	kg CO ₂ -eq.
Klimaatverandering - totaal - landgebruik en verandering in landgebruik	GWP-luluc	kg CO ₂ -eq.
Ozonlaagaantasting	ODP	kg CFC11-eq.
Verzuring	AP	mol H ⁺ -eq.
Vermesting zoetwater	EP-zoetwater	kg PO ₄ -eq.
Vermesting zeewater	EP-zeewater	kg N-eq.
Vermesting land	EP-land	mol N-eq.
Smogvorming	POCP	kg NMVOC-eq.
Uitputting van abiotische grondstoffen mineralen en metalen	ADP-mineralen & metalen	kg Sb-eq.
Uitputting van abiotische grondstoffen fossiele brandstoffen	ADP-fossiel	MJ, net cal. val.
Watergebruik	WDP	m ³ world eq. deprived
Fijnstof emissie	Ziekte door PM	Ziekte-incidentie
Ioniserende straling	Humane blootstelling	kBq U235-eq.
Ecotoxiciteit (zoetwater)	CTU ecosysteem	CTUe
Humane toxiciteit, carcinogeen	CTU humaan	CTUh
Humane toxiciteit, non-carcinogeen	CTU humaan	CTUh
Landgebruik gerelateerde impact / bodemkwaliteit	bodemkwaliteitsindex	Dimensieloos

Naast de milieu-impactcategorieën van set 1 en 2 worden conform de Bepalingmethode ook parameters voor gebruik van grondstoffen, vrijkomen van afval en vrijkomen van materialen en energie gerapporteerd. Deze worden hieronder weergegeven.

Tabel 3: Indicatoren die gebruik van grondstoffen beschrijven.

Parameter	Eenheid
Gebruik van hernieuwbare primaire energie exclusief hernieuwbare primaire energie gebruikt als materialen	MJ, netto calorische waarde
Gebruik van hernieuwbare primaire energie gebruikt als materialen	MJ, netto calorische waarde
Totaal gebruik van hernieuwbare primaire energie (hernieuwbare primaire energie en hernieuwbare primaire energie gebruikt als materialen)	MJ, netto calorische waarde
Gebruik van niet-hernieuwbare primaire energie exclusief niet hernieuwbare energie gebruikt als materialen	MJ, netto calorische waarde
Gebruik van niet-hernieuwbare primaire energie gebruikt als materialen	MJ, netto calorische waarde
Totaal gebruik van niet-hernieuwbare primaire energie (niet-hernieuwbare primaire energie en niet-hernieuwbare primaire energie gebruikt als materialen)	MJ, netto calorische waarde
Gebruik van secundaire materialen	kg
Gebruik van hernieuwbare secundaire brandstoffen	MJ, netto calorische waarde
Gebruik van niet-hernieuwbare secundaire brandstoffen	MJ, netto calorische waarde
Netto gebruik van zoet water	m ³
Gevaarlijk afval	kg
Niet-gevaarlijk afval	kg
Radioactief afval	kg
Materialen voor hergebruik	kg
Materialen voor recycling	kg
Materialen voor energie	kg
Geëxporteerde energie	MJ per energiedrager

2.6 Allocatie

De voorschriften van de Bepalingsmethode en de NEN-EN 15804:2019+A2 voor allocatie bij multi-input of multi-output processen zijn gevolgd in deze studie. Er is getracht in zoveel mogelijk gevallen allocatie te vermijden. In alle gevallen waar allocatie niet vermeden kon worden (zie hoofdstuk 3), is de exacte procedure toegelicht.

2.7 Reikwijdte

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

2.7.1 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. Voor iedere onderzochte brandstof is het meest waarschijnlijke productieproces 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.

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 en dus andere milieuscores.

2.7.2 *Tijd en technologie*

Deze studie analyseert een aantal brandstoffen die op dit moment veel gebruikt worden bij aanbestedingen. Hoewel ecoinvent altijd achterloopt op de huidige praktijk, is voor de meeste voorgronddata van processen in de brandstofketen (zoals bijvoorbeeld elektriciteitsverbruik en oliewinning) de huidige stand van zaken als richtlijn genomen.

Omdat de milieu-impact bij de inzet van deze brandstoffen verschilt, afhankelijk van verbranding in een ouder of nieuwer motortype, zijn er drie typerende motoren gekozen om het verschil te illustreren. Het is zeker mogelijk dat een vaartuig met modernere motoren een lagere milieu-impact heeft dan deze voorbeelden. Voor MGO is hierbij onderscheid gemaakt tussen verschillende motortypen die typisch op baggerschepen worden ingezet, namelijk één van net voor invoering van IMO tier I (uit 1997), hierna te noemen "Pre Tier 1". Het betreffende schip vertegenwoordigt, afgaande op de baggervloot die in de emissieregistratie bekend is, bij benadering de mediaan van de Nederlandse baggervloot. Naar verwachting ligt deze mediaan van de vloot dichtbij het gemiddelde van de vloot. Als voorbeeld van een moderner schip, is er één gekozen van vergelijkbaar motorvermogen, met een IMO tier II motorisatie (uit 2018), die representatief is voor de modernste helft van de vloot baggervaartuigen.

Verder worden er nog profielen voor MGO opgesteld voor een Pre Tier I motor in combinatie met SCR om de Tier III limiet te halen. Dat principe werkt als volgt: Bij de verbranding van MGO kan een katalysator worden ingezet om de NO_x uitstoot te verlagen op basis van het principe van Selective Catalytic Reduction (SCR). Hierbij kan de NO_x uitstoot in principe worden gereguleerd naar believen, zodat bijvoorbeeld de Tier III limiet voor stikstof kan worden behaald. Voor de milieuprofielen van MGO volgens de Tier III normering gaan we uit van een SCR installatie gecombineerd met een pré Tier I motor, die zo wordt ingesteld dat de Tier III limiet behaald wordt.

Tot slot wordt een profiel gepresenteerd voor een schip met dual-fuel motor waarin vooral LNG als brandstof wordt ingezet. In principe zou deze techniek, bij zeer lage lek van methaan (of het volledig weg-oxideren van eventuele methaanslip als deel van de uitlaatgasnabehandeling) een lagere milieu-impact kunnen opleveren dan een overeenkomstig schip op conventionele mariene gasolie (MGO). Ook kan de milieu-impact nog een fractie lager uitvallen wanneer een kleiner aandeel pilot fuel wordt ingezet (bijvoorbeeld 2%). Het effect hiervan is zeer beperkt ten opzichte van het milieuprofiel dat in deze studie wordt uitgewerkt met 20% pilot fuel.

Het ligt voor de hand dat komende jaren door instroom van nieuw materieel met moderne motoren (bijvoorbeeld stage V of dual-fuel motoren die vooral LNG gebruiken) en door de subsidieregeling op retro-fit installatie van SCR-uitlaatgasnabehandeling, de vloot gaandeweg steeds schoner zal worden (en dus de milieu-impact af zal nemen). Het is echter belangrijk om te begrijpen dat dit schoner worden met een beperkt tempo (bijvoorbeeld door beperkte capaciteit bij de retrofit bedrijven) wordt bereikt en dat er nog jarenlang ook de wat oudere -meer vervuilende- scheepstypes ingezet zullen worden.

Deze temporele en technologische afbakening betekent dat deze data geschikt is om berekeningen te doen voor de huidige situatie en de komende 10 jaar; na circa 2030 (maar als de ontwikkelingen snel gaan ook al eerder) kan de markt, de technologie en de rekenmethodiek sterk veranderd zijn en zijn de milieuberekeningen in dat geval achterhaald. Een voorbeeld hiervan is de introductie van stage V motoren, die een veel lagere milieu-impact hebben dan de huidige technologie. Deze data zijn dus niet geschikt om bijvoorbeeld toekomstvoorspellingen te doen over milieueffecten van brandstofgebruik in de gehele 21e eeuw.

2.7.3 *Datakwaliteit, compleetheid en consistentie*

De focus in dit project ligt bij de brandstoffen. Ondersteunende processen en materialen, zoals de kapitaalgoederen (schepen en machines), smeerolie en havengebruik, zijn niet in detail geanalyseerd maar enkel op hoofdlijnen geanalyseerd en gekwantificeerd. In hoofdstuk 3 is in detail beschreven 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. Verder is deze studie door een extern, erkend toetsers gereviewd volgens het NMD toetsingsprotocol.

2.7.4 *Levenscyclus en systeemgrenzen*

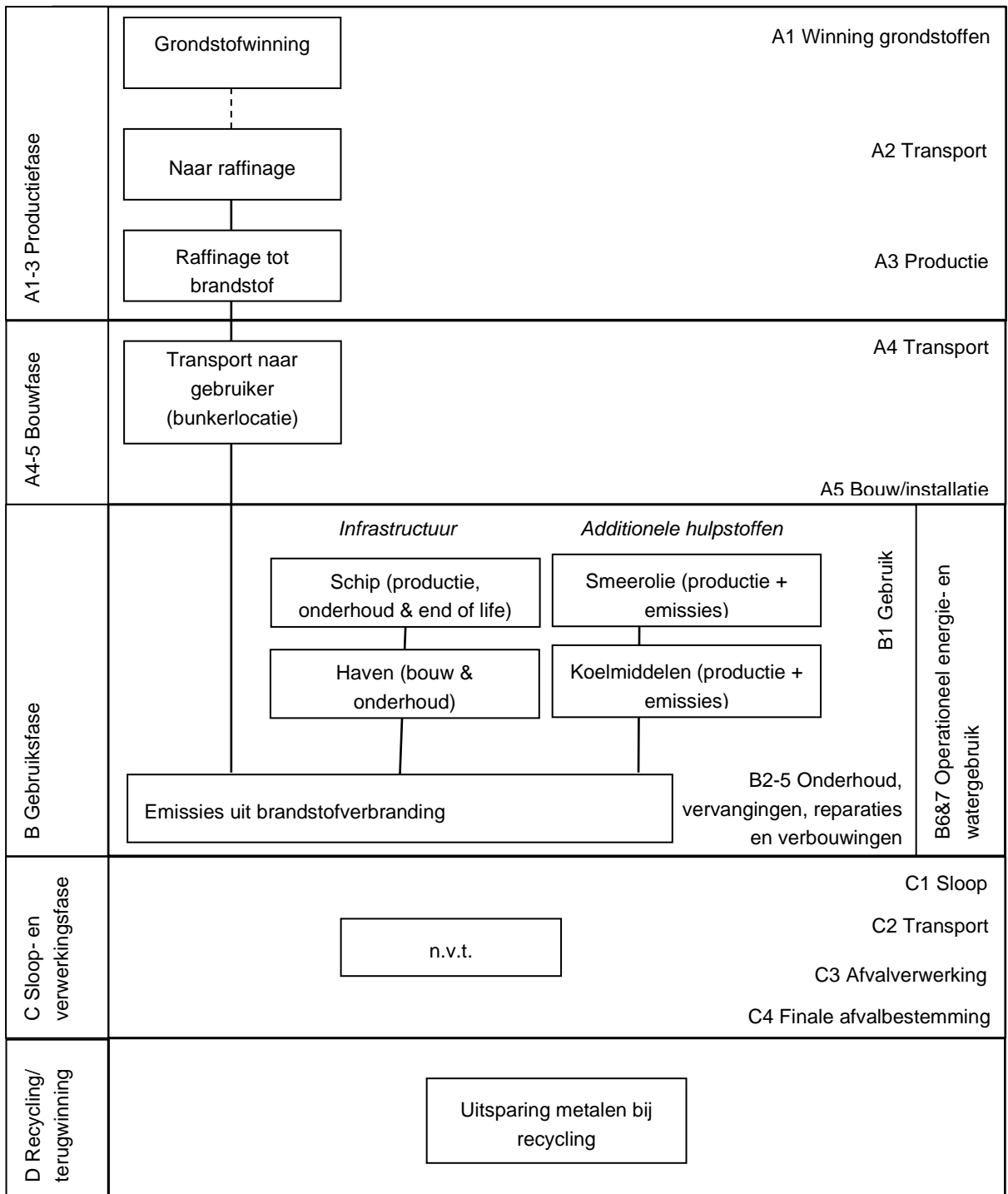
De Bepalingsmethode schrijft voor om de levenscyclusfasen te benaderen volgens de door de NEN-EN 15804:2019 +A2 beschreven indeling. De volgende levenscyclusfasen worden door de Bepalingsmethode genoemd:

- 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 brandstof in baggerschepen in Figuur 6. Vooral de modules A1-A3, A4, B1 en D zijn relevant voor de bepaling van de milieueffecten van brandstoffen. De modules B2 tot en met C zijn niet van toepassing voor brandstoffen, omdat de stoffen in module B1 reeds opbranden. In module B1 zijn tevens de productie van alle infrastructuur zoals schepen en havens en alle additionele materialen zoals smeerolie meegenomen. Ook de afvalverwerking van de kapitaalgoederen in de end-of-life fase worden meegenomen in B1, en niet in C. Immers zegt de Bepalingsmethode het volgende: "Afvalverwerking wordt in overeenstemming met de EN 15804 meegenomen in de levenscyclusfase, waar het ontstaat." (Milieudatabase, 2020a). De voordelen van recycling horen echter niet in B1 thuis, omdat voordelen uit andere fases dan de productiefase alleen in Module D mogen worden verwerkt.

Dit is een wijziging ten opzichte van het TNO-rapport R10662 uit 2016. Module D (loads and benefits beyond the system boundary) bevat de baten en lasten van het doorgeven van de netto hoeveel secundair materiaal aan een volgend productsysteem. In het geval van netto verlies van secundair materiaal vindt er milieulast plaats, in het geval van netto winst juist baten.

In deze studie omvat het dus de voordelen (en eventuele overgebleven lasten na afvalverwerking) van het recyclen van de kapitaalgoederen aan het eind van hun levensduur in module B1.



Figuur 6: Levenscyclusfasen, zoals onderscheiden door de Bepalingsmethode voor een brandstof gebruikt in baggerschepen.

3 Levenscyclusinventarisatie

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 3.4.

3.1 MGO (pré Tier I en Tier II)

3.1.1 A1-A3 - Productiefase

We gaan ervan uit dat de productie van MGO plaatsvindt in (de haven van) Rotterdam, conform het TNO-rapport R10662 uit 2016 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016). De haven van Rotterdam is de grootste bunkerhaven van Europa en is vijf olieraffinaderijen rijk. Nagenoeg alle scheepsdiesel die in Rotterdam gebunkerd wordt, is lokaal geproduceerd (Port of Rotterdam, n.d.).

Voor de productie is gekozen voor de ecoinventkaart "Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland}| production | Cut-off, U" die representatief is voor het raffinageproces in Nederland. De raffinage is weergegeven in Tabel 4, uitgedrukt per ton MGO, de rekeneenheid van deze studie. De bijdrage van kapitaalgoederen (raffinaderij) in de productieketen hiervan is meegenomen in de achterliggende proceskaarten en bedraagt minder dan 1 % van de MKI binnen A1-A3.

Tabel 4: Productie van 1 ton MGO

Processtap	Referentie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
MGO raffinage	Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland} production	1	ton	Meest representatief

3.1.2 A4 - Transport naar gebruiker

Voor het transport en het bunkeren van MGO is de ecoinventkaart Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland}| market for | Cut-off, U" gebruikt als uitgangspunt, omdat hier naast markgemiddeld transport voor Europa en de productie van de brandstof zelf, ook de inputdata van bunkeren in voorkomt. Hierbij is de input van MGO verwijderd zodat er geen dubbeltellingen ontstaan bij het combineren van de productiefase en de transportfase. Tevens is de transportafstand forfaitair op 150 km gezet in lijn met de Bepalingsmethode om representatief te zijn voor bunkeren op verschillende plaatsen in Nederland. Eventuele verliezen die zouden kunnen ontstaan zijn minimaal en worden niet meegenomen in deze studie. Het resulterende proces voor module A4 wordt weergegeven in Tabel 5, uitgedrukt per kg MGO.

De kapitaalgoederen (Infrastructure, for regional distribution of oil product {GLO}| market for | Cut-off, U) dragen voor 10% bij aan de MKI binnen deze module.

Tabel 5: Bunkeren en transport van de productielocatie naar de gebruiker voor 1 kg MGO (gebaseerd op ecoinvent "Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland}| market for | Cut-off, U".

Processtap	Referentie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Bunkeren MGO	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	0,0067	kWh	Overgenomen uit het originele proces. Stroomverbruik veranderd naar Nederlandse context.
Bunkeren MGO	Heat, central or small-scale, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U	0,00058374	MJ	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Infrastructure, for regional distribution of oil product {GLO} market for Cut-off, U	2,48E-10	p	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U	0,000689	kg	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Water/m ³	1,0335E-7	m ³	ongewijzigd Emissie naar lucht
Bunkeren MGO	Water, Europe without Switzerland	5,8565E-7	m ³	ongewijzigd Emissie naar water
Bunkeren MGO	Fly ash and scrubber sludge {Europe without Switzerland} market for fly ash and scrubber sludge Cut-off, U	0,000168	kg	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Municipal solid waste {Europe without Switzerland} market group for municipal solid waste Cut-off, U	6,27E-6	kg	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Rainwater mineral oil storage {Europe without Switzerland} market for rainwater mineral oil storage Cut-off, U	7,5E-5	m ³	ongewijzigd
Bunkeren MGO	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, U	6,89E-7	m ³	ongewijzigd
Forfaitair transport	0001-tra&Transport, vrachtwagen (o.b.v. Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U)	0,150	tkm	Als worst case benadering is er gekozen voor transport over land, omdat naast transport over water tankwagens ook tot de mogelijkheden behoren. In de praktijk zal bunkeren via een bunkerboot of bunkerstation ook voorkomen en zal er in de toekomst verder geoptimaliseerd worden.

3.1.3 B1 - Gebruiksfase

Om te voldoen aan de geldende zwavellimiet wordt voor het milieuprofiel ook in de verbrandingsfase uitgegaan van MGO met een laag zwavelgehalte van 0,1%. De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van MGO vallen uiteen in kapitaalgoederen en hulpmiddelen (Tabel 6) en verbrandingsemissies (Tabel 8). Eventuele verliezen die zouden kunnen ontstaan zijn minimaal en worden niet meegenomen in deze studie.

Tabel 6: Kapitaalgoederen en hulpmiddelen voor de gebruiksfase van 1 ton MGO.

Processtap	Referentie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U	2,06	kg	Zie paragraaf 3.4.5
Baggerschip	Eigen referentie	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 3.4.2
Machines	Eigen referentie	7,11	kg	Zie paragraaf 3.4.2
Havenfaciliteiten	Port facilities {RER} construction Cut-off, U - excl electra voor overslag	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 3.4.3
Koelmiddel	Refrigerant R134a {GLO} market for Cut-off, U	0,016	Kg	Zie paragraaf 3.4.6

Voor de verbrandingsemissies zijn er een aantal belangrijke wijzigingen ten opzichte van het TNO-rapport R10662 uit 2016 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016):

- In het eerder uitgebrachte rapport werd er gewerkt met één gemiddeld profiel voor Tier 0 (en ouder) t/m II motoren, waar dit nu is opgesplitst in twee profielen: Pré Tier I en Tier II. Vooral de uitstoot van stikstofoxiden verschilt sterk tussen oude en nieuwere motoren, wat van grote invloed is op de totale MKI.
- Voor de belangrijkste emissies is actuele emissiedata uit de modellen van de emissieregistratie gebruikt, welke zijn beschreven in het methodenrapport (Geilenkirchen et al., 2018) (Marin, 2021). De overige emissies uit het TNO-rapport R10662 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016) zijn gehandhaafd.
- De zwaveldioxide emissiefactor is alléén afhankelijk van het zwavelgehalte in de brandstof, en is daarmee onafhankelijk van het motortype (tenzij een uitlaatgas-scrubber is geïnstalleerd, maar dat is praktisch nooit zo op de beschouwde vaartuigen). Op de Noordzee moet laagzwavelige brandstof worden ingezet met maximaal 0,1% (op massa basis) zwavel: de Noordzee is een zogenoemde Emissions Controlled Area (ECA). In de praktijk is het daadwerkelijke zwavelgehalte iets lager dan de limiet. In deze studie is gewerkt met een gemiddeld zwavelgehalte van 700 ppm (m/m) wat resulteert in SO₂ emissies van 1,4 kg / ton MGO.

Tabel 7 bevat actuele emissies die volgen uit de emissieregistratie in kg per ton brandstof in kolom 2 en 3. Deze zijn representatief voor twee Tierklassen pré Tier I en Tier II. De meeste emissies verschillen niet sterk tussen de twee klassen, met uitzondering van de koolwaterstoffen en stikstofoxiden (zie kolom 4).

Tabel 7: Gehanteerde emissies, en het relatieve niveau van Tier II ten opzichte van Pré Tier I.

Emissie	Hoeveelheid (kg / ton)		Tier II ten opzichte van pré Tier I (%)
	pré Tier I	Tier II	
Koolstofdioxide	3181,6	3182,8	100%
Koolwaterstoffen	2,13	1,69	79%
Aerosolen	1,27	1,33	105%
Koolstofmonoxide	2,67	2,81	105%
Zwavedioxide	1,40	1,40	100%
Stikstofoxiden (als NO ₂)	59,8	49	82%

Vervolgens wordt de data uit het TNO-rapport R10662 uit 2016 gebruikt als uitgangspunt (Tabel 8, kolom 3), en waar mogelijk vervangen door actuele data uit de emissieregistratie uit Tabel 7 en de data voor de emissie van zwavedioxide (op basis van het gebruikte gemiddelde zwavelgehalte van MGO 0,1%). Het resultaat daarvan wordt gebruikt als inputdata voor de LCA (kolom 4 en 5) en is weergegeven in Tabel 8. Een gedetailleerde uitleg hoe de data in Tabel 8 tot stand gekomen is wordt onder de tabel weergegeven.

Tabel 8: Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton MGO.

Emissie	Groep	Hoeveelheid (kg)		
		2016 studie	Pré Tier I	Tier II
Carbon dioxide, fossil	Koolstofdioxide	3114	3181,6	3182,8
Carbon monoxide, fossil	Koolstofmonoxide	13,5	2,67	2,81
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Koolwaterstoffen	2,1	2,36	1,87
Nitrogen dioxide	Stikstofoxiden (als NO ₂)	56,8	59,8	49,0
Particulates, < 10 um	Aerosolen ¹	1,7	1,27	1,33
Sulfur dioxide	Zwavedioxide	2	1,4	1,4
Methane, biogenic	Koolwaterstoffen	0,1	0,112	0,089
Dinitrogen monoxide		0,08	0,08	0,08
Ammonia		0,01	0,01	0,01
Arsenic, ion		1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04
Cadmium		2,10E-03	2,10E-03	2,10E-03
Chromium III		2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03
Copper		7,30E-04	7,30E-04	7,30E-04
Lead		3,70E-04	3,70E-04	3,70E-04
Nickel		5,30E-04	5,30E-04	5,30E-04
		2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03
Zinc		2,45E-04	2,45E-04	2,45E-04
Acrolein	Koolwaterstoffen	3,11E-02	3,49E-02	2,77E-02

¹ De term "Aerosolen" omvat verschillende emissies en kan ook betrekking hebben op grovere deeltjes dan fijnstof (PM10). Hier is de term gebruikt voor fijnstof uitstoot.

Emissie	Groep	Hoeveelheid (kg)		
Benzene	Koolwaterstoffen	4,15E-02	4,66E-02	3,70E-02
Ethene	Koolwaterstoffen	2,49E-01	2,80E-01	2,22E-01
Formaldehyde	Koolwaterstoffen	1,24E-01	1,39E-01	1,10E-01
Toluene	Koolwaterstoffen	3,02E-02	3,39E-02	2,69E-02
Xylene (gelijk verdeeld over M-xylene, O-Xylene en P-Xylene)	Koolwaterstoffen	4,15E-02	4,66E-02	3,70E-02
Phenanthrene	Koolwaterstoffen	7,34E-04	8,24E-04	6,54E-04
Anthracene	Koolwaterstoffen	5,61E-05	6,30E-05	5,00E-05
Fluoranthene	Koolwaterstoffen	8,64E-05	9,70E-05	7,70E-05
Chrysene	Koolwaterstoffen	3,89E-05	4,37E-05	3,46E-05
Benzo(a)anthracene	Koolwaterstoffen	1,34E-05	1,50E-05	1,19E-05
Benzo(a)pyrene	Koolwaterstoffen	1,19E-05	1,34E-05	1,06E-05
Benzo(b)fluoranthene	Koolwaterstoffen	9,93E-06	1,11E-05	8,85E-06
Benzo(k)fluoranthene	Koolwaterstoffen	4,97E-06	5,58E-06	4,43E-06
Benzo(g,h,i)perylene	Koolwaterstoffen	3,89E-06	4,37E-06	3,46E-06
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Koolwaterstoffen	2,16E-09	2,42E-09	1,92E-09
Naphthalene	Koolwaterstoffen	5,18E-03	5,82E-03	4,61E-03
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Koolwaterstoffen	2,16E-10	2,42E-10	1,92E-10
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a ²		0,016	0,016	0,016

Tabel 8 bevat een overzicht van alle emissies die in de 2016 studie gebruikt werden. Dat is het uitgangspunt van deze studie. De emissiegroepen in kolom 2 komen overeen met de emissiegroepen uit Tabel 7. Voor de emissies die onder een van deze emissiegroepen vallen wordt de data uit tabel 7 gebruikt om de oude waarde te vervangen.

Voor Koolstofdioxide, Koolstofmonoxide, Stikstofoxiden, Aerosolen en Zwaveldioxide is de waarde uit Tabel 7 gebruikt rechtstreeks gebruikt. Omdat koolwaterstoffen een groep is waar meerdere emissies onder vallen kan die waarde niet rechtstreeks worden overgenomen. In plaats daarvan is per emissie die onder die groep valt de waarde uit het TNO-rapport R10662 uit 2016 gebruikt als gemiddelde voor de twee Tier klassen. Er wordt vervolgens een onder- en bovengrens van berekend aan de hand van het relatieve verschil voor koolwaterstoffen (79%) tussen de twee tierklassen uit Tabel 7. Deze boven- en ondergrens per emissie wordt gebruikt als waarden in Tabel 8. Als de Tier II waarden door de pré Tier I waarden worden gedeeld komt er voor alle emissies die onder koolwaterstoffen vallen weer 0,79 uit.

Tot slot zijn de emissies uit het TNO-rapport R10662 nog geactualiseerd naar emissies die in de rekenmethode "SBK Bepalingsmethode v 3.2" en de EN15804+A2 methode gekarakteriseerd worden. Hierbij valt het op dat vanadium er twee keer in staat: een keer als Vanadium en een keer als Vanadium ion. Dit is noodzakelijk, omdat Vanadium ion alleen in set 1 van de Bepalingsmethode gekarakteriseerd wordt en Vanadium alleen in de EN15804+A2 methode (set 2). Omdat beide methoden gelijktijdig gebruikt worden op dit moment zijn beide stoffen noodzakelijk om toe te voegen.

² Koelmiddel (zie paragraaf 3.4.6)

Verder wordt Benzo(b)fluoranthene niet gekarakteriseerd in set 1 van de Bepalingsmethode, maar wel in de EN15804+A2 methode (set 2). Omdat de bijdrage aan de totale MKI van vergelijkbare koolwaterstoffen zeer gering is, is ervoor gekozen om geen alternatief te selecteren voor deze emissie.

Tot slot is er voor NO_x in deze studie gekozen voor "Nitrogen dioxide", in tegenstelling tot het TNO-rapport R10662, waar "Nitrogen oxides", oftewel NO_x, werd gehanteerd. De reden hiervoor is dat de in deze studie gebruikte literatuur spreekt over "stikstofoxiden (als NO₂). NO_x is een verzamelterm die wordt gebruikt voor de optelsom van NO₂ en NO. Om een duidelijke impact te kunnen geven, wordt vaak, en ook in deze studie, met NO₂ gerekend. De (kleine) hoeveelheden NO tellen gewoon mee, maar zijn qua impact verrekend naar NO₂. Daarnaast kunnen aerosolen veel meer en ook grovere materialen zijn dan fijnstof (PM10). Hier is de term gebruikt voor fijnstof uitstoot in de verbrandingsfase.

3.1.4 *Module D*

Voor de kapitaalgoederen met een hoge bijdrage aan de totale MKI is er in deze studie een end of life scenario toegevoegd, waarbij de recycling (en uitsparing) van metalen meegenomen wordt. Dit geldt alleen voor de kapitaalgoederen in module B1. De kapitaalgoederen in module A1-A3 dragen minder dan 1 % bij aan de MKI binnen deze module, en module A4 draagt in zijn geheel weinig bij aan het totaal.

De recycling van metalen uit het baggerschip en de machines, en daarmee de uitsparing van primaire grondstoffen in module D, is voor alle brandstoffen hetzelfde en uitgewerkt in paragraaf 3.4.4. De afvalverwerking en recycling zelf is niet opgenomen in een aparte module C, maar verwerkt in module B1, omdat afvalverwerking moet worden gedeclareerd in de module waar het ontstaat volgens de Bepalingsmethode (Milieudatabase, 2020a). Hierbij is transport naar de afvalverwerker weggelaten, omdat de milieu-impact verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de rest van de levenscyclus.

3.2 **MGO (Tier III)**

In de vorige paragraaf zijn de milieuprofielen voor MGO voor pré Tier I en Tier II motoren uitgewerkt. Omdat er ook een nieuwere klasse, Tier III, bestaat wordt er in deze paragraaf uitgewerkt hoe het milieuprofiel voor MGO voor die klasse is opgesteld. Omdat alleen de verbrandingsemissies wijzigen blijven module A1-A4, de kapitaalgoederen uit module B1 en module D ongewijzigd ten opzichte van de andere profielen voor MGO. De wijzigingen in module B1 verbrandingsemissies worden hieronder beschreven.

Zoals in paragraaf 2.7.2 beschreven wordt er uitgegaan van een pré Tier I motor, waar een SCR systeem aan wordt toegevoegd om de stikstofuitstoot te kunnen regelen. Voor de stikstofuitstoot wordt er uitgegaan van de NO_x emissielimiet binnen de Tier III standaard. Deze wordt beschreven op Dieselnet en is weergegeven in Tabel 9 (Dieselnet, n.d.). De limiet is afhankelijk van het toerental n en is uitgedrukt per kWh geleverde arbeid.

Tabel 9: NO_x limiet per Tier klasse.

Tier	Date	NO _x Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n ^{-0.2}	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n ^{-0.23}	7.7
Tier III	2016	3.4	9 · n ^{-0.2}	1.96

Om de limiet uit te drukken per ton brandstof is dus het brandstofverbruik per kWh geleverde arbeid nodig en het toerental. Voor een gemiddeld baggerschip varieert het toerental typisch tussen 800 en 1600 rpm. Er is daarom gerekend met een gemiddelde van 1200 rpm. Een typisch brandstofverbruik voor een pré Tier I motor ligt op 185,9 g brandstof per kWh. Hiermee komt de limiet neer op 11,73 kg NO_x per ton brandstof. Bij een pré Tier I motor moet er voor MGO moet er dus 48,07 kg NO_x afgevangen worden.

Het afvangen van NO_x gebeurt via een reactie met ureum, waarbij ook CO₂ vrijkomt. De benodigde hoeveelheid ureum en de hoeveelheid CO₂ die vrijkomt kan worden uitgerekend via de reactievergelijking $4\text{NO} + 2(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$. Hieruit volgt dat er per twee moleculen NO één ureummolecuul en één molecuul CO₂ ontstaat. Vanuit de moleculaire massa's kan dan worden berekend dat één kg NO gepaard gaat met 1,00 kg ureum en 0,733 kg CO₂ uitstoot.

Voor één ton MGO in een pré Tier I motor komt dat uiteindelijk neer op 35,25 CO₂ en 48,11 kg ureum. Deze waarden zijn gebruikt in deze studie en het overzicht van bovenstaande berekeningen is weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Overzicht NO_x berekeningen bij toepassing van een SCR installatie.

Onderdeel	Hoeveelheid
kg NO _x uitstoot per ton brandstof zonder SCR	59,80
kg NO _x uitstoot per ton brandstof met SCR	11,73
kg NO _x te reduceren	48,07
kg ureum	48,11
kg CO ₂ die vrijkomt	35,25

De CO₂ uitstoot wordt gekarakteriseerd als fossiel, omdat het onbekend is of de gebruikte ureum van fossiel of biogene afkomst is. Als referentieproduct voor ureum is "Urea, as N {GLO}| market for | Cut-off, U" gehanteerd. De gebruikte referentie voor ureum duidt alleen op de N-content in ureum. Het drukt als het ware de impact van ureum uit per ton N die erin zit. ecoinvent beschrijft dat 2.17 kg ureum 1 kg stikstof (N) bevat. Er is dus per kg ureum 0,461 kg van deze referentie nodig.

3.3 LNG

3.3.1 A1-A3 Productiefase

Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van een mix van LNG-productie uit de Verenigde Staten, Nigeria, Algerije, Qatar en Rusland, waarbij de verhoudingen uit “Exhibit 2” uit het rapport “LNG imports are sharply increasing in Europe: what are the key differentiation factors between the regasification terminals” gebruikt zijn (Zimmer & Choukatli, 2019). De gehanteerde percentages en referenties uit ecoinvent zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11: Uitsplitsing van herkomstlocaties van aardgas voor LNG in Europa, met bijbehorende referentie uit ecoinvent en toelichting.

Land	%	Referentie voor gas	Toelichting
Verenigde Staten	10	Natural gas, high pressure {US} natural gas production Cut-off, U	Gemiddelde gaswinning voor dit gebied
Nigeria	17	Natural gas, high pressure {NG} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	Gemiddelde gaswinning voor dit gebied
Algerije	17	Natural gas, high pressure {DZ} natural gas production Cut-off, U	Gemiddelde gaswinning voor dit gebied
Qatar	20	Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Cut-off, U	Er bestaat geen referentie voor Qatar, dus is er een globaal gemiddelde gekozen.
Rusland	22	Natural gas, high pressure {RU} natural gas production Cut-off, U	Gemiddelde gaswinning voor dit gebied
Overig	14	Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Cut-off, U	Overige landen worden het best benaderd door een wereldwijd gemiddelde.

Het productieproces is grotendeels gemodelleerd zoals beschreven de rapportage van TNO uit 2016, gebaseerd op de Well to Wheel rapportage van JRC uit 2014 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016) (Edwards et al., 2014). Deze data is geactualiseerd voor het stroomverbruik voor liquefactie aan de hand van de nieuwe Well to tank rapportage van JRC (Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M. and Edwards, 2020), welke lager ligt dan het verbruik uit de eerdere rapportage. In de nieuwe rapportage wordt er 0,025 MJ elektriciteit per MJ LNG verbruikt. Met een LHV van 49 MJ / kg voor LNG komt dit neer op 1230 MJ per ton LNG. In het TNO-rapport R10662 werd 3041,4 MJ gehanteerd. Omdat de nieuwe Well to tank rapportage uitgaat van state-of-the-art productieprocessen (paragraaf 3.4.1.1.1), en er niet vanuit gegaan kan worden dat alle LNG die in Nederland gebruikt wordt ook wordt geproduceerd volgens state-of-the art productieprocessen, is ervoor gekozen om een gemiddelde te nemen tussen de oude en de nieuwe waarden (Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M. and Edwards, 2020). Dit komt neer op 2130 MJ per ton LNG. De resulterende data zoals gebruikt in deze studie is weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Productie van 1 ton LNG.

Proces-stap	ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Feedstock	Zie verhoudingen uit Tabel 11	1255	m ³	Hoeveelheid gebaseerd op het TNO-rapport R10662.
Elektriciteit voor liquefactie	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	2130	MJ	De Well to Tank rapportage van JRC 2020 zegt dat alle elektriciteit lokaal wordt opgewekt via gas-fired combined cycle gas turbine (CCGT) wordt opgewekt.
Machines e.d.	Natural gas processing plant {GLO} market for Cut-off, U	1,95E-12	p	Gebaseerd op ecoinventproces "Natural gas, liquefied {RoW} production Cut-off, U"
Aardgasfakkel	Waste refinery gas {GLO} treatment of, burned in flare Cut-off, U	551,25	MJ	Hoeveelheid gebaseerd op het TNO-rapport R10662. Deze referentie omvat een mix van sweet en sour gas affakkeling, wat het meest representatief is, omdat het gas uit verschillende landen komt.
Elektriciteit voor loading terminal	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	71,81	MJ	Hoeveelheid gebaseerd op het TNO-rapport R10662. Deze referentie wordt als meest representatief gezien voor elektriciteit opgewekt uit gas.
Energie voor loading terminal	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U	490	MJ	Hoeveelheid gebaseerd op het TNO-rapport R10662. Deze referentie wordt gezien als meest representatief voor warmte in een industriële omgeving.
Proces-emissies				
Methaan-emissie naar lucht	Methane, fossil	1,666	kg	Hoeveelheid gebaseerd op het TNO-rapport R10662. De nieuwe Well to Tank-studie van JEC uit 2020 geeft geen precies getal, maar noemt dat de methaanverliezen klein zijn en grotendeels afgefakkeld worden. De data uit het TNO-rapport R10662 wordt daarom nog steeds actueel geacht.

3.3.2 A4 – Transport naar de gebruiker

Voor het transport van LNG naar Rotterdam wordt de ecoinvent proceskaart "Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO}| processing | Cut-off, U" gebruikt. Deze proceskaart maakt gebruik van zowel LNG als HFO (Heavy Fuel Oil) als brandstof en bevat retourtransport en methaanlekken. Binnen deze proceskaart draagt het ontsnappen van methaan beperkt bij aan de MKI, namelijk minder dan 0,1%. De afstand is bepaald door een gewogen gemiddelde te nemen van afstand per zeeschip van de landen uit Tabel 11. De afstand per zeeschip is bepaald via <https://m.classic.searoutes.com>. Hierbij is er de aanname gemaakt dat het transport altijd per zeeschip plaatsvindt. Daarnaast is er een aanname gedaan in vanuit welke havenstad er getransporteerd wordt.

Hierbij is ervoor gekozen havensteden te hanteren die gemiddeld ver weg liggen van Rotterdam, om zo aan te sluiten bij een marktgemiddeld profiel. Er is gewerkt met een gewogen gemiddelde van 7484 km voor transport van herkomstlocatie naar Rotterdam. Retourtransport wordt niet apart berekend om dit al wordt meegenomen in ecoinvent proceskaart. In Tabel 13 zijn de benodigde gegevens om hiertoe te komen weergegeven. De percentages komen uit Tabel 11.

Tabel 13: Transportafstanden voor LNG naar Rotterdam.

Land	%	Afstand over zee (km)	Gekozen haven
Verenigde Staten	10	7000	Charleston
Nigeria	17	8124	Harcourt
Algerije	17	3335	Algiers
Qatar	20	11800	Doha
Rusland	22	7096	Krasnoyarsk
Overig	14	-	-
Gewogen gemiddeld	100	7484	-

Tevens is elektriciteits- en energieverbruik voor de bunkerterminal 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. Een overzicht van de gebruikte data voor module A4 wordt weergegeven in Tabel 14.

De kapitaalgoederen rondom bunkeren dragen ongeveer 1,5 % bij aan de MKI binnen deze module (Infrastructure, for regional distribution of oil product {GLO} market for | Cut-off, U). Omdat de bijdrage gering is, maar wel meer dan 1%, worden deze kapitaalgoederen meegenomen. Er wordt er geen end of life scenario bij opgesteld, omdat de bijdrage ervan aan de MKI binnen deze module naar verwachting minder dan 1% is.

Tabel 14: Transport van 1 ton LNG van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	ecoinventkaart	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Transport per LNG-tanker	Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO} processing Cut-off, U	7484	tkm	Zie Tabel 13
Elektriciteitsverbruik terminal	Electricity, medium voltage {NL} market for Cut-off, U	41,65	MJ	
Energieverbruik terminal	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U	490	MJ	
Bunkeren	Eigen proceskaart obv Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U	1	ton	Zoals bij MGO ³
Forfaitair transport	0001-tra&Transport, vrachtwagen (o.b.v. Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U)	150	tkm	Als worst case benadering is er gekozen voor transport over land, omdat naast transport over water tankwagens ook tot de mogelijkheden behoren. In de praktijk zal bunkeren via een bunkerboot of bunkerstation ook voorkomen en zal er in de toekomst verder geoptimaliseerd worden.

3.3.3 B1 Gebruiksfase

De processen die plaatsvinden tijdens de gebruiksfase oftewel de verbranding van LNG vallen uiteen in kapitaalgoederen en hulpmiddelen (Tabel 15) en verbrandingsemissies (Tabel 17). Hoewel LNG gekoeld bewaard moet worden op het schip in een tank, zijn er geen extra koelmiddelen nodig, vanwege het zelfkoelende effect door methaanverdamper. Er zijn wél extra methaan emissies hierdoor, maar die kunnen weer gecomprimeerd worden en in de motor worden ingespoten. Wanneer het schip lang stil ligt kunnen af en toe kleine ontvluchtingen optreden om de druk in de tank niet teveel te laten stijgen. Dat zijn dan wel emissies naar buiten. Deze worden heel effectief onderdrukt door hoogwaardige isolatie van de LNG tank. Daarmee vallen deze in het niet ten opzichte van de emissies die al waren meegenomen in de verbrandingsemissies.

De machines aan boord zijn ongewijzigd gelaten ten opzichte van een traditioneel baggerschip op MGO. Hoewel een dubbelwandige LNG-tank duurder en complexer is (dubbelwandige tankwanden met vacuüm ertussen voor isolatie) is er weinig extra materiaalbehoefte (hoewel er wel extra investeringen nodig zijn om de veiligheid te waarborgen).

³ Het opslaan van LNG tijdens Bunkering en transport is wel significant duurder dan voor diesel en olieproducten.

Tabel 15: Kapitaalgoederen en hulpmiddelen voor de gebruiksfase van 1 ton LNG.

Processtap	Referentie	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Smeerolie	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U	2,46	kg	Zie paragraaf 3.4.5
Baggerschip	Eigen referentie	1,78 E-5	p	Zie paragraaf 3.4.2
Machines	Eigen referentie	7,11	kg	Zie paragraaf 3.4.2
Havenfaciliteiten	Port facilities {RER} construction Cut-off, U - excl electra voor overslag	5,08 E-9	p	Zie paragraaf 3.4.3
Koelmiddel	Refrigerant R134a {GLO} market for Cut-off, U	0,016	Kg	Zie paragraaf 3.4.6

Voor de verbrandingsemissies zijn er een aantal belangrijke wijzigingen ten opzichte van het TNO-rapport R10662 uit 2016 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016):

- Voor de belangrijkste emissies is er nieuwe en actuele data verzameld, met als belangrijkste rede dat er nieuwe inzichten zijn in het lekken van methaan tijdens de verbrandingsfase. Deze uitstoot is nu gebaseerd op een publicatie van Ushakov, Stenersen en Einang (Ushakov & Stenersen, 2019) en is substantieel hoger dan wat er in 2016 werd meegenomen in de berekening (toen 13,3 kg, nu 38,9 kg). De publicatie van Ushakov, Stenersen en Einang (Ushakov & Stenersen, 2019) is momenteel het beste met data onderbouwde overzicht over methaanslip dat beschikbaar is. Een overzichtsartikel van ICCT (Pavlenko et al., 2020) valt voor een groot deel terug op Ushakov, maar presenteert ook data voor modernere (hoge druk injectie) en grotere tweetakt motoren die echter vaker op oceanscheperen dan op Noordzee-vaartuigen worden ingezet. Mogelijk worden zulke modernere dual-fuel motoren in de toekomst -in kleinere uitvoeringen- ook op de Noordzee vaker ingezet. Voorlopig blijven de data die Ushakov presenteert het best van toepassing, maar eigenlijk weerspiegelt dit een gebrek aan meer metingen (die zeer welkom zouden zijn). Omdat meer data vooralsnog ontbreken, worden de gegevens in genoemde publicatie gebruikt.
- De gehanteerde data is weergegeven in Tabel 16. De overige emissies zijn gebaseerd op het TNO-rapport R10662 uit 2016 (Jochemsen-Verstraeten et al., 2016).
- De verbranding is gebaseerd op een gebruik in een dual-fuel dieselmotor, waarin 80% LNG en 20% MGO wordt ingezet. Hierdoor komt de uitstoot van NO_x hoger uit dan in het TNO-rapport R10662. Zoals in paragraaf 1.2 vermeld wordt, wordt daarom een profiel opgesteld voor de combinatie van deze twee brandstoffen, zowel qua productie als qua gebruiksfase.

Tabel 16: Bronnen voor de belangrijkste emissiedata voor de verbranding van 80% LNG en 20% MGO in een dual-fuel motor.

Emissie	Referentie	Hoeveelheid (kg / ton LNG)
Methaan	Ushakov et al., 2018, LPDF-motoren (Ushakov & Stenersen, 2019)	38,9
VOS	Ushakov et al., 2018, LPDF-motoren (Ushakov & Stenersen, 2019)	2,3
SO ₂	TNO report TNO-RPT-2011-00166 1.0, tabel 14 (TNO, 2011)	0,28*
N ₂ O	Emissiefactoren_brandstof / 5 (Norbert E. Ligterink, Jessica M. de Ruiter & Jan H.C. Hulskotte, Ruud P. Verbeek, 2020)	0,09
NO _x (als NO ₂)	Ushakov et al., 2018, LPDF-motoren (Ushakov & Stenersen, 2019)	10,7
NH ₃	Emissiefactoren_brandstof / 5 (Norbert E. Ligterink, Jessica M. de Ruiter & Jan H.C. Hulskotte, Ruud P. Verbeek, 2020)	0,011
CO	Ushakov et al., 2018, LPDF-motoren (Ushakov & Stenersen, 2019)	10,7
CO ₂	TNO report TNO-RPT-2011-00166 1.0, tabel 14 (TNO, 2011)	2679,1
PM10	TNO report TNO-RPT-2011-00166 1.0, tabel 14 (TNO, 2011)	0,11

* bij een fractie pilot-fuel van 20%, is de zwavelemissie één vijfde van die van puur MGO.

Vervolgens wordt de data uit het TNO-rapport R10662 uit 2016 gebruikt als uitgangspunt (weergegeven in kolom 2), en waar mogelijk vervangen met actuele data uit Tabel 16. Het resultaat daarvan in kolom 3 wordt gebruikt als inputdata voor de LCA en is weergegeven in Tabel 17.

Tabel 17: Emissies naar lucht bij de verbranding van 1 ton brandstof (80% LNG en 20% MGO) in een dual-fuel motor.

Emissie	Hoeveelheid (kg)	
	2016 studie	Update 2021
Carbon dioxide, fossil	2750	2679,1
Carbon monoxide, fossil	14,8	10,7
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1,5	2,30
Nitrogen dioxide	4,5	10,7
Particulates, < 10 um	0,08	0,11
Sulfur dioxide	0,1	0,28
Methane, fossil ⁴	13,3	38,9
Dinitrogen monoxide	0,08	0,09
Ammonia	0,01	0,011
Acrolein	1,56E-03	1,56E-03
Benzene	2,07E-03	2,07E-03
Ethene	1,24E-02	1,24E-02
Formaldehyde	6,22E-03	6,22E-03
Toluene	1,51E-03	1,51E-03
Xylene (gelijk verdeeld over M-xylene, O-Xylene en P-Xylene)	2,07E-03	2,07E-03
Phenanthrene	3,70E-05	3,70E-05
Anthracene	3,00E-06	3,00E-06
Fluoranthene	4,00E-06	4,00E-06
Chrysene	2,00E-06	2,00E-06
Benzo(a)anthracene	1,00E-06	1,00E-06
Benzo(a)pyrene	1,00E-06	1,00E-06
Benzo(b)fluoranthene	4,97E-07	4,97E-07
Benzo(k)fluoranthene	2,48E-07	2,48E-07
Benzo(g,h,i)perylene	1,94E-07	1,94E-07
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	1,08E-10	1,08E-10
Naphthalene	2,59E-04	2,59E-04
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	1,08E-11	1,08E-11
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a ⁵	1,60E-02	1,60E-02

3.3.4 Module D

Voor de kapitaalgoederen met een hoge bijdrage aan de totale MKI is er in deze studie een end of life scenario toegevoegd, waarbij de recycling (en uitsparing) van metalen meegenomen wordt. Dit geldt alleen voor de kapitaalgoederen in module B1. De kapitaalgoederen in module A1-A3 dragen minder dan 1 % bij aan de MKI binnen deze module. De kapitaalgoederen binnen module A4 dragen ongeveer 1,5% bij aan de MKI voor module A4. Ze worden niet verwaarloosd, maar er wordt geen end-of-life scenario aan toegevoegd, omdat de bijdrage daarvan aan module D op minder dan 1% uitkomt.

⁴ Inclusief methaanslip

⁵ Koelmiddel (zie paragraaf 3.4.6)

De recycling van metalen uit het baggerschip en de machines, en daarmee de uitsparing van primaire grondstoffen in module D, is voor alle brandstoffen hetzelfde en uitgewerkt in paragraaf 3.4.4. De afvalverwerking en recycling zelf is niet opgenomen in een aparte module C, maar verwerkt in module B1, omdat afvalverwerking moet worden gedeclareerd in de module waar het ontstaat volgens de Bepalingsmethode (Milieudatabase, 2020a). Hierbij is transport naar de afvalverwerker weggelaten, omdat de milieu-impact verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de rest van de levenscyclus.

3.4 Kapitaalgoederen & hulpmiddelen voor gebruiksfase

Een aantal processen is relevant voor meerdere brandstoffen en is consequent hetzelfde gemodelleerd. In deze paragraaf worden ze besproken.

3.4.1 *Infrastructuur*

Met "infrastructuur" wordt in deze studie bedoeld: de (transport)middelen die primair gebruikt worden om de brandstof te bunkeren en te verbranden. Voor scheepsbrandstoffen gaat het dan om de schepen en om de havens waar de schepen verblijven (bijvoorbeeld om te bunkeren). Eventuele bunkerschepen die nodig zijn om die brandstof van de haven naar het baggerschip brengen worden buiten beschouwing gelaten. Het gebruik van de haven die het bunkerschip dan weer gebruikt wordt wel meegenomen. Voor alle brandstoffen wordt het gebruik van havens, het bunkeren en de transportafstand van bunkerlocatie naar het werk op dezelfde manier gemodelleerd. Hoewel per brandstof de locaties waar bunkeren mogelijk is zullen verschillen, maakt dat voor de milieu-impact in deze studie niet uit, omdat er wordt gewerkt met een forfaitaire afstand van 150 km.

Systeem-infrastructuur voor de brandstof voor distributie en productie van brandstoffen zijn meegenomen in achterliggende de proceskaarten van ecoinvent. Infrastructuur voor de schepen, d.w.z. vaarwegen, sluisen e.d., zijn niet meegenomen in deze rapportage. In de SBK bepalingmethode is beschreven dat alles dat minder dan 1% op basis van massa en energie-input bijdraagt en niet meer dan 5% aan de milieu-impact niet meegenomen hoeft te worden in de LCA. Naar verwachting is de impact van sluisen en vaarwegen niet significant voor baggerschepen, omdat deze in principe nooit ver landinwaarts varen.

Deze verwachting wordt als volgt inzichtelijk gemaakt: Uit de proceskaart "Transport, freight, inland waterways, barge {RER}| processing | Cut-off, U" uit ecoinvent blijkt dat vaarwegen 13,6% aan de MKI bijdragen. Omdat een baggerschip veel minder gebruik maakt van een kanaal dan een binnenvaartschip zal de bijdrage van vaarwegen aan de totale MKI gering zijn voor baggerschepen.

3.4.2 *Schepen*

De brandstoftoepassing vindt plaats in schepen die ingezet worden voor baggerwerkzaamheden en kustsuppletie. De impact van de materialen waar het schip uit bestaat (productie, onderhoud en verwerking einde levensduur) wordt toegerekend aan de brandstof, op basis van de totale hoeveelheid brandstof die gedurende de levensduur van het schip gebruikt wordt. Hierbij vindt er geen update plaats van de gehanteerde data uit het TNO-rapport R10662. De aanpak wordt hieronder verder uitgewerkt.

Ecoinvent heeft gegevens om de materialen van schepen toe te rekenen aan transportschepen, maar heeft geen relevante gegevens voor het type schepen dat relevant is voor deze opdracht (m.n. baggerschepen). Het milieuprofiel voor baggerschepen is gebaseerd op de materiaalsamenstelling van een zeeschip uit ecoinvent met correctiefactoren voor grootte van het schip en toevoeging van de specifieke machines zoals pompen. Daarnaast wordt er een end of life scenario toegevoegd, waarbij de recycling (en uitsparing) van metalen meegenomen wordt.

Voor de modellering van het schip is gebruik gemaakt van de productkaart "Freight ship, transoceanic {GLO} production". Dit schip is opgebouwd uit verschillende materialen, maar "Reinforcing steel" beslaat met afstand het grootste percentage van het totale gewicht. De totale massa van het schip is daardoor bij benadering gelijk aan de massa van dit materiaal, namelijk 7.500 ton. De massa van een typisch baggerschip is echter 3.900 ton⁶. Daarom zijn alle inputs van de gebruikte referentie uit ecoinvent geschaald met de factor 3900/7500 om de productkaart representatief te maken voor een baggerschip.

Voor de modellering van de specifieke machines aan boord van baggerschepen werd in het TNO-rapport R10662 gebruik gemaakt van de referentie "slurry tanker, production/kg/CH/I". Deze referentie is echter van naam veranderd tijdens een ecoinventupdate en heet nu "Liquid manure tank trailer {CH} production". Er is ervoor gekozen om van de eerder gemaakte keuze voor Zwitserland als representatief gebied voor Nederland af te wijken, en in plaats daarvan Rest-of-World te kiezen (een Europees gemiddelde proceskaart bestaat niet in ecoinvent). De reden hiervoor is dat Zwitserland niet vergelijkbaar is met Nederland wat betreft stroomvoorziening. Daarmee heeft een geografisch gebied waar Nederland in ligt de voorkeur boven Zwitserland. De referentie die nu gekozen is, is "Liquid manure tank trailer {RoW} production".

De hoeveelheid schip per ton brandstof is gebaseerd op een gemiddelde levensduur (20 jaar), zoals ook gehanteerd is in TNO-rapport R10662. Omdat er relatief veel spreiding is in levensduur zijn er nog steeds ook veel oudere schepen in gebruik. Schepen met pré Tier I motoren, inmiddels ouder dan 20 jaar, zijn daarom nog steeds veel in gebruik.

Voor het jaarlijks brandstofverbruik⁷ wordt uitgegaan van 2812 ton brandstof. Dit komt neer op een hoeveelheid van 1,78E-5 schip per ton brandstof. De hoeveelheid extra machines is gebaseerd op een veronderstelde levensduur van 5 jaar.

⁶ 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 $0,464 \times 8362 \text{ ton} = 3.879.968 \text{ kg}$.

⁷ Jaarlijks brandstofverbruik is gebaseerd op

- Het aantal kilo's brandstof dat per cyclus verbruikt wordt:
 - o Tijdens varen: $2,5u (150 \text{ min.}) \times 4000 \text{ kW vermogen} \times 0,19 \text{ kg/kWh specifiek verbruik} = 1900 \text{ kg}$
 - o Tijdens lossen: $0,25u (15 \text{ min.}) \times 700 \text{ kW vermogen} \times 0,19 \text{ kg/kWh} = 33,25 \text{ kg}$
 - 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 $4000 \text{ uur} \times 703 \text{ kg/uur} = 2812000 \text{ kg brandstof}$.

Dit komt neer op een hoeveelheid van $7,11E-5$ machine per ton brandstof. Omdat er gerekend wordt met een gewicht van 100 ton voor de machines aan boord van een baggerschip en de gebruikte referentie per kg is, is er $100.000 * 7,11E-5 = 7,11$ kg machines nodig per ton brandstof.

Zowel in de levensduur als in het brandstofverbruik zijn er aannames gemaakt in het TNO rapport R10662, die van invloed zijn op de hoogte van de milieu-impact van de schepen. Echter is de bijdrage van het schip op de totale MKI van de brandstoffen voor alle brandstoffen beperkt (5-10%), waardoor de onzekerheid in de levensduur en het brandstofverbruik van weinig invloed is op de totale MKI van de brandstofprofielen. Daarom heeft er in deze studie geen aanscherping op de data plaatsgevonden.

3.4.3 *Havens*

Havens zijn gemodelleerd op basis van de een algemene productkaart voor havengebruik "Port facilities {RER}| construction". In het TNO-rapport R10662 werd er daarnaast nog een extra productkaart gebruikt voor havenonderhoud, maar in de nieuwe versie van ecoinvent zijn de haven zelf en het onderhoud samengevoegd tot het bovengenoemde profiel. Hierbij is er één aanpassing gedaan, namelijk in het elektriciteitsverbruik. De proceskaart vermeldt namelijk dat een gedeelte van de gebruikte stroom afkomstig is van maintenance en gebruik van de haven, gebaseerd op informatie over de haven van Hamburg. Zoals in het TNO-rapport R10662 beschreven wordt dit elektriciteitsverbruik voornamelijk voor overslag ingezet, hetgeen voor baggerschepen niet relevant is. Daarom is het elektriciteitsverbruik uit de referentie verwijderd. Er blijft een stroomgebruik voor onderhoud aan de haven over van $4,53E7$ kWh voor deze productkaart die per stuk (dus één haven) gemodelleerd is.

Vervolgens is de hoeveelheid havengebruik gerelateerd aan een ton brandstof. Hiervoor is gebruik gemaakt van de referentie uit ecoinvent "Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| processing". Deze referentie beschrijft een bepaalde hoeveelheid transport, uitgedrukt in tkm, en bevat een bijbehorende hoeveelheid brandstof en havengebruik. Wij hebben deze hoeveelheden omgerekend per ton brandstof, om zo het havengebruik te kunnen relateren aan de rekeneenheid van de brandstoffen in deze studie. Dit komt neer op $5,08x 10^{-9}$ hoeveelheid havengebruik per ton brandstof.

3.4.4 *Recycling van metalen*

In het TNO-rapport R10662 is de recycling van metalen bij afdanking van de schepen meegenomen. In deze studie is de aanpak hiervan vernieuwd naar de nieuwste versie van de Bepalingsmethode en de Nationale Milieudatabase. Daarnaast wordt module D enigszins vereenvoudigd ten opzichte van het TNO-rapport R10662, doordat in deze studie slechts de recycling van staal en roestvrij staal wordt meegenomen. De uitsparing andere metalen is achterwege gelaten, omdat deze per materiaal slechts 0,1% of minder van het totale metaalgewicht bedragen en dus een verwaarloosbare impact hebben.

Om de uitsparing van primaire grondstoffen in Module D te bepalen is allereerst gekeken naar het document “Forfaitaire waarden voor verwerking-scenario’s einde leven behorende bij: Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken” waar de bepalingmethode naar verwijst (Milieudatabase, 2020b) (Milieudatabase, 2020a). Dit document beschrijft per materiaalcategorie welke fractie ervan bij einde leven wordt gestort, verbrand, gerecycled of hergebruikt. Voor staal zijn er enkele categorieën beschikbaar, waarvan “Staal, zink / verzinkt staal (o.a. profielen, platen, zinklagen)” het meest representatief wordt geacht voor de scheepsbouw vanwege (het voorkomen van) roestvorming. De overige opties zijn “Staal, damwanden”, “Staal, licht”, en “staal, wapening”. Alle drie deze opties worden minder representatief geacht, waarbij voor “staal, licht” doorslaggevend is dat er 12% hergebruik plaatsvindt, wat niet realistisch wordt geacht voor onderdelen van schepen. Voor de gekozen deze materiaalcategorie geldt dat er 95% gerecycled wordt en 5% gestort. Met deze percentages is er gerekend in deze studie.

De volgende referenties zijn gehanteerd voor stort, recycling en uitsparing van materiaal:

Tabel 18: Gehanteerde referenties per onderdeel van de einde levensduur.

Onderdeel	Referentie	Toelichting
Stort	0253-sto&Stort staal (o.b.v. Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, U)	Deze referentie is de enige optie voor staal uit de NMD 3.2 en wordt daarmee gezien als standaard.
Recycling	0315-reC&Sorteren en persen oud ijzer (o.b.v. Iron scrap, sorted, pressed {RER} sorting and pressing of iron scrap Cut-off, U)	Deze referentie is de enige optie voor staal uit de NMD 3.2 en wordt daarmee gezien als standaard.
Uitsparing	0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U)	Deze referentie is de enige optie voor staal uit de NMD 3.2 en wordt daarmee gezien als standaard.

Omdat 95% van het staal gerecycled wordt en de hoeveelheid staal in schepen en machines aan boord bekend is via de proceskaarten van ecoinvent, kan er worden uitgerekend hoeveel secundair materiaal het productsysteem verlaat (95% van het inkomende materiaal). De precieze hoeveelheid uitgaand materiaal wordt hier niet nader toegelicht, omdat dit al in de ecoinvent proceskaarten is opgenomen.

Nu moet er alleen nog worden bepaald hoeveel secundair materiaal er het productsysteem binnenkomt. Het verschil hiertussen bepaalt namelijk hoeveel primair materiaal er kan worden uitgespaard in module D (Milieudatabase, 2020a). Dit verschilt per referentie in ecoinvent en zal dus moeten worden uitgezocht voor de vier staalproductkaarten die zijn gebruikt in het baggerschip en de extra machines daarbij.

Reinforcing steel

Deze referentie bestaat voor 63% uit ongelegeerd staal, en 37% uit laaggelegeerd staal. Voor de productie van 1 kg laaggelegeerd staal via het convertorproces (57% van totale productie) wordt er 0,12501 kg scrap gebruikt en bij het vlamboogovenproces (43% van totale productie) 1,105 kg. Voor productie van 1 kg ongelegeerd staal wordt altijd 0,2125 kg scrap gebruikt.

Hiermee is de input van secundair materiaal per kg reinforcing steel gelijk aan $73\% \cdot 0,2125 + 37\% \cdot 57\% \cdot 0,12501 + 37\% \cdot 43\% \cdot 1,105 = 0,357$ kg.

Omdat de output gelijk is aan 0,95 kg (95% recycling), is de netto outputstroom van secundair materiaal $0,95 - 0,357 = 0,593$ kg per kg reinforcing steel. Met deze hoeveelheid mag dus gerekend worden in module D.

Steel, chromium steel 18/8, hot rolled

Chromium steel verwijst voor 27% naar het convertor proces, waar 0,52029 kg scrap voor wordt gebruikt. Voor het electric-proces wordt er geen scrap toegepast.

Hiermee is de input van secundair materiaal per kg reinforced steel gelijk aan $27\% \cdot 0,52029 = 0,1405$ kg. Omdat de output gelijk is aan 0,95 kg (95% recycling) is de netto outputstroom van secundair materiaal $0,95 - 0,1405 = 0,81$ kg per kg staal. Met deze hoeveelheid mag dus gerekend worden in module D.

Steel, low-alloyed, hot rolled

Low alloyed steel verwijst voor 43% naar het electric-proces, waar 1,105 kg scrap voor wordt gebruikt en voor 57% naar het convertorproces, waar 0,1205 kg scrap wordt gebruikt. Hiermee is de input van secundair materiaal per kg staal gelijk aan $43\% \cdot 1,105 + 57\% \cdot 0,1205 = 0,406$ kg. Omdat de output gelijk is aan 0,95 kg (95% recycling) is de netto outputstroom van secundair materiaal $0,95 - 0,406 = 0,544$ kg per kg staal. Met deze hoeveelheid mag dus gerekend worden in module D.

Steel, unalloyed

Unalloyed steel gebruikt per kg 0,2125 kg. Hiermee is de input van secundair materiaal per kg staal gelijk aan 0,2125 kg. Omdat de output gelijk is aan 0,95 kg (95% recycling) is de netto outputstroom van secundair materiaal $0,95 - 0,2125 = 0,737$ kg per kg staal. Met deze hoeveelheid mag dus gerekend worden in module D.

3.4.5 *Smeerolie*

Alle motoren die beschouwd worden in deze studie, worden gesmeerd met smeerolie. Viertakmotoren 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 19. Dit smeerolieverlies is in alle proceskaarten gemodelleerd als smeerolieverbruik, oftewel "Lubricating oil {RER}" in ecoinvent. Deze proceskaart bevat transport naar een gemiddelde locatie in Europa, wat representatief is aangezien de leverancier onbekend is.

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

Brandstof	Smeeroлие-verlies (g/kWh)	Energie-inhoud (MJ/kg)	Omreken-factor* (kWh/kg)	Smeeroлие-verlies (kg/ ton brandstof)
MGO	0,4	42,8	5,36	2,15
LNG	0,4	49	6,14	2,46

De verliezen van de smeeroлие 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 smeerolieg wordt niet beschouwd als een afvalproduct (omdat het later nog nuttig hergebruikt wordt) en de verdere verwerking is dus ook niet meegenomen.

3.4.6 Koelmiddelen

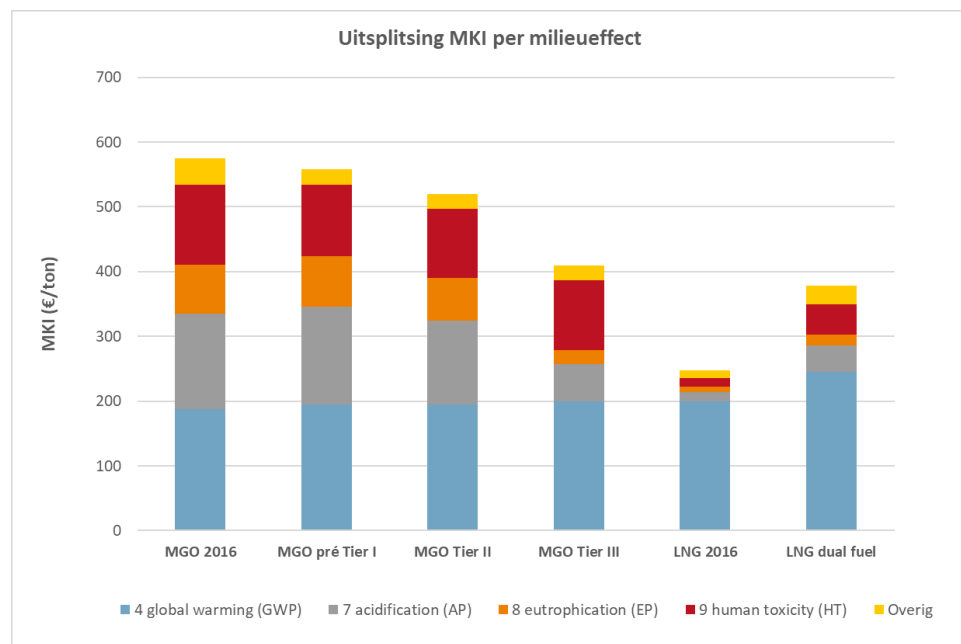
De schepen zijn voorzien van airconditioning om de binnenruimten te koelen. Deze installaties hebben een reservoir met ongeveer 150 kilogram koelmiddel R-134a (1,1,1,2-tetrafluorethaan), waaruit jaarlijks circa 30% ontsnapt (Smith et al., 2014). Deze emissie is meegenomen in de emissiefactoren voor alle brandstoffen. Daarnaast is de jaarlijkse productie van dit koelmiddel meegenomen in de berekeningen (dus 45 kg per jaar). Dit komt neer op 0,016 kg per ton brandstof. Voor productie is de proceskaart "Refrigerant R134a {GLO} market for" gebruikt.

4 Effectbeoordeling

In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze LCA-studie besproken. De milieupact van de verschillende brandstoffen wordt uitgedrukt in de MilieuKostenIndicator (MKI) per ton verbruikte brandstof. Deze MKI wordt vervolgens op twee manier uitgesplitst: per milieueffect (4.1) en per levenscyclusfase (4.2). In het volgende hoofdstuk (5) wordt dieper in gegaan op de zwaartepunten en gevoeligheden van de resultaten.

4.1 Milieueffecten

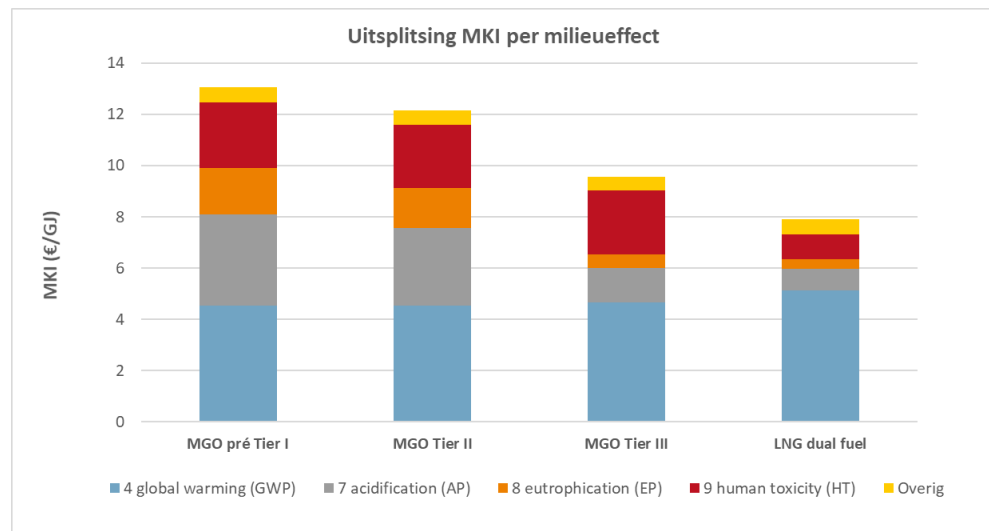
Figuur 7 toont de MKI voor de gehele levenscyclus van de brandstoffen. Hierbij wordt er ook een vergelijking gemaakt met de brandstofprofielen die in 2016 werden opgesteld (TNO-rapport R10662), zodat het inzichtelijk wordt wat de bijdrage is van individuele milieueffecten aan de verschillen tussen de profielen uit 2016 en uit deze studie. De traditionele scheepsbrandstof MGO heeft over de hele levenscyclus per ton een hogere impact dan LNG (80% LNG 20% MGO). Bij MGO zijn er kleine verschillen in MKI tussen pré Tier I en Tier II motoren, en ligt Tier III substantieel lager, met name doordat vermesting en verzuring lager uitvallen als gevolg van de lagere uitstoot van NO_x. Het LNG-profiel (dus 80% LNG 20% MGO) heeft over de gehele levenscyclus een hoger klimaatveranderend effect dan MGO. Het LNG-profiel scoort het laagst op verzuring en vermesting.



Figuur 7: Uitsplitsing MKI per milieueffect per ton brandstof.

In vergelijking met het TNO-rapport R10662 blijven de milieueffecten die veel bijdragen aan de totale MKI min of meer gelijk, met uitzondering van LNG: Voor LNG gaat de bijdrage van human toxicity, verzuring, vermesting en global warming significant omhoog (>20% stijging voor global warming, >100% stijging voor de overige effecten).

Aangezien de brandstoffen enigszins verschillen in calorische waarde (42,8 tot 49 MJ/ton), zal de vergelijking van de milieu-impacts van de brandstoffen per hoeveelheid geleverde energie licht afwijken van het beeld in bovenstaande grafiek. Daarom wordt de MKI over de gehele levenscyclus ook per GJ weergegeven in onderstaande grafiek. Hierbij is de naar massa gewogen gemiddelde calorische waarde voor LNG (80% LNG en 20% MGO) aangehouden. De verhoudingen tussen de brandstoffen verschillen nauwelijks, maar het LNG-profiel komt per GJ relatief nog iets lager uit dan per ton brandstof.

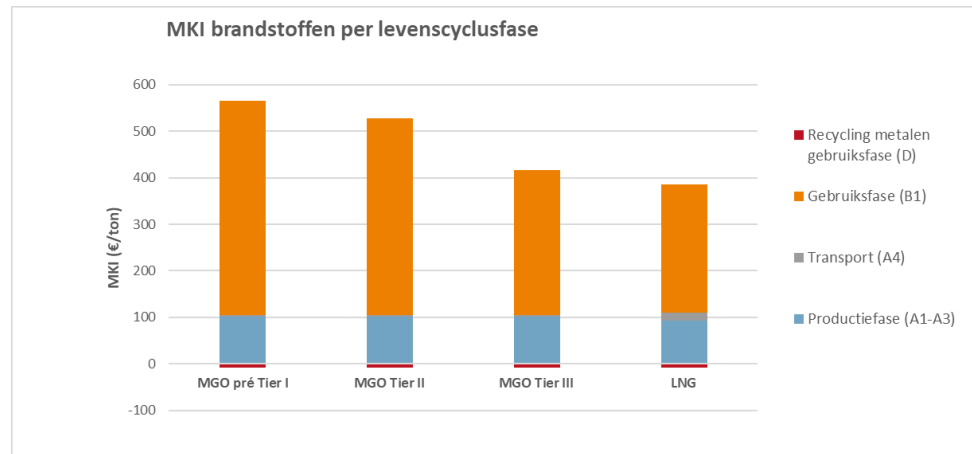


Figuur 8: Uitsplitsing MKI per milieueffect per GJ brandstof.

4.2 Levenscyclusfasen

Zoals Figuur 9 laat zien, zijn de impacts bij de verschillende brandstoffen op vergelijkbare wijze over de levensfasen verdeeld: het grootste deel van de milieueffecten ligt in de gebruiksfase. Het transport van de brandstof naar de gebruiker (A4) heeft bij alle brandstoffen geen significante impact (<5%).

Alhoewel Module D voor de recycling van metalen uit het baggerschip slechts een kleine bijdrage heeft ten opzichte van het totaal (<5%), valt het op dat er hier een negatieve MKI optreedt, die de MKI van de productie van de kapitaalgoederen iets verlaagt. Dit is het gevolg van het doorgeven van een netto hoeveelheid secundair materiaal aan een nieuwe levenscyclus. Deze netto hoeveelheid kent een grondstofequivalent, waarmee bepaald wordt wat de vermeden productie van primair materiaal is.



Figuur 9: Uitsplitsing MKI per levenscyclusfase per ton brandstof.

5 Interpretatie

5.1 Zwaartepuntanalyse

In deze paragraaf worden de modules die het meest bijdragen aan de totale milieu-impact nader onderzocht en verder uitgesplitst middels een zwaartepuntanalyse. Module A4 en D dragen relatief weinig (<5%) bij aan de totale MKI voor alle brandstoffen en worden daarom buiten beschouwing gelaten in dit hoofdstuk. Er wordt dus alleen een zwaartepuntanalyse voor module A1-A3 en B1 opgesteld.

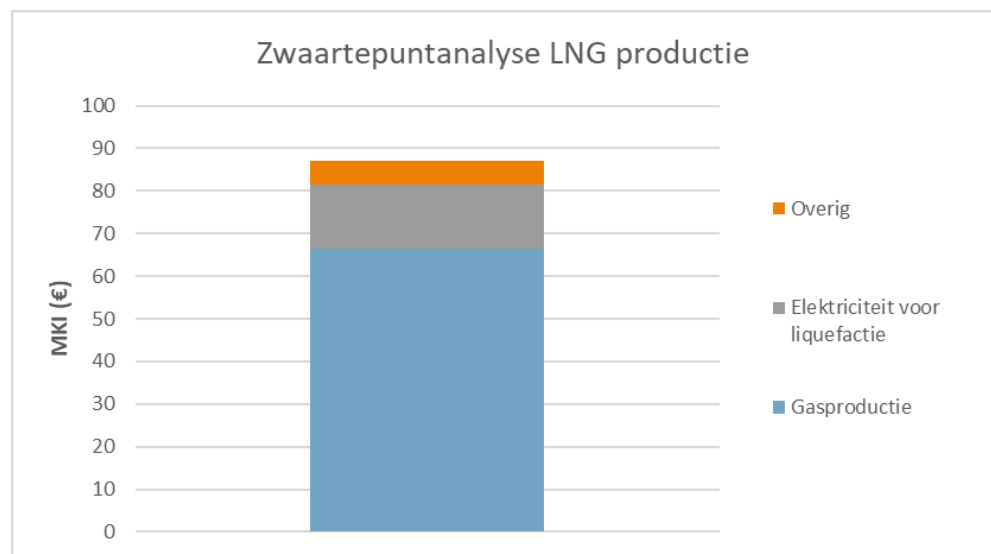
5.1.1 A1-A3 Productiefase

MGO

Omdat er voor MGO is gewerkt met een standaard referentie uit ecoinvent, en de impact van de productie minder bijdraagt aan de totale MKI dan de gebruiksfase, wordt er geen zwaartepuntanalyse voor de productie van MGO getoond. De MKI is vrijwel geheel opgebouwd uit de productie en raffinage van diesel.

LNG

Figuur 10 toont de MKI, uitgesplitst voor de productie van LNG. De productie van aardgas heeft met 66 MKI de grootste bijdrage aan de milieu-impact, gevolgd door de benodigde elektriciteit voor liquefactie. De overige proces-inputs dragen in totaal weinig bij.

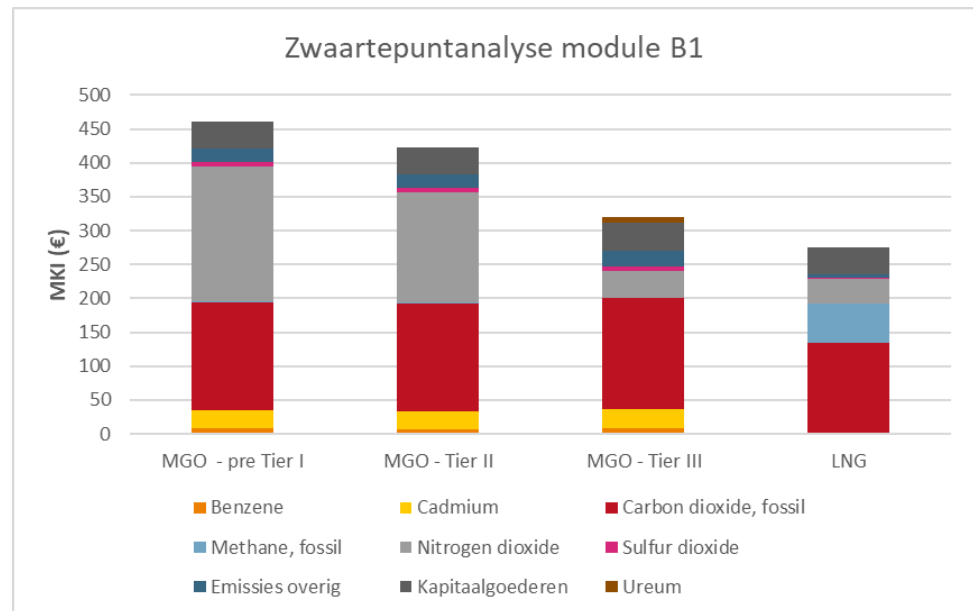


Figuur 10: Zwaartepuntanalyse voor de productie van LNG (A1-A3).

5.1.2 B1 – Gebruiksfase

Figuur 11 geeft een uitsplitsing weer van de belangrijkste verbrandingsemissies en kapitaalgoederen voor alle brandstoffen. NO_x (nitrogen oxides) en CO₂ (carbon dioxide) hebben gezamenlijk de grootste bijdrage bij alle vier brandstof – motor combinaties. Voor LNG geeft methaan een belangrijke bijdrage aan de MKI, maar voor de andere brandstofprofielen niet.

Ook valt af te lezen dat de verschillen in MKI tussen de pre Tier I, de Tier II en de Tier III motoren voornamelijk te relateren zijn aan de uitstoot van NO_x. De extra uitstoot van CO₂ en het gebruik van ureum bij Tier III dragen beperkt bij aan de MKI. Tot slot valt er af te lezen dat de bijdrage van kapitaalgoederen voor alle brandstoffen nagenoeg gelijk is, met een MKI rond de 40 euro.



Figuur 11: Zwaartepuntanalyse binnen module B1 voor alle brandstoffen, per ton brandstof.

5.2 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 aannames en alternatieve scenario's die we bekijken hebben betrekking op:

- **MGO:**
De aanname betreft het toerental van de motor bij het Tier III profiel. Bij MGO wordt de MKI gedomineerd door de uitstoot van CO₂ en NO_x. Omdat de NO_x uitstoot volgens de Tier III limiet afhankelijk is van het toerental en het toerental variatie kent, wordt er onderzocht wat hiervan het effect is op de totale MKI.
- **LNG:**
De aanname betreft de uitstoot van methaanslip. Voor LNG bekijken we wat het effect is van een lagere of hogere uitstoot van methaan tijdens de verbranding, omdat hier een onzekerheidsmarge op zit.

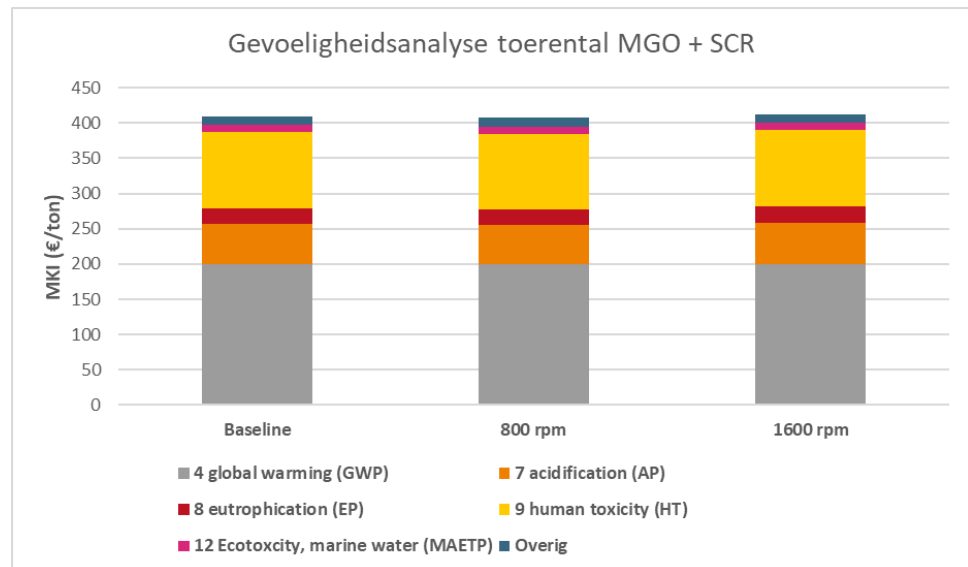
5.2.1 Gevoeligheidsanalyse 1: variatie in NO_x-uitstoot bij toepassing SCR.

In deze gevoeligheidsanalyse is onderzocht wat de invloed is van de spreiding in het toerental n op de totale MKI het MGO Tier III profiel. In paragraaf 3.1.3 is uitgewerkt dat de stikstof-limiet voor tier III afhankelijk is van het toerental, en dat het toerental tussen de 800 en 1600 rpm ligt. Voor het Tier III profiel is een gemiddelde aangehouden van 1200 rpm, en in deze gevoeligheidsanalyse wordt gekeken naar het effect van de onder- en bovengrens. De stikstoflimiet bedraagt 12,72 kg NO_x per ton MGO bij 800 rpm en 11,07 kg NO_x bij 1600 rpm. De gehanteerde data en de hoeveelheid ureum en CO₂ uitstoot die ermee gepaard gaat is weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20: Inputdata voor de gevoeligheidsanalyse van MGO + SCR.

	MGO + SCR		
	Baseline (1200 rpm)	800 rpm	1600 rpm
kg NO _x uitstoot per ton brandstof zonder SCR	59,80	59,80	59,80
kg NO _x uitstoot per ton brandstof met SCR	11,73	12,72	11,07
kg NO _x te reduceren	48,07	47,08	48,73
kg ureum	48,11	47,12	48,77
kg CO ₂ die vrijkomt	35,25	34,53	35,74

De uiteindelijke resultaten zijn weergegeven in Figuur 12. De drie situaties leveren nagenoeg dezelfde resultaten op. Bij 800 rpm wordt de totale MKI 0,5% verlaagd, en bij 1600 rpm 0,8% verhoogd ten opzichte van de baseline. De spreiding in het toerental is dus van zeer geringe invloed op de MKI van het Tier III profiel voor MGO.



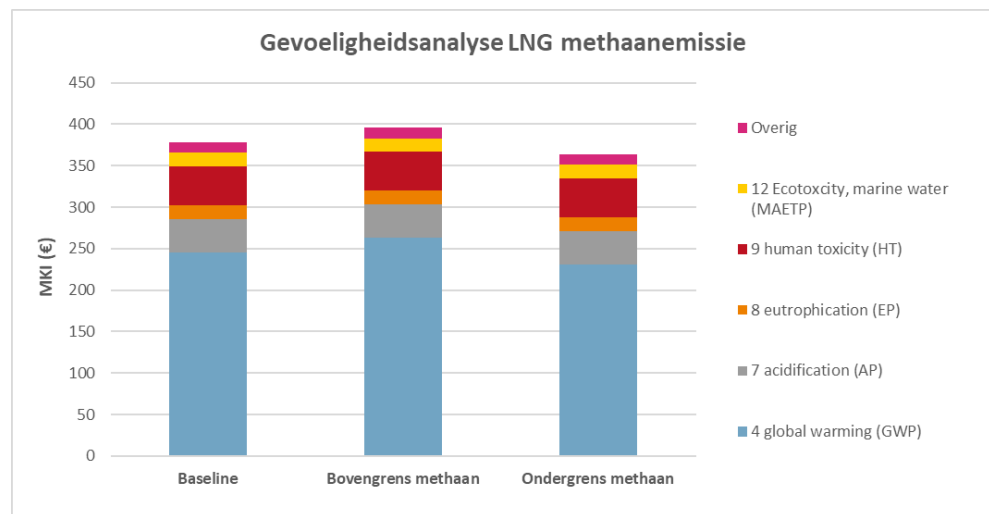
Figuur 12: Gevoeligheidsanalyse van MGO om de invloed op de MKI van de spreiding in het toerental aan te tonen.

5.2.2 Gevoeligheidsanalyse 2: methaanemissies bij LNG

Voor LNG is er onderzocht wat de invloed is op de totale MKI van de onzekerheidsmarge in de uitstoot van methaan in de gebruiksfase B1. In Figuur 5 uit de studie die gebruikt is voor het bepalen van de LNG uitstoot (Ushakov & Stenersen, 2019) valt af te lezen dat de bovengrens in methaanuitstoot op 9 g / kWh zit, en de ondergrens op 4,6 g / kWh. Ten opzichte van het uitgangspunt van 6,9 g / kWh (gelijk aan 38,9 kg per ton brandstof) komt dit voor de bovengrens op 30% hoger uit, en de ondergrens op 33% lager. Dat deze percentages niet identiek zijn is mogelijk het gevolg van afronding bij het aflezen van de grafiek of van een niet-normale verdeling.

Mogelijk leidt de druk op broeikasgasemissies voor de zeevaart tot het op termijn beschikbaar komen van motoren met veel lagere methaanemissies. Vooralsnog zijn daar echter nog geen duidelijke indicaties voor. Een motor met lage methaanemissies heeft over het algemeen SCR nabehandeling nodig, hetgeen sterk kostenverhogend is. Voor de huidige praktijksituatie voor de Noordzee lijkt de gebruikte bron de best representatieve.

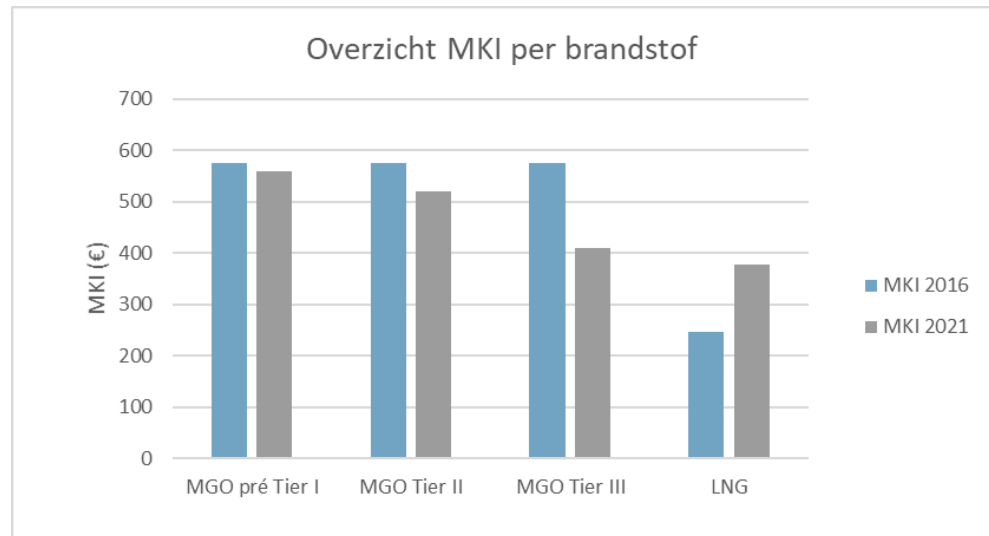
In Figuur 13 is weergegeven wat het effect hiervan op de totale MKI is. De grafiek toont de uitgangssituatie (baseline), de onder- en bovengrens. De bovengrens komt 4,7% hoger uit op de totale MKI, en de ondergrens 3,9% lager. De invloed van de onzekerheid van methaanemissie op de totale MKI is dus redelijk beperkt (<5%).



Figuur 13: Gevoeligheidsanalyse voor LNG, waarbij wordt onderzocht wat de invloed op de totale MKI is van de onzekerheid in methaanemissie.

5.3 Vergelijking met voorgaande onderzoek

In Figuur 14 wordt er een vergelijking gemaakt tussen de 4 milieuprofielen voor de brandstoffen die in deze studie zijn opgesteld met de overeenkomende brandstoffen uit het TNO-rapport R10662.



Figuur 14: Overzicht van de MKI per ton brandstof en vergelijking met het TNO-rapport R10662 uit 2016. NB: in 2016 werd slechts 1 profiel voor MGO opgesteld, en geen onderscheid gemaakt tussen Pré Tier I en Tier II.

Voor MGO pré Tier I en Tier II zijn de verschillen relatief klein. Het verschil is met name te verklaren zijn doordat Tier II motoren iets gunstiger uitvallen dan het gemiddelde profiel uit het TNO-rapport R10662, en doordat de ecoinvent proceskaart voor productie van MGO anders is dan die van MDO (welke in de studie uit 2016 werd gehanteerd in plaats van MGO). Daarnaast heeft er een update plaatsgevonden naar een nieuwe versie van ecoinvent. Het Tier III profiel valt substantieel lager uit dan het Tier II profiel vanwege de verlaagde uitstoot van NO_x .

Voor LNG zijn de verschillen ook aanzienlijk, wat te maken heeft met de volgende twee punten:

- Er zijn nieuwe inzichten over de uitstoot van methaan bij de verbranding van LNG in een dual-fuel motor, die veel hoger blijkt uit te vallen dan dat er in 2016 aangenomen werd.
- De winning van gas is in deze studie representatiever gemaakt voor LNG in de Europese context. Waar er in 2016 werd gewerkt met winning in Qatar wordt er nu met verschillende winningslocaties gewerkt, overeenkomstig met de herkomstlocaties van LNG in Europa. Dit veroorzaakt een hogere impact dan in de vorige studie verondersteld werd.

6 Ondertekening

Naam van de opdrachtgever:
Rijkswaterstaat

Datum waarop of tijdsbestek waarin het onderzoek heeft plaatsgehad:
Oktober 2020- December 2021

Naam en functies van medewerkers:
Dr. M. Bolech
T. A. van der Kruk MSc

Naam en paraaf tweede lezer:



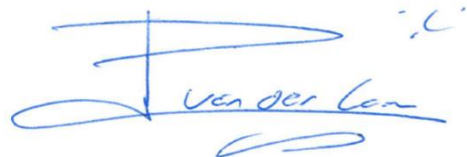
Dr. T.N. Ligthart

Ondertekening:



Ir. A. van Horssen
Projectleider

Autorisatie vrijgave:



Dr. ir. G.P. van der Laan
Research Manager

7 Bibliografie

- Aabo, K. (2002). *Marine Transport Fuels and Emissions*.
Dieselnet. (n.d.). *IMO Marine Engine Regulations*. Retrieved March 30, 2021, from <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- Edwards, R., Hass, H., Larivé, J.-F., Lonza, L., Maas, H., & Rickeard, D. (2014). WELL-TO-WHEELS integration. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. In *JRC Technical reports*. <https://doi.org/10.2790/95533>
- Geilenkirchen, G., Hulskotte, J., Dellaert, S., Ligterink, N., Sijstermans, M., Roth, K., & 't Hoen, M. (2018). *Methods for calculating the emissions of transport in the*. 67.
- IMO. (2020). *IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- International Organization for Standardization. (2017). *Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of marine fuels (ISO Standard No. 8217)*.
- Jochemsen-Verstraeten, J., de Vos-Effting, S. E., Keijzer, E. E., Dellaert, S. N. C., van Horssen, A., van Gijlswijk, R. N., & Hulskotte, J. H. J. (2016). *Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase*.
- Marin. (2021). *Sea Shipping Emissions 2019: Netherlands Continental Shelf, 12-Mile Zone and Port Areas*.
- Milieudatabase, S. N. (2020a). *Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken: Vol. Versie 1.0*.
- Milieudatabase, S. N. (2020b). *Forfaitaire waarden voor verwerking-scenario 's einde leven behorende bij: Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken Forfaitaire waarden voor verwerking-scenario 's einde leven behorende bij: Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. november, 1–2*.
- Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). (2006). *Nen-en-iso 14040*.
- Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). (2019). *NEN-EN 15804+A2 (Vol. 2, Issue november 2019)*.
- Norbert E. Ligterink, Jessica M. de Ruiter, S. N. C. D., & Jan H.C. Hulskotte, Ruud P. Verbeek, W. A. V. (2020). *Onderbouwing AERIUS emissiefactoren voor wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart en zeevaart*.
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel. https://theicct.org/sites/default/files/publications/Climate_implications_LNG_marinefuel_01282020.pdf. *ICCT Working Paper 2020-02, January*. www.theicct.org
- Port of Rotterdam. (n.d.). *Rotterdam Bunker Port*. Retrieved June 30, 2021, from <https://www.portofrotterdam.com/nl/scheepvaart/zeevaart/overig/rotterdam-bunker-port>
- Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M. and Edwards, R. (2020). *JEC Well-to-Tank report v5*. <https://doi.org/10.2760/959137>
- Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., & Hoen, M., A. (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. *International Maritime Organization (IMO)*, 327. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3>
- The Engineering Toolbox. (n.d.). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. Retrieved January 27, 2021, from https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- The European commission. (2021). *Amendment of the Renewable Energy Directive 2030 climate target*.

- TNO. (2011). *Environmental and Economic aspects of using LNG as a fuel for shipping in The Netherlands*. 1–48.
- Ushakov, S., & Stenersen, D. (2019). Methane slip from gas fuelled ships: a comprehensive summary based on measurement data. *Journal of Marine Science and Technology*.
- Vlasblom, W. J. (2007). *Designing Dredging Equipment. Lecture Notes* (Issue May).
- WWF, & IMO. (2021). *Sustainability criteria for zero and low carbon fuels*.
- Zimmer, S., & Choukatli, H. (2019). *LNG imports are sharply increasing in Europe: what are the key differentiation factors between the regasification terminals?* (Issue May). <https://www.emerton.co/app/uploads/2019/05/Market-insight-LNG-May-2019.pdf>

A Appendix I: Gekarakteriseerde milieueffecten op basis van set 1 (Bepalingsmethode)

In deze appendix worden de milieuprofielen per ton brandstof op basis van set 1 (Bepalingsmethode, juli 2020) getoond.

Tabel 21: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO pré Tier I.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,59E-03
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,50E+01	1,90E-01	1,33E+00	-3,53E-01	2,62E+01
4 global warming (GWP)	kg CO ₂ eq	5,08E+02	2,60E+01	3,41E+03	-5,79E+01	3,89E+03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,83E-04	4,02E-06	2,83E-05	-2,65E-06	7,12E-04
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C ₂ H ₄	7,56E-01	1,45E-02	3,68E+00	-1,36E-01	4,31E+00
7 acidification (AP)	kg SO ₂ eq	5,51E+00	1,09E-01	3,24E+01	-2,17E-01	3,78E+01
8 eutrophication (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq	7,54E-01	2,19E-02	7,95E+00	-2,20E-02	8,70E+00
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	4,01E+02	1,04E+01	8,43E+02	-3,72E+01	1,22E+03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1,67E+01	2,76E-01	2,64E+01	4,80E-01	4,38E+01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5,68E+04	9,49E+02	3,95E+04	5,18E+02	9,77E+04
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	8,68E-01	5,61E-02	1,24E+01	3,24E+00	1,65E+01
111. Energy, primary, renewable, excludi	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,16E+02
113. Energy, primary, renewable, materia	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
101. Energy, primary, renewable (MJ)	MJ	1,70E+02	1,43E+01	1,26E+02	5,60E+00	3,16E+02
112. Energy, primary, non-renewable, exc	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,61E+04
114. Energy, primary, non-renewable, mat	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,28E+04
102. Energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5,66E+04	4,10E+02	2,35E+03	-4,70E+02	5,89E+04
108. Secondary material (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
109. Secondary fuel, renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
110. Secondary fuel, non-renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
104. Water, fresh water use (m³)	m ³	5,99E+00	5,13E-02	1,72E+00	-2,13E-01	7,55E+00
106 Waste, hazardous (kg)	kg	1,41E-02	4,61E-04	1,29E-02	-7,91E-03	1,95E-02
105 Waste, non hazardous (kg)	kg	1,16E+01	2,07E+01	5,11E+01	-3,47E+00	8,00E+01
107 Waste, radioactive (kg)	kg	3,84E-01	2,28E-03	5,69E-03	-1,24E-04	3,92E-01
120. Components for re-use (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
121. Materials for recycling (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
122. Materials for energy recovery (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
123. Exported energy, electric (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
124. Exported energy, thermal (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabel 22: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO Tier II.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,59E-03
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,50E+01	1,90E-01	1,33E+00	-3,53E-01	2,62E+01
4 global warming (GWP)	kg CO ₂ eq	5,08E+02	2,60E+01	3,41E+03	-5,79E+01	3,89E+03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,83E-04	4,02E-06	2,83E-05	-2,65E-06	7,12E-04
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C ₂ H ₄	7,56E-01	1,45E-02	3,06E+00	-1,36E-01	3,69E+00
7 acidification (AP)	kg SO ₂ eq	5,51E+00	1,09E-01	2,70E+01	-2,17E-01	3,24E+01
8 eutrophication (EP)	kg PO ₄ --- eq	7,54E-01	2,19E-02	6,54E+00	-2,20E-02	7,30E+00
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	4,01E+02	1,04E+01	8,11E+02	-3,72E+01	1,18E+03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1,67E+01	2,76E-01	2,24E+01	4,80E-01	3,98E+01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5,68E+04	9,49E+02	3,95E+04	5,18E+02	9,77E+04
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	8,68E-01	5,61E-02	1,22E+01	3,24E+00	1,64E+01
111. Energy, primary, renewable, excludi	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,16E+02
113. Energy, primary, renewable, materia	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
101. Energy, primary, renewable (MJ)	MJ	1,70E+02	1,43E+01	1,26E+02	5,60E+00	3,16E+02
112. Energy, primary, non-renewable, exc	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,61E+04
114. Energy, primary, non-renewable, mat	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,28E+04
102. Energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5,66E+04	4,10E+02	2,35E+03	-4,70E+02	5,89E+04
108. Secondary material (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
109. Secondary fuel, renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
110. Secondary fuel, non-renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
104. Water, fresh water use (m³)	m ³	5,99E+00	5,13E-02	1,72E+00	-2,13E-01	7,55E+00
106 Waste, hazardous (kg)	kg	1,41E-02	4,61E-04	1,29E-02	-7,91E-03	1,95E-02
105 Waste, non hazardous (kg)	kg	1,16E+01	2,07E+01	5,11E+01	-3,47E+00	8,00E+01
107 Waste, radioactive (kg)	kg	3,84E-01	2,28E-03	5,69E-03	-1,24E-04	3,92E-01
120. Components for re-use (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
121. Materials for recycling (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
122. Materials for energy recovery (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
123. Exported energy, electric (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
124. Exported energy, thermal (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabel 23: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO Tier III.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,59E-03	3,87E-05	2,95E-03
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,50E+01	1,90E-01	1,98E+00	-3,53E-01	2,68E+01
4 global warming (GWP)	kg CO ₂ eq	5,08E+02	2,60E+01	3,52E+03	-5,79E+01	4,00E+03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,83E-04	4,02E-06	3,87E-05	-2,65E-06	7,23E-04
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C ₂ H ₄	7,56E-01	1,45E-02	2,36E+00	-1,36E-01	2,99E+00
7 acidification (AP)	kg SO ₂ eq	5,51E+00	1,09E-01	8,80E+00	-2,17E-01	1,42E+01
8 eutrophication (EP)	kg PO ₄ --- eq	7,54E-01	2,19E-02	1,76E+00	-2,20E-02	2,51E+00
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	4,01E+02	1,04E+01	8,19E+02	-3,72E+01	1,19E+03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1,67E+01	2,76E-01	2,74E+01	4,80E-01	4,48E+01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5,68E+04	9,49E+02	4,37E+04	5,18E+02	1,02E+05
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	8,68E-01	5,61E-02	1,25E+01	3,24E+00	1,66E+01
111. Energy, primary, renewable, excludi	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,41E+02
113. Energy, primary, renewable, materia	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
101. Energy, primary, renewable (MJ)	MJ	1,70E+02	1,43E+01	1,50E+02	5,60E+00	3,41E+02
112. Energy, primary, non-renewable, exc	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,75E+04
114. Energy, primary, non-renewable, mat	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,28E+04
102. Energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5,66E+04	4,10E+02	3,73E+03	-4,70E+02	6,03E+04
108. Secondary material (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
109. Secondary fuel, renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
110. Secondary fuel, non-renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
104. Water, fresh water use (m³)	m ³	5,99E+00	5,13E-02	5,82E+00	-2,13E-01	1,16E+01
106 Waste, hazardous (kg)	kg	1,41E-02	4,61E-04	1,41E-02	-7,91E-03	2,07E-02
105 Waste, non hazardous (kg)	kg	1,16E+01	2,07E+01	5,54E+01	-3,47E+00	8,42E+01
107 Waste, radioactive (kg)	kg	3,84E-01	2,28E-03	9,53E-03	-1,24E-04	3,96E-01
120. Components for re-use (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
121. Materials for recycling (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
122. Materials for energy recovery (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
123. Exported energy, electric (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
124. Exported energy, thermal (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabel 24: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton brandstof (80% LNG en 20% MGO) in een dual-fuel motor.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	9,06E-05	1,75E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,54E-03
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,72E+01	1,32E+00	1,34E+00	-3,53E-01	2,96E+01
4 global warming (GWP)	kg CO ₂ eq	7,19E+02	1,69E+02	4,08E+03	-5,79E+01	4,91E+03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,53E-04	1,52E-05	2,85E-05	-2,65E-06	2,94E-04
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C ₂ H ₄	1,01E+00	7,63E-02	2,26E+00	-1,36E-01	3,21E+00
7 acidification (AP)	kg SO ₂ eq	2,91E+00	8,16E-01	6,55E+00	-2,17E-01	1,01E+01
8 eutrophication (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq	2,69E-01	7,49E-02	1,57E+00	-2,20E-02	1,89E+00
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	2,23E+02	4,12E+01	2,90E+02	-3,72E+01	5,17E+02
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	4,01E+01	3,41E+00	2,69E+00	4,80E-01	4,67E+01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,44E+05	1,29E+04	5,43E+03	5,18E+02	1,63E+05
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	5,01E-01	1,49E-01	1,28E+00	3,24E+00	5,17E+00
111. Energy, primary, renewable, excludi	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,39E+02
113. Energy, primary, renewable, materia	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
101. Energy, primary, renewable (MJ)	MJ	6,69E+01	3,97E+01	1,26E+02	5,60E+00	2,38E+02
112. Energy, primary, non-renewable, exc	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,38E+04
114. Energy, primary, non-renewable, mat	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,78E+04
102. Energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5,69E+04	2,77E+03	2,37E+03	-4,70E+02	6,16E+04
108. Secondary material (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
109. Secondary fuel, renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
110. Secondary fuel, non-renewable (kg)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
104. Water, fresh water use (m³)	m ³	1,81E+00	-5,67E+01	1,73E+00	-2,13E-01	-5,34E+01
106 Waste, hazardous (kg)	kg	4,53E-02	2,89E-03	1,29E-02	-7,91E-03	5,32E-02
105 Waste, non hazardous (kg)	kg	6,43E+00	2,25E+01	5,11E+01	-3,47E+00	7,65E+01
107 Waste, radioactive (kg)	kg	7,93E-02	6,96E-03	5,78E-03	-1,24E-04	9,19E-02
120. Components for re-use (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
121. Materials for recycling (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
122. Materials for energy recovery (kg)	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
123. Exported energy, electric (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
124. Exported energy, thermal (MJ)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

B Appendix II: MKI

De MKI per ton brandstof per levenscyclusfase is weergegeven in Tabel 25.

Tabel 25: MKI per module voor alle 4 brandstofprofielen, per ton brandstof.

Brandstofprofiel	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
MGO pré Tier I	102,03	3,04	460,82	-7,37	558,51
MGO Tier II	102,03	3,04	422,39	-7,37	520,08
MGO Tier III	102,03	3,04	311,74	-7,37	409,43
LNG	92,06	17,85	275,68	-7,37	378,21

In Tabel 26 is een aangepaste versie van de MKI getoond, waarbij de wegingsfactor voor CO₂ verhoogd is van 50 euro per ton naar 103 euro per ton. Deze versie van de MKI wordt hier de MKI_{CO₂-103} genoemd.

Tabel 26: MKI_{CO₂-103} per module voor alle 4 brandstofprofielen, per ton brandstof.

Brandstofprofiel	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
MGO pré Tier I	128,95	4,41	641,69	-10,44	764,61
MGO Tier II	128,95	4,41	603,29	-10,44	726,21
MGO Tier III	128,95	4,41	498,39	-10,44	621,31
LNG	130,14	26,79	491,75	-10,44	638,24

In Tabel 27 is de MKI (met de standaard CO₂-weginfactor van 50 euro per ton) weergegeven voor de hele levenscyclus, uitgesplitst per milieueffect.

Tabel 27: MKI per milieueffect van de 4 brandstofprofielen per ton brandstof.

Effectcategorie	Eenheid	MGO pré Tier I	MGO Tier II	MGO Tier III	LNG
Totaal	Euro	564,25	526,11	415,17	376,92
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	Euro	0,00	0,00	0,00	0,00
2 abiotic depletion, fuel (AD)	Euro	4,19	4,19	4,29	4,73
4 global warming (GWP)	Euro	194,43	194,46	199,89	245,31
5 ozone layer depletion (ODP)	Euro	0,02	0,02	0,02	0,01
6 photochemical oxidation (POCP)	Euro	8,74	7,51	6,10	6,39
7 acidification (AP)	Euro	156,99	135,68	62,41	39,00
8 eutrophication (EP)	Euro	78,30	65,67	22,59	17,00
9 human toxicity (HT)	Euro	109,49	106,64	107,33	46,49
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	Euro	1,31	1,19	1,34	1,40
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	Euro	9,77	9,77	10,19	16,29
14 Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	Euro	0,99	0,98	1,00	0,31

C Appendix III: Gekarakteriseerde milieueffecten op basis van set 2 (EN 15804/A2:2019)

In deze appendix worden de milieuprofielen per ton brandstof op basis van set 2 (EN 15804+A2) getoond.

Tabel 28: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO pré Tier I.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
Climate change	kg CO ₂ eq	5,21E+02	2,62E+01	3,43E+03	-6,16E+01	3,92E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	8,63E-04	4,97E-06	2,59E-05	-2,18E-06	8,91E-04
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,35E+02	1,50E+00	5,07E+00	4,03E-01	2,42E+02
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	3,07E+00	1,41E-01	6,42E+01	-3,76E-01	6,71E+01
Particulate matter	disease inc.	3,17E-05	2,07E-06	1,92E-04	-3,36E-06	2,23E-04
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6,40E-06	3,91E-07	7,80E-05	1,29E-05	9,77E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	1,55E-07	1,27E-08	4,71E-06	-7,70E-09	4,87E-06
Acidification	mol H+ eq	6,36E+00	1,48E-01	4,72E+01	-2,63E-01	5,34E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7,63E-03	7,50E-04	2,20E-02	-1,50E-03	2,88E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	6,35E-01	4,44E-02	2,34E+01	-4,59E-02	2,41E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	7,18E+00	5,49E-01	2,57E+02	-5,32E-01	2,64E+02
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	2,64E+04	3,35E+02	6,32E+03	-2,10E+03	3,10E+04
Land use	Pt	6,27E+03	5,48E+02	2,42E+03	-1,03E+02	9,13E+03
Water use	m ³ depriv.	2,40E+02	3,25E-01	6,68E+01	-1,05E+01	2,96E+02
Resource use, fossils	MJ	5,34E+04	3,86E+02	2,22E+03	-4,52E+02	5,55E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,59E-03
Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	5,19E+02	2,62E+01	3,43E+03	-6,20E+01	3,92E+03
Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	1,25E+00	-5,53E-02	-6,44E-01	3,98E-01	9,53E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	1,47E-01	8,91E-03	3,16E-01	1,86E-02	4,90E-01
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	2,51E-07	3,45E-08	4,95E-05	-8,17E-09	4,98E-05
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	2,22E-06	1,03E-07	6,13E-06	-1,90E-06	6,56E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	3,99E-06	2,54E-07	2,24E-05	1,48E-05	4,14E-05
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	6,21E-08	8,00E-09	4,22E-06	-4,17E-07	3,88E-06
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	9,32E-08	4,72E-09	4,90E-07	4,09E-07	9,98E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	3,38E+03	1,88E+01	1,56E+02	-6,38E+00	3,55E+03
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	8,70E+03	6,26E+01	2,61E+02	-5,96E+01	8,96E+03
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	1,43E+04	2,54E+02	5,90E+03	-2,03E+03	1,84E+04

Tabel 29: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO Tier II.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
Climate change	kg CO ₂ eq	5,21E+02	2,62E+01	3,43E+03	-6,16E+01	3,92E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	8,63E-04	4,97E-06	2,59E-05	-2,18E-06	8,91E-04
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,35E+02	1,50E+00	5,07E+00	4,03E-01	2,42E+02
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	3,07E+00	1,41E-01	5,28E+01	-3,76E-01	5,56E+01
Particulate matter	disease inc.	3,17E-05	2,07E-06	1,78E-04	-3,36E-06	2,09E-04
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6,40E-06	3,91E-07	6,80E-05	1,29E-05	8,77E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	1,55E-07	1,27E-08	3,96E-06	-7,70E-09	4,12E-06
Acidification	mol H+ eq	6,36E+00	1,48E-01	3,92E+01	-2,63E-01	4,54E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7,63E-03	7,50E-04	2,20E-02	-1,50E-03	2,88E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	6,35E-01	4,44E-02	1,92E+01	-4,59E-02	1,99E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	7,18E+00	5,49E-01	2,11E+02	-5,32E-01	2,18E+02
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	2,64E+04	3,35E+02	6,30E+03	-2,10E+03	3,09E+04
Land use	Pt	6,27E+03	5,48E+02	2,42E+03	-1,03E+02	9,13E+03
Water use	m ³ depriv.	2,40E+02	3,25E-01	6,68E+01	-1,05E+01	2,96E+02
Resource use, fossils	MJ	5,34E+04	3,86E+02	2,22E+03	-4,52E+02	5,55E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,59E-03
Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	5,19E+02	2,62E+01	3,43E+03	-6,20E+01	3,92E+03
Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	1,25E+00	-5,53E-02	-6,44E-01	3,98E-01	9,53E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	1,47E-01	8,91E-03	3,16E-01	1,86E-02	4,90E-01
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	2,51E-07	3,45E-08	3,93E-05	-8,17E-09	3,96E-05
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	2,22E-06	1,03E-07	6,29E-06	-1,90E-06	6,72E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	3,99E-06	2,54E-07	2,24E-05	1,48E-05	4,14E-05
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	6,21E-08	8,00E-09	3,47E-06	-4,17E-07	3,12E-06
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	9,32E-08	4,72E-09	4,90E-07	4,09E-07	9,98E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	3,38E+03	1,88E+01	1,37E+02	-6,38E+00	3,53E+03
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	8,70E+03	6,26E+01	2,61E+02	-5,96E+01	8,96E+03
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	1,43E+04	2,54E+02	5,90E+03	-2,03E+03	1,84E+04

Tabel 30: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton MGO Tier III.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
Climate change	kg CO ₂ eq	5,21E+02	2,62E+01	3,54E+03	-6,16E+01	4,03E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	8,63E-04	4,97E-06	3,85E-05	-2,18E-06	9,04E-04
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,35E+02	1,50E+00	7,79E+00	4,03E-01	2,45E+02
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	3,07E+00	1,41E-01	1,63E+01	-3,76E-01	1,91E+01
Particulate matter	disease inc.	3,17E-05	2,07E-06	1,25E-04	-3,36E-06	1,55E-04
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6,40E-06	3,91E-07	7,87E-05	1,29E-05	9,84E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	1,55E-07	1,27E-08	4,75E-06	-7,70E-09	4,91E-06
Acidification	mol H+ eq	6,36E+00	1,48E-01	1,21E+01	-2,63E-01	1,84E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7,63E-03	7,50E-04	2,53E-02	-1,50E-03	3,22E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	6,35E-01	4,44E-02	4,80E+00	-4,59E-02	5,43E+00
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	7,18E+00	5,49E-01	5,38E+01	-5,32E-01	6,10E+01
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	2,64E+04	3,35E+02	7,22E+03	-2,10E+03	3,19E+04
Land use	Pt	6,27E+03	5,48E+02	2,59E+03	-1,03E+02	9,30E+03
Water use	m ³ depriv.	2,40E+02	3,25E-01	2,41E+02	-1,05E+01	4,71E+02
Resource use, fossils	MJ	5,34E+04	3,86E+02	3,48E+03	-4,52E+02	5,68E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,66E-04	1,53E-04	2,59E-03	3,87E-05	2,95E-03
Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	5,19E+02	2,62E+01	3,54E+03	-6,20E+01	4,03E+03
Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	1,25E+00	-5,53E-02	-9,04E-01	3,98E-01	6,93E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	1,47E-01	8,91E-03	3,40E-01	1,86E-02	5,14E-01
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	2,51E-07	3,45E-08	4,95E-05	-8,17E-09	4,98E-05
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	2,22E-06	1,03E-07	6,28E-06	-1,90E-06	6,71E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	3,99E-06	2,54E-07	2,30E-05	1,48E-05	4,20E-05
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	6,21E-08	8,00E-09	4,24E-06	-4,17E-07	3,89E-06
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	9,32E-08	4,72E-09	5,12E-07	4,09E-07	1,02E-06
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	3,38E+03	1,88E+01	1,87E+02	-6,38E+00	3,58E+03
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	8,70E+03	6,26E+01	4,71E+02	-5,96E+01	9,17E+03
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	1,43E+04	2,54E+02	6,56E+03	-2,03E+03	1,91E+04

Tabel 31: Milieuprofiel van de levenscyclus van 1 ton brandstof (80% LNG en 20% MGO) in een dual-fuel motor.

Effectcategorie	Eenheid	A1-A3	A4	B1	D	Totaal
Climate change	kg CO ₂ eq	7,76E+02	1,72E+02	4,37E+03	-6,16E+01	5,26E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3,18E-04	1,84E-05	2,61E-05	-2,18E-06	3,61E-04
Ionising radiation	kBq U-235 eq	4,95E+01	4,77E+00	5,13E+00	4,03E-01	5,98E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	3,05E+00	5,62E-01	1,50E+01	-3,76E-01	1,83E+01
Particulate matter	disease inc.	1,34E-05	9,59E-06	4,10E-05	-3,36E-06	6,07E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,39E-06	1,43E-06	2,37E-05	1,29E-05	4,34E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	1,21E-07	4,36E-08	1,15E-06	-7,70E-09	1,30E-06
Acidification	mol H+ eq	3,39E+00	9,87E-01	9,36E+00	-2,63E-01	1,35E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	4,06E-03	2,24E-03	2,20E-02	-1,50E-03	2,68E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	4,11E-01	1,66E-01	4,35E+00	-4,59E-02	4,88E+00
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,49E+00	1,94E+00	4,79E+01	-5,32E-01	5,38E+01
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,77E+04	1,53E+03	6,07E+03	-2,10E+03	2,32E+04
Land use	Pt	2,41E+03	7,05E+02	2,42E+03	-1,03E+02	5,43E+03
Water use	m ³ depriv.	7,21E+01	-2,44E+03	6,69E+01	-1,05E+01	-2,31E+03
Resource use, fossils	MJ	5,17E+04	2,54E+03	2,24E+03	-4,52E+02	5,61E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	9,06E-05	1,75E-04	2,24E-03	3,87E-05	2,54E-03
Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	7,75E+02	1,71E+02	4,37E+03	-6,20E+01	5,26E+03
Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	6,26E-01	2,39E-01	-6,44E-01	3,98E-01	6,19E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	6,89E-02	4,59E-02	3,16E-01	1,86E-02	4,50E-01
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	4,76E-07	5,54E-08	4,58E-06	-8,17E-09	5,10E-06
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1,54E-06	5,16E-07	1,48E-05	-1,90E-06	1,50E-05
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	3,77E-06	8,72E-07	6,27E-06	1,48E-05	2,57E-05
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	4,35E-08	2,17E-08	7,53E-07	-4,17E-07	4,01E-07
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	7,78E-08	2,18E-08	3,95E-07	4,09E-07	9,04E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	7,24E+02	5,51E+01	1,03E+02	-6,38E+00	8,75E+02
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	7,18E+03	4,26E+02	2,64E+02	-5,96E+01	7,81E+03
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	9,80E+03	1,04E+03	5,71E+03	-2,03E+03	1,45E+04

D Appendix III: Review statement



SGS
SEARCH

SGS Search Consultancy

Heerwijk (hoofdkantoor)
Meerstraat 2, Postbus 83
5473 ZH Heerwijk (N.Br.)

Amsterdam
Petroluushavenweg 8
1041 AC Amsterdam

Groenigen
Stavangerweg 21-23
9729 JC Groningen

Spijknisse
Mellewijk 18
3208 LA Spijknisse

Tel. +31 (0)88 214 88 00
consultancy@sgssearch.nl
www.sgssearch.nl

TNO
Ter attentie van de heer A. van Horssen
(per e-mail: arjan.vanhorsen@tno.nl)

Amsterdam, 16 december 2021

Behandeld door: Harry van Ewijk
Onze referentie: 26.21.00192.1_2

Betreeft: Resultaat review update LCA scheepsbrandstoffen 2021 Deel A

Geachte heer Van Horssen,

Na een beoordeling van een eerdere versies in 2021 heeft SGS de review van "Update milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase: Deel A fossiele brandstoffen, Tim van der Kruk en Mark Bolech, TNO, 14 december 2021" in opdracht van Rijkswaterstaat vandaag afgerond. Het betreft de update van twee brandstoffen (MGO en LNG), waarvan voor MGO drie verbrandingsprofielen zijn opgeleverd.

In tegenstelling tot de eerdere versie zijn nu niet alleen de milieuprofielen beschikbaar voor de NMD, maar ook de proceskaarten op basis van Ecoinvent 3.5 met specifieke TNO-aanpassingen. Een eerdere versie is door SGS in juli ingelezen en bleek met versie 3.2 van de NMD processendatabase reproduceerbaar. Dit zal nog gebeuren met de december 2021 versie. Deze werkwijze betekent dat de resultaten actueel blijven bij updates van de NMD processendatabase (met name ecoinvent), maar betekent tegelijkertijd dat de resultaten dan (enigszins) veranderen.

Het rapport beschrijft helder en bondig de uitgangspunten, de modellering en de resultaten. De conclusie luidt:

De methodologie, dataverzameling en rapportage voldoen aan de eisen van de "Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken, versie 1.0 - juli 2020, EN 15804 en onderliggende normen.

Met vriendelijke groet,



Ir. Harry van Ewijk
Senior consultant SGS Search Consultancy, Stichting NMD erkend deskundige