

TNO-rapport

TNO 2018 R10658

20 LCA's van brandstof-machinecombinaties

Circular Economy & Environment

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Datum	November 2018
Auteur(s)	L.Kootstra MSc
Aantal pagina's	64 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat GPO
Projectnaam	Milieuprofielen Diesel Mob Werktuigen
Projectnummer	060.32476

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.

© 2018 TNO

Samenvatting

In dit onderzoek zijn in opdracht van Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud (GPO) 20 milieuprofielen opgesteld van verschillende machine-brandstofcombinaties voor opname in de nationale milieudatabase. Rijkswaterstaat wil middels deze branche representatieve (categorie 2) milieuprofielen stimuleren dat de milieubelasting ten gevolge van het gebruik van graafmachines en vrachtwagentransport voor werk in de GWW sector afneemt. Deze rapportage beschrijft de aanpak en de gehanteerde gegevens van de uitgevoerde levenscyclusanalyse.

De rekeneenheid van deze studie is “het verbruik van 1 liter brandstof toegepast in graafmachines of vrachtwagens”. De brandstoffen die zijn beschouwd zijn diesel, biodiesel, HVO en GTL. De machines zijn graafmachines uit de categorie IIIB, IV en V met vermogen van 75 tot 130kW en zware (>32 ton) Euro 5 en Euro 6 vrachtwagens. In het algemeen geldt; hoe hoger de categorie of Euro aanduiding, hoe nieuwer en hoe minder luchtvervuilend de machine is.

Diesel en GTL worden over het algemeen in pure vorm gebruikt. Biodiesel en HVO worden echter bijna altijd gemengd met diesel om binnen de voorgeschreven specificaties te blijven. De maximale bijmengingspercentages zijn 7% voor biodiesel en 30% voor HVO. Het is echter, met additionele keuring, voor sommige motoren mogelijk om een hoger bijmengingspercentage te gebruiken. In deze studie zijn milieuprofielen opgesteld voor pure brandstoffen. Voor gebruik van de milieuprofielen van biodiesel en HVO moet de bijmenging door de gebruiker worden ingevoerd. Dus in het geval er 100 liter biodiesel is gebruikt met bijmengingspercentage van 5% (de huidige mix die aan de pomp is te verkrijgen), moet bij de invoer 5 liter biodiesel en 95 liter diesel worden gehanteerd.

De resultaten van deze studie worden uitgedrukt in “MKI” per liter brandstof. “MKI” is de afkorting van milieukosten indicator en heeft de eenheid schaduwkosten. Met de MKI/schaduwkosten kunnen de verschillende milieueffecten onderling gewogen worden opgeteld tot één getal uitgedrukt in MKI. De resultaten zijn per liter weergegeven, omdat dit voor de uiteindelijke gebruikers van de milieuprofielen gemakkelijk is toe te passen. De milieu-impact van gebruik van graafmachines en vrachtwagens kan immers worden bepaald door enkel de hoeveelheid gebruikte brandstof in te voeren.

In Figuur 1 worden de milieuprofielen van alle 20 machine-brandstofcombinaties weergegeven. De getallen in de staafdiagrammen representeren de MKI per liter. Over het algemeen is er een afname van de MKI per liter te zien voor de nieuwere (hoger categorie/ Euronorm) van machines. Voor diesel is het verschil tussen categorie IIIB en IV graafmachines 6%, gelijk aan het verschil tussen Euro 5 en 6 vrachtwagens. Er is echter geen significant verschil in de MKI per liter tussen categorie IV en V graafmachines, doordat de vermindering in impact van de emissies veel kleiner is tussen IV en V, in vergelijking met het verschil tussen categorie IIIB en IV.

De staafdiagrammen uit Figuur 1 zijn onderverdeeld in de verschillende levenscyclus fases die door de SBK-bepalingsmethode worden onderscheiden. De

MKI van de productiefase (A1-A3, blauw) vertegenwoordigt de milieu-impact van de brandstofproductie. De grafieken laten ook een negatieve waarde zien, doordat de productie van brandstof bijproducten oplevert die in een ander systeem gebruikt worden. De milieubelasting door de productie van een vergelijkbaar product wordt afgetrokken zodat de rekeneenheid voor alle brandstoffen gelijk blijft (brandstof zonder bijproducten). De transportfase (A4, rood) vertegenwoordigt het transport van de brandstof tot de gebruiker, de gebruiksfase (B, groen) de emissies die vrijkomen bij de verbranding van een liter brandstof, maar ook de emissies door slijtage aan het wegdek en van de remmen. Daarnaast bevat het ook de milieu-impact van het productie van Adblue en de materialen die worden gebruikt in bouw en onderhoud van de graafmachines. De milieu-impact gerelateerd aan deze zaken is naar rato toegerekend.

Wat als eerste opvalt is dat de MKI per liter brandstof van vrachtwagens groter is dan die van graafmachines. Voor beide is de MKI gerelateerd aan de productie- en transportfase, per type brandstof, gelijk, maar de MKI gerelateerd aan de gebruiksfase voor vrachtwagens groter dan voor graafmachines. In de gebruiksfase van vrachtwagens wordt namelijk ook de rememissies en gebruik van infrastructuur toegerekend aan milieu-impact per liter brandstof. Graafmachines maken geen gebruik van infrastructuur en hebben geen rememissies, dus een lagere milieu-impact in de gebruiksfase¹. De hogere milieu-impact per liter betekent niet dat vrachtwagens “slechter” zijn dan graafmachines. Je kan beide immers niet vergelijken omdat zij een andere functie vervullen: afgraven van grond en steenachtige versus vervoer van materiaal. Wel kan worden verondersteld dat per liter brandstof de milieu-impact van vrachtwagens groter is dan voor graafmachines.

Opvallend is ook het verschil in verdeling van de milieu-impact over de verschillende fases tussen enerzijds diesel en GTL en anderzijds HVO en biodiesel. Voor de eerste twee is de milieu-impact van de gebruiksfase het grootste (B, groen). Voor biodiesel en HVO is deze een stuk lager, omdat er bij verbranding biogene CO₂ vrijkomt. Dit wil zeggen dat de CO₂ die wordt uitgestoten tijdens de verbranding niet meegerekend wordt in het effect op klimaatverandering, omdat deze CO₂ (relatief) kort geleden uit de atmosfeer is opgenomen door gewassen die eerste generatie (direct uit het gewas) of tweede generatie (biobased afvalproduct) gebruikt worden voor de productie van de brandstof. Dit in tegenstelling tot GTL en diesel, beide gebaseerd op fossiele brandstoffen, waarbij de CO₂ honderden miljoenen jaren geleden is vastgelegd en de emissie nu bijdraagt aan de verhoging van de CO₂ concentratie in de atmosfeer. In de productiefase (blauwe gedeelte) zien we het omgekeerde. De milieu-impact van de productiefase van biodiesel en HVO is groter dan die van diesel en GTL. Samengevat; de lagere milieu-impact gerelateerd aan de verbranding van HVO en biodiesel wordt (deels) teniet gedaan door de hogere milieu-impact gerelateerd aan de productiefase.

De milieu-impact van de productiefase van biodiesel en HVO is sterk afhankelijk van de gebruikte grondstof voor het maken van deze brandstoffen. Het vervangen van tweede generatie grondstoffen zoals afgewerkt frituurvet en dierlijke vetten door

¹ In Figuur 11 wordt dit nader toegelicht door de milieu-impact van een categorie IV graafmachine en Euro 5 vrachtwagen uit te splitsen naar de verschillende bijdragen in de gebruiksfase.

eerste generatie grondstoffen zoals koolzaad- en palmolie kan de milieu-impact van de gebruiksfase met wel 50% voor biodiesel en 40% voor HVO verlagen².

Vergelijken van verschillende brandstoffen

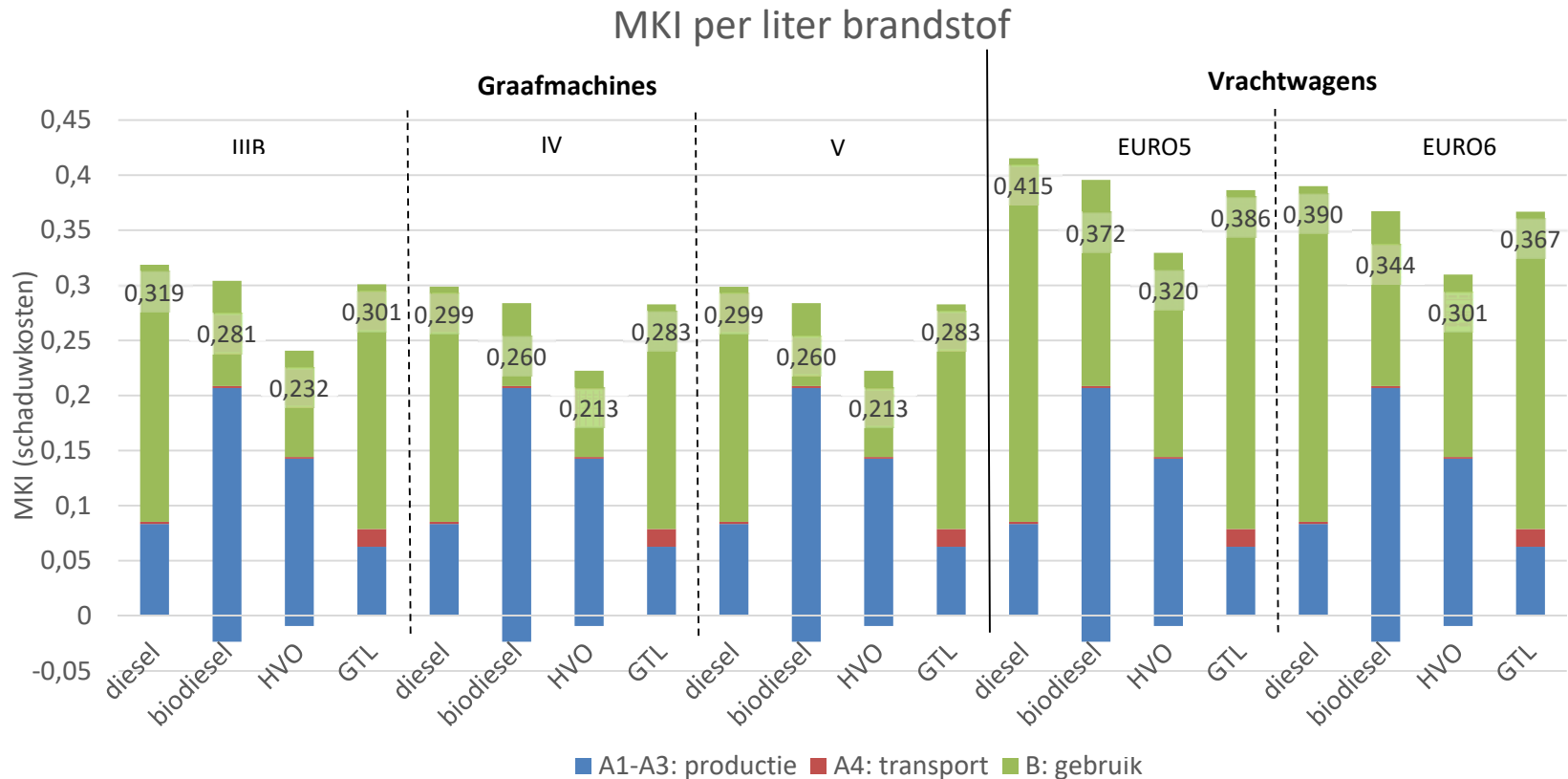
In Figuur 1 worden de MKI van verschillende machine-brandstof combinaties per liter brandstof getoond omdat dit de rekeneenheid is van deze studie. Voor graafmachines uit categorie IIIb is de MKI van diesel het grootst, GTL en opvolgend biodiesel iets lager (respectievelijk, 6% en 12%) en HVO nog lager (27%). Als je de milieu impact van de verschillende brandstoffen wil vergelijken, is het echter eerlijker om deze in de eenheid MKI per MJ te vergelijken, omdat je dan dezelfde hoeveelheid verzet werk / gereden kilometers vergelijkt. Als dit wordt gedaan, wordt het verschil tussen de MKI van diesel, GTL en biodiesel kleiner (GTL ongeveer 1% lager en biodiesel zo'n 4% lager). De MKI per MJ van HVO blijft aanzienlijk lager (ongeveer 25%) dan die van diesel.³ Hier moet nog wel rekening worden gehouden dat in geval van biodiesel en HVO deze brandstoffen niet in pure vorm worden gebruikt, maar worden bijgemengd en dus dat het verschil met MKI van diesel kleiner wordt (1% lager voor biodiesel en zo'n 7% voor HVO).

Voor vrachtwagens zijn de resultaten vergelijkbaar met die voor brandstof in graafmachines en is de MKI per liter voor biodiesel, HVO en GTL, respectievelijk 10%, 23% en 7% lager dan voor diesel. De MKI per MJ is gemiddeld, 3%, 20% en 3% lager.⁴

² In deze studie zijn we uitgegaan dat voor de productie een verhouding van biodiesel 21% koolzaadolie, 16% palmolie, 26% afgewerkt frituurvet en 37% dierlijke vetten wordt gebruikt. En voor HVO 40% dierlijk vet, 40% frituurvet en 20% palmolie.

³ In Figuur 8 worden de graafmachine-brandstof combinaties vergeleken in eenheid MKI per MJ.

⁴ In Figuur 9 vrachtwagen-brandstof combinaties vergeleken in eenheid MKI per MJ.



Figuur 1: Milieuprofielen van de 20 machine-brandstofcombinaties weergegeven in MKI per liter brandstof. De getallen genoemd in de grafiek zijn is de totale MKI over alle levenscyclusfasen van de brandstoffen per liter. Het blauwe deel van de staafdiagrammen is de milieupact van de productie van de brandstof, waarin de negatieve deel de vermeden milieueffecten door productie van bijproducten in productie van biodiesel en HVO vertegenwoordigt. Het rode deel het aandeel van het transport van de productielocatie naar de gebruiker. Het groene deel representeert de milieupact van de gebruiksfase, dus de emissies die vrijkomen bij verbranding van een liter brandstof, maar ook de emissies die vrijkomen bij het remmen en toerekening van de milieupact van de materialen die gebruikt zijn voor maken van vrachtwagen en graafmachine.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Doelgroep.....	8
1.3 Aanpak	8
1.4 Berekeningsprocedures.....	9
1.5 Allocatie	11
1.6 Uitvoering en begeleiding	11
1.7 Opzet van de rapportage	12
1.8 Standaarden	12
2 Ontwerp van de studie	13
2.1 Rekeneenheid	13
2.2 Brandstoffen	13
2.3 Mobiele werktuigen.....	15
2.4 Reikwijdte	16
2.5 Levenscyclus en systeemgrenzen	17
3 Input/output gegevens	19
3.1 Diesel	19
3.2 Biodiesel.....	20
3.3 HVO.....	23
3.4 GTL	25
3.5 Graafmachines categorie 3, 4 en 5.....	27
3.6 Transportvoertuigen (vrachtwagens) klasse Euro 5 en 6.....	33
4 Milieuprofielen	41
4.1 Milieueffecten per liter brandstof.....	41
4.2 Milieueffecten per MJ	44
4.3 Milieueffecten van de meest gebruikelijke brandstofsamenstellingen	46
4.4 Milieueffecten van de gebruiksfase.....	46
4.5 Verbrandingsemissies per machine-brandstof combinatie.....	47
4.6 Gevoeligheidsanalyse	48
4.7 Verbeterpotentieel	51
5 Conclusie	52
6 Ondertekening	54
Literatuurlijst.....	55
Appendix A: Gekarakteriseerde milieuprofielen	56
Appendix B: Gewogen milieuprofielen	59

Appendix C: Verslag van de reviewer 60



1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bij een groot deel van de aanbestedingen van GWW-werken door Rijkswaterstaat is duurzaamheid één van de beste kwaliteit-prijsverhouding (BKPV) criteria. De duurzaamheidsprestatie wordt bepaald met behulp van DuboCalc, een programma waarmee de totale milieu-impact van GWW-werken kan worden berekend. Om de verbeterde duurzaamheidsprestaties van de markt t.a.v. de inzet van graafmachines en vrachtwagens ook daadwerkelijk tot uiting te laten komen in DuboCalc-berekeningen zijn er nieuwe milieuprofielen nodig voor het ingezette materieel in combinatie met het type brandstof dat dit materieel gebruikt. De milieuprofielen dienen te worden ondergebracht in de Nationale Milieu Database (NMD).

Rijkswaterstaat (RWS) Grote Projecten en Onderhoud (GPO) heeft TNO gevraagd om voor vier brandstoftypes en vijf materieeltypes (dus voor in totaal 20 machine-brandstofcombinaties) een levenscyclusanalyse (LCA) uit te voeren conform de bepalingmethode Milieuprestaties Gebouwen en GWW-werken, zoals beheerd door de Stichting Bouwkwiteit (SBK). Deze LCA's betreffen getoetste, met de branche afgestemde merk-ongebonden data (categorie 2).

1.2 Doelgroep

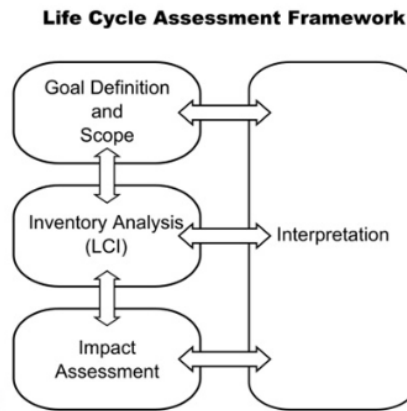
Deze rapportage bevat achtergrond informatie voor de gebruikers van de 20 machine-brandstofcombinatie milieuprofielen in de Nationale Milieu Database (NMD) of software die is gebaseerd op de NMD. Voor hen biedt deze rapportage (met name Hoofdstuk 3) inzicht in de (onderbouwing van) aannames, gebruikte data, systeemgrenzen, etc. die zijn gehanteerd in opstellen van de milieuprofielen. De resultaten zijn echter ook voor andere experts, zoals materieel beheerders en MVO-managers, interessant. De resultaten (Hoofdstuk 4) kunnen voor hen als leidraad dienen in opstellen van beleid op gebied van gebruik van graafmachines en vrachtwagens.

1.3 Aanpak

De milieuprofielen zijn berekend middels een levenscyclusanalyse (LCA) op basis van de SBK bepalingmethode (Stichting Bouwkwiteit, 2014)⁵. Figuur 2 illustreert de standaardprocedure van het uitvoeren van een LCA. Globaal bestaat een LCA uit (1) het vaststellen van het doel en de scope, (2) de inventarisatiefase, met definiëring van het productsysteem en kwantificering van inputs en outputs in functionele eenheden, (3) vertalen van inventarisatie en naar milieueffecten en normalisatie van resultaten, en (4) opstellen van evaluatie en conclusies. De afbakening van de studie (stap 1) komt voort uit de opdracht van RWS en de afbakening voorgeschreven door de SBK-bepalingmethode. Voor stap 2 (gegevensverzameling) is gebruik gemaakt van eerder uitgevoerde studies naar de (LCA) emissies in de voorketen (productie van de brandstof) en bij de verbranding van brandstof. In stap 3 wordt gebruik gemaakt van de in de SBK

⁵ Inclusief de wijzigingsbladen uit 2015, 2016 en 2017.

bepalingsmethode voorgeschreven impact assessment methode en weegfactoren, ofwel schaduwrijzen. Het resultaat is de Milieukosten Indicator (MKI), waarbij de milieubelasting uitgedrukt is in Euro's. Des te hoger de MKI-waarde, des groter de milieubelasting.



Figuur 2: Standaardprocedure in Life Cycle Assessment.

In deze rapportage zijn algemene milieuprofielen beschreven voor inzet van verschillende type mobiele werktuigen die verschillende types brandstof gebruiken. De eenheid is in liter van de gebruikte brandstof en de milieuaspecten die zijn meegenomen zijn: productie en verbranding van de brandstof; productie, gebruik, en einde leven van de mobiele werktuigen; en additionele processen zoals gebruik van smeerolie.

Om tot branche representatieve data (categorie 2) te komen zijn de uitgangspunten van de LCA's afgestemd met een vertegenwoordiger van de brancheorganisatie BMWT. De BMWT is de belangenbehartiger van leveranciers van bouwmachines, magazijninrichtingen, wegebouwmachines en transportmaterieel.

Daarnaast is voor opname van de milieuprofielen in de NMD vereist dat de deze gereviewed worden door een externe, SBK-erkende reviewer. Deze reviewer beoordeelt of de LCA's conform de SBK-bepalingsmethode zijn uitgevoerd. Deze rapportage is gereviewed door Harry van Ewijk van SGS Search.

Deze rapportage bevat tabellen waarin per voorgeschreven fase van de levenscyclus de inventarisatie gedocumenteerd is, inclusief een verklaring waar de gegevens op zijn gebaseerd, alsmede de volledige milieuprofielen. De milieuprofielen zoals ingediend voor de Nationale Milieudatabase, zijn te vinden in de appendix van dit rapport.

1.4 Berekeningsprocedures

De berekeningsprocedures van deze studie zijn gebaseerd op de SBK bepalingmethode (versie 2.0 november 2014, met wijzigingsbladen 1 juni 2017 en 1 augustus 2017), en daarmee indirect op de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013). Expliciet zijn de volgende procedures gehanteerd:

- De milieu-impacts zijn gekarakteriseerd met de methoden die beschreven zijn in de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013); afwijkingen hierbij zijn in deze rapportage beargumenteerd in de inleiding en in dit hoofdstuk.
- Bij de berekening van energiestromen is rekening gehouden met de gebruikte brandstoffen en elektriciteitsbronnen, winning en transport van brandstoffen, omzettingsrendement en verdeling van energiestromen.
- Conform de SBK bepalingmethode zijn lange termijnemissies niet meegenomen. Kapitaalgoederen (infrastructuur) zijn wel meegenomen in de berekeningen.
- Additionele middelen; Bij het verbranden van brandstof in graafmachines wordt smeerolie gebruikt, bij Euro 6 vrachtwagens Adblue. Beide zijn inbegrepen in deze studie.
- Voor alle achtergrondprocessen is, zoals voorgeschreven door de SBK bepalingmethode, database Ecoinvent 3.4 – allocation, recycled content - unit gebruikt (Wernet, et al., 2016).

De milieueffecten die zijn meegenomen in deze studie, zijn de genoemde effecten in tabel 11 in de SBK bepalingmethode, welke nodig zijn om MKI's te berekenen. Daarnaast is alle andere milieu-informatie meegenomen die voor opname in de NMD vereist zijn (energie, waterverbruik en afval). Deze milieueffecten en aanvullende informatie zijn gekarakteriseerd op basis van de spreadsheet met karakterisatiefactoren⁶ zoals geleverd door de SBK.

De effectcategorie klimaatverandering is niet aangepast ten opzichte van de SBK-voorschriften, maar verdient extra toelichting voor de biobased brandstoffen uit deze studie (HVO en biodiesel). Klimaatverandering wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten, wat betekent dat alle broeikasgassen op basis van hun effectgrootte worden omgerekend in CO₂-eenheden. Methaan is bijvoorbeeld een veel sterker broeikasgas dan CO₂ en daarom wordt 1 kilogram aan methaanemissies uitgedrukt als 25 kilogram CO₂-equivalenten. De natuurlijke koolstofcyclus, oftewel de opname van CO₂ door vegetatie en het vrijkomen van CO₂ bij de verbranding of vertering ervan, worden niet beschouwd als een milieueffect en daarom niet meegenomen in de berekeningen. Biogene CO₂ heeft dus ook een karakterisatiefactor van 0 CO₂-equivalenten.

Wanneer de biogene koolstof wordt uitgestoten in de vorm van methaan, wordt de periode dat het gas in de atmosfeer verblijft als methaan wel meegerekend als broeikasgasemissie; vanaf het moment dat methaan vervalt tot CO₂, wordt het weer als onderdeel van de natuurlijke koolstofkringloop beschouwd. Daarom heeft biogene methaan een karakterisatiefactor van 22,5 CO₂-equivalenten (ten opzichte van 25 CO₂-equivalenten voor fossiel methaan).

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

⁶ Spreadsheet getiteld "SBK_Bepalingmethode,25mei2018_NMD2_2.CSV". Deze spreadsheet is geïmporteerd als methode in SimaPro 8.5.

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

Milieueffectcategorie	Afkorting	Eenheid	Weegfactor (MKI/kg equivalent)
Uitputting van abiotische grondstoffen, excl. fossiele energiedragers	ADP-elementen	kg antimoon	0,16
Uitputting van fossiele energiedragers	ADP-brandstof	kg antimoon	0,16
Klimaatverandering	GWP-100j	kg CO ₂	0,05
Ozonlaagaantasting	ODP	kg CFC 11	30
Fotochemische oxidantvorming	POCP	kg etheen	2
Verzuring	EP	kg SO ₂	4
Vermesting	AP	kg (PO ₄) ³⁻	9
Humaan-toxicologische effecten	HTP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,09
Ecotoxicologische effecten, aquatisch (zoetwater)	FAETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,03
Ecotoxicologische effecten, aquatisch (zeewater)	MAETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,0001
Ecotoxicologische effecten, terrestrisch	TETP	kg 1,4 dichloorbenzeen	0,06
Andere milieu-informatie	Afkorting	Eenheid	
Totaal hernieuwbare energie	CED _{renew}	MJ	n.v.t.
Totaal niet-hernieuwbare energie	CED _{non-renew}	MJ	n.v.t.
Totaal energie	CED _{total}	MJ	n.v.t.
Netto gebruik van zoet water	WD	m ³	n.v.t.
Niet-gevaarlijk afval	NGA	kg	n.v.t.
Gevaarlijk afval	GA	kg	n.v.t.

1.5 Allocatie

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

1.6 Uitvoering en begeleiding

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

- Ruud Verbeek en Jan Hulskotte zijn experts op het gebied van emissies van voertuigen. Zij hebben gezamenlijk de data over verbrandingsemissies van graafmachines en vrachtwagens geleverd.
- René van Gijlswijk is consultant duurzame mobiliteit met ervaring in LCA van brandstofketens. In deze studie heeft hij de brandstofproductieroutes opgesteld.
- Suzanne de Vos-Effting, Elisabeth Keijzer en Lucinda Kootstra zijn LCA-experts met ervaring in het onderzoeken en opstellen van milieuprofielen. Voor deze studie hebben zij gebruik gemaakt van voor dit doel voorgeschreven normen, en het LCA-softwareprogramma SimaPro 8.5.

1.7 Opzet van de rapportage

In Hoofdstuk 1 zijn de aanleiding, het doel en de rekenprocedures uitgelegd. Hoofdstuk 2 zet het onderwerp van deze studie uiteen, beginnende bij een globale beschrijving van de brandstoffen (2.1) en mobiele werktuigen (2.2), gevolgd door de rekeneenheid (3), de reikwijdte van de studie (2.4) en weergave van levenscyclus en de systeemgrenzen (2.5). In Hoofdstuk 3 volgt een lijst met aannames en input/outputgegevens van deze studie per levenscyclusfase. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van deze studie weer, met eerst de MKI's voor de gehele levenscyclus (4.1 en 4.2). De gevoeligheidsanalyses worden besproken in paragraaf 4.6.

In de appendix A zijn de gekarakteriseerde, ongewogen milieuprofielen toegevoegd van alle brandstoffen en in appendix B zijn de gewogen milieuprofielen opgenomen in tabelvorm. In appendix C wordt het verslag van de reviewer weergegeven.

1.8 Standaarden

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

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

2 Ontwerp van de studie

2.1 Rekeneenheid

Deze rapportage beschrijft de milieu-impact van gebruik van graafmachine of vrachtwagen *per liter* diesel, biodiesel, HVO of GTL. De gebruikers van de milieuprofielen kunnen op basis van de aantal liter gebruikte brandstof voor een GWW werk de project specifieke milieubelasting berekenen.

De milieuprofielen zijn opgesteld voor gebruik van pure brandstof, dus 100% diesel, biodiesel, HVO of GTL. HVO en biodiesel worden echter vaak niet in pure vorm gebruikt, maar gemengd met diesel. De gemengde brandstoffen tot 7% biodiesel en 30% HVO, voldoen aan vereiste brandstofs specificaties en kunnen dus in elke machine worden gebruikt. Sommige machinetypes en modellen zijn echter ook geschikt voor gebruik van mengsel met een hoger percentage alternatieve brandstof. Een extra keuring is echter hiervoor vereist.

Door wel een analyse te doen van de pure brandstoffen, hebben de gebruikers van programma's zoals DuboCalc de vrijheid om zelf aan te geven in welke verhouding zij de brandstoffen gebruiken en hier op te innoveren. Nadeel is echter dat er groter risico op fouten ontstaat omdat het percentage handmatig moet worden ingevoerd.

2.2 Brandstoffen

2.2.1 Diesel

Diesel is een door destillatie van aardolie verkregen brandstof, die gebruikt wordt in dieselmotoren: verbrandingsmotoren die gebruik maken van zelfontbranding door hoge temperatuur en druk. Diesel is relatief veilig, omdat het niet gemakkelijk verdampt. De kwaliteit van dieselbrandstof is de laatste decennia sterk verbeterd door met name de vermindering van het zwavelgehalte (op het moment maximaal 10 ppm) en het aandeel polycyclische koolwaterstoffen. Daardoor dalen de luchtverontreinigende emissies en is tevens de toepassing van roetfilters en katalysatoren veel gemakkelijker geworden.

Voor de verbetering van de verbrandingseigenschappen zijn diverse additieven toegevoegd. Alle leveranciers in Europa leveren diesel die qua samenstelling en fysische en chemische eigenschappen voldoen aan de grenzen die gesteld zijn in de EN590-standaard. Verder is de Fuel Quality Directive (2009/30/EC) van toepassing, waarin minimumspecificaties voor de brandstof zijn vastgelegd voor gebruik op de weg en in mobiele werktuigen.

De onderste stookwaarde (Lower Heating Value, LHV) bedraagt 43.1 MJ/kg (JRC, 2014). Bij een dichtheid van 832 g/l is dit gelijk aan 35.9 MJ/l. Het koolstofgehalte is 86.1%. Voor het milieuprofiel wordt uitgegaan van een zwavelgehalte van 5 ppm (Wernet, et al., 2016). Vanwege de vrije handel in Europa en het feit dat er verschillende raffinaderijen zijn in Nederland, is gekozen voor een Europees gemiddelde samenstelling en aanvoerroute.

2.2.2 Biodiesel

Biodiesel is een biobrandstof met eigenschappen die het geschikt maken om in een dieselmotor gebruikt te worden. Het meest gebruikte type van biodiesel is Fatty Acid Methyl Ester (FAME). De in Europa gebruikte grondstoffen (materiaalbronnen) voor FAME zijn koolzaadolie, zonnebloemolie, dierlijk vet, afgedankte frituurolie, sojaolie en palmolie. De mix hangt af van de eigenschappen van de resulterende biodiesel, de prijs en politieke keuzes.

De eigenschappen van FAME zijn vastgelegd in de EN14214. FAME heeft met 890 g/l een wat hogere dichtheid dan diesel, maar een wat lagere energiedichtheid: 37.2 MJ/kg (JRC, 2014). Dit is daarmee gelijk aan 33.1 MJ/l. Er wordt in Nederland in ca. 10 raffinaderijen anderhalf megaton biodiesel geproduceerd, waarvan het grootste deel in pure vorm wordt geëxporteerd. 152 kton wordt bijgemengd voor nationaal gebruik (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017).

Omdat de eigenschappen van biodiesel afwijken van fossiele diesel, zijn veel moderne dieselmotoren niet geschikt zijn om op pure FAME te draaien. In de EN590-standaard is vastgesteld dat FAME biodiesel voor maximaal 7 volumepercent mag worden bijgemengd bij fossiele diesel. Het gemiddelde bijmengpercentage wordt echter rond de 5% geschat. In deze analyse zijn gaan we er echter vanuit dat er 100% biodiesel wordt gebruikt in de mobiele werktuigen.

2.2.3 HVO

Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) wordt geproduceerd door plantaardige of dierlijke oliën en vetten met waterstof te behandelen. Er is een grote verscheidenheid aan grondstoffen die ingezet kunnen worden om HVO te produceren, met als resultaat dat er ook een grote variatie te verwachten is in het milieuprofiel van HVO.

Neste Oil heeft wereldwijd drie fabrieken (Singapore, Finland en Nederland). In deze analyse gaan we uit dat alle HVO die in Nederland gebruikt wordt ook in Nederland geproduceerd wordt, omdat omvang van Nederlandse productie 0,8 miljoen ton van 2,0 miljoen ton totale productie vormt. Neste Oil gebruikt voor 80% afval en residuen, waardoor een grotendeels tweede generatie biobrandstof wordt verkregen (Neste, 2018). Deze 80% bestaat voor de helft uit dierlijke vetten en de andere helft uit afgewerkt frituurvet. De overige 20% bestaat uit palmolie, een eerste generatie biobrandstof (Erne, 2011). Aangezien HVO een biobrandstof is, gelden de CO₂- en methaanemissies uit verbranding als biogeen (zie paragraaf 1.4 voor de uitleg over biogene emissies).

Het milieuprofiel per liter is gebaseerd op HVO met een energie-inhoud (LHV) van 44 MJ/kg en dichtheid van 0.785 kg/l.

2.2.4 GTL

GTL is een vloeibare brandstof die synthetisch gemaakt is met een Gas-To-Liquids proces. Daarbij wordt aardgas omgezet in koolwaterstoffen met langere ketens, die vloeibaar zijn bij omgevingstemperatuur. Het voordeel is dat deze vloeibare brandstoffen gemakkelijker te transporteren zijn dan aardgas. Het aardgas kan van fossiele of van biogene oorsprong zijn.

Voor het milieuprofiel wordt ervan uitgegaan dat fossiel aardgas gebruikt wordt, en dat de GTL betrokken wordt van de grootste GTL-productiefaciliteit ter wereld, die door Shell gerund wordt in Qatar. Voor GTL-productie wordt aardgas in een steam

reforming proces eerst omgezet in syngas (een mengsel van koolstofmonoxide en waterstof), waarna er via het Fischer-Tropsch-proces een dieselachtige brandstof van gemaakt wordt. GTL wordt per olietanker vervoerd naar Rotterdam. Door de zuivere vorm van GTL zijn de emissies van luchtverontreinigende stoffen direct uit de motor lager dan bij conventionele brandstoffen. Afhankelijk van de uitlaatgasnabehandeling van het voertuig zijn de emissies uit de uitlaat soms ook lager. Het milieuprofiel per liter is gebaseerd op GTL met een energie-inhoud (LHV) van 44 MJ/kg en dichtheid van 780 g/l.

2.2.5 Veelgebruikte informatie brandstoffen

In deze rapportage zal een aantal eigenschappen van de verschillende brandstoffen veelvuldig worden gebruikt. Voor de volledigheid zijn deze eigenschappen in Tabel 2 samengevat.

Tabel 2: Dichtheid en stookwaarde (of calorische waarde) van de verschillende brandstoffen.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/liter)	35,9	33,1	34,5	34,3
Dichtheid (kg/liter)	0,832	0,890	0,780	0,780

2.3 Mobiele werktuigen

2.3.1 Graafmachines categorie 3, 4 en 5

Binnen de werken van RWS worden verschillende type mobiele werktuigen ingezet. Naar schatting gaat het in de gehele bouwsector om 16.000 graafmachines, die met 38% het grootste aandeel hebben in het totale wagenpark vormen (Hulskotte & Verbeek, 2009). Binnen deze groep van graafmachines vormt de vermogensklasse van 75 tot 130 kW het grootste aandeel in de emissie uitstoot (Hulskotte & Verbeek, 2009). De milieu-impact van mobiele werktuigen wordt berekend voor graafmachines met een vermogen tussen de 75 en 130 kW. Andere types machines met een ander vermogen geven andere emissies en vallen buiten de scope van deze LCA. In de gevoeligheidsanalyse zal worden onderzocht of de resultaten ook representatief zijn voor de andere vermogensklassen.

De verschillende categorieën, ook tiers of klassen genoemd, die worden onderscheiden zijn de Europese emissieregelgeving waar graafmachines vanaf bepaalde datum moeten voldoen. In tabel 2 zijn de verschillende categorieën, met de maximaal toegestane stikstofoxide (NO_x) en fijnstof (< 10µm; PM10) weergegeven.

Tabel 3: Maximaal toegestane NO_x en PM10 uitstoot in g/kWh waar nieuwe graafmachines tussen 75 en 130kW aan moeten voldoen vanaf bepaald jaartal.

	Jaar van ingang	NO _x (g/kWh)	PM10 (g/kWh)
Categorie IIIA	2006	4	0,3
Categorie IIIB	2011	3,3	0,025
Categorie IV	2014	0,4	0,025
Categorie V	2019	0,4	0,015

De gemiddelde levensduur van graafmachines wordt geschat op 7 tot 9 jaar. Omdat vanaf 2011 dus alleen nog graafmachines uit categorie IIIB verkocht mogen worden, verwachten we dat het aantal machines uit de categorie IIIA sterk aan het

afnemen is. In de analyse van graafmachines uit categorie III, gaan we dus uit van machines die moeten voldoen aan regelgeving van categorie IIIB.

2.3.2 *Vrachtwagens klasse Euro 5 en 6*

Vrachtwagens zijn te onderscheiden in verschillende grootte en emissiestandaarden waar zij aan moeten voldoen. In deze analyse gaan we uit van zwaar transport dus van vrachtwagen met totaalgewicht > 32 ton. De klassen Euro 5 en 6 duiden ook hier op de emissieregelgeving waaraan nieuwe vrachtwagen moeten voldoen vanaf een bepaald jaar. Voor zware Euro 5 vrachtwagens is de maximale NO_x-uitstoot 2,0 g/kWh, voor Euro 6 vrachtwagen wordt deze maximale uitstoot verlaagd tot 0,40 g/kWh. Voor PM10 is dit respectievelijk, 0.02 en 0.01 g/kWh. De regelgeving voor Euro 5 geldt vanaf 2008 en Euro 6 vanaf 2013.

2.4 **Reikwijdte**

De resultaten in deze studie geven een beeld van de milieu-impacts van verbranding van 1 liter brandstof (diesel, biodiesel, GTL en HVO) voor graafmachines en vrachtwagens zoals ingezet in werken van RWS. Vooraf is vastgesteld welke reikwijdte deze studie beslaat. Hierin spelen geografische, temporele, technische en andere aspecten een rol.

Geografie

Voor iedere onderzochte brandstof is het meest waarschijnlijke productieprofiel vastgesteld voor brandstoffen zoals aangeboden op de Nederlandse markt. Gebruik van deze gegevens in andere landen en andere toepassingen wordt afgeraden, omdat de representativiteit niet geborgd kan worden. De emissies van andere type mobiele werktuigen en/of vermogensklasse wijken namelijk af en voor sommige brandstoffen is er een grote spreiding in het milieuprofiel door variatie in herkomst en productie van de brandstoffen.

Tijd en technologie

Deze studie analyseert een aantal brandstoffen die reeds gebruikt worden en daarom is in de processen in de brandstofketen (zoals bijvoorbeeld elektriciteitsverbruik en oliewinning) de huidige stand van zaken als richtlijn genomen. Deze temporele en technologische afbakening betekent dat deze data geschikt is om berekeningen te doen voor de huidige situatie en dus niet geschikt zijn om bijvoorbeeld toekomstvoorspellingen te doen over milieueffecten van brandstofgebruik in de gehele 21^e eeuw.

Datakwaliteit, compleetheid en consistentie

De focus in dit project ligt bij de brandstoffen en emissies gegenereerd in de verbranding van de brandstoffen. Ondersteunende processen en materialen, zoals de machines, smeerolie, en toevoegingen aan de brandstof zijn niet in detail maar enkel op hoofdlijnen geanalyseerd en gekwantificeerd. In hoofdstuk 3 is uitgebreid toegelicht welke processen wel en niet zijn meegenomen.

Er is naar gestreefd om zoveel mogelijk voorgronddata (zoals emissie-kentallen) 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 transport van brandstof, zijn meer algemene en openbare bronnen zoals productsheets van producenten gebruikt indien geen betere bronnen beschikbaar waren.

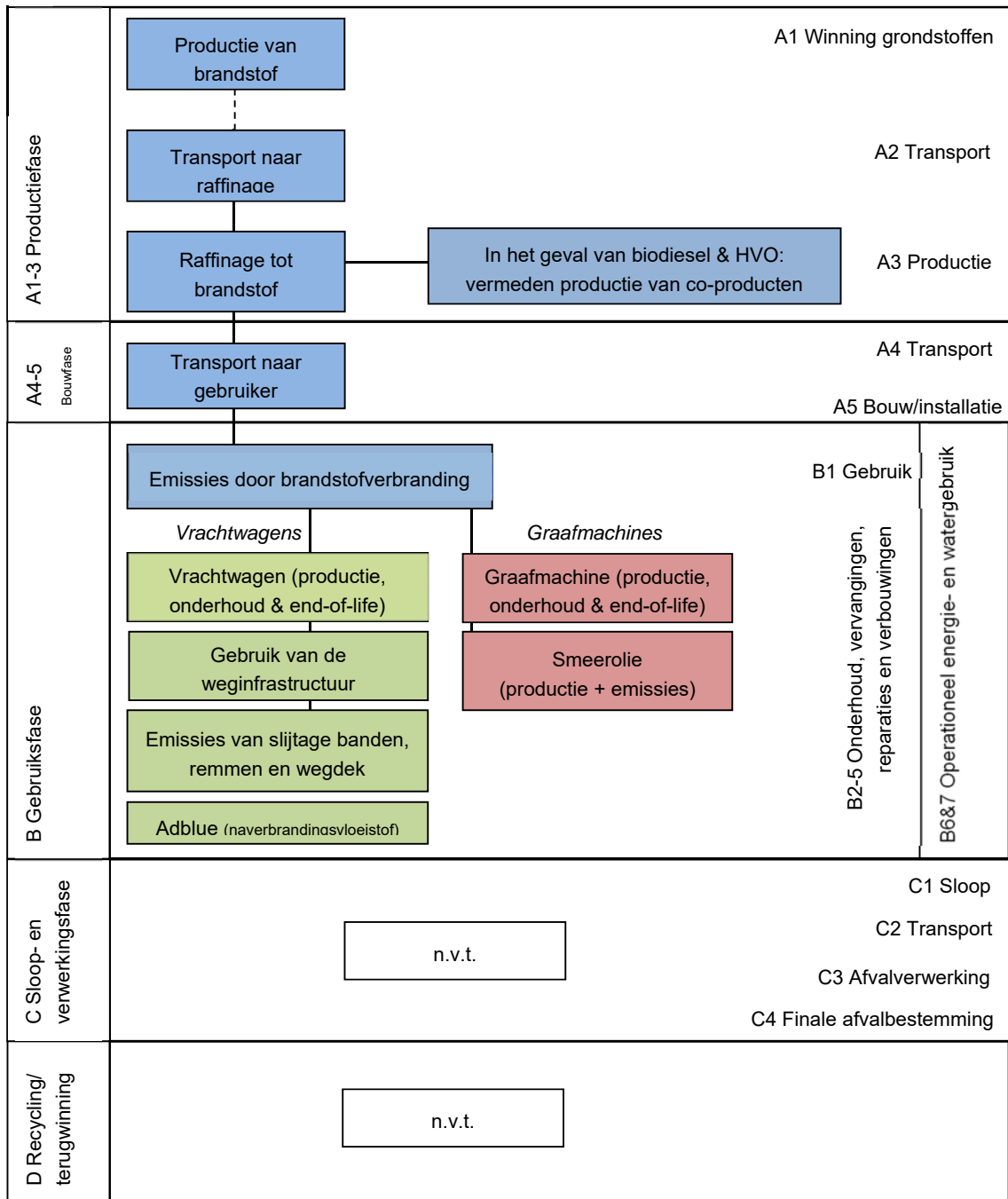
2.5 Levenscyclus en systeemgrenzen

De SBK bepalingsmethode schrijft voor om de levenscyclusfasen te benaderen volgens de door de NEN-EN 15804:2012 +A1 (2013) beschreven indeling. Deze indeling is weergegeven in Figuur 3, met daarin de keten van het te analyseren product. De volgende levenscyclusfasen worden door de SBK bepalingsmethode genoemd:

- A1-3: productiefase, inclusief:
 - A1: winning en verwerking grondstoffen, verwerking secundaire materiaal input (product van recycling processen)
 - A2: transport naar de producent
 - A3: productie
- A4-5: bouwfase, inclusief:
 - A4: transport naar de bouwlocatie
 - A5: installatie van het product in het beoogde object
- B: gebruiksfase, inclusief:
 - B1: gebruik van het geïnstalleerde product
 - B2: onderhoud van het geïnstalleerde product
 - B3: reparatie aan het geïnstalleerde product
 - B4: vervanging van het geïnstalleerde product
 - B5: renovatie van het geïnstalleerde product
- C: sloop- en verwerkingsfase (end of life), inclusief:
 - C1: sloop, de-installatie
 - C2: transport naar afvalverwerking
 - C3: Afvalverwerking voor hergebruik, terugwinning en/of recycling
 - C4: afdanking/ finale afvalverwerking
- D: hergebruik, terugwinning en/of recycling potentieel en voordelen/lasten welke buiten het systeem vallen.

Deze bovenstaande classificatie is ter illustratie schematisch weergegeven voor het verbranden van diesel in een vrachtwagen. Vooral de fases A1-A3, A4 en B1 zijn relevant voor de bepaling van de milieueffecten van machine-brandstofcombinaties. De fases B2 tot en met D zijn niet van toepassing voor brandstoffen, omdat de stoffen in fase B1 reeds opbranden. In fase B1 zijn tevens alle infrastructuur zoals de machines en wegen, en alle additionele materialen zoals smeerolie meegenomen.

De EN 15804 is in principe gericht op bouwproducten. In deze studie is deze echter ook toegepast op brandstoffen en daarom is de indeling van de milieu-impact over deze levenscyclusfasen bij gebruik van het milieu profiel afwijkend. Indien het milieuprofiel bijvoorbeeld wordt toegepast in berekening van afvoer van sloop materiaal, zal de volledige milieu-impact onderdeel C2 vallen en zal deze niet worden onderverdeeld in de categorieën zoals in deze rapportage omschreven.



Figuur 3 Levensfasen, zoals onderscheiden door de SBK bepalingsmethode voor verbranding van 1 liter brandstof in een vrachtwagen of graafmachine. De blauwe onderdelen zijn de bijdrage van de productie van de brandstof en emissies door brandstofverbranding. Deze gelden voor alle 20 LCA's. De groene delen worden alleen in de analyses voor milieuprofielen van vrachtwagens meegenomen, de rode delen alleen in voor graafmachines.

3 Input/output gegevens

In dit hoofdstuk zal eerst per brandstof het milieuprofiel voor de fases productie (A1-A3) en transport naar de gebruiker (A4) worden getoond. Daarna volgen per machine type de milieuprofielen gerelateerd aan de gebruikersfase (B).

3.1 Diesel

A1-A3 Productiefase

We gaan ervan uit dat de productie van diesel plaatsvindt in de haven van Rotterdam en vanuit daar alleen nog getransporteerd moet worden naar de gebruiker. Voor de productie is het Ecoinvent proces “Diesel {Europe without Switzerland} petroleum refinery operation” gebruikt. In dit proces is het onderdeel “Heavy fuel oil, burned in refinery furnace” representatief voor heel de wereld (GLO) vervangen door proces representatief voor Europa (Europe without Switzerland). Met deze wijziging is dit proces representatief voor winning van aardolie en het raffinageproces in Nederland en zijn de CO₂-emissies zijn vergelijkbaar zoals gerapporteerd in de well-to-wheel studie (JRC, 2014). Het raffinage proces is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Productie van 1 liter diesel.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Diesel raffinage	Diesel {Europe without Switzerland} petroleum refinery operation (aangepast)	1*0,832	kg	Ecoinvent met aanpassing van heavy fuel burned proces van GLO naar EU-CH.

A4 Transport naar gebruiker

Voor de opslag van diesel na de productie is het Ecoinvent-proces “Diesel, at regional storage/RER” gebruikt, waarbij de input van diesel en het transport is verwijderd zodat geen dubbeltellingen ontstaan bij het combineren van de diesel-productiefase en -transportfase. Het transport van diesel van de haven van Rotterdam naar de gebruiker is afhankelijk van de locatie van de gebruiker, daarom is de forfaitaire transportafstand van de SBK aangehouden (150 km). Het vervoer vindt plaats met een tankwagen, een vrachtwagen geschikt voor het vervoer van brandbare vloeistoffen. De Ecoinvent- en SBK-databases bevatten geen apart proces voor dit type vervoer, dus daarom is het meest representatieve proces voor dit vervoer gekozen. Op basis van de gemiddelde gewicht van een tankwagen, 38 ton (werktuigen.nl, 2018), is dit het Ecoinvent-proces: “Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}”. Er is gekozen om de Euro 5 klasse vrachtwagen te gebruiken, omdat het wagenpark bestaat uit Euro 5 en vrachtwagens en deze de grootste milieu-impact heeft (worst-case benadering). Het proces voor fase A4 wordt weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Opslag en transport van 1 liter diesel van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Opslag diesel	Diesel, low sulphur, at regional storage/RER (aangepast)	1*0,832	kg	Diesel-inzet en -transport verwijderd uit het Eco-invent proces.
Transport naar gebruiker	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	150*0,832	kgkm	Forfaitaire transportafstand conform SBK

3.2 Biodiesel

A1-A3 productiefase

De samenstelling van biodiesel varieert van jaar tot jaar door schommelingen in prijs van grondstoffen en veranderende wet- en regelgeving. De prijzen voor koolzaad en palmolie liggen namelijk dicht bij elkaar (Winkel, Kwant, Goh, & Junginger, 2014) en in 2009 is de regelgeving rondom biobrandstoffen gebaseerd op rest- en afvalstromen gewijzigd. Sinds dat moment tellen deze biobrandstoffen dubbel mee in bijdrage aan het aandeel hernieuwbare energie in de transportsector (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017). De gebruikte bronnen voor biodiesel zijn o.a. dierlijk vet, koolzaadolie, maisolie, gebruikt frituurvet en palmolie (Grinsven, Kampman, & Scholten, 2015). In Nederland is in 2016 60% van de biobrandstoffen uit afval en reststromen geproduceerd (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017). Deze 60% bestaat uit olie gewonnen uit dierlijk vet en afgewerkt frituurvet. De overige 40% bestaat uit een combinatie van koolzaadolie en palmolie (Grinsven, Kampman, & Scholten, 2015). In Tabel 6 wordt de samenstelling van 2016 weergegeven.

Tabel 6: Samenstelling van biodiesel.

Biobrandstof grondstof	Percentage (%)
<i>Koolzaadolie</i>	21
<i>Palmolie</i>	16
<i>Afgewerkte frituurolie</i>	26
<i>Dierlijke vetten</i>	37
totaal	100
<i>Uitgespaarde productie van glycerine*</i>	+ 5,3

*) *glycerine is een bijproduct van de productie van FAME en wordt in een ander proces (biomethanol productie) ingezet. Omdat het gaat om een co-product met exact dezelfde eigenschappen las glycerine die op andere wijzen wordt geproduceerd, wordt er binnen module A1 gecompenseerd voor de vermeden milieu-impact van reguliere glycerine productie.*

In het kort ziet het proces er als volgt uit: koolzaad (of raapzaad) en oliepalm worden gekweekt en de vruchten geoogst. Na transport worden deze geperst tot een olie die samen met het frituur en dierlijk vet wordt verestert met methanol. In A3 komen de frituur- en dierlijk vet vrij van milieulast het systeem binnen, omdat wordt verondersteld dat de voortbrengende keten tot aan 'end-of-waste' (einde afvalstatus) is gemodelleerd. Voor deze wel alle milieu-impact van transport en verdere verwerking tot biodiesel meegenomen.

Het koolzaad gebruikt voor de productie van biobrandstoffen wordt verbouwd in Noord-Europa en wordt gemodelleerd door het Eco-invent proces "Rape-oil crude {Europe without Switzerland}, rape oil mill operation". Dit proces beschrijft de productie van koolzaad en maken van koolzaadolie (transport en het persen). Het transport van de olie van de productieplant naar de haven van Rotterdam wordt geschat op 600 km (afstand van midden Duitsland naar Rotterdam). Het vervoer vindt plaats per tankwagen.

Palmolie wordt vooral geproduceerd in Maleisië, voor de productie en het persen van de palmolie is het Ecoinvent-proces "Palm oli, crude {MY}, palm oil mill operation" gebruikt. De palmolie wordt vervolgens per vrachtschip vervoerd naar de haven van Rotterdam, een afstand van 14800 km (sea-distances.org, 2018).

Afgewerkt frituurvet wordt gemodelleerd met het Ecoinvent-proces "Used vegetable cooking oil, GLO, market for" en daarna per tankwagen getransporteerd naar de haven van Rotterdam, we gaan hier uit van forfaitaire transportafstand van 150 km.

De vetten uit slachtafval kunnen ook met methanol veresterd worden, maar dienen eerst geraffineerd te worden tot olie in een zogenaamd "rendering"-proces. Dit renderingsproces is uitgebreid beschreven in de studie van Nikander et al. uit 2008 (tabel 9 en 10). In dit proces wordt van 1000 kg slachtafval 76 kg dierlijk vet gemaakt dat kan worden gebruikt als biobrandstof. De rest van het slachtafval wordt grotendeels verbrand, omdat het volgens Nederlandse wet niet is toegestaan het als diervoeding te gebruiken. Dit proces wordt gemodelleerd op basis van de gerapporteerde in- en outputs in tabel 11 en 12 van Nikander (2008). Hierbij wordt er vanuit gegaan dat slachtafval een afval product is; de milieu-impact van de dierlijke keten wordt niet toegerekend aan het afval en ook de verbranding van de 880kg overige restproducten niet worden meegenomen in de analyse.

Het renderingsproces voor de productie van 76 kg dierlijk vet is weergegeven in Tabel 7. Transport van de verwerkte dierlijke vetten naar de productiefaciliteit is meegenomen met de door SBK voorgeschreven forfaitaire transportafstand van 150 km voor niet-bulkgoederentransport binnen Nederland.

Tabel 7: Proces voor verwerking van 1000 kg dierlijk afval tot 76 kg dierlijke vetten die kunnen worden ingezet als biobrandstof op basis van tabel 10 en 11 van Nikander (2008).

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Water voor proces en koeling	Water, cooling, unspecified natural origin, NL	497	dm ³	
Dierlijke vetten	Animal matter	1000	kg	
Warmte voor proces, gas	Heat, district or industrial, natural gas {EU_CH}, at industrial furnace >100 kW	1314	MJ	
Warmte voor proces, stoom	Heat from steam, in chemical industry {RER}, market for	212	MJ	
Transport van slachtafval naar fabriek	Transport, freight, lorry > 32 metric ton, Euro 5 {GLO}	150	t*km	Binnenlands transport van slachtafval naar fabriek (150 km van 1000kg dierlijk slachtafval)

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
<i>Uitgespaarde producten</i>				
Proceswarmte naar netwerk	Heat, district or industrial, natural gas {EU-CH}, at industrial furnace >100 kW	425	MJ	
<i>Behandelde afval en emissies</i>				
Afvalwater	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH	880	dm ³	
Gevaarlijk afval	Hazardous waste, for incineration {EU-CH}, treatment of	0,03	kg	
Vast afval	Municipal solid waste {NL}, treatment of, incineration (aangepaste versie van municipal waste {EU-CH})	13	kg	Proces is aangepast naar Nederlandse situatie qua energie- en warmteterugwinning.

Voor het veresteringsproces is het Ecoinvent-proces "Vegetable oil methyl ester, esterification of rape oil {Europe with Switzerland}" gebruikt. Het proces van verestering hangt niet af van het type olie dat als input wordt gebruikt, dus achten we het gebruik van elektriciteit, water, en methanol ook representatief voor de mix van biodiesel. In dit proces is dus de samenstelling van de input aangepast van alleen koolzaad naar de biodiesel mix en het transport van de verschillende vetten naar de fabriek in haven van Rotterdam toegevoegd. De aanpassingen gedaan in het Ecoinvent-proces zijn weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8: Aanpassingen aan de in- en outputs van het Ecoinvent-proces "Vegetable oil methyl ester, esterification of rape oil {EU-CH}" (incl. aanpassingen) dat wordt gebruikt voor productie van 1 kilogram biodiesel.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Input dierlijke vetten	Pre-processed (rendered) animal fats	0,926*0,37	kg	Proces beschreven in Tabel 7. Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 37% fractie van dierlijke vetten.
Input koolzaad	Rape-oil crude {EU-CH}, rape oil mill operation	0,926*0,21	kg	Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 21% fractie van koolzaad.
Transport van koolzaad	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	0,926*0,21*600=71,5	kgkm	Gewichtsaandel vermenigvuldigd met afstand transport midden Duitsland naar Nederland.
Input frituurvet	Vegetable oil, from waste cooking oil, at plant/CH	0,926*0,26	kg	Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 26% fractie van frituurolie.
Transport frituurvet	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	0,926*0,26*150=71,5	kgkm	Gewichtsaandel vermenigvuldigd met forfaitaire afstand transport.

Input palmolie	Palm oil, crude {MY}, palm oil mill operation	0,926*0,16	kg	Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 16% fractie van palmolie.
Transport palmolie	Transport, freight, sea, transoceanic tanker {GLO}	0,926*0,16* 14800 = 2,19E3	kgkm	Gewichtsaandeel vermenigvuldigd met fractieafstand transport van Maleisië naar Rotterdam.
Uitgespaarde producten				
Glycerine productie	Glycerine {GLO}, market for (transport verwijderd)	0,05*0,89= 0,045	kg	

A4 Transport naar gebruiker

Voor de opslag en transport van biodiesel is het Ecoinvent-proces "diesel, at regional storage/RER" gebruikt, waarbij de input van diesel en het transport is verwijderd zodat geen dubbelstellingen ontstaan bij het combineren van de diesel-productiefase en -transportfase. Het transport van biodiesel van de haven van Rotterdam naar de gebruiker is afhankelijk van de locatie van de gebruiker, daarom is de forfaitaire transportafstand van de SBK aangehouden (150 km). Het vervoer vindt plaats met een tanker vrachtwagen en wordt (net als in het geval van diesel) gemodelleerd het Ecoinvent-proces: "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}". Het proces voor fase A4 wordt weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9: Opslag en transport van 1 liter biodiesel van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Opslag biodiesel	Diesel, low sulphur, at regional storage/RER (aangepast)	1*0,890	kg	Diesel-inzet en -transport verwijderd uit het Ecoinvent-proces
Transport naar gebruiker	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	150*0,890	kgkm	Forfaitaire transportafstand conform SBK

3.3 HVO

A1-A3 Productiefase

Op basis van informatie van de Neste Oil website wordt HVO voor 80% geproduceerd uit afvalstromen, en voor 20% uit primaire stromen. Voor de productie van HVO wordt daarom uitgegaan van een mix van 20% palmolie, 40% dierlijke vetten en 40% afgewerkt frituurvet (Neste, 2018). De productie van de dierlijke vetten, palmolie en het frituurvet is hetzelfde als voor productie van biodiesel en is beschreven in de vorige paragraaf. In A1 komen de frituur- en dierlijk vet vrij van milieulast het systeem binnen, omdat wordt verondersteld dat de voortbrengende keten tot aan 'end-of-waste' (einde afvalstatus) is gemodelleerd. Voor deze wel alle milieu-impact van transport en verdere verwerking tot biodiesel meegenomen.

Na de productie van alle vetten worden deze op een andere manier dan bij biodiesel verwerkt. Eerst worden de vetten voorbereid in een voorbereidingsproces dat alle onzuiverheden verwijderd met behulp van

chemicaliën. Op basis van de studie van Nikander uit 2008 (tabel 12 en 13) is een Ecoinvent-proces voor deze voorbereidingstap opgesteld.

Tabel 10: Pretreatmentproces voor de productie van 1,191 kilogram vetten op basis van tabel 12 en 13 uit studie van Nikander (2008).

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Bekende inputs uit de natuur				
Input dierlijke vetten	Pre-processed (rendered) animal fats	1,1214*0,4	kg	Proces beschreven in Tabel 7. Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 40% fractie van dierlijke vetten.
Input frituurvet	Vegetable oil, from waste cooking oil, at plant/CH	1,1214*0,4	kg	Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 40% fractie van frituurolie.
Transport frituurvet	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	1,1214*0,4 *150	kgkm	Gewichtsaandeel vermenigvuldigd met forfaitaire afstand transport.
Input palmolie	Palm oil, crude {MY}, palm oil mill operation	1,1214*0,2	kg	Totaal gewicht is overgenomen uit Ecoinvent-proces en gewogen met 20% fractie van palmolie.
Transport palmolie	Transport, freight, sea, transoceanic tanker {GLO}	1,1214*0,2 * 14800	kgkm	Gewichtsaandeel vermenigvuldigd met fractieafstand transport van Maleisië naar Rotterdam.
Elektriciteit voor proces	Electricity, medium voltage, at grid/NL	0,05	MJ	
Water	Tap water {EU-CH}, market for	0,028	dm ³	
Stoom voor proces	Heat, from steam in chemical industry {RER}, market for	0,657	kg	
Chemicaliën	Chemicals, organic {GLO}, market for	0,003	kg	
Behandelde afval en emissies				
Afvalwater	Wastewater, average {EU-CH}, treatment of	0,111	dm ³	
Rest afval slacht	Meat and bone meal {NL}, treatment of, municipal incineration	0,013	kg	Proces is aangepast naar Nederlandse situatie qua energie- en warmteterugwinning.

Na de voorbereiding van de vetten wordt de HVO geproduceerd met behulp van het 'Hydrotreatment proces'. In dit proces wordt met behulp van waterstof de triglycerides van de dierlijke vetten omgezet in koolwaterstoffen. Daarnaast worden ook propaan en biogasoline geproduceerd als bijproduct. Het gaat om 0,072 en 0,025 kilo per productie van één kilo HVO. De modellering van dit proces is gebaseerd op de beschrijving van Nikander uit 2008 in tabel 14 en 15.

Tabel 11: Hydrotreatment proces voor de productie van 1kg HVO op basis van tabel 14 en 15 van Nikander (2008).

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
HVO uit pretreatmentproces	Pretreatment HVO (Tabel 10)	1,191	kg	
Input waterstof	Hydrogen, liquid, at plant/RER	0,042	kg	
Water	Tap water {EU-CH}, market for	0,025	dm ³	
Stoom voor proces	Heat, from steam in chemical industry {RER}, market for	0,029	MJ	
Elektriciteit	Electricity, medium voltage {NL}, market for	0,107	MJ	
Emissie naar lucht	Carbon dioxide, biogenic	0,048	kg	
Behandelde afval en emissies				
Afvalwater	Wastewater, average {EU-CH}, treatment of wastewater	0,113	dm ³	
Uitgespaarde producten				
Productie van propaan als bijproduct	Propane {GLO}, market for	0,072	kg	
Productie van biogasoline als bijproduct	Petrol, low sulfur {EU-CH}, market for (transport verwijderd)	0,025	kg	

A4 Transport naar gebruiker

Voor de opslag en transport van HVO is het Ecoinvent-proces “diesel, at regional storage/RER” gebruikt, waarbij de input van diesel en het transport is verwijderd zodat geen dubbeltellingen ontstaan bij het combineren van de diesel-productiefase en -transportfase. Het transport van biodiesel van de haven van Rotterdam naar de gebruiker is afhankelijk van de locatie van de gebruiker, daarom is de forfaitaire transportafstand van de SBK aangehouden (150 km). Het vervoer vindt plaats met een tanker vrachtwagen en wordt (net als in het geval van diesel) gemodelleerd het Ecoinvent-proces: “Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}”. Het proces voor fase A4 wordt weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Opslag en transport van 1 liter HVO van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Opslag HVO	Diesel, low sulphur, at regional storage/RER (aangepast)	1*0,785	kg	Diesel inzet en -transport verwijderd uit het Ecoinvent-proces
Transport naar gebruiker	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	150*0,785	kgkm	Forfaitaire transportafstand conform SBK

3.4 GTL

A1-A3 Productiefase

De productie van GTL is gemodelleerd aan hand van de studie van JRC (2014). De GTL die in Nederland op de markt is, wordt grotendeel in Qatar geproduceerd door Shell (JRC, 2014). Globaal gezien bestaat de productie van GTL bestaat uit 3 stappen (Shell, 2014):

- Vergassing van het aardgas op temperatuur van 1300 tot 1500 graden, zodat de methaan met zuurstof reageert tot koolstofmonoxide en waterstof.
- Synthese van koolwaterstoffen volgens het Fisher Tropsch proces. Dit vindt plaats bij temperatuur van 201 tot 260 graden en met behulp van een katalysator.
- Omzetting van de koolwaterstoffen naar benzine door reactie met waterstof en met behulp van een katalysator.

Bij GTL-productie wordt aardgas gebruikt als grondstof en tevens om het proces van energie te voorzien. Vanuit de well-to-wheel studie is bekend dat 65% van het gewonnen aardgas wordt gebruikt voor GTL en 35% wordt gebruikt voor het productie proces (JRC, 2014). Voor productie van 1 kg aardgas is dus $1/0,65 = 1,54$ kg aardgas nodig. Dit komt overeen met 1,73 m³.

Aardgaswinning in Qatar zit niet in de database van Ecoinvent. De beschikbare kaarten voor on-shore gasproductie zijn voor Nederland, Noorwegen, Rusland, Duitsland en Algerije. Omdat we aannemen dat het productie in Algerije het meeste lijkt op het productieproces in Qatar is hier de proceskaart "Natural gas, at production onshore/DZ" (Algerije) gebruikt.

De impact van het productie proces is gebaseerd op studie van JRC (2014). In deze studie worden alleen de CO₂-equivalenten gerapporteerd. Die hebben we gelijk gehouden voor de productieberekening in dit onderzoek en aangevuld voor de overige milieueffecten door op basis van Ecoinvent-processen de GTL productie te benaderen. Naar verwachting draagt vergassing (de eerste van de drie stappen) het meeste bij aan het productieproces van GTL. Deze vergassing is gemodelleerd met het meest representatieve Ecoinvent-proces beschikbaar voor verhitting tot hoge temperaturen namelijk "Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER". In dit proces is de mix van landen waaruit aardgas wordt gebruikt vervangend door Algerije. Ook is aangenomen dat de benodigde elektriciteit lokaal wordt opgewekt met aardgas. We veronderstellen dat deze energie processen voor vergassing (grootste bijdrage, stap 1) representatief zijn voor alle energiegebruik voor het productieproces van GTL om de andere milieueffecten dan door CO₂ emissie te berekenen.

De infrastructuur nodig voor de GTL productie is gemodelleerd met behulp van het Ecoinvent-proces "Chemical plant, organics {RER}", omdat de meest representatieve proces is dat beschikbaar is. De fractie is ook overgenomen uit het Ammonia productie proces ("Ammonia, steam reforming, liquid, at plant {RER}").

Voor opslag na productie van de GTL is het energiegebruik gelijk gesteld aan waarde gerapporteerd in JRC (2014). Er is hier gebruik gemaakt van het Ecoinvent proces: "Electricity, medium voltage {DZ} natural gas burned in gas turbine for compressor station" omdat dit het meest representatief is voor de opslag van GTL.

In Tabel 13 wordt het gehele productieproces van GTL weergegeven.

Tabel 13: Productie van 1 liter GTL.

Proces-stap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
Aardgas grondstof	Natural gas, at production onshore/DZ	1,73	m ³	Gebaseerd op energie-inhoud van 43 MJ/kg voor GTL en 39,1 MJ/m ³ voor aardgas uit Algerije.
Productie van GTL	Heat, district or industrial, natural gas {DZ}	10,3	MJ	Van de totale aardgasinzet wordt 35% gebruikt in de productie. Dit gebruik is gedeeld om overeen te komen met JRC (2014)
Infrastructuur	Chemical plant, organics/RER/I	0,000000 0004	p	Gebaseerd op het Ecoinvent-proces "Ammonia, steam reforming, liquid, at plant {RER}"
Elektriciteitsverbruik GTL depot	Electricity, medium voltage {DZ} natural gas burned in gas turbine for compressor station	0.0361	MJ	(JRC, 2014)

A4 Transport naar gebruiker

GTL wordt per olietanker van Qatar naar Rotterdam getransporteerd. Via het Suezkanaal is dit een afstand van ongeveer 11 800 km (sea-distances.org, 2018). Voor dit transport is in een bestaande Ecoinvent-proces ("Transport, freight, sea, transoceanic tanker {GLO} marker for") gebruikt. Voor de opslag en transport van GTL is het Ecoinvent-proces "diesel, at regional storage/RER" gebruikt, waarbij de input van diesel en het transport is verwijderd zodat geen dubbeltellingen ontstaan bij het combineren van de diesel-productiefase en -transportfase. Het transport van GTL van de haven van Rotterdam naar de gebruiker is afhankelijk van de locatie van de gebruiker, daarom is de forfaitaire transportafstand van de SBK aangehouden (150 km). Het vervoer vindt plaats met een tanker vrachtwagen en wordt (net als in het geval van diesel) gemodelleerd het Ecoinvent-proces: "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}". Het proces voor fase A4 wordt weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14: Opslag en transport van 1 liter GTL van de productielocatie naar de gebruiker.

Processtap	Ecoinvent-proces	Hoeveelheid	Eenheid	Bron/ Toelichting
GTL-transport van Qatar naar haven Rotterdam	Transport, freight, sea, transoceanic ship, GLO, marker for	11800*0,78 0	kgkm	Afstand is berekend met behulp van sea-distances.org.
Opslag GTL	Diesel, low sulphur, at regional storage/RER (aangepast)	1*0,780	kg	Diesel-inzet en -transport verwijderd uit Ecoinvent-proces
Transport naar gebruiker	Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}	150*0,780	kgkm	Forfaitaire transportafstand conform SBK

3.5 Graafmachines categorie 3, 4 en 5

Zoals in Figuur 3 op pagina 18 weergegeven is, dragen meerdere processen bij aan het milieuprofiel van de gebruiksfase. Allereerst zullen de emissies die gepaard

gaan met verbranding van 1 liter brandstof in graafmachines worden besproken. Daarna wordt het gebruik van de graafmachine, smeerolie en Adblue besproken.

De emissies van verbranding van 1 liter diesel in de verschillende graafmachines zijn bepaald op basis van emissieregistratie-model van TNO (Hulskotte & Verbeek, 2009). Deze informatie is voor vluchtig organische componenten (VOC-elementen) en metalen aangevuld met rapportage van Klein et al (2017). Omdat er geen meetdata beschikbaar zijn voor de emissiefactoren voor verbranding van een liter biodiesel, GTL en HVO in graafmachines, zijn deze bepaald op basis van ervaringen in vrachtwagens. Door middel van het vergelijken van de technologieën die worden gebruikt in de verschillende klassen graafmachines en vrachtwagens is een inschatting gemaakt van de vermindering in emissiefactoren voor de brandstoffen anders dan diesel.

B1 gebruiksfase – verbrandingsemissies NRMM categorie 3B

Voor graafmachines in categorie IIIb is aangenomen dat deze voorzien zijn van uitlaatgasrecirculatie (ook wel 'Exhaust of Emission Gas Recirculation' of EGR genoemd) technologie. Doordat verbrandingsemissies nogmaals door de verbrandingsmotor worden gecirculeerd, wordt de uitstoot van stikstofoxiden verminderd. Daarnaast heeft de helft van de graafmachines een dieselpartikelfilter (DPF, of roetfilter) die fijnstof (ook wel 'particle matter' of PM) uit de verbrandingsemissies afvangt. Voor HVO en GTL is de uitstoot van PM (alle grooten) 5% lager, rekening houdend met het aandeel roetfilters. Voor vluchtig organische stoffen (VOC) en koolstofmonoxide (CO) wordt uitgegaan van 10% lager in vergelijking met diesel, op basis van ervaring met Euro IV motoren. Voor NO_x wordt geen verschil verwacht tussen GTL, HVO en diesel, vanwege het grote aandeel motoren met EGR. In het verleden lieten motoren met EGR vooral een wisselende response zien voor NO_x, soms positief en soms negatief. In het geval van gebruik van 100% biodiesel, wordt er 12% meer NO_x, 30% minder PM en 10% minder HC en CO emissies verwacht (Verbeek, et al., 2008).

In Tabel 15 wordt de emissies die vrijkomen bij verbranding van 1 liter brandstof weergegeven voor diesel, biodiesel, HVO en GTL.

Tabel 15: Emissiefactoren in kilogrammen voor verbranding van een liter brandstof voor graafmachines uit categorie 3B.

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
<i>Carbon monoxide, fossil</i>	1.05E-04			9.19E-05
<i>Carbon monoxide, biogenic</i>		8.87E-05	9.25E-05	
<i>Carbon dioxide, fossil</i>	2.64E+00			2.58E+00
<i>Carbon dioxide, biogenic</i>		2.49E+00	2.59E+00	
<i>Methane, fossil</i>	2.48E-06			2.18E-06
<i>Methane, biogenic</i>		2.11E-06	2.20E-06	
<i>NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin</i>	5.95E-05	5.05E-05	5.26E-05	5.23E-05
<i>Dioxin</i>	1.55E-12	1.32E-12	1.37E-12	1.37E-12
<i>PAH</i>	5.42E-07	4.60E-07	4.80E-07	4.77E-07
<i>Benzo(a)pyrene</i>	1.06E-06	8.96E-07	9.34E-07	9.28E-07

<i>Arsenic</i>	4.16E-11	3.21E-08	4.09E-11	4.07E-11
<i>Cadmium</i>	2.08E-11	3.92E-11	2.04E-11	2.03E-11
<i>Chromium</i>	9.98E-09	1.96E-11	9.81E-09	9.76E-09
<i>Copper</i>	6.07E-09	9.42E-09	5.97E-09	5.94E-09
<i>Mercury</i>	1.91E-09	5.73E-09	1.88E-09	1.87E-09
<i>Lead</i>	1.25E-10	1.80E-09	1.23E-10	1.22E-10
<i>Nickel</i>	4.16E-11	1.18E-10	4.09E-11	4.07E-11
<i>Selenium</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Zinc</i>	1.58E-08	1.49E-08	1.55E-08	1.54E-08
<i>Dinitrogen monoxide</i>	2.13E-05	2.01E-05	2.10E-05	2.08E-05
<i>Ammonia</i>	8.31E-06	7.84E-06	8.17E-06	8.12E-06
<i>Nitrogen oxides</i>	8.27E-03	8.73E-03	8.13E-03	8.08E-03
<i>Particle matter <2,5 um</i>	6.70E-05	4.42E-05	6.25E-05	6.22E-05
<i>Particle matter >2,5 um and < 10 um</i>	3.52E-06	2.33E-06	3.29E-06	3.27E-06
<i>Sulfur dioxide</i>	1.66E-05	1.57E-05	1.64E-05	1.63E-05

B1 gebruiksfase – verbrandingsemissies NRMM categorie 4

Voor graafmachines in categorie IV is aangenomen dat deze allen zijn voorzien van EGR en selectieve katalytische reductie (beter bekend als SCR of “selective catalytic reduction”). Door de verbrandingsemissies te laten reageren met ureum of ammoniak wordt een deel van de stikstofoxiden omgezet in stikstof en water. Daarnaast maakt driekwart van de machines ook gebruik van DPF technologie. Voor HVO en GTL is de uitstoot van PM 5% lager dan voor diesel. Deze vermindering is gebaseerd op aanname dat 75% van de klasse 4 graafmachines is voorzien van een roetfilter. Voor deze graafmachines is er geen vermindering in PM emissie. De overige 25% van de klasse IV graafmachines heeft geen roetfilter en voor deze machines is er een 20% vermindering van PM emissies indien HVO of GTL als brandstof wordt gebruikt. Voor biodiesel, wordt uitgegaan van een 7% PM uitstoot reductie rekening houdend met een marktaandeel van roetfilters van 75% en reductie van 30% voor graafmachines zonder roetfilter (Verbeek, et al., 2008). Voor alle brandstoffen is geen vermindering van NO_x, VOC en CO emissies. Voor NO_x wordt uitgegaan van 0% effect, omdat alle klasse IV graafmachinemotoren voorzien zullen zijn van closed-loop NO_x control.

In Tabel 16 wordt de emissies die vrijkomen bij verbranding van 1 liter brandstof weergegeven voor diesel, biodiesel, HVO en GTL.

Tabel 16: Emissiefactoren in kilogrammen voor verbranding van een liter brandstof voor graafmachines uit categorie 4.

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
<i>Carbon monoxide, fossil</i>	1.05E-04			1.02E-04
<i>Carbon monoxide, biogenic</i>		9.86E-05	1.03E-04	
<i>Carbon dioxide, fossil</i>	2.64E+00			2.58E+00
<i>Carbon dioxide, biogenic</i>		2.49E+00	2.59E+00	
<i>Methane, fossil</i>	2.48E-06			2.43E-06
<i>Methane, biogenic</i>		2.34E-06	2.44E-06	
<i>NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin</i>	5.96E-05	5.61E-05	5.85E-05	5.81E-05

<i>Dioxin</i>	1.55E-12	1.46E-12	1.53E-12	1.52E-12
<i>PAH</i>	5.42E-07	5.11E-07	5.33E-07	5.30E-07
<i>Benzo(a)pyrene</i>	1.06E-06	9.95E-07	1.04E-06	1.03E-06
<i>Arsenic</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Cadmium</i>	2.08E-11	1.96E-11	2.04E-11	2.03E-11
<i>Chromium</i>	9.98E-09	9.42E-09	9.81E-09	9.76E-09
<i>Copper</i>	6.07E-09	5.73E-09	5.97E-09	5.94E-09
<i>Mercury</i>	1.91E-09	1.80E-09	1.88E-09	1.87E-09
<i>Lead</i>	1.25E-10	1.18E-10	1.23E-10	1.22E-10
<i>Nickel</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Selenium</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Zinc</i>	1.58E-08	1.49E-08	1.55E-08	1.54E-08
<i>Dinitrogen monoxide</i>	2.13E-05	2.01E-05	2.10E-05	2.08E-05
<i>Ammonia</i>	8.31E-06	7.84E-06	8.17E-06	8.12E-06
<i>Nitrogen oxides</i>	1.10E-03	1.04E-03	1.08E-03	1.08E-03
<i>Particle matter <2,5 um</i>	6.70E-05	5.87E-05	5.92E-05	5.89E-05
<i>Particle matter >2,5 um and < 10 um</i>	3.52E-06	3.09E-06	3.12E-06	3.10E-06
<i>Sulfur dioxide</i>	1.66E-05	1.57E-05	1.64E-05	1.63E-05

B1 gebruiksfase – verbrandingsemissies NRMM categorie 5

Voor graafmachines in categorie V worden voor alle machines EGR, SCR en DPF als technologieën ingezet. Door de inzet van al deze technieken, is het verschil in verbrandingsemissies tussen GTL, HVO, biodiesel en diesel per MJ afwezig. In Tabel 17 worden de emissies (in kg) die vrijkomen bij verbranding van 1 liter brandstof weergegeven voor diesel, biodiesel, HVO en GTL.

Tabel 17: Emissiefactoren in kilogrammen voor verbranding van een liter brandstof graafmachines uit categorie 5.

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
<i>Carbon monoxide, fossil</i>	1.05E-04			1.02E-04
<i>Carbon monoxide, biogenic</i>		9.86E-05	1.03E-04	
<i>Carbon dioxide, fossil</i>	2.64E+00			2.58E+00
<i>Carbon dioxide, biogenic</i>		2.49E+00	2.59E+00	
<i>Methane, fossil</i>	2.48E-06			2.43E-06
<i>Methane, biogenic</i>		2.34E-06	2.44E-06	
<i>NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin</i>	5.96E-05	5.61E-05	5.85E-05	5.81E-05
<i>Dioxin</i>	1.55E-12	1.46E-12	1.53E-12	1.52E-12
<i>PAH</i>	5.42E-07	5.11E-07	5.33E-07	5.30E-07
<i>Benzo(a)pyrene</i>	1.06E-06	9.95E-07	1.04E-06	1.03E-06
<i>Arsenic</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Cadmium</i>	2.08E-11	1.96E-11	2.04E-11	2.03E-11
<i>Chromium</i>	9.98E-09	9.42E-09	9.81E-09	9.76E-09

<i>Copper</i>	6.07E-09	5.73E-09	5.97E-09	5.94E-09
<i>Mercury</i>	1.91E-09	1.80E-09	1.88E-09	1.87E-09
<i>Lead</i>	1.25E-10	1.18E-10	1.23E-10	1.22E-10
<i>Nickel</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Selenium</i>	4.16E-11	3.92E-11	4.09E-11	4.07E-11
<i>Zinc</i>	1.58E-08	1.49E-08	1.55E-08	1.54E-08
<i>Dinitrogen monoxide</i>	2.13E-05	2.01E-05	2.10E-05	2.08E-05
<i>Ammonia</i>	8.31E-06	7.84E-06	8.17E-06	8.12E-06
<i>Nitrogen oxides</i>	1.10E-03	1.04E-03	1.08E-03	1.08E-03
<i>Particle matter <2,5 um</i>	3.59E-05	3.38E-05	3.53E-05	3.51E-05
<i>Particle matter >2,5 um and < 10 um</i>	1.89E-06	1.78E-06	1.86E-06	1.85E-06
<i>Sulfur dioxide</i>	1.66E-05	1.57E-05	1.64E-05	1.63E-05

B1 gebruiksfase – algemene processen

Productie, onderhoud en end-of-life van graafmachines

Om de afschrijving van graafmachines te modelleren is gebruik gemaakt van het Ecoinvent proces “Hydraulic digger {GLO}, market for, U”, omdat dit de meest representatieve data beschikbaar is. In het Ecoinvent-proces “Excavation, hydraulic digger {RER} U”, is de factor van de afschrijving 1,0E-6 stuks graafmachine per m³ verzet werk. Dit kan worden omgerekend naar afschrijving per liter diesel door deze factor te delen door het diesel gebruik in kg uit hetzelfde Ecoinvent-proces (0,131 kg) en vervolgens te vermenigvuldigen met de dichtheid van diesel (0,832 kg/l). De afschrijving per liter diesel komt dan neer op: (1E-6 piece / 0.131 kg) * 0,832 kg/l = 6.35E-6 piece per liter diesel.

Deze waarde wordt representatief geacht omdat deze qua orde grootte overeenkomt met de afschrijving die wordt gehanteerd in TNO's emissieregistratiemodel (Hulskotte & Verbeek, 2009). Voor de andere brandstoffen is deze waarde gecorrigeerd met de calorische waarde en weergegeven in Tabel 18.

Tabel 18: Afschrijving van categorie IIIB, IV en V graafmachines per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Fractie van graafmachine die gemodelleerd wordt (*10 ⁻⁶ piece/liter)	6,35	5,86	6,10	6,07

Gebruik van smeermiddelen

Tijdens het gebruik van graafmachines wordt smeerolie in de motor gebruikt. Dit kan worden gemodelleerd met het Ecoinvent-proces “Lubrication oil {GLO}, market for”. In het Ecoinvent-proces “Evacuation, Hydraulic digger {RER}” wordt een hoeveelheid van 0,0025 kg per 0,131 kg diesel gebruikt. Het gebruik van smeerolie is dus (0,0025 / 0,131) kg per kg diesel en (0,0025 / 0,131) kg * 0,832 kg/L = 1,58E-2 kg smeerolie per liter diesel. Omdat het smeerolie gebruik schaalt met het verzette werk en het verzette werk schaalt met de calorische waarde van de brandstoffen, wordt het verbruik voor de andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde. Het verbruik voor alle brandstoffen is weergegeven in Tabel 19.

Tabel 19: Gebruik van smeerolie in categorie IIIB, IV en V graafmachines per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
--	--------	-----------	-----	-----

Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Gebruik van smeerolie per liter brandstof (*10 ⁻² kg/liter)	1,59	1,46	1,53	1,52

Na gebruik moeten de smeerolieresten ook verwerkt worden. Dit is gemodelleerd met het Ecoinvent-proces "Waste mineral oil" {EU-CH}, market for" en dezelfde fracties als gebruik van smeerolie weergeven in Tabel 19.

Gebruik van Adblue

In categorie IV en IV graafmachines wordt gebruikt gemaakt van de selectieve katalytische reductie (beter bekend als SCR of "selective catalytic reduction") technologie. Hiervoor wordt Adblue, een oplossing 32,5% ureum en gedemineraliseerd water, gebruikt om de bij de verbranding gevormde stikstofoxiden om te zetten in stikstof en water. Het Adblue-verbruik van graafmachines is gebaseerd op die van vrachtwagens. Dit is gemiddeld 19,7 gram ureum per liter brandstof. Dit wordt gemodelleerd door het Ecoinvent-proces "Urea, as N {RE} production". Dit proces komt overeen met 1 kilogram stikstof (N), dus 2,17kg ureum en verbruik per liter diesel is dus $19,7/2,17=9,08$ gram. Omdat ook het ureumgebruik schaal met het verzette werk, is voor de andere brandstoffen het gebruik gecorrigeerd met de calorische waarde weergeven in Tabel 20.

Tabel 20: Gebruik van ureum in categorie IV en V graafmachines per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Gebruik van ureum per liter brandstof (g/liter)	9.08	8.37	8.72	8.67

3.6 Transportvoertuigen (vrachtwagens) klasse Euro 5 en 6

In de gebruiksfase zijn er vier componenten uit het schema uit Figuur 3 die worden beschouwd: de emissies van de verbranding van 1 liter van brandstof, impact gerelateerd aan het gebruik van infrastructuur, gebruik van ADblue en de impact gerelateerd aan productie, gebruik en end-of-life van de vrachtwagen.

B1 gebruiksfase – verbrandingsemissies Euro 5 en 6

De emissies van diesel zijn gebaseerd op data uit de factsheets van Verbeek (2014), waarin gemeten emissies worden gerapporteerd. Voor GTL en HVO wordt een verschil van -12% en -21% aan NOx- en fijnstofemissies gerapporteerd. Voor biodiesel is de NOx uitstoot hoger (+23%) en de fijnstof emissie lager (-61%). Daarnaast is de uitstoot van koolstofmonoxide (CO) en vluchtig organische componenten (VOC) voor alledrie respectievelijk -10% en -20%. Tot VOC behoren de componenten acetaldehyde, benzaldehyde, benzene, butane, ethane, formaldehyde, methane, m- en o-xylene, NMVOC, PAH, pentane, propane, styrene en toluene. De emissies van zware Euro 5 vrachtwagens zijn in kilogrammen per liter brandstof weergegeven in Tabel 21.

Tabel 21: Emissies gerelateerd aan verbranding van 1 liter brandstof in vrachtwagen klasse Euro 5.

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
Acetaldehyde	4.00E-06	3.02E-06	3.13E-06	3.14E-06
Acrolein	1.55E-06	1.46E-06	1.51E-06	1.52E-06
Ammonia	8.16E-06	7.69E-06	7.97E-06	8.02E-06
Arsenic	8.32E-11	7.85E-11	8.13E-11	8.18E-11
Benzaldehyde	1.20E-06	9.04E-07	9.37E-07	9.43E-07
Benzene	6.13E-08	4.62E-08	4.79E-08	4.82E-08
Butane	1.31E-07	9.90E-08	1.03E-07	1.03E-07
Cadmium	7.24E-09	6.83E-09	7.07E-09	7.11E-09
Carbon dioxide, fossil	2.65E+00		2.59E+00	
Carbon dioxide, biogenic		2.50E+00		2.60E+00
Carbon monoxide, fossil	3.95E-03		3.47E-03	
Carbon monoxide, biogenic		3.35E-03		3.49E-03
Chromium	2.50E-08	2.35E-08	2.44E-08	2.45E-08
Chromium VI	4.99E-11	4.71E-11	4.88E-11	4.91E-11
Copper	1.76E-08	1.66E-08	1.72E-08	1.73E-08
Dinitrogen monoxide	1.53E-04	1.44E-04	1.49E-04	1.50E-04
Ethane	2.63E-08	1.98E-08	2.05E-08	2.06E-08
Formaldehyde	7.35E-06	5.55E-06	5.75E-06	5.78E-06
Heptane	2.63E-07	2.48E-07	2.57E-07	2.58E-07
Lead	4.33E-08	4.09E-08	4.24E-08	4.26E-08
Mercury	4.41E-09	4.16E-09	4.31E-09	4.33E-09
Methane, fossil	2.15E-06		1.68E-06	

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
<i>Methane, biogenic</i>		1.62E-06		1.69E-06
<i>m-Xylene</i>	8.58E-07	6.47E-07	6.70E-07	6.74E-07
<i>Nickel</i>	7.32E-09	6.90E-09	7.15E-09	7.20E-09
<i>Nitrogen oxides</i>	1.05E-02	1.22E-02	9.05E-03	9.10E-03
<i>NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin</i>	7.11E-05	5.36E-05	5.56E-05	5.59E-05
<i>o-Xylene</i>	3.50E-07	2.64E-07	2.74E-07	2.75E-07
<i>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	6.51E-08	4.91E-08	5.09E-08	5.12E-08
<i>Particulates, < 2.5 um</i>	6.68E-05	2.46E-05	5.16E-05	5.19E-05
<i>Particulates, < 10 um</i>	6.68E-05	2.46E-05	5.16E-05	5.19E-05
<i>Pentane</i>	5.25E-08	3.96E-08	4.10E-08	4.13E-08
<i>Propane</i>	8.75E-08	6.60E-08	6.84E-08	6.88E-08
<i>Selenium</i>	8.32E-11	7.85E-11	8.13E-11	8.18E-11
<i>Styrene</i>	4.90E-07	3.70E-07	3.83E-07	3.85E-07
<i>Sulfur dioxide</i>	1.36E-05	1.28E-05	1.33E-05	1.33E-05
<i>Toluene</i>	8.75E-09	6.60E-09	6.84E-09	6.88E-09
<i>Zinc</i>	1.45E-06	1.36E-06	1.41E-06	1.42E-06

Voor Euro 6 vrachtwagens worden zowel de EGR als de SCR en DPF technologie gebruikt. Door het toepassen van de closed-loop-NOx-control en de DPF is er het verschil in emissies van de verschillende brandstoftypes nihil. In Tabel 22 worden de emissies van zware Euro 6 vrachtwagens weergegeven.

Tabel 22: Emissies gerelateerd aan verbranding van 1 liter brandstof in vrachtwagen klasse Euro 6.

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
<i>Acetaldehyde</i>	3.25E-06	3.07E-06	3.18E-06	3.20E-06
<i>Acrolein</i>	1.26E-06	1.19E-06	1.23E-06	1.24E-06
<i>Ammonia</i>	8.15E-06	7.68E-06	7.96E-06	8.01E-06
<i>Arsenic</i>	8.32E-11	7.85E-11	8.13E-11	8.18E-11
<i>Benzaldehyde</i>	9.75E-07	9.19E-07	9.53E-07	9.58E-07
<i>Benzene</i>	4.98E-08	4.70E-08	4.87E-08	4.90E-08
<i>Butane</i>	1.07E-07	1.01E-07	1.04E-07	1.05E-07
<i>Cadmium</i>	7.24E-09	6.83E-09	7.07E-09	7.11E-09
<i>Carbon dioxide, fossil</i>	2.65E+00		2.59E+00	
<i>Carbon dioxide, biogenic</i>		2.50E+00		2.60E+00
<i>Carbon monoxide, fossil</i>	2.27E-03		2.22E-03	
<i>Carbon monoxide, biogenic</i>		2.14E-03		2.23E-03
<i>Chromium</i>	2.50E-08	2.35E-08	2.44E-08	2.45E-08
<i>Chromium VI</i>	4.99E-11	4.71E-11	4.88E-11	4.91E-11
<i>Copper</i>	1.76E-08	1.66E-08	1.72E-08	1.73E-08
<i>Dinitrogen monoxide</i>	1.36E-04	1.28E-04	1.33E-04	1.34E-04
<i>Ethane</i>	2.13E-08	2.01E-08	2.09E-08	2.10E-08
<i>Formaldehyde</i>	5.98E-06	5.64E-06	5.84E-06	5.87E-06
<i>Heptane</i>	2.13E-07	2.01E-07	2.09E-07	2.10E-07

Emissiestof	Emissiefactor diesel (kg/L)	Emissiefactor biodiesel (kg/L)	Emissiefactor HVO (kg/L)	Emissiefactor GTL (kg/L)
Lead	4.33E-08	4.09E-08	4.24E-08	4.26E-08
Mercury	4.41E-09	4.16E-09	4.31E-09	4.33E-09
Methane, fossil	1.75E-06		1.71E-06	
Methane, biogenic		1.65E-06		1.72E-06
m-Xylene	6.97E-07	6.58E-07	6.81E-07	6.85E-07
Nickel	7.32E-09	6.90E-09	7.15E-09	7.20E-09
Nitrogen oxides	1.86E-03	1.75E-03	1.82E-03	1.83E-03
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	5.78E-05	5.45E-05	5.65E-05	5.68E-05
o-Xylene	2.85E-07	2.68E-07	2.78E-07	2.80E-07
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	6.51E-08	6.14E-08	6.36E-08	6.40E-08
Particulates, < 2.5 um	3.78E-05	3.56E-05	3.69E-05	3.71E-05
Particulates, < 10 um	3.78E-05	3.56E-05	3.69E-05	3.71E-05
Pentane	4.27E-08	4.03E-08	4.17E-08	4.20E-08
Propane	7.12E-08	6.71E-08	6.95E-08	6.99E-08
Selenium	8.32E-11	7.85E-11	8.13E-11	8.18E-11
Styrene	3.98E-07	3.76E-07	3.89E-07	3.92E-07
Sulfur dioxide	1.36E-05	1.28E-05	1.32E-05	1.33E-05
Toluene	7.12E-09	6.71E-09	6.95E-09	6.99E-09
Zinc	1.45E-06	1.36E-06	1.41E-06	1.42E-06

B1 gebruiksfase – algemene processen

Productie, onderhoud en end-of-life van vrachtwagens

Voor het modeleren van de slijtage van een vrachtwagen is het Ecoinvent-proces "Lorry, 16 metric ton {GLO}" gebruikt, omdat dit proces ook in de Ecoinvent-processen "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 en 6" wordt gebruikt en dit proces up-to-date en representatief wordt geacht.

Hierbij nemen we aan dat de factor (9,65E-8 piece /t*km) die wordt gebruikt gecorrigeerd is voor de keuze van een lichter type vrachtwagen (16 i.p.v. 32 metric ton). Dit lijkt ook het geval als we deze factor vergelijken met data uit andere bronnen. In detail: in het geval van Euro 5 en Euro 6 vrachtwagens rijden vrachtwagens gemiddeld 36532 km/jaar. De gemiddelde levensduur is 13,4 jaar en de gemiddelde laadfactor voor GWW 29,96 ton (Wernet, et al., 2016). De afschrijving per t*km transport is dan $1 / (36532 \text{ km/jaar} * 13,4 \text{ jaar} * 29,96 \text{ ton}) = 6.818E-8$.

De factor van afschrijving kan worden omgerekend naar afschrijving per liter diesel door deze factor te delen door het diesel gebruik in kg uit de Ecoinvent-processen "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 6 {RER}, U" en "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}, U", namelijk (0,01917 kg voor Euro 5 en 0,01919 kg voor Euro 6) en vervolgens te vermenigvuldigen met de dichtheid van diesel (0,832 kg/l). De afschrijving per liter diesel komt dan neer op:

- Euro 5: $(9,65E-8 \text{ piece/t*km} / 0,01917 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 4,19E-6$ piece per liter diesel.

- Euro 6: $(9,65E-8 \text{ piece/t*km} / 0,01919 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 4,18E-6$ piece per liter diesel.

Deze twee factoren kunnen ook worden overgenomen voor het modelleren van het onderhoud aan de vrachtwagens met het Ecoinventproces "Maintenance, lorry 16 metric ton {GLO}, market for, U", omdat in dit proces de milieu-impact van het onderhoud aan een vrachtwagen over zijn gehele levensduur in kaart wordt gebracht en ook het meest representatieve proces is, dat beschikbaar is.

Omdat de afschrijving en het onderhoud evenredig zijn met de gereden kilometers en dus de calorische waarde van de brandstoffen, is het onderhoud en de afschrijving voor de andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde (Tabel 23).

Tabel 23: Fracties van onderhoud en afschrijving van Euro 5 en 6 vrachtwagens gewogen per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35.9	33.1	34.5	34.3
Fractie van aantal vrachtwagens Euro 5 die gemodelleerd wordt (*10 ⁻⁶ piece/liter)	4,19	3,86	4,02	4,00
Fractie van aantal vrachtwagens Euro 6 die gemodelleerd wordt (*10 ⁻⁶ piece/liter)	4,18	3,86	4,02	4,00
Fractie van onderhoud Euro 5 die gemodelleerd wordt (*10 ⁻⁶ piece/liter)	4,19	3,86	4,02	4,00
Fractie van vrachtwagens Euro 6 die gemodelleerd wordt (*10 ⁻⁶ piece/liter)	4,18	3,86	4,02	4,00

Emissies van remmen

De emissies gerelateerd aan vrijkomend remstof zijn gebaseerd op de rapportage: "Emissieschattingen Diffuse bronnen - Emissieregistratie: remslijtage" (Deltares en TNO, 2016). De informatie uit deze rapportage die is gecombineerd om de rem-emissies van vrachtwagens per gebruik van een liter diesel te bepalen, is:

- emissiefactor voor vorming van stof uit remvoering gegeven in mg/km voor verschillende type wegen (snelwegen, binnen en buiten de bebouwde kom) (Tabel 24);
- verkeersprestatie van vrachtwagens in 2014 voor de verschillende type wegen (Tabel 24);
- verdeling van de emissies over de compartimenten lucht, bodem, riool en het voertuig (Tabel 24);
- en samenstelling van remstof vrijkomend bij remslijtage met de eenheid kg per kg remstof (Tabel 26).

De gemiddelde hoeveelheid geëmitteerde remstof kan nu dus worden berekend door de vermenigvuldiging van de remstof in kg/km te vermenigvuldigen met fractie van verkeersprestatie en % emissies naar bestemming te sommeren. Het resultaat zijn de gemiddelde emissies naar lucht, bodem, riool en auto zoals weergegeven in de meest rechter kolom van Tabel 24.

Tabel 24: Achtergrondgegevens voor de berekening van de gemiddelde emissie (in kg/km) veroorzaakt door remslijtage.

	Binnen bebouwde kom	Landelijke wegen	Snelwegen	Gemiddelde emissie (kg/km)
<i>Verkeersprestaties vrachtwagens (miljoen km)</i>	364	467	1277	-
<i>Fractie verkeersprestaties (%)</i>	0.17	0.22	0.61	--
<i>Totaal gewicht remstof van vrachtwagens (ton)</i>	25	10	14	-
<i>Kilogram remstof per kilometer (kg/km)</i>	6,86E-05	2,14E-05	1,10E-05	-
<i>Percentage remstof geëmitteerd naar lucht</i>	49%	49%	49%	1,14E-05
<i>Percentage remstof geëmitteerd naar bodem</i>	8%	18%	18%	3,00E-06
<i>Percentage remstof geëmitteerd naar riool</i>	12%	2%	2%	1,65E-06
<i>Percentage remstof dat aan auto blijft zitten</i>	31%	31%	31%	7,21E-06

De gemiddelde emissie in kg/km kan worden omgerekend naar emissie in kg per liter door te delen door te delen door het diesel gebruik per t*km en te vermenigvuldigen met gemiddelde belading en dichtheid van diesel. Per liter diesel komt dit dus neer op:

- Voor Euro 5: $(1,14E-05 \text{ kg/km} / 0,01917 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} * 29,96 \text{ t} = 1,48E-2 \text{ kg emissie per liter diesel}$.
- Voor Euro 6: $(1,14E-05 \text{ kg/km} / 0,01919 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} * 29,96 \text{ t} = 1,48E-2 \text{ kg emissie per liter diesel}$.

Omdat de rememissies evenredig zijn met de gereden kilometers en dus de calorische waarde van de brandstoffen, zijn de emissiefactoren voor de andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde (Tabel 25).

Tabel 25: Rememissie naar lucht, bodem en lucht van Euro 5 en 6 vrachtwagens per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35.9	33.1	34.5	34.3
Rememissie naar lucht van Euro 5 vrachtwagen (*10 ⁻² kg/liter)	1,48	1,37	1,42	1,41
Rememissie naar lucht van Euro 6 vrachtwagen (*10 ⁻² kg/liter)	1,48	1,36	1,42	1,41
Rememissie naar water van Euro 5 vrachtwagen (*10 ⁻³ kg/liter)	2,15	1,98	2,06	2,05
Rememissie naar water van Euro 6 vrachtwagen (*10 ⁻³ kg/liter)	2,14	1,98	2,06	2,05
Rememissie naar bodem van Euro 5 vrachtwagen (*10 ⁻³ kg/liter)	3,90	3,59	3,75	3,72
Rememissie naar bodem van Euro 6 vrachtwagen (*10 ⁻³ kg/liter)	3,89	3,59	3,74	3,72

Deze rememissies zijn gemodelleerd door de gemiddelde emissiefactor te vermenigvuldigen met de samenstelling van het remstof weergeven in Tabel 26. Hierbij is aangenomen dat de emissies naar riool geheel in het oppervlakte water terecht komen (het "worst-case" scenario) en dus gemodelleerd als emissies naar water. Het percentage van de remstof dat aan de auto vast blijft zitten is niet gemodelleerd, omdat deze pas vrijkomt bij een wasbeurt en dus dit niet in direct in het milieu terecht komt.

Tabel 26: Samenstelling van 1kg remstof vrijkomend bij remslijtage.

Emissie per kg remstof (kg/kg)	
Particulate Matter, <10um	4.90E-01
Aluminium	1.00E-03
Antimony	8.00E-04
Bismut	6.56E-04
Chromium	4.00E-04
Phosphorus	4.36E-04
Iron	6.76E-02
Cobalt	6.50E-04
Copper	3.80E-03
Lead	4.16E-04
Manganese	5.00E-04
Molybdenum	3.00E-04
Nickel	1.00E-04
Silicon	1.90E-03
Tin	1.10E-03
Titanium	3.00E-04
Carbon	1.12E-02
Sulfate	1.00E-03
Vanadium	1.00E-04
Tungsten	5.81E-04
Zinc	1.50E-03

Voor de emissies gepaard gaande met banden en wegslijtage zijn de Ecoinvent processen 'Tyre wear emissions, lorry {RER} treatment of' en 'Road wear emissions, lorry {RER} treatment of' gebruikt. Deze Ecoinvent processen zijn gebaseerd op vrij recente en onderbouwde data uit 2013 en zijn representatief. Bovendien is het aandeel van de milieu-impact van de emissies verbonden aan slijtage van de banden en het wegdek gering zijn vergeleken met de totale milieu-impact van het gebruik van vrachtwagen.

Emissies van banden en het wegdek

De hoeveelheid emissie per liter diesel door deze factor te delen door het diesel gebruik in kg uit de Ecoinvent-processen "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 6 {RER}, U" en "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}, U", namelijk (0,01917 kg voor Euro 5 en 0,01919 kg voor Euro 6) en vervolgens te vermenigvuldigen met de dichtheid van diesel (0,832 kg/l). De emissie per liter diesel komt dan neer op:

- Emissies door bandenslijtage voor Euro 5: $(1,6760E-4 \text{ kg/t*km} / 0,01917 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 7,27E-3 \text{ kg per liter diesel}$.
- Emissies door bandenslijtage voor Euro 6: $(1,6760E-4 \text{ kg/t*km} / 0,01919 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 7,27E-3 \text{ kg per liter diesel}$.
- Emissies door wegdekslijtage voor Euro 5: $(1,4561E-5 / 0,01917 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 6,32E-4 \text{ kg per liter diesel}$.
- Emissies door wegdekslijtage voor Euro 6: $(1,4561E-5 / 0,01919 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 6,31E-4 \text{ kg per liter diesel}$.

Omdat de emissies evenredig zijn met de gereden kilometers en dus de calorische waarde van de brandstoffen, zijn de emissiefactoren voor de andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde (Tabel 27).

Tabel 27: Emissiefactoren door banden- en wegslijtage voor Euro 5 en 6 vrachtwagens gewogen per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Emissiefactor bandenslijtage Euro 5 per liter brandstof (*10 ⁻³ kg/liter)	7,27	6,70	6,99	6,95
Emissiefactor bandenslijtage Euro 6 per liter brandstof (*10 ⁻³ kg/liter)	7,27	6,70	6,98	6,94
Emissiefactor wegslijtage Euro 5 per liter brandstof (*10 ⁻⁴ kg/liter)	6,32	5,83	6,07	6,04
Emissiefactor wegslijtage Euro 6 per liter brandstof (*10 ⁻⁴ kg/liter)	6,31	5,82	6,07	6,04

Gebruik van weginfrastructuur

Tijdens het transport maken vrachtwagens gebruik van de huidige infrastructuur en wordt dus de slijtage die zij aan de weg veroorzaken meegenomen in de bepaling van de milieu-impact per liter brandstof. Dit is gedaan op basis van de kaart "Road {CH} | Market for road | Alloc Rec, U". De factor van het gebruik van de wegen tijdens gebruik van 1 liter brandstof is overgenomen van de Ecoinvent-processen "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}" en "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 6 {RER}". In deze kaart met de eenheid 1 t*km, is de factor voor weggebruik 0,00109 meter*jaar. Dit kan worden omgerekend naar afschrijving per liter diesel door deze factor te delen door het diesel gebruik in kg uit dezelfde Ecoinvent-processen "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 6 {RER} , U" en "Transport, freight, lorry >32 metric ton, Euro 5 {RER}, U", namelijk (0,01917 kg voor Euro 5 en 0,01919 kg voor Euro 6) en vervolgens te vermenigvuldigen met de dichtheid van diesel (0,832 kg/l). De afschrijving per liter diesel komt dan neer op:

- Euro 5: $(0.00109 \text{my/t*km} / 0,01917 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 4.73\text{E-}2$ meter*jaar per liter diesel.
- Euro 6: $(0.00109 \text{my/t*km} / 0,01919 \text{ kg/t*km}) * 0,832 \text{ kg/l} = 4.72\text{E-}2$ meter*jaar per liter diesel.

Omdat het weggebruik evenredig is met de gereden kilometers en dus de calorische waarde van de brandstoffen, is de factor voor het weggebruik voor de andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde (Tabel 28).

Tabel 28: Factor van weggebruik voor Euro 5 en 6 vrachtwagens gewogen per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Weggebruik in meter*jaar voor Euro 5 vrachtwagens (*10 ⁻² meter*jaar/L)	4,73	4,36	4,55	4,52
Weggebruik in meter*jaar voor Euro 6 vrachtwagens (*10 ⁻² meter*jaar/L)	4,72	4,36	4,54	4,51

Gebruik van Adblue

In Euro 6 vrachtwagens wordt Adblue, een oplossing 32,5% ureum en gedemineraliseerd water, gebruikt om de bij de verbranding gevormde stikstofoxiden om te zetten in stikstof en water.

Het Adblue-verbruik is gebaseerd op maximaal 71 g/l, maar binnen Euro 6 vrachtwagens wordt een deel van de uitlaatgassen terug in de verbrandingskamer in geleid om stikstofoxide te reduceren (bekend als EGR (Exhaust gas

recirculation)). Het echte gebruik van Adblue wordt dus geschat op 60 g/l, wat betekend 19,7 gram ureum per liter diesel. Dit wordt gemodelleerd door het Ecoinvent-proces "Urea, as N {RE} production". Dit proces komt overeen met 1kg N, dus 2,17kg ureum en verbruik per liter diesel is dus $19,7/2,17=9,08$ gram. Omdat het gebruik van Adblue evenredig is met de gereden kilometers, is het gebruik voor andere brandstoffen gecorrigeerd met de calorische waarde (weergegeven in Tabel 29).

Tabel 29: Gebruik van ureum in Euro 6 vrachtwagens per liter brandstof.

	Diesel	Biodiesel	HVO	GTL
Stookwaarde (MJ/l)	35,9	33,1	34,5	34,3
Gebruik van ureum per liter brandstof (g/liter)	9.08	8.37	8.72	8.67

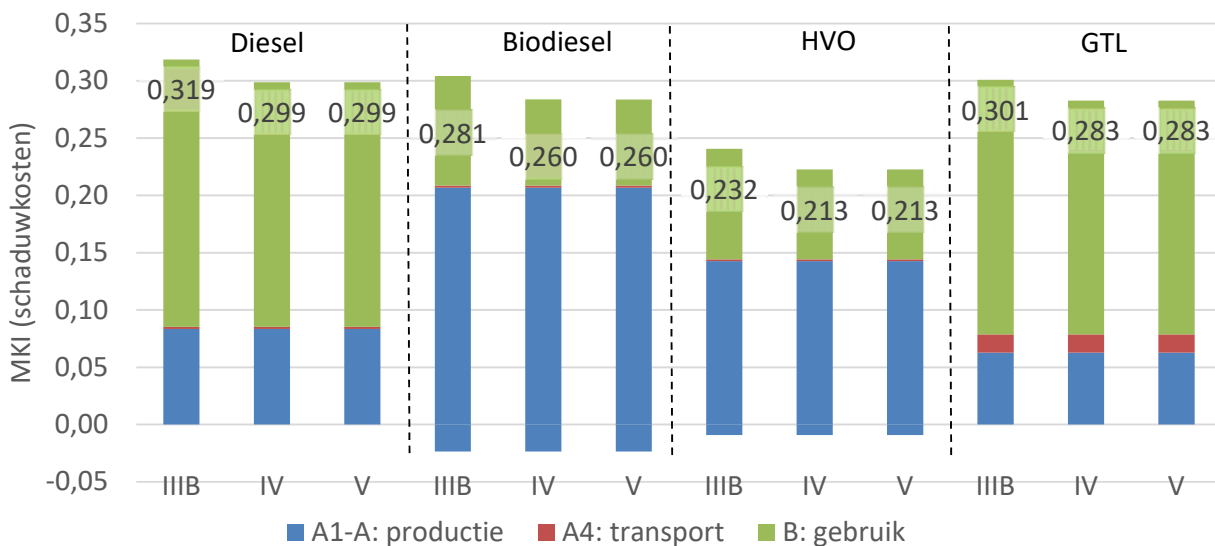
4 Milieuprofielen

In dit hoofdstuk worden de milieuprofielen van alle machine-brandstofcombinaties gepresenteerd en de voornaamste gevoeligheden van de analyse nader onderzocht met behulp van een gevoeligheidsanalyse. Het hoofdstuk eindigt met een hoofdstuk over het verbeterpotentieel van alternatieve brandstoffen voor graafmachines en vrachtwagens.

4.1 Milieueffecten per liter brandstof

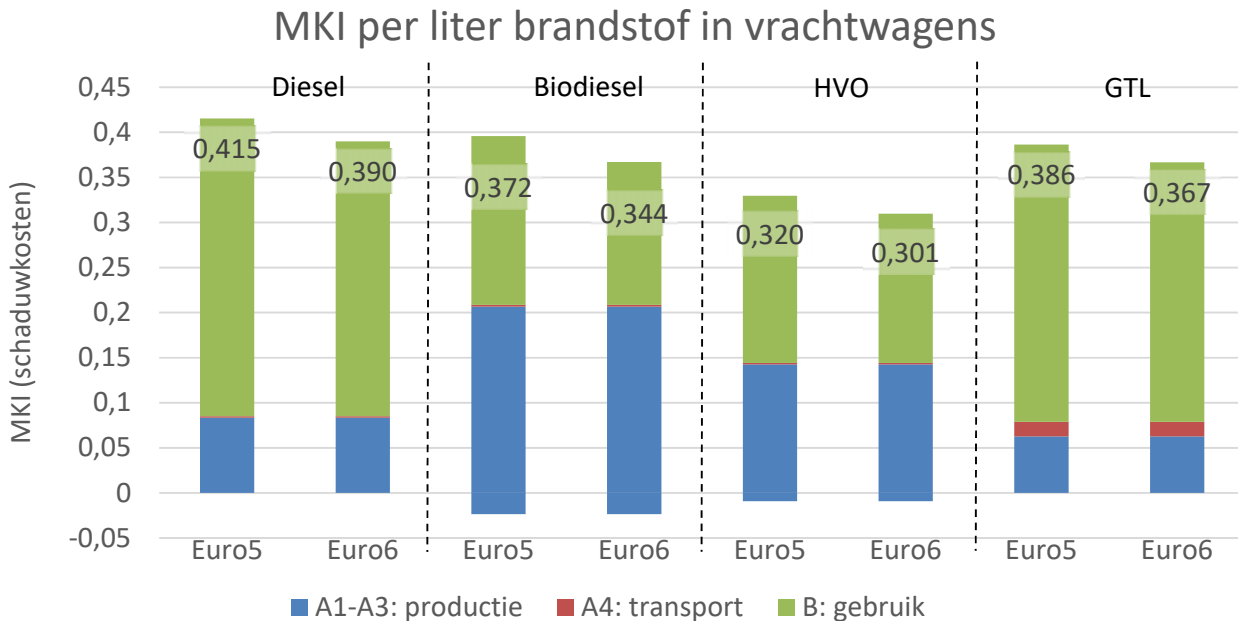
De totale milieu-impact uitgedrukt in de MKI (milieukostenindicator; met eenheid schaduwkosten) per liter brandstof voor de verschillende machine-brandstof combinaties zijn weergegeven in Figuur 4 en Figuur 5⁷. De verschillende kleuren van de staafdiagrammen vertegenwoordigen de fases van het milieuprofiel, zoals weergegeven in Figuur 3 (op pagina 18). In het geval van biodiesel en HVO wordt er ook een negatieve waarde in de grafiek weergegeven. Hier gaat het om de uitgespaarde milieu-impact, doordat bij de productie van deze brandstoffen ook andere producten (zoals glycerine) worden gemaakt. Doordat dit bijproduct wordt geproduceerd in dit proces, wordt de productie van een vergelijkbaar product vermeden en mag daarom van de milieu-impact van deze vermeden productie van de milieu-impact brandstofproductie worden afgetrokken. Het totaal dat per staafdiagram wordt weergegeven is de totale MKI over alle levenscyclusfasen per liter brandstof.

MKI per liter brandstof voor graafmachines



Figuur 4: MKI per liter voor de graafmachine-brandstof combinaties. De milieu-impact is onderverdeeld in de verschillende fases gebruikt in de SBK-bepalingsmethode.

⁷ In Appendix A worden de milieuprofielen van alle machine-brandstofcombinaties per liter in tabelvorm weergegeven.



Figuur 5: MKI per liter voor de vrachtwagen-brandstof combinaties. De milieu-impact in onderverdeeld in de verschillende fases gebruikt in de SBK-bepalingsmethode.

De milieu-impact van de fases A1-A3 (productie) en A4 (transport) zijn onafhankelijk van het type machine en dus gelijk voor de verschillende machines. De waarden van de gebruiksfase (B) zijn wel verschillend voor elke machine brandstof combinatie. Voor de graafmachines is er groot verschil (~0,02 MKI) tussen categorie IIIB en IV, maar bijna tot geen verschil tussen categorie IV en V. Dit komt doordat vermindering in schadelijke emissies tussen categorie IIIB en IV groter is dan tussen categorie IV en V. In het geval van vrachtwagens is de MKI van Euro 6 ook lager door een vermindering van schadelijke emissies.

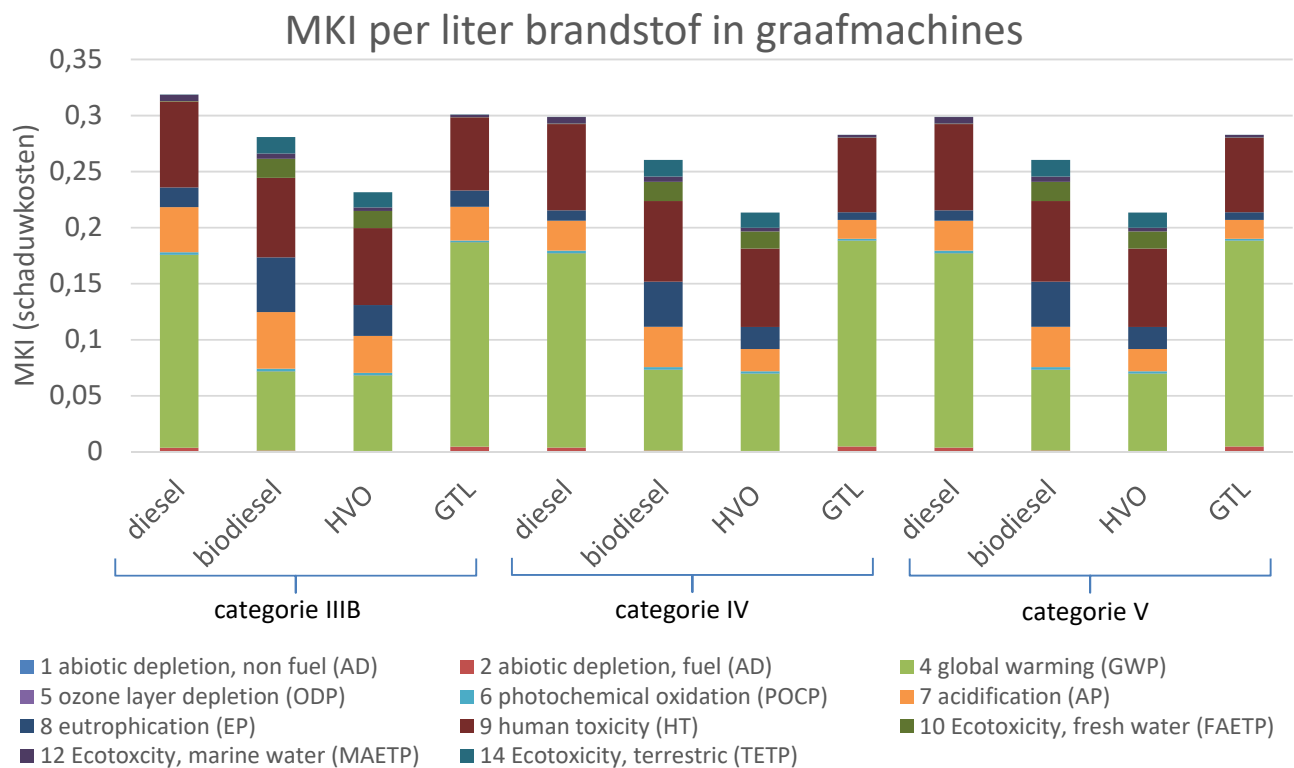
De milieu-impact van GTL in de gebruiksfase (groene gedeelte) is lager dan in het geval van diesel, maar meer dan tweemaal zo hoog als in geval van biodiesel en HVO. Voor biodiesel en HVO is de milieu-impact een stuk lager, omdat er bij verbranding biogene CO₂ vrijkomt. Dit wil zeggen dat de CO₂ die wordt uitgestoten tijdens de verbranding niet is meegerekend in het effect op klimaatverandering, omdat deze CO₂ (relatief) kort geleden uit de atmosfeer is opgenomen door gewassen die eerste generatie (direct uit het gewas) of tweede generatie (biobased afvalproduct) gebruikt worden voor de productie van de brandstof. Dit in tegenstelling tot GTL en diesel, beide fossiele brandstoffen.

Dit betekent echter niet dat de gehele milieu-impact twee maal zo klein is. Doordat de productie van biodiesel (en in iets mindere mate ook voor HVO) een grotere milieu-impact heeft, is de totale milieu-impact van biodiesel en diesel bijna gelijk, ofwel: het voordeel van de lagere milieu-impact van emissies wordt (deels) teniet gedaan door grotere milieu belasting in de productiefase van de brandstof. In de gevoeligheidsanalyse laten we zien dat de samenstelling van de grondstof voor biobrandstoffen van grote invloed is op de milieu-impact van de productie fase.

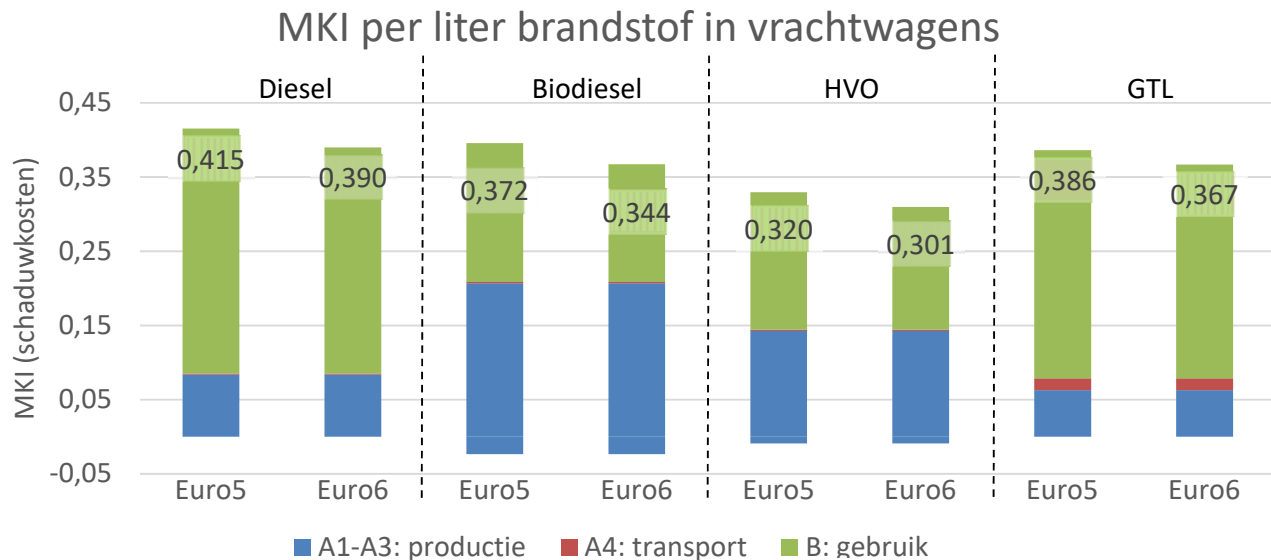
Kort samengevat, heeft productie van eerste generatie biobrandstof een veel hogere impact dan tweede generatie productie en doordat eerste generatie in de huidige marktmix nog een significant aandeel heeft is de impact van de productie relatief hoog.

De transportfase is voor alle brandstoffen bijna gelijk met uitzondering van GTL. Diesel, biodiesel en HVO worden namelijk allen in Nederland geproduceerd, terwijl GTL in Qatar wordt geproduceerd en dus naar Nederland moet worden vervoerd.

In Figuur 6 en Figuur 7 is de MKI van de machine-brandstof combinaties nogmaals weergegeven. Nu is in de staafdiagrammen een onderscheid gemaakt in de verschillende milieueffectcategorieën.



Figuur 6: MKI per liter voor de graafmachine-brandstof combinaties. De milieu-impact in onderverdeeld in de verschillende milieueffect categorieën.



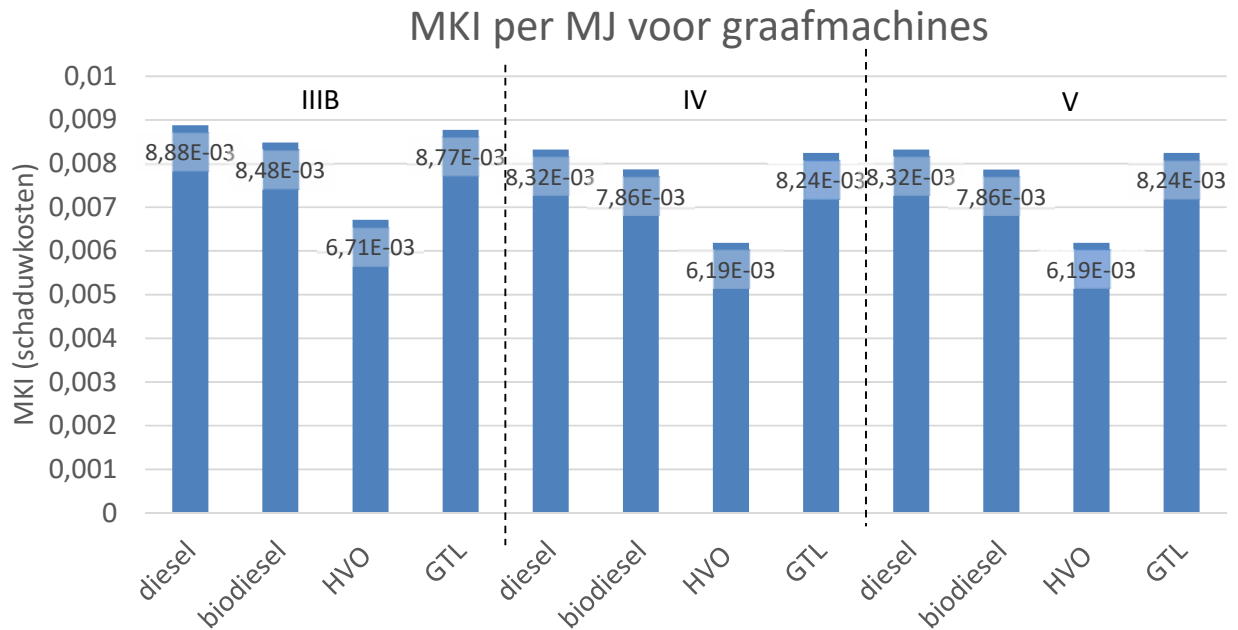
Figuur 7: MKI per liter voor de vrachtwagen-brandstof combinaties. De milieu-impact in onderverdeeld in de verschillende milieueffect categorieën.

Ook in deze twee diagrammen is er verschil tussen aan de ene kant diesel en GTL en aan de andere kant HVO en biodiesel. In het geval van diesel en GTL dragen klimaatverandering (groene deel van de staafdiagram) het meeste bij aan de totale milieu-impact en dat wordt voor het grootste gedeelte veroorzaakt door de emissie van CO₂ en andere broeikasgassen tijdens verbranding van de diesel. Voor biodiesel en HVO is deze bijdrage aanzienlijk lager, omdat het hier gaat om biobrandstoffen en dus uitstoot van biogene CO₂ en methaan.

4.2 Milieueffecten per MJ

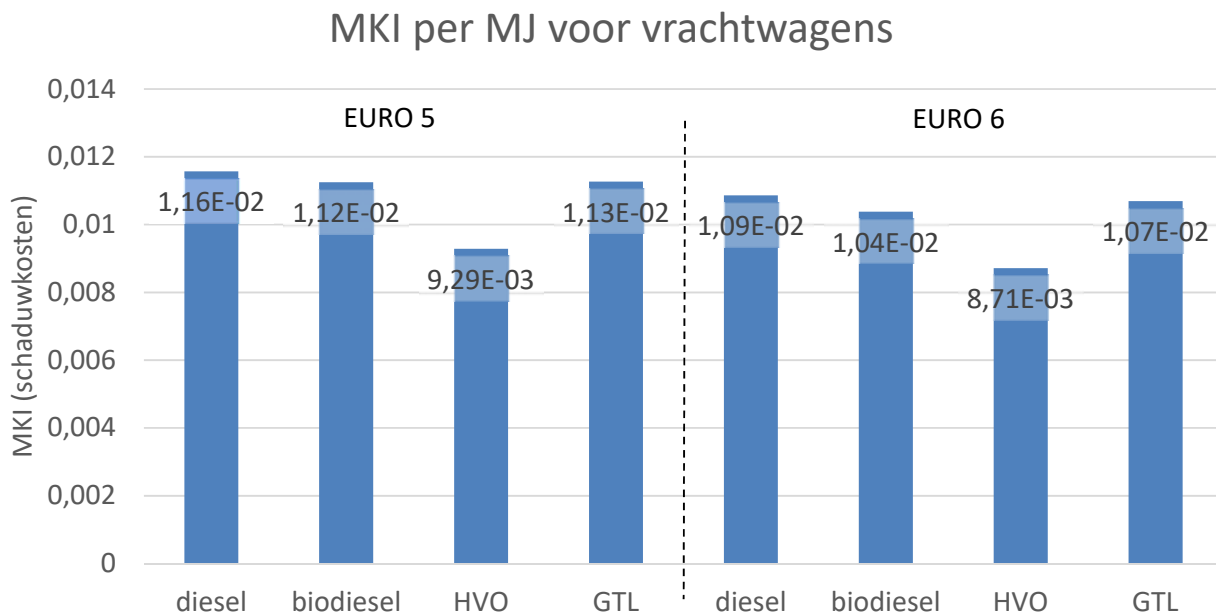
Om de milieueffecten van de verschillende brandstoffen eerlijk te kunnen vergelijken moet er echter geen vergelijking worden gemaakt per liter, maar per MJ. De stookwaarde van de verschillende brandstoffen is namelijk verschillend en door per MJ te vergelijken, wordt de brandstoffen vergeleken voor dezelfde hoeveelheid verzet werk / gereden kilometers.

In Figuur 8 zijn de milieueffecten uitgedrukt in MKI per MJ van de beschouwde graafmachine-brandstofcombinaties weergegeven. In tegenstelling tot wanneer de brandstoffen per liter worden vergeleken is de MKI van GTL per MJ net iets lager (~1%) dan die van diesel. Het verschil diesel en biodiesel is bij vergelijking per MJ ook kleiner en ongeveer 4%. De MKI per MJ van HVO is gemiddeld 25% lager dan die van diesel.



Figuur 8: MKI per MJ van de verschillende graafmachine-brandstofcombinaties.

In Figuur 9 zijn de milieu-impacts (MKI) per MJ van de verschillende vrachtwagen-brandstofcombinaties weergegeven. Voor vrachtwagens is de MKI van GTL en biodiesel een fractie lager dan die van diesel. Deze verschillen zijn kleiner dan wanneer je de MKI per liter vergelijkt door het verschil in calorische waarde van diesel en biodiesel en GTL. De MKI van HVO blijft het laagst en is ongeveer 20% lager dan de MKI van diesel.

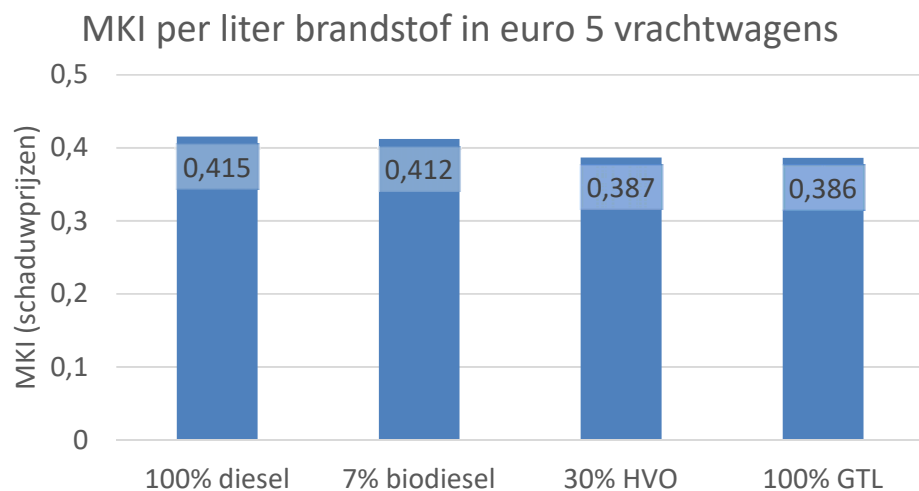


Figuur 9: MKI per MJ van de vrachtwagen-brandstofcombinaties.

4.3 Milieueffecten van de meest gebruikelijke brandstofsamenstellingen

In deze studie zijn milieuprofielen opgesteld voor gebruik van biodiesel en HVO in pure vorm. Deze twee brandstoffen worden echter vaak niet in deze vorm gebruikt, omdat de samenstelling sterk verschilt van die van diesel en dus niet elke motor geschikt is voor de pure vorm van deze brandstoffen. Biodiesel en HVO kunnen in elke motor tot 7% en 30% bijmenging worden gebruikt. Veel motoren werken ook met een hoger percentage van bijmenging, maar moeten hier wel apart voor worden gekeurd.

Omdat de opgestelde milieuprofielen voor biodiesel en HVO meestal in gemengde vorm gebruikt zullen worden, wordt in Figuur 10 het milieuprofiel voor brandstof bestaande uit diesel met 7% biodiesel en 30% HVO vergeleken met het milieuprofiel van pure diesel en GTL. De milieuprofielen zijn weergegeven per liter brandstof verbrand in een Euro 5 vrachtwagen.



Figuur 10: MKI van diesel, diesel met 7% bijgemengd biodiesel en 30% bijgemengd HVO.

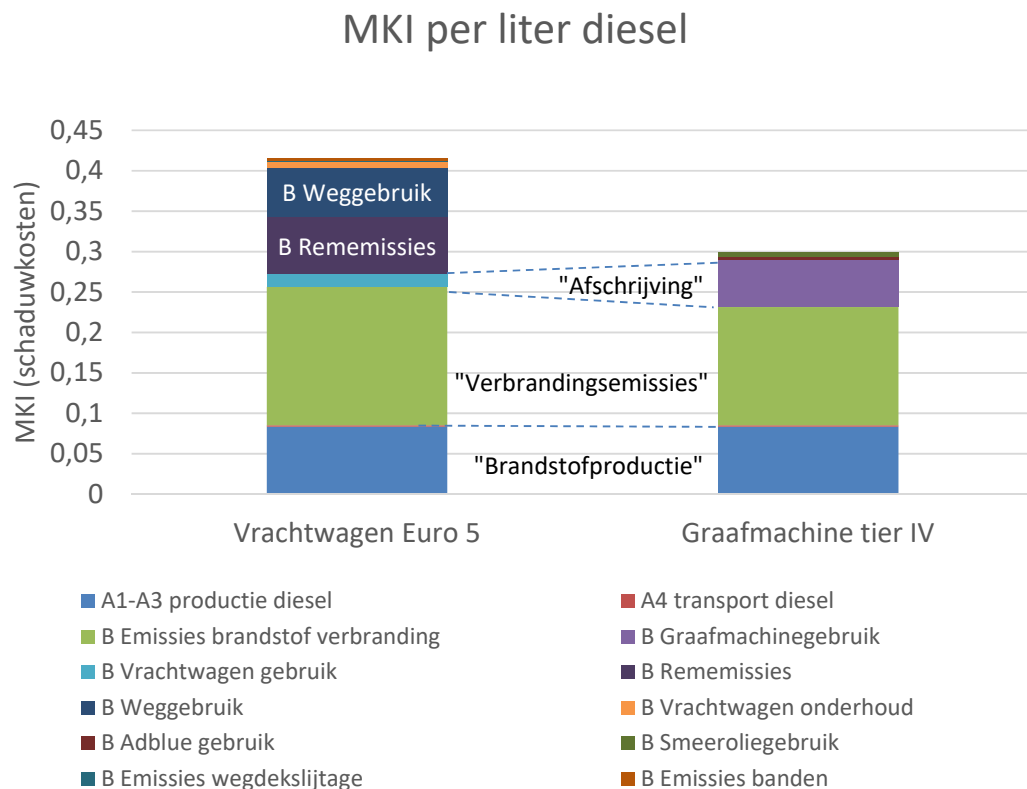
Zoals verwacht is in Figuur 10 het verschil tussen diesel en biodiesel kleiner dan in Figuur 5, omdat de fractie aan biodiesel lager is. Per liter is de totale MKI voor biodiesel een fractie (0,7%) lager dan die van diesel, maar in als de MKI per MJ wordt vergeleken is dit verschil nog kleiner (0,2%). In het geval van HVO is het verschil iets groter en is milieu-impact per liter 6,9% lager. Bij vergelijking per MJ is het verschil nog maar 5,9%.

Voor de andere type graafmachines en vrachtwagens is het resultaat vergelijkbaar.

4.4 Milieueffecten van de gebruiksfase

In deze studie is de milieu-impact van de gebruiksfase een som van de milieueffecten door emissies die vrij komen bij de verbranding en andere aspecten zoals gebruik van graafmachine of vrachtwagen, het gebruik van Adblue, gebruik

van smeerolie, en in geval van vrachtwagens, emissies door remmen en gebruik van de infrastructuur. In Figuur 11 is de MKI van de gebruiksfase van een categorie IV graafmachine en Euro 5 vrachtwagens opgesplitst naar de verschillende bijdragen. De MKI door de verbrandingsemissies is voor graafmachines en vrachtwagens bijna even groot. De emissies van vrachtwagens zijn iets hoger, omdat de emissiedata die hier voor is gebruikt is geverifieerd met metingen en emissies iets hoger bleken te zijn. Voor graafmachines zijn deze metingen (nog) niet gedaan en is dus onbekend of deze verhoging hier ook voor geldt. Het deel van de overige bijdragen is voor vrachtwagens ongeveer tweemaal zo groot. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat bij vrachtwagens ook de emissies naar de lucht die vrij komen bij het remmen en het gebruik van de weginfrastructuur in het berekenen van de milieu-impact wordt meegenomen. Daarentegen is bijdrage van gebruik/afschrijving van vrachtwagen/graafmachine, lager voor vrachtwagens.



Figuur 11: MKI per liter diesel voor categorie IV graafmachine en Euro 5 vrachtwagen uitgesplitst naar de bijdragen in de gebruiksfase.

4.5 Verbrandingsemissies per machine-brandstof combinatie

De emissies van luchtvervuilende fracties zoals NOx en PM is over het algemeen lager voor GTL, HVO en biodiesel ten opzichte van diesel. In de tabel hebben we het verschil in emissies per liter in percentages weergegeven.

Tabel 30: Verschil in emissies bij verbranding van een liter GTL, HVO en biodiesel in vergelijking met diesel. De stoffen die worden beschouwd zijn stikstofoxide (NOx), fijnstof (PM), koolwaterstoffen (HC) en koolstofmonoxide (CO).

	<i>HVO en GTL</i>				<i>biodiesel</i>			
	<i>NOx</i>	<i>PM</i>	<i>HC</i>	<i>CO</i>	<i>NOx</i>	<i>PM</i>	<i>HC</i>	<i>CO</i>
<i>Graafmachines</i>								
<i>Categorie IIIB</i>	0%	-5%	-10%	-10%	+12%	-30%	-10%	-10%
<i>Categorie IV</i>	0%	-5%	0%	0%	0%	-7%	0%	0%
<i>Categorie V</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>Vrachtwagens</i>								
<i>Euro 5</i>	-12%	-21%	-20%	-10%	+23%	-61%	-20%	-10%
<i>Euro 6</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

4.6 Gevoeligheidsanalyse

In het onderzoek dat tot nu toe is gepresenteerd zijn verschillende aannames genomen en keuzes gemaakt. Om de invloed van deze keuzes en aannames op het resultaat nader te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op keuzes met de grootst verwachte impact.

Er zal een vergelijking worden gemaakt van:

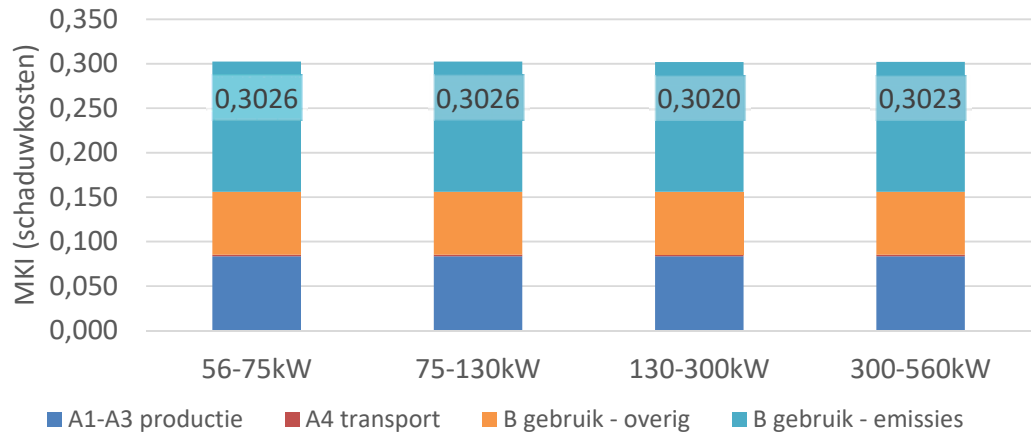
- de verbranding van 1 liter diesel voor verschillende vermogensklassen van categorie IV graafmachines om te laten zien hoe gevoelig de resultaten zijn voor het vermogen van de machine (zwaar materieel, lichter materieel). Het inzicht dat we hier uit krijgen zal naar verwachting vergelijkbaar zijn voor de andere categorieën graafmachines en type brandstoffen;
- de milieu-impact voor andere samenstellingen van de gebruikte mix van grondstoffen voor biodiesel en HVO, om de laten zien hoe gevoelig het resultaat is voor de het type grondstof (eerst generatie of tweede generatie biobrandstoffen).

4.6.1 Invloed van vermogensklasse graafmachines

De scope van deze studie beperkt zich tot inzet van groot en zwaar materiaal in aanleg en onderhoud van grootschalige infrastructuurprojecten. Bij het opstellen van de milieuprofielen van de graafmachines, is er gekozen om de meest voorkomende vermogensklasse te analyseren, namelijk 75 tot 130kW. In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre het milieuprofiel van deze vermogensklasse ook representatief is voor de andere vermogensklassen van groot materieel. Dit wordt gedaan door de milieuprofielen te vergelijken van één machine-brandstof combinatie (graafmachine categorie IV, diesel). De resultaten zijn representatief voor ander brandstoffen en categorieën graafmachines, omdat er de relatie tussen de vermogensklasse en de verbrandingsemissies voor alle categorieën en brandstoffen gelijk zijn.

In Figuur 12 wordt de MKI's per liter diesel van categorie IV graafmachines uit de verschillende vermogensklassen vergeleken. De staven uit de grafiek zijn opgesplitst in de verschillende fases uit de SBK-bepalingsmethode, namelijk productie, transport en gebruik. De gebruiksfase B is daarnaast verder opgesplitst in een deel dat toe te schrijven is aan de verbrandingsemissies en de overige bijdragen zoals bijvoorbeeld productie van de graafmachine.

MKI per liter klasse IV graafmachines met verschillend vermogen



Figuur 12: Milieuprofiel (MKI) van categorie IV graafmachines met verschillend vermogen bij gebruik van 1 liter diesel.

Voor alle graafmachines is de milieu-impact voor alle onderdelen op de emissies na exact gelijk, omdat de productie van liter diesel niet afhangt van de graafmachine waar deze in wordt gebruikt en in analyse gebruikt wordt gemaakt van een standaard graafmachine om materiaalgebruik (en bijbehorende milieu-impact) te bepalen.

Wat ook opvalt, is dat milieu-impact toe te schrijven aan de uitstoot van emissies tijdens het gebruik (het blauwe gedeelte) ook nauwelijks verschillen voor deze vermogensklassen. Om precies te zijn is het maximale verschil ten opzichte van de gekozen vermogensklasse van 75 tot 130kW, +0,37% en -0,0002% en dus verwaarloosbaar vergeleken met de totale milieu-impact. De milieuprofielen voor de vermogensklasse 75 tot 130kW zijn dus ook representatief voor de andere vermogensklassen (van 56 tot 560 kW) uit dezelfde emissie categorie.

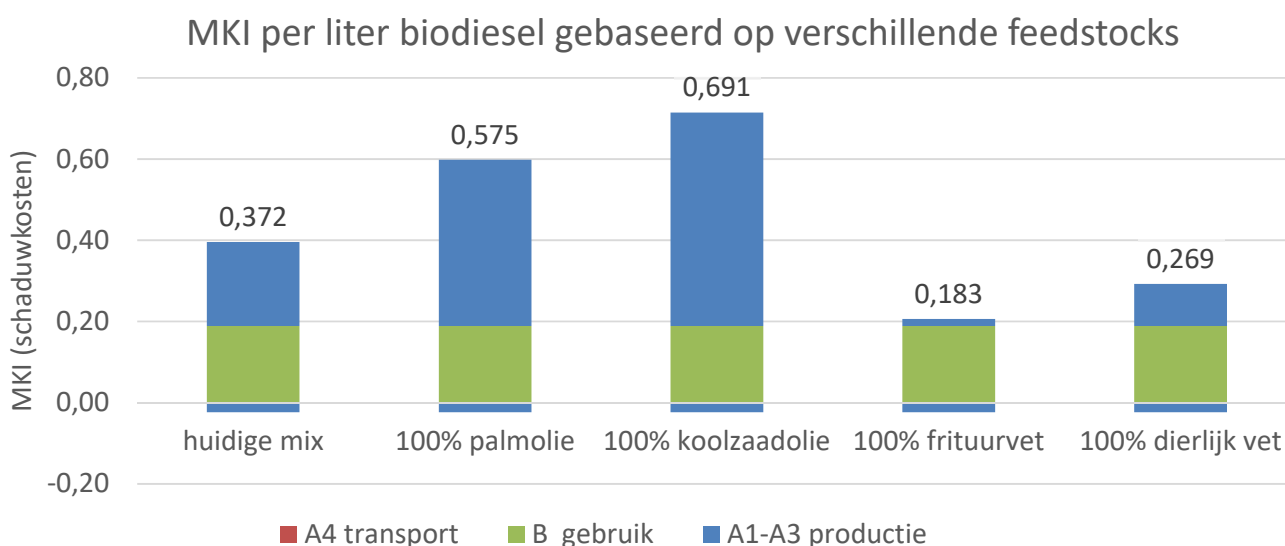
In eerder onderzoek (Vos-Effting, 2018) werd dezelfde observatie gedaan voor deze vermogensklassen. Voor lagere vermogensklassen (<75 kW) werd in deze studie echter wel een verandering in de milieu-impact geobserveerd: de lichtere machines (<35 kW) hadden een circa 15% hogere MKI per liter diesel. Deze toename in MKI is voornamelijk toe te schrijven aan hogere NO_x-emissies van voertuigen met een laag vermogen, zoals gerapporteerd door Hulskotte & Verbeek (2016).

Naast vermogensklasse spelen nog twee andere factoren een rol in de MKI van de graafmachine. Allereerst wordt het emissieprofiel bepaald door de continuïteit van het machinegebruik: staat een machine continu aan, of wordt hij enkele malen per dag opgestart en stil gezet? Daarnaast wordt de milieu-impact van graafmachines bepaald door de efficiëntie: wanneer een machine even aangezet wordt om een kleine hoeveelheid zand te verplaatsen, zal deze wellicht meer brandstof verbruiken per ton zand dan een graafmachine die veel uren achtereen aan het werk is.

4.6.2 Invloed van de samenstelling van biodiesel

In de tweede gevoeligheidsanalyse is het effect van gebruik van verschillende grondstoffen voor het maken van de biodiesel op de milieu-impact onderzocht. De samenstelling van biodiesel varieert namelijk door de tijd, omdat de kosten van de verschillende grondstoffen dicht bij elkaar liggen. In deze studie is een milieuprofiel opgesteld voor biodiesel bestaand uit 21% koolzaadolie, 16% palmolie, 26% afgewerkt frituurvet en 37% dierlijke vetten. De milieu-impact van deze mix vergeleken met de milieu-impact van biodiesel gebaseerd op 100% koolzaadolie, 100% palmolie, 100% frituurvet en 100% dierlijke vetten.

In Figuur 13 wordt het totale milieuprofiel van een Euro 5 vrachtwagen die 1 liter biodiesel gebruikt weergegeven. De milieu-impacts zijn onderverdeeld in de verschillende fases. De milieu-impacts voor de gebruiks- en transportfase zijn gelijk voor alle samenstellingen, omdat deze onafhankelijk zijn van de samenstelling van de grondstoffen. De milieu-impact toe te schrijven aan de productie van de biodiesel (het blauwe gedeelte) varieert daarentegen aanzienlijk. Hierin komt ook het verschil tussen eerste en tweede generatiebrandstoffen duidelijk naar voren. De milieu-impact van de eerste generatie biodiesel gebaseerd op palm- of koolzaadolie is namelijk enkele malen hoger dan die van tweedegeneratie biodiesel gebaseerd op frituur- of dierlijk vet.



Figuur 13: MKI van productie van 1 liter biodiesel gebaseerd op huidige mix en pure palmolie, koolzaadolie, afgewerkt frituurvet en olie uit dierlijke vetten.

Omdat de milieu-impact van de grondstof sterk varieert, heeft de samenstelling van de gebruikte grondstoffen een groot effect op de uiteindelijke MKI van de machine-biodieselcombinaties. Door deze sterke afhankelijkheid is het opgestelde milieuprofiel dus alleen representatief voor de mix van 21% koolzaadolie, 16% palmolie, 26% afgewerkt frituurvet en 37% dierlijke vetten. Het biedt echter ook mogelijkheden om de milieu-impact van biodiesel flink te verlagen door het meer tweede generatie grondstoffen te gebruiken in de productie.

Ditzelfde geldt voor HVO. Deze brandstof is nu gebaseerd op 80% tweede generatie grondstoffen uit dierlijke vetten (40%) en frituurvet (40%), en 20%

palmolie. De milieu-impact van productie van een liter HVO kan dus ook flink worden verlaagd door aandeel gebaseerd op palmolie te vervangen door tweede generatie grondstof. Daarnaast vermindert de milieu-impact ook door het deel gebaseerd op afgewerkt frituurvet te vergroten.

4.7 Verbeterpotentieel

Op basis van de resultaten en de gevoeligheidsanalyse is er een aantal richtingen waarop de milieu-impact van het gebruik van vrachtwagens en graafmachines per liter diesel aanzienlijk kan worden verlaagd, oftewel het potentieel waarmee de milieuprestatie verbeterd kan worden.

In het geval van biodiesel en HVO kan de MKI worden verbeterd door de samenstelling van deze brandstoffen te wijzigen. Zoals in de gevoeligheidsanalyse wordt getoond kan de MKI per liter van biodiesel tot wel 50% worden verlaagd door de eerste generatie grondstoffen zoals palm- en koolzaadolie te vervangen door tweede generatie grondstoffen zoals frituur- en dierlijk vet. Voor HVO gaat het om een vermindering van 40% van de MKI per liter.

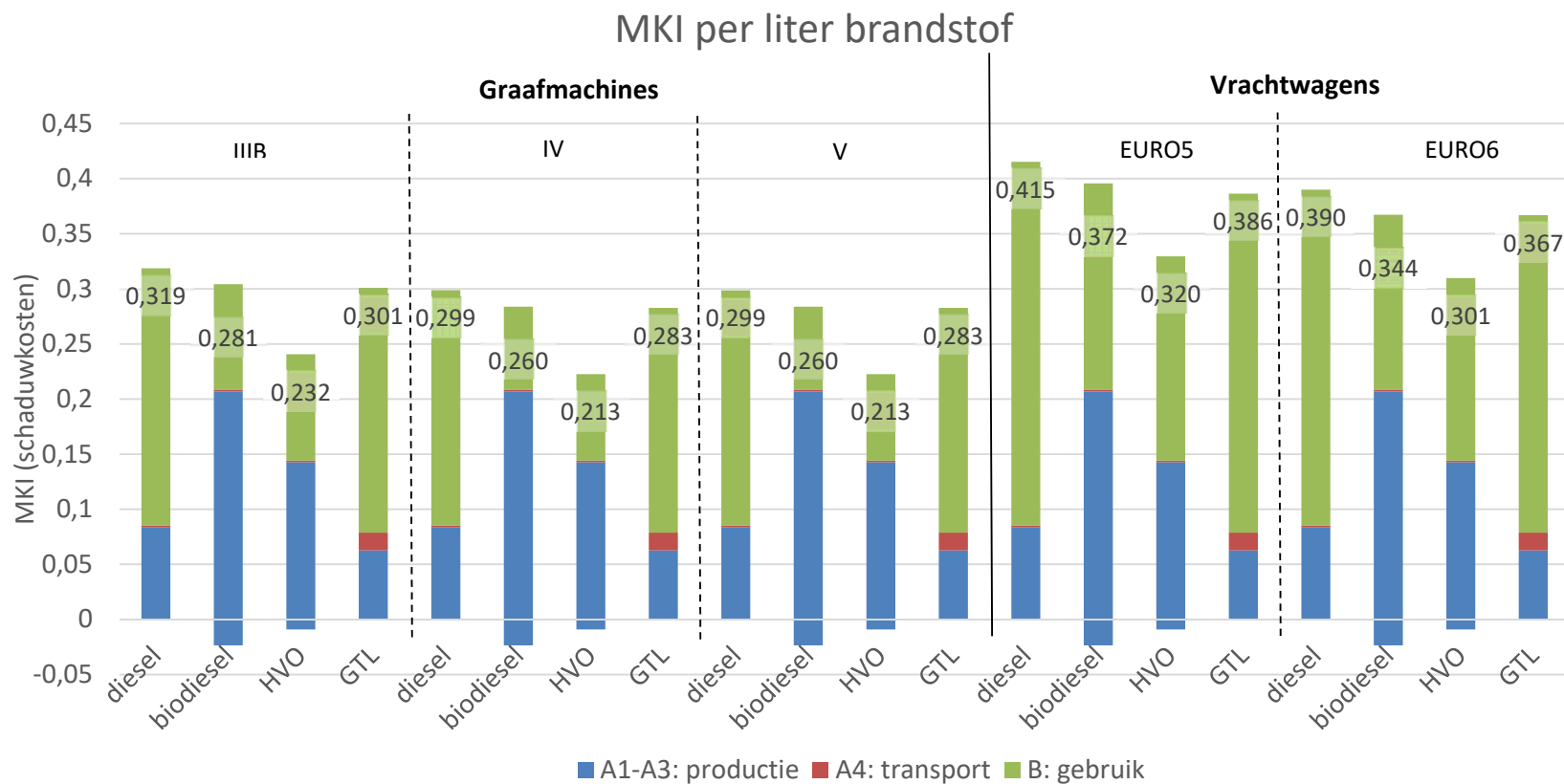
Een andere manier om de milieu-impact van de inzet van machines te verlagen is door graafmachines uit categorie IIIB zo veel mogelijk te vervangen door categorie IV en V en vrachtwagens Euro 5 te vervangen door Euro 6. Voor zowel graafmachines als vrachtwagens is de milieu-impact van nieuwe categorieën tot 8% lager.

5 Conclusie

In dit onderzoek zijn in opdracht van Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud (GPO) 20 milieuprofielen opgesteld van verschillende machine-brandstofcombinaties voor opname in de nationale milieudatabase. In Figuur 14 worden de milieuprofielen van alle 20 machine-brandstofcombinaties weergegeven. De getallen in de staafdiagrammen representeren de MKI per liter, de rekeneenheid is van deze studie. Voor graafmachines uit categorie IIIb is de MKI van diesel het grootst, GTL en opvolgend biodiesel iets lager (respectievelijk, 6% en 12%) en HVO nog lager (27%). Als je de milieu impact van de verschillende brandstoffen wil vergelijken, is het echter eerlijker om deze in de eenheid MKI per MJ te vergelijken, omdat je dan dezelfde hoeveelheid verzet werk / gereden kilometers vergelijkt. Als dit wordt gedaan, wordt het verschil tussen de MKI van diesel, GTL en biodiesel kleiner (GTL ongeveer 1% lager en biodiesel zo'n 4% lager). De MKI per MJ van HVO blijft aanzienlijk lager (ongeveer 25%) dan die van diesel.⁸ Hier moet nog wel rekening worden gehouden dat in geval van biodiesel en HVO deze brandstoffen niet in pure vorm worden gebruikt, maar worden bijgemengd en dus dat het verschil met MKI van diesel kleiner wordt (1% lager voor biodiesel en zo'n 7% voor HVO). Voor vrachtwagens zijn de resultaten vergelijkbaar met die voor brandstof in graafmachines en is de MKI per liter voor biodiesel, HVO en GTL, respectievelijk 10%, 23% en 7% lager dan voor diesel. De MKI per MJ is gemiddeld, 3%, 20% en 3% lager.⁹

⁸ In Figuur 8 worden de graafmachine-brandstof combinaties vergeleken in eenheid MKI per MJ.

⁹ In Figuur 9 vrachtwagen-brandstof combinaties vergeleken in eenheid MKI per MJ.



Figuur 14: Milieuprofielen van de 20 machine-brandstofcombinaties weergegeven in MKI per liter brandstof. De getallen genoemd in de grafiek zijn is de totale MKI over alle levenscyclusfasen van de brandstoffen per liter. Het blauwe deel van de staafdiagrammen is de milieu-impact van de productie van de brandstof, waarin de negatieve deel de vermeden milieueffecten door productie van bijproducten in productie van biodiesel en HVO vertegenwoordigt. Het rode deel het aandeel van het transport van de productielocatie naar de gebruiker. Het groene deel representeert de milieu-impact van de gebruiksfase, dus de emissies die vrijkomen bij verbranding van een liter brandstof, maar ook de emissies die vrijkomen bij het remmen en toerekening van de milieu-impact van de materialen die gebruikt zijn voor maken van vrachtwagen en graafmachine.

6 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever

Rijkswaterstaat; Grote Projecten en Onderhoud (GPO)

T.a.v. de heer de Weger en de heer Nouta

Naam en functies medewerkers

Ir. R.P. Verbeek, Ir. J.H.J. Hulskotte, Ing. R.N. van Gijlswijk

Drs. E.E. Keijzer

Periode waarin het onderzoek plaatsvond

Maart – Augustus 2018

Naam en paraaf tweede lezer



Drs. S.E. de Vos-Effting

Ondertekening



Ir. L. Kootstra
Auteur

Autorisatie vrijgave



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

Literatuurlijst

- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2017). *Hernieuwbare energie in Nederland 2016*. Den Haag/Heerlen/Bonaire: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- Deltares en TNO. (2016). *Remslijtage - emissieschattingen diffuse bronnen emissieregistratie*.
- Erne, v. E. (2011). *Public Eye Award 2011: People's Award for Neste Oil Green Diesel*. Opgehaald van Anders bekeken: <https://www.stichtingmilieunet.nl/andersbekekenblog/energie/public-eye-award-2011-peoples-award-for-neste-oil-green-diesel.html>
- Grinsven, v. A., Kampman, B., & Scholten, T. (2015). *Biofuels on the Dutch market; update data for 2013*. Delft: CE Delft.
- Hulskotte, J., & Verbeek, R. (2009). *Emissie Mobiele Machines gebaseerd op machineverkoop in combinatie met brandstof Afzet (EMMA)*. Utrecht: TNO.
- JRC. (2014). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*.
- Neste. (2018, mei 4). *Products*. Opgehaald van Neste official website: <https://www.neste.com/fi/en/companies/products/renewable-products/renewable-raw-materials/wastes-and-residues-0>
- sea-distances.org. (2018, mei 4). *sea-distances.org*. Opgehaald van online tool for calculation distances between sea ports: www.sea-distances.org
- Shell. (2014). *Kennisgids - GTL fuel v2*.
- Verbeek, R., Smokers, R., Kadijk, G., Hensema, A., Passier, G., Rabé, E., . . . Riemersma, I. (2008). *Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles, phase 2*. Delft: TNO.
- Vos-Effting, S. d. (2018). *LCA-Achtergrondrapportage voor Nederlandse Asphaltmengsels, versie 2.1*. TNO & EcoChain.
- werktuigen.nl. (2018, mei 4). *Online marktplaats voor tankwagen brandstof*. Opgehaald van werktuigen.nl: <https://www.werktuigen.nl/wegtransport-trucks-trailers/vrachtwagen-tankwagen/tankwagen-brandstof-709.html>
- Wernet, G. B.-R. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1218–1230.
- Winkel, J., Kwant, K., Goh, C., & Junginger, M. (2014). *Sustainable biomass and bioenergy in the Netherlands*. The Hague: Netherlands Enterprise Agency.

Appendix A: Gekarakteriseerde milieuprofielen

Tabel 31: Gekarakteriseerde milieuprofielen voor klasse IIIb graafmachines per liter brandstof

Karakterisatiefactor	Eenheid	Resultaten graafmachines klasse IIB			
		<i>diesel</i>	<i>biodiesel</i>	<i>HVO</i>	<i>GTL</i>
abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1.61E-06	3.75E-06	2.10E-06	4.98E-06
abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2.35E-02	8.19E-03	5.27E-03	2.96E-02
global warming (GWP)	kg CO2 eq	3.44E+00	1.41E+00	1.35E+00	3.65E+00
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5.99E-07	1.33E-07	8.20E-08	4.85E-08
photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	1.13E-03	1.16E-03	9.91E-04	7.33E-04
acidification (AP)	kg SO2 eq	1.01E-02	1.26E-02	8.26E-03	7.52E-03
eutrophication (EP)	kg PO4--- eq	1.93E-03	5.42E-03	3.05E-03	1.62E-03
human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	8.52E-01	7.87E-01	7.62E-01	7.24E-01
ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1.69E-02	5.69E-01	5.09E-01	5.75E-03
ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5.64E+01	4.71E+01	3.28E+01	2.17E+01
ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	3.03E-03	2.44E-01	2.25E-01	2.95E-03
energy, primary, renewable (MJ)	MJ	3.83E-01	7.84E+00	2.46E+00	4.31E-01
energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5.25E+01	1.73E+01	1.10E+01	6.30E+01
energy, primary (MJ)	MJ	5.28E+01	2.51E+01	1.35E+01	6.35E+01
water, fresh water use (m3)	m3	4.96E-03	6.12E-02	1.94E-02	2.82E-03
waste, non hazardous (kg)	kg	8.80E-02	2.81E-01	2.44E-01	1.07E-01
waste, hazardous (kg)	kg	3.62E-04	1.01E-04	6.10E-05	9.62E-05

Tabel 32: Gekarakteriseerde milieuprofielen voor klasse IV graafmachines per liter brandstof

Karakterisatiefactor	Eenheid	Resultaten graafmachines tier IV			
		diesel	biodiesel	HVO	GTL
abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1.76E-06	3.88E-06	2.24E-06	5.11E-06
abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2.38E-02	8.44E-03	5.53E-03	2.98E-02
global warming (GWP)	kg CO2 eq	3.47E+00	1.44E+00	1.38E+00	3.68E+00
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6.04E-07	1.38E-07	8.67E-08	5.32E-08
photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	1.14E-03	1.17E-03	1.00E-03	7.45E-04
acidification (AP)	kg SO2 eq	6.65E-03	9.00E-03	4.96E-03	4.24E-03
eutrophication (EP)	kg PO4--- eq	1.02E-03	4.46E-03	2.18E-03	7.49E-04
human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	8.55E-01	7.99E-01	7.76E-01	7.38E-01
ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1.71E-02	5.69E-01	5.10E-01	5.95E-03
ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5.74E+01	4.79E+01	3.37E+01	2.26E+01
ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	3.07E-03	2.44E-01	2.25E-01	2.99E-03
energy, primary, renewable (MJ)	MJ	3.94E-01	7.85E+00	2.47E+00	4.42E-01
energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5.31E+01	1.78E+01	1.16E+01	6.36E+01
energy, primary (MJ)	MJ	5.35E+01	2.57E+01	1.41E+01	6.41E+01
water, fresh water use (m3)	m3	5.02E-03	6.13E-02	1.95E-02	2.88E-03
waste, non hazardous (kg)	kg	8.94E-02	2.83E-01	2.45E-01	1.08E-01
waste, hazardous (kg)	kg	3.64E-04	1.04E-04	6.32E-05	9.84E-05

Tabel 33: Gekarakteriseerde milieuprofielen voor klasse V graafmachines per liter brandstof

Karakterisatiefactor	Eenheid	Resultaten graafmachines tier V			
		diesel	biodiesel	HVO	GTL
abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1.76E-06	3.88E-06	2.24E-06	5.11E-06
abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2.38E-02	8.44E-03	5.53E-03	2.98E-02
global warming (GWP)	kg CO2 eq	3.47E+00	1.44E+00	1.38E+00	3.68E+00
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6.04E-07	1.38E-07	8.67E-08	5.32E-08
photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	1.14E-03	1.17E-03	1.00E-03	7.45E-04
acidification (AP)	kg SO2 eq	6.65E-03	9.00E-03	4.96E-03	4.24E-03
eutrophication (EP)	kg PO4--- eq	1.02E-03	4.46E-03	2.18E-03	7.49E-04
human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	8.55E-01	7.99E-01	7.76E-01	7.38E-01
ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1.71E-02	5.69E-01	5.10E-01	5.95E-03
ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5.74E+01	4.79E+01	3.37E+01	2.26E+01
ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	3.07E-03	2.44E-01	2.25E-01	2.99E-03
energy, primary, renewable (MJ)	MJ	3.94E-01	7.85E+00	2.47E+00	4.42E-01
energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	5.31E+01	1.78E+01	1.16E+01	6.36E+01
energy, primary (MJ)	MJ	5.35E+01	2.57E+01	1.41E+01	6.41E+01
water, fresh water use (m3)	m3	5.02E-03	6.13E-02	1.95E-02	2.88E-03
waste, non hazardous (kg)	kg	8.94E-02	2.83E-01	2.45E-01	1.08E-01
waste, hazardous (kg)	kg	3.64E-04	1.04E-04	6.32E-05	9.84E-05

Tabel 34: Gekarakteriseerde milieuprofielen voor euro 5 vrachtwagens per liter brandstof

Karakterisatiefactor	Eenheid	Resultaten vrachtwagens euro 5			
		<i>diesel</i>	<i>biodiesel</i>	<i>HVO</i>	<i>GTL</i>
abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	7.11E-06	8.81E-06	7.38E-06	1.02E-05
abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2.80E-02	1.24E-02	9.61E-03	3.39E-02
global warming (GWP)	kg CO2 eq	3.70E+00	1.65E+00	1.60E+00	3.84E+00
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	7.36E-07	2.60E-07	2.14E-07	1.79E-07
photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	2.34E-03	2.26E-03	2.13E-03	1.87E-03
acidification (AP)	kg SO2 eq	1.35E-02	1.61E-02	1.09E-02	1.01E-02
eutrophication (EP)	kg PO4--- eq	2.75E-03	6.26E-03	3.67E-03	2.22E-03
human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1.30E+00	1.21E+00	1.20E+00	1.16E+00
ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	8.41E-02	6.31E-01	5.74E-01	7.00E-02
ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	2.20E+02	1.98E+02	1.90E+02	1.78E+02
ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	7.73E-03	2.49E-01	2.29E-01	7.43E-03
energy, primary, renewable (MJ)	MJ	1.00E+00	8.41E+00	3.06E+00	1.02E+00
energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	6.40E+01	2.79E+01	2.21E+01	7.41E+01
energy, primary (MJ)	MJ	6.50E+01	3.63E+01	2.52E+01	7.51E+01
water, fresh water use (m3)	m3	1.30E-02	6.86E-02	2.71E-02	1.05E-02
waste, non hazardous (kg)	kg	5.29E+00	5.07E+00	5.24E+00	5.07E+00
waste, hazardous (kg)	kg	4.53E-04	1.86E-04	1.49E-04	1.83E-04

Tabel 35: Gekarakteriseerde milieuprofielen voor euro 6 vrachtwagens per liter brandstof

Karakterisatiefactor	Eenheid	Resultaten graafmachines tier V			
		<i>diesel</i>	<i>biodiesel</i>	<i>HVO</i>	<i>GTL</i>
abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	7.24E-06	8.94E-06	7.51E-06	1.04E-05
abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2.83E-02	1.26E-02	9.87E-03	3.41E-02
global warming (GWP)	kg CO2 eq	3.73E+00	1.67E+00	1.62E+00	3.86E+00
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	7.41E-07	2.64E-07	2.18E-07	1.84E-07
photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	2.29E-03	2.23E-03	2.11E-03	1.84E-03
acidification (AP)	kg SO2 eq	9.31E-03	1.14E-02	7.51E-03	6.76E-03
eutrophication (EP)	kg PO4--- eq	1.64E-03	5.02E-03	2.77E-03	1.34E-03
human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1.30E+00	1.21E+00	1.21E+00	1.17E+00
ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	8.40E-02	6.31E-01	5.74E-01	6.99E-02
ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	2.21E+02	1.99E+02	1.91E+02	1.79E+02
ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	7.75E-03	2.49E-01	2.29E-01	7.46E-03
energy, primary, renewable (MJ)	MJ	1.01E+00	8.42E+00	3.07E+00	1.03E+00
energy, primary, non-renewable (MJ)	MJ	6.46E+01	2.85E+01	2.27E+01	7.46E+01
energy, primary (MJ)	MJ	6.56E+01	3.69E+01	2.58E+01	7.57E+01
water, fresh water use (m3)	m3	1.30E-02	6.87E-02	2.72E-02	1.05E-02
waste, non hazardous (kg)	kg	5.28E+00	5.07E+00	5.23E+00	5.07E+00
waste, hazardous (kg)	kg	4.56E-04	1.88E-04	1.51E-04	1.85E-04

Appendix B: Gewogen milieuprofielen

Tabel 36: MKI van de verschillende machine-brandstofcombinaties per liter brandstof. Totaal en per fase.

			Totaal	A1-A3 (productie)	A4 (transport)	B (gebruik)
graafmachines	Categorie IIIB	diesel	3.19E-01	8.35E-02	1.74E-03	2.33E-01
		biodiesel	2.81E-01	1.83E-01	1.86E-03	9.56E-02
		HVO	2.32E-01	1.33E-01	1.64E-03	9.65E-02
		GTL	3.01E-01	6.27E-02	1.60E-02	2.22E-01
	Categorie IV	diesel	2.99E-01	8.35E-02	1.74E-03	2.14E-01
		biodiesel	2.60E-01	1.83E-01	1.86E-03	7.52E-02
		HVO	2.13E-01	1.33E-01	1.64E-03	7.83E-02
		GTL	2.83E-01	6.27E-02	1.60E-02	2.04E-01
	Categorie V	diesel	2.99E-01	8.35E-02	1.74E-03	2.13E-01
		biodiesel	2.60E-01	1.83E-01	1.86E-03	7.52E-02
		HVO	2.13E-01	1.33E-01	1.64E-03	7.83E-02
		GTL	2.83E-01	6.27E-02	1.60E-02	2.04E-01
vrachtwagens	Euro 5	diesel	4.15E-01	8.35E-02	1.74E-03	1.74E-03
		biodiesel	3.72E-01	1.83E-01	1.86E-03	1.86E-03
		HVO	3.20E-01	1.33E-01	1.64E-03	1.64E-03
		GTL	3.86E-01	6.27E-02	1.60E-02	1.60E-02
	Euro 6	diesel	3.90E-01	8.35E-02	1.74E-03	1.74E-03
		biodiesel	3.44E-01	1.83E-01	1.86E-03	1.86E-03
		HVO	3.01E-01	1.33E-01	1.64E-03	1.64E-03
		GTL	3.67E-01	6.27E-02	1.60E-02	1.60E-02

Appendix C: Verslag van de reviewer

Harry van Ewijk van SGS heeft de review uitgevoerd in 3 ronden:

1. Goal & scope: uitgangspunten, zoals vastgelegd in een concept TNO-rapport 23 februari 2018 (ontvangen 27 maart), zijn 30 maart 2018 besproken met opdrachtgever RWS, branchevertegenwoordigers, TNO en SGS.
2. Review van complete concept eindrapport in eerste ronde op 3 augustus 2018.
3. Final review op 10 september 2018.

De bevindingen van de SGS review van 3 augustus 2018 en de reactie van TNO daarop zijn opgenomen in onderstaande tabel. Bij de finale review waren de genoemde zaken voor zover relevant verwerkt in het rapport en waren er geen aanvullende vragen. Daarmee is de review met goed gevolg doorlopen en kunnen de data worden aangeleverd aan de NMD.

Betreft: 20 LCA's van brandstof-machinecombinaties, L. Kootsra, 8 juni 2018 (TNO-rapport TNO 2018 R10658)			
Reviewer: Harry van Ewijk, SGS Search, 3 augustus 2018.			
nr.	Pagina/ par.	Vraag/opmerking	Reactie opsteller
Algemeen		De aanpak is helder beschreven. Het wordt over het algemeen goed duidelijk welke aannamen zijn gedaan en hoe modellering plaatsvond. Hier en daar zijn er nog wat taalslordigheden. Deze blijven in de review grotendeels buiten beschouwing.	-
1.	2, 3, 4/ Samenv 7/1.3	Functionele eenheid Er staat nu: "In deze studie is de (functionele) eenheid "MKI" per liter brandstof gehanteerd. "MKI" is de afkorting van milieukosten indicator en heeft de eenheid schaduwkosten." Verderop wordt gesproken over rekeneenheid. Dat lijkt me correct. Daarnaast zou ik anders formuleren, bijvoorbeeld: De rekeneenheid is "het verbruik van 1 liter brandstof, toegepast in graafmachines", respectievelijk "het verbruik van 1 liter brandstof, toegepast in vrachtwagens", voor de volgende brandstoffen... Uitgedrukt in MKI zou ik buiten de definitie van de rekeneenheid houden. Het geldt immers ook voor de scores per effectcategorie. (Na paragraaf 1.3 komt het begrip FE niet meer voor.)	Suggestie voor het spreken over rekeneenheid en het spreken over "verbruik" i.p.v. MKI zijn overgenomen op de genoemde pagina's. Op pagina 2 is rekeneenheid toegevoegd aan begin van tweede en is onder resultaten wijziging gemaakt dat de rekeneenheid wordt uitgedrukt in MKI.
2.	2/Samen	Wat betekent "netto MKI". Netto weglaten?	Met netto MKI werd de netto waarde van de MKI bedoeld, dus som van alle positieve en negatieve bijdragen samen. Dit was toegevoegd om duidelijk te maken dat er soms een verschil aanwezig is tussen hoogte van de staafdiagram en getal dat er werd genoemd. Het is nu gewijzigd naar de "totale MKI over alle levenscyclusfasen".

3.	2/Samen	"De hogere milieu-impact per liter betekent niet dat graafmachines "slechter" zijn dan vrachtwagens." Het is toch precies andersom?	Klopt, dit is gewijzigd. De alinea is verplaatst, zodat het na de uitleg van de verschillende fases komt.
4.	3/Samen (rapport)	Module D is niet correct toegepast. EN 15804 zegt hierover op verschillende plaatsen wat, o.a. in 6.3.4.2: "Flows leaving the system at the end-of-waste boundary of the product stage (A1-A3) shall be allocated as coproducts (see 6.4.3.2). Loads and benefits from allocated co-products shall not be declared in Module D (see 6.3.4.6). If such a co-product allocation is not possible, other methods may be chosen and shall be justified. Therefore, as a general rule, potential loads or benefits from A1-A3 do not appear in module D." Wat mij betreft kan de vermeden impact in module A worden verrekend. Het is wel goed de impact ervan in het rapport apart in beeld te houden.	Dit is aangepast in de specifieke tekst en de modelering. De co-productie wordt nu tot fase A3 gerekend. In de grafieken in de rapportage is wel de scheiding tussen positief en negatief behouden, zodat duidelijk wordt welk deel van de milieu-impact is te relateren aan de uitgespaarde productie.
5.	3/Samen	"Hiervoor wordt alleen het deel van de milieu-impact meegerekend dat kan worden toebedeeld aan het gebruik van de brandstof." zou ik anders formuleren of de zin weglaten. Nu lijkt het alsof er zaken niet zijn toegerekend, terwijl waarschijnlijk wordt bedoeld dat deze zaken naar rato zijn toegerekend.	Zin is aangepast naar De milieu impact gerelateerd aan deze zaken is naar rato toegerekend."
6.	4/Samen	Zie ook punt 3. Ik zou hier toelichting verwachten op het verschil in de gebruiksfase tussen graafmachines en vrachtwagens. Zit hem dat in de infrastructuur? Productie is per liter verbruik per type brandstof immers steeds gelijk.	Er is extra toelichting geschreven over de verschillen tussen graafmachines en vrachtwagens en de relatie met de verschillende fases. De alinea is verplaatst, zodat het na de uitleg van de verschillende fases komt.
7.	7/1.1	BPKV eenmaal voluit?	Aangepast
8.	8/1.3	"De milieuprofielen zoals ingediend voor de Nationale Milieudatabase, zijn te vinden in de appendix van dit rapport." Deze volgen nog. Neem in het aanleverformat in het toelichtingveld de belangrijkste uitgangspunten op, zoals al verspreid in het rapport aanwezig. Dit is belangrijk omdat de eindgebruikers van de NMD (DuboCalc-gebruikers) deze info ook kunnen zien. Indien er voor wordt gekozen de info ook aan te bieden voor de processendatabase (?) dan geldt dat ook voor de gebruikers daarvan.	De productnaam en toelichting_eindgebruiker zijn in de rapportage nog niet weergegeven. In de mail heb ik een excel bestand toegevoegd met alle beschrijvingen.
9.	9/1.4	Ecoinvent 3.3 is prima. Het mag ook al 3.4 zijn (gezien SimaPro 8.5).	Ecoinvent 3.4 is gebruikt en tekst is aangepast.
10.	9/1.4	Gebruik de 'SBK methode 25 mei 2018', zoals zichtbaar op www.milieudatabase.nl/index.php?q=bepalingsmethode . Daar zit een downloadlink achter: http://www.milieudatabase.nl/download/SBK_Bepalingsmethode_25mei2018_(NMD%202_2).zip In de beschrijving bij de methode staan de belangrijkste wijzigingen.	We hadden inderdaad de verkeerde methode gebruikt. Dit is aangepast en resultaten zijn dus alleen ook aangepast!

11.	13/2.2.3	In "In deze analyse gaan we uit dat alle HVO die in Nederland gebruikt wordt ook in Nederland geproduceerd wordt, omdat omvang van Nederlandse productie 0,8 miljoen ton van 2,0 ton totale productie vormt." ontbreekt miljoen achter 2,0.	Aangepast.
12.	14/2.3 (rapport)	Mobiele werktuigen en graafmachines worden in het rapport genoemd. Bijvoorbeeld Tabel 19 mobiele voertuigen en Tabel 20 graafmachines. De resultaten worden gepresenteerd voor graafmachines. Hanteer deze begrippen consequent en overweeg opname van graafmachines en vrachtwagens in de (onder)titel.	De term mobiele werktuigen is op zoveel mogelijk plaatsen vervangen door graafmachines. In alle bijschriften van grafieken in aanpassing gemaakt naar graafmachines.
13.	16/2.5 19 en 20 22	In A1 komen de grondstoffen vrij van milieulast het systeem binnen omdat wordt verondersteld dat de voortbrengende keten tot aan 'end-of-waste' (einde afvalstatus) is gemodelleerd. Het is handig om bij de beschrijving van de productiefase van de betreffende brandstoffen (biodiesel, HVO) dit sleutelbegrip uit EN15804 te noemen.	In productie van HVO en biodiesel is een extra zin hierover opgenomen.
14.	19/3.2	"...en sinds 2009 tellen biobrandstoffen uit afval dubbel mee voor het aandeel hernieuwbare energie voor vervoer...". Is dit relevant? Zo nee, overweeg weglaten. Zo ja, nadere toelichting op wat "dubbel meetellen" betekent?	Dubbel meetellend betekend dat de biobrandstof is gebaseerd op een rest of afvalstroom. Omdat het verder voor de samenstelling van biodiesel niet relevant is, is de tekst gewijzigd naar "en in 2009 is de regelgeving rondom biobrandstoffen gebaseerd op rest- en afvalstromen gewijzigd. Sinds dat moment tellen deze biobrandstoffen dubbel mee in bijdrage aan het aandeel hernieuwbare energie in de transportsector (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017)."
15.	19/3.2	Ik volg de tekst onder gebruikte bronnen niet helemaal. "De gebruikte bronnen zijn o.a. dierlijk vet, koolzaadolie, maisolie, gebruikt frituurvet en palmolie (Grinsven, Kampman, & Scholten, 2015). In Nederland is in 2016 ca. 60% van de biobrandstoffen uit dubbeltellende grondstoffen geproduceerd. Dit is het totaal voor biodiesel, biobenzine en biogas (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017). Deze 60% bestaat uit gebruik van dierlijk vet en afgewerkt frituurvet. De overige 40% bestaat uit een combinatie van koolzaadolie en palmolie (Grinsven, Kampman, & Scholten, 2015)." - Wordt met de "ca. 60%" en "Deze 60%" hetzelfde bedoeld? - Ik kom erop omdat biogas wordt genoemd en ik me afvraag waar dat biogas terugkomt (of blijft).	De tekst is aangepast zodat de twee vragen duidelijker worden. De Ca. 60% is inderdaad dezelfde 60% en zin over biogas en biobenzine is verwijderd, omdat deze voor verwarring kan zorgen. De huidige tekst is: "In Nederland is in 2016 60% van de biobrandstoffen uit afval en reststromen geproduceerd (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2017). Deze 60% bestaat uit olie gewonnen uit dierlijk vet en afgewerkt frituurvet. "

16.	19/Tab. 6	<p>Zoals aangegeven moet de glycerine in module A worden verrekend en niet in D. De voetnoot heeft het over de gebruiksfase (module B). Dat begrijp ik, maar vind ik ook verwarrend.</p> <p>Dat brengt me op een gerelateerd punt. Het ingewikkelde van deze studie is dat vanuit de brandstof geredeneerd (geen bouwproduct - en dus eigenlijk EN15804 niet van toepassing) de module-indeling anders kan zijn dan wanneer het gaat om het proces waarbij de brandstof wordt ingezet in DuboCalc/NMD. Module B in deze studie wordt dan bijvoorbeeld module A (als het om aanleg gaat) of C (als het om sloop gaat). Het lijkt me goed hieraan kort aandacht te besteden in de inleiding en bij de resultaten.</p>	<p>Dit is aangepast in de tabel en de voetnoot. Daarnaast is in hoofdstuk 2.5 levenscyclus en systeemgrenzen de volgende tekst toegevoegd: 'De EN 15804 is in principe gericht op bouwproducten. In deze studie is deze echter ook toegepast op brandstoffen en daarom is de indeling van de milieu-impact over deze levenscyclusfasen bij gebruik van het milieu profiel afwijkend. Indien het milieuprofiel bijvoorbeeld wordt toegepast in berekening van afvoer van sloop materiaal, zal de volledige milieu-impact onderdeel C2 vallen en zal deze niet worden onderverdeeld in de categorieën zoals in deze rapportage omschreven.'</p>
17.	22/Tab.10 25/Tab.14	<p>Voor vermeden productie is het 'market for' proces minder geschikt, vanwege de gehanteerde mix en het transport dat in dat proces is opgenomen. Kies dus (een mix van) 'production' processen.</p>	<p>Omdat de marktprocessen wel een marktmix bevatten van de verschillende productieprocessen waarop bijv. glycerine geproduceerd wordt, wordt de voorkeur uitgesproken om dit het "market for" proces te gebruiken. Voor deze zijn wel alle transport processen gelijk gesteld op 0. Dit betekent dat voor biodiesel en HVO de uitgespaarde productie iets lager is geworden.</p>
18.	27/Tab.16	<p>Waarom niet "Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO} market for" gekozen?</p>	<p>Er is er voor gekozen om het Ecoinvent-proces 'Transport, freight, sea, transoceanic tanker {GLO}' te gebruiken omdat deze wordt aangedreven op normale heavy fuel oil en we dit het meest representatief achten voor het vervoer dat momenteel plaats vindt. Het Ecoinvent proces "Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO} market for" gaat er vanuit dat de turbine van het schip door LNG aangedreven (naast heavy fuel oil).</p>
19.	29/3.5 e.v.	<p>"Door de inzet van al deze technieken, is het verschil in verbrandingsemissies tussen GTL, HVO, biodiesel en diesel afwezig." Misschien goed om hier steeds bij te vermelden "per MJ" (achter verschil).</p>	<p>Aangepast</p>
20.	32/3.6 1e zin	<p>Het lijkt goed om aan "de emissies van de verbranding van 1 liter van brandstof en impact gerelateerd aan productie, gebruik en end-of-life van de vrachtwagen" gebruik van weginfrastructuur toe te voegen.</p>	<p>Aangepast, het ging hier om vier in plaats van twee componenten.</p>
21.	32/Tab.23	<p>De volgorde waarin de emissies worden genoemd verschilt tussen vrachtwagens en mobiele werktuigen (--> graafmachines). Hou dit liefst gelijk, waarbij beginnen met Carbon ... mijn voorkeur heeft.</p>	<p>We snappen je punt. Er is hier echter voor gekozen om de volgorde van de aangeleverde data aan te houden om de kans op (kopieer) fouten te verkleinen.</p>
22.	35, 36, 37, 38/B1	<p>In "Omdat de afschrijving en het onderhoud evenredig zijn met het verzette werk en dus de calorische waarde van de brandstoffen..." denk je bij 'verzette werk' eerder aan mobiele werktuigen dan aan vrachtwagentransport.</p>	<p>In de tekst is voor vrachtwagens "verzet werk" aangepast naar "gereden kilometers".</p>

23.	37/B1 38/tab.29	De emissies door wegdekslijtage lijken een factor 10 te laag. Ik kom tot 6,32E-4 kg/liter diesel voor Euro 5.	Klopt, dit stond fout in de tabel vermeld, maar was juist in de analyse opgenomen.
24.	38/B1	Zin "Op basis van het gemiddeld kilometrage van al het transport en vrachtwagens > 32ton, en gemiddelde gewicht van vrachtwagen en de belading." loopt niet.	Zin is verwijderd.
25.	38	"meterjaar" en "meter jaar" worden beide gebruikt. Mogelijk is meter*jaar voor de tekst helderder (dan ook t*km), of eenmaal toelichten, maar in ieder geval consequent opnemen.	Alles aangepast naar t*km en meter*jaar
26.	43/4.2	verrichtte-->verrichte	Aangepast
27.	45/4.4	"...gebruik van graafmachine of vrachtwagen, onderhoud van dit deze, ..."	Aangepast
28.	45/4.4 46/Fig.11	"De MKI door de verbrandingsemissies is voor graafmachines en vrachtwagens bijna even groot..." Dat zou ik ook verwachten. Is kort uit te leggen waarom er toch wel enig verschil is tussen de verbrandingsemissies in deze figuur?	Het verschil komt door verschil in data die is gebruikt voor vrachtwagens en graafmachines. In het geval van graafmachines zijn de verbrandingsemissies gebaseerd op referentie data. Bij vrachtwagens is deze data afgelopen jaren aangevuld met data metingen die zijn gedaan, wat er toe heeft geleid dat de verbrandingsemissies iets hoger zijn. Bij graafmachines worden momenteel soortgelijke metingen gedaan, maar is dit nog niet verwerkt in de data en is de kans dus groot dat de verbrandingsemissies iets te laag worden ingeschat.
29.	46/4.5	vergelijken -->vergeleken	Aangepast
30.	46/4.5	Aan de tweede zin "ten opzichte van diesel" toevoegen?	Aangepast
31.	46/4.6	verwachtte -->verwachte	Aangepast
32.	48/4.6.2	Eerste gelijk weg in "...gelijk zijn gelijk ...".	Aangepast
33.	52/Lit.	Hier ook de Bepalingsmethode, Ecoinvent en de versie van de set met karakterisatiefactoren opnemen?	Aangepast
34.	-	Is er een overzicht beschikbaar van geïnventariseerde ingrepen die niet zijn gekarakteriseerd? (rolt uit SimaPro na berekening op tab Checks)	Dit overzicht stuur ik mee in de mail.