

Traffic & Transport
Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl
T +31 88 866 00 00

TNO-rapport

TNO 2022 R11048

Inventarisatie en categorisatie huidige en toekomstige aanbod duurzame mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw

Datum	10 juni 2022
Auteur(s)	Pim van Mensch, Siem van Merriënboer, Dennis Tol, Annette Rondaj, Jorrit Harmsen, Ruben Franssen
Exemplaarnummer	2022-STL-RAP-100344912
Aantal pagina's	77 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Projectnaam	Bijdrage verduurzaming mob. werkt. bouwlog
Projectnummer	060.46471

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2022 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Onderzoeksvraag	3
1.2	Scope	3
1.3	Leeswijzer	3
2	Categorisering voor mobiele werktuigen en bouwlogistieke voertuigen	4
2.1	Mobiele werktuigen in de bouwsector (droog)	4
2.2	Voertuigen ingezet in de bouwlogistiek	9
2.3	Emissiecijfers bouwlogistieke voertuigen	12
2.4	Spoorwerktuigen	19
3	Verschoningsopties	23
3.1	Elektrificatie en waterstof	24
3.2	Biobrandstoffen	27
3.3	Gedrag en logistieke efficiëntieverbetering	29
3.4	Hybride aandrijving	31
3.5	Schone dieselmotor	31
3.6	E-fuels	33
4	Verschoningsopties en toekomstige ontwikkelingen per categorie	34
4.1	Mobiele werktuigen en spoorwerktuigen	34
4.2	Bouwlogistiek	38
5	Voorwaarden en potentiële barrières	41
5.1	Betaalbaarheid	41
5.2	Beschikbaarheid	41
5.3	Toepasbaarheid	41
6	Vaartuigen die worden gebruikt in de waterbouw	43
6.1	Inleiding	43
6.2	Aanpak	43
6.3	Vlootsamenstelling en emissies	44
6.4	Reductiemaatregelen waterbouw	54
6.5	Onderzochte energiedragers en -omzetters en hun 'volwassenheid'	54
6.6	Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies voor de zoute waterbouw	56
6.7	Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies voor de zoete waterbouw	57
6.8	Verwacht effect op CO ₂ -emissies	58
6.9	Impact op de operationele inzet/ het ruimtegebruik aan boord	60
6.10	Impact op kosten	62
7	Bibliografie	64
8	Ondertekening	66
	Bijlage(n)	
	A Indeling SBI-codes naar 'Bouw' en 'Mogelijk Bouw'	
	B Emissielimieten mobiele werktuigen	
	C Overzicht emissiebijdrage per machinetype	
	D Samenstelling bouwlogistieke voertuigen	

1 Inleiding

Een belangrijk kennisgebied voor de totstandkoming van de routekaart 'Schoon en Emissieloos Bouwen' zijn de verduurzamingsopties voor mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw. Het gaat hierbij zowel om opties die emissies van luchtverontreinigende stoffen (zoals NO_x en fijnstof) reduceren als om opties die de uitstoot van broeikasgassen (met name CO₂) reduceren. Het is hierbij belangrijk om onderscheid te maken tussen de mogelijkheden op korte termijn en mogelijkheden op lange termijn. Dit overzicht is samengesteld op basis van beschikbare kennis binnen TNO vanuit recente en lopende onderzoekstrajecten op dit gebied, aangevuld met een analyse van relevante studies uit externe bronnen en overleg met marktpartijen.

1.1 Onderzoeksvraag

Welke mogelijkheden tot verschoning en verduurzaming van mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw zijn er momenteel beschikbaar en welke ontwikkelingen zijn er op korte (<2025), middellange (2025-2030) en lange termijn (2030-2035)?

1.2 Scope

Deze notitie is gericht op mobiele werktuigen, voertuigen die op het land worden ingezet in de bouwsector, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw.

1.3 Leeswijzer

In deze notitie wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op de voorgestelde categorisering voor mobiele werktuigen, inzet van voertuigen in de bouwlogistiek en spoorwerktuigen. Deze categorisering is van belang omdat de verschoningsopties kunnen verschillen per type materieel. In hoofdstuk 3 worden voor deze categorieën de mogelijke verschoningsopties voor reductie van CO₂, NO_x en PM beschreven. In hoofdstuk 4 worden vervolgens de verschoningsopties gekoppeld aan de voorgestelde categorieën. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de korte, middellange en lange termijn. Ook worden de verwachte toekomstige ontwikkelingen besproken. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de voorwaarden en potentiële barrières voor de ingroei van uitstootvrij materieel. Tot slot worden in hoofdstuk 6 de resultaten gepresenteerd voor vaartuigen die worden ingezet in de waterbouw. Er is gekozen om deze categorie apart te behandelen omdat deze erg afwijkt van het landgebonden materieel op het gebied van oplossingsrichtingen, operationele afwegingen en regelgeving. In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens een inschatting gegeven van de samenstelling en omvang van de vloot, de omvang van de emissies en het verwachte effect van verschillende reductiemaatregelen.

2 Categorisering voor mobiele werktuigen en bouwlogistieke voertuigen

2.1 Mobiele werktuigen in de bouwsector (droog¹)

Mobiele werktuigen is een uitgebreide categorie waarbij de verschoningsopties kunnen verschillen per type materieel.

Hiervoor zijn de mobiele werktuigen ingedeeld in verschillende categorieën:

- 1 Mini (tot 19kW);
- 2 Klein (tot 19-37/56 kW);
- 3 Middelgroot (56-130 kW);
- 4 Groot (130-560 kW);
- 5 Zeer groot (>560 kW).

De gehanteerde vermogensklassen zijn gerelateerd aan de emissiewetgeving die voor mobiele werktuigen geldt (stagenormen²). Tabel 1 geeft het overzicht van de vermogenscategorieën en geeft weer hoe deze relevant zijn voor de emissies van verbrandingsmotoren in mobiele werktuigen. Zie Bijlage A voor een overzicht van de emissielimieten per vermogensklasse en per stagenorm.

Tabel 1: Overzicht categorieën droge mobiele werktuigen en emissies voor verbrandingsmotoren.

Categorie	NO _x *	Fijnstof	CO ₂ *
Mini materieel (<19 kW)	Geen schone verbrandingsmotoren beschikbaar		CO ₂ uitstoot wordt met name bepaald door energievraag (= draaiuren x vermogen). Voor een substantiële reductie is een andere brandstof of aandrijflijn nodig.
Klein materieel (19 tot 37 kW)	Af-fabriek geen schone verbrandingsmotoren beschikbaar (geen SCR katalysator)	Stage V (2019) heeft een roetfilter	
Klein materieel (37 tot 56 kW)		Stage V heeft een roetfilter, Stage IIIB (2011) is een flinke stap schoner dan Stage IIIA (2006)	
Middelgroot materieel (56 tot 130 kW)	Stage IV en V hebben lage NO _x (wel SCR katalysator)		
Groot materieel (130 kW tot 560 kW)			
Zeer groot materieel (>560 kW)	Geen schone verbrandingsmotoren beschikbaar	Alleen Stage V generatorsets zijn mogelijk schoon (met SCR)	

*Bij alternatieve energiedragers, zoals elektrisch of waterstof (in combinatie met brandstofcel) is er geen lokale uitstoot van emissies.

¹ Droge mobiele werktuigen betreft materieel wat op het land wordt ingezet. Drijvende werktuigen, zoals werkschepen (maaiboten, baggerschepen etc.) vallen hier niet onder. Deze worden behandeld in hoofdstuk 6.

² De Europese emissienormen voor mobiele werktuigen zijn onderverdeeld in Stage-normen (ook wel Fase-normen). Deze normen beschrijven de toegestane uitstoot van onder andere NO_x- en fijnstof per kWh.

Los van de categorisering naar vermogensklasse, is het voor de mogelijke verschoningsopties nuttig om onderscheid te maken tussen stationair (bijvoorbeeld aggregaten, pompen en lichtmasten) en rijdend (graafmachines, laadschoppen etc.) materieel. Stationaire en rijdende machines komen voor in elke vermogenscategorie. Een stationaire machine is bijvoorbeeld in potentie makkelijker uitstootvrij te maken, omdat dergelijke machines direct aan een stroomkabel aangesloten kunnen worden, of – in het geval van een stroomaggregaat – kunnen worden vervangen door een directe aansluiting op het elektriciteitsnet.

Voor bepaling van de mogelijke ingroeisnelheid van bepaalde verschoningsopties is het belangrijk om rekening te houden met specialistisch materieel. Specialistisch materieel is bijvoorbeeld materieel dat vanwege hoge aanschafkosten of een lange levensduur niet snel wordt vernieuwd. Deze categorie komt daardoor sneller in aanmerking voor retrofit oplossing (van de gehele aandrijflijn of door toevoeging van nabehandeling). Hiervoor bestaat vooralsnog geen officiële of harde definitie.

Een mogelijke definitie zou bijvoorbeeld de onderstaande elementen kunnen bevatten:

- Lange levensduur: Bijvoorbeeld > 15 jaar;
- De prijs van het materieel (>XX euro), al dan niet in combinatie met de levensduur;
- De prijs voor de motor/aandrijflijn gedeeld door de prijs van het totale materieelstuk. (Een lage ratio geeft aan dat de prijs veel minder door de motor wordt bepaald).

Hieronder worden de categorieën en hun relevantie qua emissiebijdrage nader toegelicht. Punt van aandacht hierbij is actualiteit van de cijfers en huidige onzekerheden, deze worden daarom eerst kort toegelicht.

2.1.1 *Actualiteit en onzekerheid in emissiecijfers*

Informatie omtrent emissiecijfers van mobiele werktuigen in deze notitie is gebaseerd op het EMMA model³. Dit model wordt gebruikt voor bepaling van de landelijke emissiecijfers (zoals opgenomen in de emissieregistratie) voor mobiele werktuigen. Het EMMA model bevat een inschatting (er is immers beperkte registratie) over de aantallen machines, machinetypen, hun eigenschappen (motortypen, vermogen, bouwjaar/emissienorm), de inzet (draaiuren, brandstofgebruik, motorbelasting etc.) en emissiefactoren. De cijfers die in deze notitie zijn gebruikt gaan over zichtjaar 2020.

De uitkomsten uit het model zijn onzeker door het gebrek aan registraties van machines en de inzet ervan. Ondanks nieuwe en verbeterde inzichten zijn er hoogstwaarschijnlijk blinde vlekken waardoor diverse bronnen buiten beeld blijven.

³ Het EMMA model bevat een inschatting over de aantallen machines, machinetypen, eigenschappen (motortypen, vermogen, bouwjaar/emissienorm), de inzet (draaiuren, brandstofgebruik, motorbelasting etc.) en emissiefactoren (Hulskotte & Verbeek, 2009) Het energiegebruik en bijbehorende emissies van o.a. CO₂ en NO_x worden berekend aan de hand van de verwachte draaiuren en de emissiefactoren van de machines zoals volgen uit de normen en (beperkt) uitgevoerde metingen.

In het kader van het informeren en onderbouwen van beleid en andere maatregelen om de milieu-impact van mobiele machines te verminderen, is het van belang het inzicht in het machinepark en de inzet daarvan verder te blijven verbeteren.

Eind 2021 is een update geweest van het EMMA model op basis van nieuwe inzichten (waaronder nieuwe emissiemetingen, RDW kentekenregistratie en een uitgevoerde inventarisatie van de vlootsamenstelling en inzet (Dellaert, van Mensch, Bhoraskar, & van der Mark, 2021)). Ten gevolge van de nieuwe inzichten zijn de totale berekende emissies gestegen. Dit komt onder andere door de toevoeging van nieuwe machinecategorieën (zoals lichtmasten) en een verhoging van het aantal actieve machines, mede doordat machines langer gebruikt worden dan voorheen ingeschat. Daarnaast zijn er veranderingen doorgevoerd op basis van nieuwe inzichten in het aantal draaiuren (hoger bij nieuwe machines, lager bij oude machines).

De bovengenoemde updates aan het EMMA model resulteren voor zichtjaar 2020 in hogere totale emissies dan in voorgaande jaren. In 2009, toen het model ontwikkeld is, waren de cijfers te relateren aan de inzet van rode diesel voor mobiele werktuigen. De geregistreerde inzet van rode diesel is gebruikt om de met het model berekende waarden voor brandstofverbruik en CO₂-uitstoot te valideren. Tegenwoordig wordt er geen rode diesel meer ingezet voor mobiele werktuigen en valt het dieselvebruik in de bouw niet te onderscheiden van het dieselvebruik van het wegverkeer. De uitkomsten van de nieuwe berekeningen in 2021 laten zien dat het dieselvebruik (van mobiele werktuigen) met circa 20% is toegenomen ten opzichte van de verwachtingen op basis van de oude rekenmethode. Daarop is bij de Taakgroep emissieregistratie besloten om de totale emissies voorlopig terug te schalen naar de verwachte brandstofplas in zichtjaar 2020 op basis van de oude rekenmethode. In deze notitie zijn zowel de geschaalde als ongeschaalde emissies gepresenteerd. Met een betere onderbouwing (meer inzichten dan destijds beschikbaar) van de afwijking met de oude rekenmethode is schalen mogelijk niet meer nodig in toekomstige berekeningen. In 2022 vindt kennisopbouw plaats ten behoeve van een betere onderbouwing.

2.1.2 Toelichting relevantie van categorieën per vermogensklasse

In Tabel 2 zijn de huidige emissiecijfers van de mobiele werktuigen in de bouw gepresenteerd. Hier is onderscheid gemaakt naar geschaalde en ongeschaalde emissies.

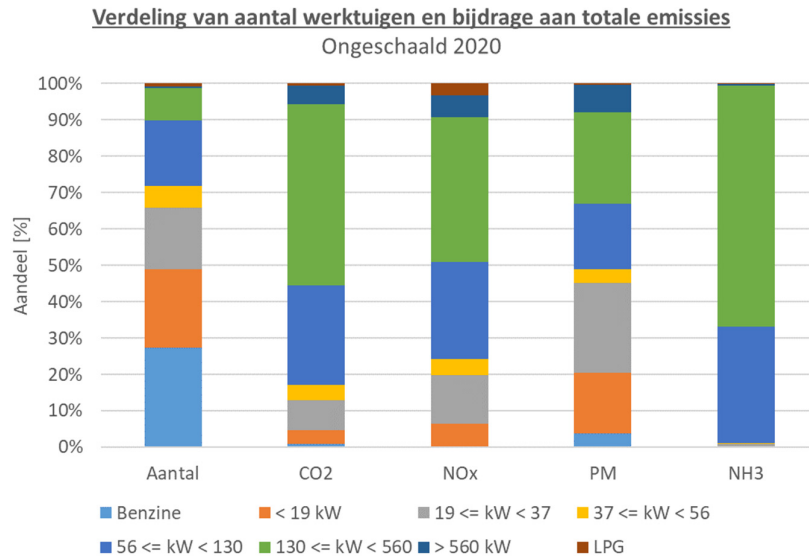
Tabel 2: Totale berekende emissies mobiele werktuigen in 2020.

Stof	Oud	Nieuw - Ongeschaald	Nieuw - Geschaald
CO ₂	1,5 Mton	1,8 Mton	1,5 Mton
NO _x	7,7 kton	11,7 kton	9,9 kton
PM	0,3 kton	0,5 kton	0,4 kton
NH ₃	-	66 ton	54 ton

Vanwege een lange levensduur voor een deel van materieelpark, in combinatie met minder strenge (NO_x) emissielimieten voor het materieel met een motorvermogen van minder dan 56 kW, zal de autonome verjonging naar verwachting in 2025 en 2030 niet zorgen voor een forse daling van de NO_x-emissie (ca. 20% daling in 2030).

Sinds zomer 2020 is de verplichte introductie van Stage V tot twee keer uitgesteld vanwege de COVID-19 pandemie (verordeningen EU/2020/1040 en EU/2021/258). Dit zal ook een vertraging geven van de autonome ontwikkeling naar Stage V.

De relatieve bijdragen van de categorieën aan de emissies en aantallen machines is gepresenteerd in Figuur 1 voor zichtjaar 2020. De hier beschreven categorieën beslaan allerlei verschillende typen mobiele machines (graafmachine, laadschop etc.). Bijlage B geeft een overzicht van de emissiebijdrage per type werktuig volgens EMMA.



Figuur 1: Aandeel van verschillende vermogensklassen mobiele werktuigen in de aantallen machines en in de CO₂-, NH₃-, NO_x- en fijnstofemissies in 2020 volgens EMMA. Machines met benzine als brandstof hebben een maximum motorvermogen van minder dan 19 kW. LPG machines zijn alleen vorkheftrucks en vallen grotendeels in de vermogenscategorie tot 56 kW. De in de legenda aangegeven vermogenscategorieën betreffen alle dieselwerktuigen.

Mini materieel (<19 kW)

Dit is de categorie kleinste machines. Voorbeelden van machines in deze categorie zijn mini gravers, kleine stroomaggregaten, maar bijvoorbeeld ook trilplaten. Van het totale machinepark bestaat 22% uit machines onder 19 kW. Met EMMA is de bijdrage aan de verschillende emissies als volgt berekend: CO₂ (4%), NO_x (6%), PM (17%), NH₃ (0%).

Voor de categorie machines met een motorvermogen onder de 19 kW bestaat voor dieselmotoren alleen de Stage V-norm als emissieklasse. Voorafgaand aan Stage V waren er geen emissie-eisen voor dit type materieel. Een moderne machine met Stage V dieselmotor in dit segment geeft nog steeds hoge emissies vanwege de milde emissielimieten.

De toegestane Stage V NO_x-emissielimieten voor mini materieel zijn bijna een factor 20 hoger dan voor materieel van 56 tot 560 kW.

Deze kleine machines zijn daardoor niet alleen relatief zeer vervuilend, maar zelfs in absolute zin -in grammen per uur- vervuilerder dan grotere machines. Machines met een Stage V motor onder de 19 kW hebben geen roetfilter nodig om aan de emissielimieten te voldoen. Dit heeft een hoge uitstoot van fijnstof tot gevolg. De CO₂-uitstoot van deze categorie is vanwege de kleine motor (en lage verbruik) juist beperkt.

Klein materieel (19 tot 37/56 kW)

De diversiteit in deze categorie is groot. Dit kunnen bijvoorbeeld de wat kleinere graafmachines, laadschoppen en landbouwtrekkers zijn. Maar ook een groot deel van de bronbemelingspompen, generatoren en vorkheftrucks valt in deze categorie. Met EMMA is de bijdrage aan de verschillende emissies als volgt berekend: CO₂ (13%), NO_x (18%), PM (28%), NH₃ (1%). Circa 23% van de machines in de bouw valt binnen deze vermogenscategorie.

De Stage V-emissienorm voor de uitstoot van NO_x is voor materieel in de vermogensklasse 37 tot 56 kW niet veranderd ten opzichte van Stage IIIB. In de vermogenscategorie 19-37 kW is wel een aanscherping geweest, maar de emissielimiet is nog steeds mild. De toegestane Stage V NO_x-emissielimieten voor klein materieel zijn ruim een factor 10 hoger dan voor materieel van 56 tot 560 kW. Deze machines zijn daardoor in vergelijking met grotere machines zeer vervuilend.

De emissielimieten voor fijnstof zijn wel aangescherpt in de Stage V-norm. Voor machines met een motor van meer dan 19 kW is een roetfilter benodigd om de deeltjesaantal limiet te halen. Dergelijke filters zijn zeer effectief in het reduceren van fijnstof. De CO₂-uitstoot van deze categorie is, vanwege het hogere vermogen, hoger dan bij het mini materieel.

In totaal zorgen de categorieën mini en klein materieel voor ongeveer de helft van de NO_x en fijnstof emissies door bouw materieel. Het is daarmee een relevante categorie voor verschoning. Het gaat daarentegen wel om een groot aantal machines dat verschoond moet worden.

Middelgroot (56 tot 130 kW) en groot materieel (130 tot 560 kW)

Ook in deze categorie is de diversiteit groot. Dit kunnen bijvoorbeeld de grotere graafmachines en laadschoppen zijn. Bovendien valt het grootste deel van de landbouwtrekkers (ingezet in de bouw) in deze categorie, maar ook een groot deel van bijvoorbeeld de mobiele kranen, asfalteermachines en bulldozers. In totaal valt 27% van de machines in deze vermogenscategorie. Met EMMA is de bijdrage aan de verschillende emissies als volgt berekend voor middelgroot materieel: CO₂ (27%), NO_x (27%), PM (18%), NH₃ (32%). Voor groot materieel is het aandeel berekend als: CO₂ (50%), NO_x (40%), PM (25%), NH₃ (66%).

De machines in de vermogenscategorie 56-560 kW hebben voor Stage IV en Stage V dezelfde NO_x-emissielimieten. Een overstap van Stage IV naar Stage V heeft daarom voor NO_x-reductie geen effect. De overstap van Stage IIIB naar Stage IV (of V) levert daarentegen wel een forse NO_x-reductie op (vanwege toepassing SCR).

Ook voor deze categorie zijn in Stage V de emissielimieten voor fijnstof dusdanig aangescherpt dat er een roetfilter nodig is (tot 560 kW).

Er zijn ook Stage IIIB en Stage IV machines met roetfilters, maar het exacte percentage daarvan is niet bekend.

Zeer groot materieel (>560 kW)

Voor grotere machines dan 560 kW was er voorafgaand aan Stage V helemaal geen limiet. De emissielimieten voor Stage V voor deze categorie zijn nog steeds vrij mild. De machines met een motorvermogen van meer dan 560 kW hebben geen roetfilter nodig en ook geen SCR katalysator. Grotere generatorsets hebben mogelijk wel een SCR katalysator. Voor CO₂ is deze categorie dominant binnen de categorie groot materieel. Met EMMA is de bijdrage aan de verschillende emissies als volgt berekend voor zeer groot materieel: CO₂ (5%), NO_x (5%), PM (8%), NH₃ (0%).

2.2 Voertuigen ingezet in de bouwlogistiek

Bouwlogistieke voertuigen worden gecategoriseerd volgens de volgende kenmerken (zie Tabel 3):

- Gewichtsklasse
- Europese voertuigcategorie (N1 t/m N3)
- Toegestane maximum massa voertuig
- Inrichting (zie Bijlage C)

Naast de inzet van specifieke bouwvoertuigen, zoals betonmixers of kippers, wordt in de bouw ook gebruik gemaakt van algemene voertuigtypes (bestelauto's, vrachtauto's en trekker-opleggers). Algemene voertuigtypes zijn voertuigtypes die ook voor andere doeleinden dan bouw ingezet in de logistieke sector.

Tabel 3: Categorisering van bouwlogistieke voertuigen. De aantallen betreffen alle voertuigen in de Nederlandse vloot (RDW, jan. '21) binnen deze voertuigtypes, dus ook voertuigen die met een ander doeleinde dan bouwlogistiek worden ingezet. Daarnaast is het aandeel bouw getoond in percentage en aantal voertuigen. Voertuigen met het kenmerk 'utiliteitsvoertuig' betreffen hier een selectie van typisch bouwlogistieke voertuigen op basis van de inrichtingscode van (zie Tabel 34 in de bijlage).

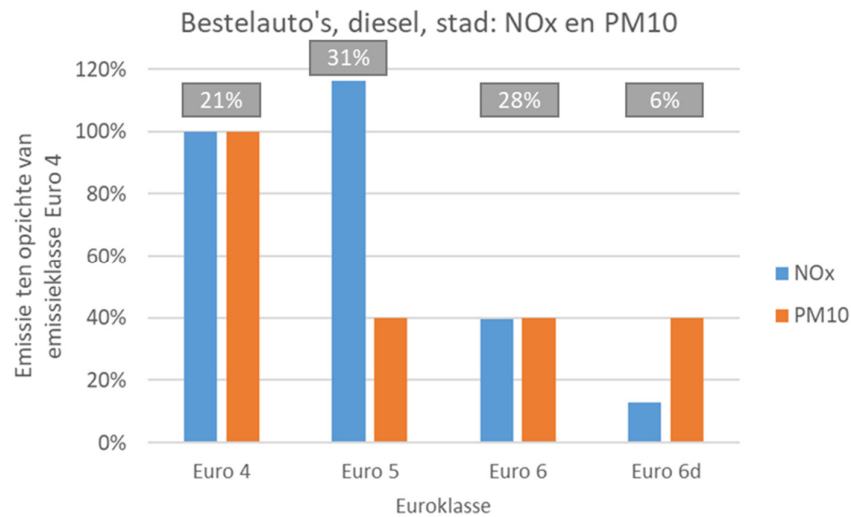
Gewichts-klasse	Voertuigtype	Europese voertuig-classificatie	Toegestane maximum massa voertuig	Inrichting	Aantal voertuigen in totale park	Aandeel bouw (%)	Aandeel bouw (aantal voertuigen)
Licht	Bestelauto	N1	<3,5 ton		1.046.000	25%	256.000
	Trekker-oplegger	N1	<3,5 ton	Opleggertrekker	8.000	22%	2.000
Middelzwaar	Vrachtauto licht	N2	<10 ton		23.000	5%	1.000
	Vrachtauto midden	N2, N3	<=19,5 ton		31.000	6%	2.000
	Utiliteitsvoertuig	N2, N3	<=19,5 ton	Tabel 34	5.000	7%	300
Zwaar	Vrachtauto	N3	>19,5 ton		21.000	20%	4.000
	Utiliteitsvoertuig	N3	>19,5 ton	Tabel 34	16.000	27%	4.000
	Trekker-oplegger	N2, N3	>= 3,5 ton	Opleggertrekker	79.000	10%	8.000
Totaal					1.229.000	23%	277.300

Figuur 21 in de bijlage geeft de samenstelling van de typisch bouwlogistieke voertuigen weer op basis van de voertuigtypes in Tabel 34. Naast de selectie van utiliteitsvoertuigen (Tabel 3) komen de typisch bouwlogistieke voertuigen uit Tabel 34 ook voor in de algemene voertuigcategorieën, zoals bestelauto's en vrachtauto's.

In de figuren in de bijlage (Figuur 22 – Figuur 27) worden verschillende kenmerken (emissiestandaard, brandstofsoort, leeftijd voertuig) getoond van de voertuigen uit Tabel 3. Bij de kenmerken is geen onderscheid gemaakt of deze voertuigen wel of niet voor bouwlogistiek worden ingezet. Uit deze analyse volgt dat tweederde van deze selectie van het Nederlandse wagenpark emissieklasse Euro 5/V of hoger heeft. Ongeveer 0,6% is zero-emissie (energiedrager is elektriciteit of waterstof). Het grootste aantal voertuigen zijn bestelwagens (circa 97%). Daaruit blijkt dat de transitie naar zero-emissie in deze sector nog nihil is en slechts deels zichtbaar is in de bestelauto's.

Figuur 28 en Figuur 29 laten de verhoudingen van emissiekenmerken zien tussen de verschillende voertuigtypes van de CO₂- en NO_x-uitstoot per kilometer in de stad. Dit is een gewogen gemiddelde op basis van de eigenschappen (leeftijd, Euroklasse, brandstof) van de voertuigen in de vloot per voertuigtype. De verhoudingen kunnen veranderen bij nieuwe voertuigen. De uitstoot op de bouwplaats zelf en de onzekerheid die daarbij komt kijken met betrekking tot stationair draaien is hierin niet meegenomen. Verschillende voertuigtypes die per kilometer een relatief hoge uitstoot hebben (bijvoorbeeld: asfaltkipper, mobiele kraan of betonpomp), komen relatief weinig voor in de vloot. Dit is terug te zien in het aandeel emissies gekoppeld aan deze voertuigtypes (zie Figuur 30 en Figuur 31). Voor de veel voorkomende algemene voertuigtypes (bestelauto's, trekker-opleggers, vrachtauto's) geldt juist dat deze ondanks relatief gunstige emissiekenmerken een groot aandeel hebben in de totale emissies door de grote aantallen en derhalve ook een belangrijke categorie voor verduurzaming vormen.

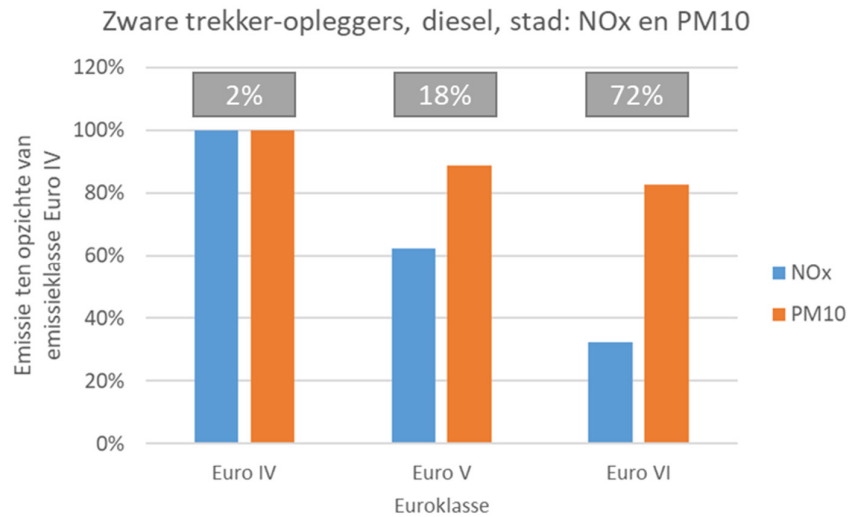
Als wordt ingezoomd op de categorieën diesel bestelauto's en zware trekker-opleggers (Figuur 2 en Figuur 3) dan wordt inzicht verkregen in de ontwikkeling van de NO_x- en PM₁₀-emissies per kilometer vanaf Euroklasse 4/IV. Figuur 2 en 3 laten de emissiefactoren zien in de stad, voor buitenweg en snelweg is echter een vergelijkbare trend zichtbaar.



Figuur 2: Relatieve emissiefactoren (NO_x en PM₁₀) ten opzichte van Euro 4 voor bestelauto's (diesel) in de stad (emissiefactoren voor zichtjaar 2020). De PM₁₀-emissiefactoren bevatten zowel uitlaatemissies als slijtage emissies (remmen, banden, wegdek). De grijze boxen geven per emissieklasse het aandeel voertuigen in de vloot weer. Let op, deze aandelen boxen tellen niet op tot 100%, omdat voertuigen met een emissieklasse pré-Euro 4 niet in dit overzicht zijn meegenomen. Zie hoofdstuk 3.4 voor een toelichting op de schone dieselmotor (Euro 6d).

Uit Figuur 2 is op te maken dat voor bestelauto's een forse verschoningslag is gemaakt op het gebied van PM₁₀ (vanaf Euro 5 ca. naar 40% uitstoot ten opzichte van Euro 4), dit is het gevolg van de toepassing van roetfilters. De getoonde emissiefactoren bevatten zowel emissies van de uitlaat als vanuit slijtage (remmen, banden, wegdek). De reductie op uitlaatemissies is daardoor groter dan zichtbaar in het figuur, de slijtage emissies verminderen immers niet door toepassing van een roetfilter.

Voor NO_x is die verschoning later op gang gekomen. Vanaf Euro 6d Temp (2018) zijn bestelauto's substantieel schoner geworden op het vlak van de NO_x-emissies (Euro 6 naar 40% uitstoot ten opzichte van Euro 4 en Euro 6d naar 13% uitstoot ten opzichte van Euro 4). Met Euro-6d in 2020 is er nog een verdere verbetering. De autonome verschoning zal daarom de komende 10 jaar naar verwachting zorgen voor forse reducties in deze voertuigcategorie voor NO_x en fijnstof.



Figuur 3: Relatieve emissiefactoren (NO_x en PM₁₀) ten opzichte van Euro IV voor zware trekker-opleggers (diesel) in de stad (emissiefactoren uit 2020). De PM₁₀ emissiefactoren bevatten zowel uitlaatemissies als slijtage emissies (remmen, banden, wegdek). De grijze boxen geven per emissieklasse het aandeel voertuigen in de vloot weer. Let op, deze aandelen tellen niet op tot 100%, omdat voertuigen met een emissieklasse pré-Euro IV niet in dit overzicht zijn meegenomen. Zie hoofdstuk 3.4 voor een toelichting op de schone dieselmotor (Euro VI).

Voor zware trekker-opleggers (Figuur 3) is ook een ontwikkeling gemaakt, met name op het gebied van NO_x (Euro VI naar 32% uitstoot t.o.v. Euro IV). Voor PM₁₀ is voor zware dieselveertuigen een substantiële daling waarneembaar over de opvolgende emissieklassen. Vanaf Euro VI heeft elke (diesel)vrachtauto een roetfilter (mits niet verwijderd), dat zorgt voor lage fijnstof uitlaatemissies.

2.3 Emissiecijfers bouwlogistieke voertuigen

De methodiek om tot de totale jaarlijkse uitstoot van bouwlogistieke voertuigen te komen bestaat uit twee onderdelen:

1. De totale emissies van al het bestel- en vrachtautoverkeer op basis van de Emissieregistratie
2. Het bepalen van het aandeel van de vrachtwagens die ingezet worden in de bouw (aandeel bouwvoertuigen)

Door deze twee onderdelen samen te voegen kan een inschatting worden gegeven van de emissies van de wegvoertuigen in de bouwsector.

De emissies van het bestel- en vrachtautoverkeer, zoals in de Emissieregistratie zijn vastgelegd, zijn per voertuigcategorie⁴ berekend op basis van aantal geregistreerde voertuigen * aantal geregistreerde km's * emissiefactor per specifieke voertuigcategorie. Voor het bepalen van het aandeel voertuigen dat aan de bouw wordt toegerekend, wordt rekening gehouden met een gemiddeld aantal gereden kilometers per voertuigcategorie (VERSIT-klasse) en de bijbehorende specifieke emissiefactor.

⁴ Voertuigcategorie is gebaseerd op type voertuig gecombineerd met emissienorm (Euro-klasse).

Bij het bepalen van het aandeel van de emissies voor specifiek de bouw is uitgegaan van een schatting van het aantal voertuigen dat ingezet wordt in de bouw per voertuigcategorie. De totale emissies per voertuigcategorie uit de Emissieregistratie worden verdeeld naar 'bouw' en 'niet-bouw' op basis van deze verhouding per voertuigcategorie. De aanname daarbij is dat binnen een voertuigcategorie sprake is van een evenredige inzet van de 'bouw' en 'niet-bouw' voertuigen. De schatting van het aandeel 'bouw' komt tot stand op basis van de geregistreerde economische bedrijfsactiviteit (SBI-code) van de geregistreerde eigenaar van het voertuig. De werkwijze en aannames die daarbij gemaakt worden, worden in de volgende paragrafen nader toegelicht.

De huidige beschikbare brondata waarop de emissieberekeningen zijn gebaseerd vertoont een aanzienlijke mate van onvolledigheid en onzekerheid. Dit wordt in de volgende paragrafen nader toegelicht (met name paragraaf 2.3.3.). Wat daarvan de impact is op de resultaten wordt getracht inzichtelijk te maken door voor verschillende scenario's een gevoeligheidsanalyse uit te voeren (paragraaf 2.3.4.). Uiteindelijk resulteert dit in een bandbreedte op het aandeel emissies bouwlogistiek (wegvoertuigen) op het geheel van logistiek (wegvervoer) van -3% tot +5% (zie tabel 4). De geconstateerde onvolledigheid en onzekerheid in de brondata gaan ook een rol spelen bij het monitoren van het effect van toegepaste maatregelen. Dit betekent dat er ook een aanzienlijke mate van onzekerheid blijft bestaan in de impact van het beleid. Om dit te voorkomen wordt aanbevolen om een programma te starten tot betere monitoring en registratie van brongegevens voor bouwlogistiek wegvervoer.

2.3.1 *Aandeel bouwvoertuigen*

Om een inschatting te maken van het totale aandeel bouwgerelateerde emissies zijn de SBI-codes van zakelijke geregistreerde Nederlandse kentekens geanalyseerd. Deze zakelijke kentekens⁵ betreffen in totaal ongeveer 60% van alle wegvoertuigen, welke vervolgens zijn ingedeeld in de categorieën: 'Bouw' & 'Geen bouw'. De indeling in deze categorieën is gebaseerd op de SBI-codes die gekoppeld zijn aan de KvK-registratie van de kentekens. Daarnaast zijn er SBI-codes aangemerkt als 'Mogelijk Bouw' ten behoeve van een gevoeligheidsanalyse. In Bijlage A is de indeling van de SBI codes te vinden.

Elke KvK-registratie kan tot drie verschillende SBI-codes behoren, daarom heeft ieder voertuig één, twee of drie verschillende SBI-codes.

De indeling is als volgt:

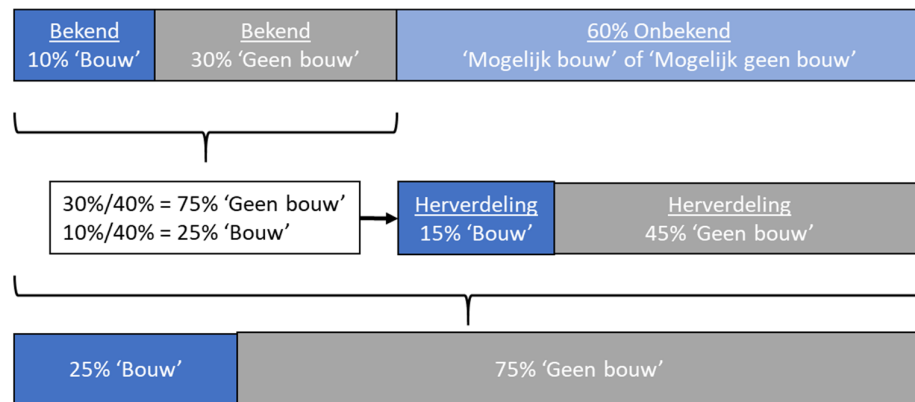
- 1 SBI-code: voertuig telt 1x mee in die categorie.
- 2 SBI-codes: voertuig telt in elke categorie voor 1/2x mee.
- 3 SBI-codes: voertuig telt in elke categorie voor 1/3x mee.

Door deze indeling kan het voorkomen dat bepaalde voertuigen voor een deel in de bouw worden ingezet en voor een deel buiten de bouw. Voor de toedeling naar bouwategorisering worden de voertuigen in iedere SBI-code evenredig meegeteld, er is geen weging toegepast naar SBI-code 1,2 of 3.

⁵ In verband met privacywetgeving ontbreken de voertuigen van ZZP'ers/freelancers in de dataset.

De groep 'Mogelijk Bouw' bestaat uit voertuigen waarvan niet met zekerheid kan worden gezegd in welke sector ze worden ingezet (denk aan: 'transport van goederen over de weg, financiële holdings, uitleenbureaus etc.). Deze groep wordt in dezelfde verhouding als van de wel bekende groep voertuigen meegenomen in het bepalen van het aandeel bouw.

Met bovenstaande aanpak is voor elk kenteken de mate waarin deze wordt ingezet in de bouw ingeschat. Dit wordt vervolgens geaggregeerd naar VERSIT-klasse⁶. De uitkomst van deze analyse is dus een aandeel van de inzet in de bouw per VERSIT-klasse. Zie Figuur 4 voor een fictief rekenvoorbeeld.



Figuur 4: Visualisatie van de indeling 'Bouw', 'Geen bouw' en 'Mogelijk bouw' op basis van de SBI methodiek.

Een aantal voertuigrichtingen is handmatig aangemerkt als 'niet bouw', het gaat daarbij om;

- Ambulance
- Bergingsvoertuig
- Brandweerwagen
- Gepantserd voertuig
- Kampeerwagen
- Kantoorwagen
- Lijkwagen
- Medische hulpwagen
- Straatveegwagen
- Straatveger reiniger rioolzuiger
- Veewagen
- Voor vervoer boten
- Voor vervoer zweefvliegtuigen
- Vuilniswagen

2.3.2 Totale emissies bestel- en vrachtauto's

Als bron voor de totale jaarlijkse emissies in Nederland van bestel- en vrachtauto's in de hele logistieke sector worden detailgegevens van de Emissieregistratie gebruikt. De totale emissies zijn voor elke VERSIT-klasse bekend.

⁶ Deze klasse deelt de voertuigen in op basis van de belangrijkste emissie-verklarende variabelen als gewicht, brandstof en euroklasse (zie ook (Eijk, et al., 2020)). Op basis van de VERSIT+ klasse zijn per voertuig de emissiefactoren bepaald.

Door deze data te koppelen aan het eerder gevonden aandeel bouw per VERSIT-klasse kunnen de totale bouw-gerelateerde emissies worden ingeschat.

Tabel 4: Inschatting van de emissies gerelateerd aan bouwlogistiek op basis van de SBI-analyse.

Categorie	CO ₂ (Mton)	NO _x (kton)	NH ₃ (ton)	PM ₁₀ (ton)
Lichte voertuigen (N1)	1,0	3,4	21	143
Zware voertuigen (N2 + N3)	0,8	2,9	61	102
Totaal	1,8	6,3	82	245
Totaal logistiek weg (bron: Emissieregistratie)	10,5	34,9	624,0	1327,3
Aandeel bouwlogistiek (weg)	17%	18%	13%	18%
<i>Resultaat gevoeligheidsanalyse</i>	<i>14% - 21%</i>	<i>15% - 22%</i>	<i>10% - 18%</i>	<i>16% - 23%</i>

2.3.3 Aannames en beperkingen bij de gehanteerde methodiek

De methodiek voor het bepalen van de emissiecijfers van wegvoertuigen kent de volgende beperkingen:

- Niet alle voertuigen met een inzet in logistiek zijn gekoppeld aan de KvK-data (dit gaat om ca. 570.000 kentekens) in verband met privé-eigenaren of ZZP'er/freelancers die wel bij de KvK staan ingeschreven maar wegens privacy-redenen uit de data zijn gelaten. Er is impliciet aangenomen dat de verdeling van de onbekende voertuigen gelijk is aan die van de bekende voertuigen.
- Economische activiteit (SBI-code) zegt iets over de eigenaar van het voertuig, en niet over de gebruiker. Hierdoor vallen alle voertuigen met SBI-code 'lease' in de onbekend categorie en worden deze meegenomen op basis van de verhouding van de wel bekende voertuigen.
- Elk kenteken kan tot 3 SBI-codes hebben. Aangenomen is dat alle SBI-codes die zijn toegewezen aan het voertuig evenveel meewegen qua aandeel in de inzet, waarbij de som optelt tot één.
- Van meerdere SBI-codes is duidelijk dat de voertuigen die eraan gekoppeld zijn wel voor logistieke activiteiten worden ingezet, maar het is onbekend of de voertuigen in de bouwsector worden ingezet en hoe groot de inzet in de bouw is ten opzichte van andere logistieke segmenten. Dit zijn SBI-codes van bijvoorbeeld financiële holdings, leasemaatschappijen of verhuurbedrijven. Omdat de daadwerkelijke inzet van deze groep voertuigen niet te achterhalen is aan de hand van SBI-codes wordt de werkhypothese gehanteerd dat de verhouding 'bouw' en 'geen bouw' in deze groep gelijk blijft aan de verhouding van de wel bekende SBI-codes van deze groep voertuigen. Dit kan in de praktijk sterk afwijken (bijvoorbeeld omdat er in sommige bouwonderdelen zoals afbouw van woningen wellicht relatief veel wordt uitbesteed). Op deze onzekerheid is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.
- Er wordt aangenomen dat de inzet van de voertuigen in de bouw gelijk is aan de gemiddelde inzet per VERSIT-klasse. Bijvoorbeeld: indien bouwvoertuigen gemiddeld gezien vaker op binnenstedelijke wegen rijden dan niet-bouw gerelateerde voertuigen, dan is dit niet meegenomen in de emissies van bouwlogistiek.
- Hulpfuncties van voertuigen (bijv. het gebruik van een kraan op een kraanwagen) zijn niet meegeteld in de emissies.

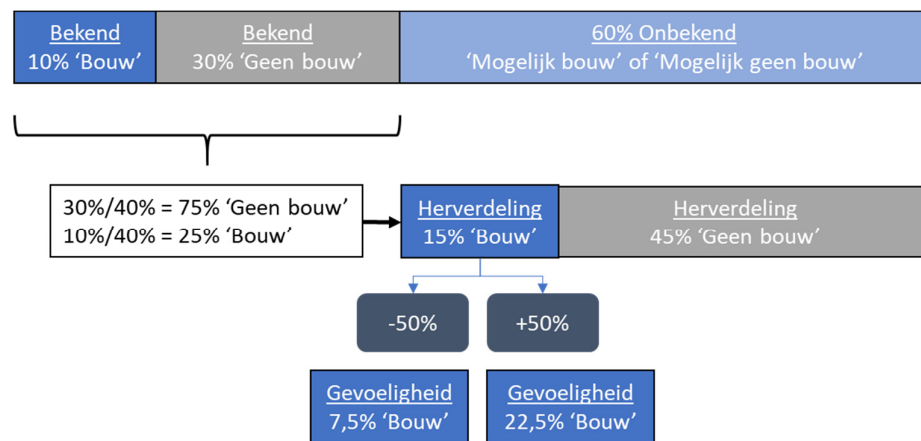
Bovenstaande aannames en beperkingen behorende bij de gehanteerde methodiek geven aan dat de uitkomst van het bepalen van het aandeel bouw een mate van onnauwkeurigheid in zich heeft. Dit is echter niet te voorkomen met de huidige kennis en informatie die beschikbaar is binnen de bouwsector. Hoe groot deze onnauwkeurigheid is proberen we in de volgende paragrafen inzichtelijk te maken. Om tot betere informatie en inzichten te komen, is een initiatief nodig om tot betere registratie van de inzet van voertuigen in specifieke bedrijfstakken te komen.

2.3.4 Gevoeligheidsanalyse

Er zijn drie gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de impact van bepaalde onzekerheden in de gehanteerde methodiek te duiden.

2.3.4.1 Herverdeling 'Mogelijk bouw'

In de basis analyse is de verdeling 'Bouw' & 'Geen Bouw' in de groep 'Mogelijk Bouw' als gelijk verondersteld en hierop geëxtrapoleerd. In deze gevoeligheidsanalyse wordt het effect van deze aanname getoetst. Binnen de groep mogelijk bouw is het aandeel dat wordt toegeschreven aan de 'Bouw' met 50% verhoogd of verlaagd, zie Figuur 5.



Figuur 5: Visualisatie van de gevoeligheidsanalyse.

In onderstaande figuur is een rekenvoorbeeld visueel weergegeven. Het totale effect op de emissies is ongeveer $\pm 20\%$ en is samengevat in Tabel 5.

Tabel 5: Resultaten van gevoeligheidsanalyse 'effect van mogelijk bouw'.

Categorie	CO ₂ (Mton)	NO _x (kton)	NH ₃ (ton)	PM ₁₀ (ton)
Lichte voertuigen (N1)	0.8 – 1.1	3.0 - 3.8	18 – 24	125 - 161
Zware voertuigen (N2 + N3)	0.6 – 1.3	2.2 – 3.6	43 – 79	75 – 128
Totaal	1.4 – 2.1	5.1 – 7.4	61 – 103	200 – 288

2.3.4.2 Handmatige indeling 'Bouw inrichtingen'

Voor een aantal voertuiginrichtingen kan met een verhoogde zekerheid worden gezegd dat ze voor het grootste gedeelte in de bouw ingezet worden, ondanks dat er meerdere SBI-codes aan gekoppeld zijn.

In deze gevoeligheidsanalyse is het aandeel bouw op 100% gezet van de volgende voertuiginrichtingen (voor N2 & N3),

- Achterwaartse kipper
- Asfaltkipper
- Betonpomp
- Betonmixer
- Boorwagen
- Driezijdige kipper
- Kipper
- Kraanwagen
- Mobiele kraan
- Open laadvloer
- Open met kraan
- Resteelwagen
- Tweezijdige kipper
- Voertuig met haakarm

Het effect van deze aanpassing is weergegeven in onderstaande tabel,

Tabel 6: Resultaten van gevoeligheidsanalyse 'handmatige indeling 'Bouw inrichtingen''.

Categorie	CO ₂ (Mton)	NO _x (kton)	NH ₃ (ton)	PM ₁₀ (ton)
Lichte voertuigen (N1)	1,0	3,4	21	143
Zware voertuigen (N2 + N3)	1.1	4.1	90	150
Totaal	2.1 (+15%)	7.5 (+20%)	111 (+19%)	293 (+35%)

2.3.4.3 Gevoeligheid aandeel bestelauto's en trekker-opleggers

De derde gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op het aandeel bestelauto's en trekker-opleggers. Deze voertuigcategorieën zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van de emissies in de analyse. Bestelauto's zorgen voor circa 50% van de totale CO₂, PM en NO_x uitstoot en 25% van de NH₃ emissies (Tabel 7). De trekker-opleggers zijn een subgroep van de zware voertuigen en tegelijkertijd worden deze groepen ook veelal buiten de bouw ingezet. Bestelauto's worden ook voor woonwerk verkeer of privé buiten werktijd gebruikt en trekker-opleggers kunnen ook voor transport in andere sectoren worden ingezet.

Tabel 7: Aandeel van de emissies in de basisanalyse.

Categorie	CO ₂ (%)	NO _x (%)	NH ₃ (%)	PM ₁₀ (%)
Bestelauto's	54%	54%	25%	58%
Trekker-opleggers	28%	21%	45%	20%
Overig	18%	15%	30%	22%

Aangezien deze voertuigcategorieën dominant zijn voor de emissies in de bouwlogistiek, volgens de SBI analyse, is de uitkomst ook gevoelig voor meer of minder bestelauto's of trekker-opleggers in de bouw. Wanneer het aantal bestelauto's in de bouw met 50% verminderd wordt, betekent dat ongeveer een kwart minder emissies (-13% voor NH₃) dat toegeschreven kan worden aan de bouw, zie Tabel 8.

Tabel 8: Effect 50% minder aan bouw toegerekende bestelauto's.

Categorie	CO ₂ (Mton)	NO _x (kton)	NH ₃ (ton)	PM ₁₀ (ton)
Bestelauto's	0,5	1,7	11	72
Trekker-opleggers	0,8	2,9	61	102
Totaal	1,3 (-27%)	4,6 (-27%)	72 (-13%)	174 (-29%)

De gevoeligheid van het aandeel trekker-opleggers is weergegeven in Tabel 9. Bij deze analyse is het aandeel trekker-opleggers in de bouw verhoogd met 50%. Daarbij nemen de totale bouw emissies afkomstig van wegtransport toe met ca. 10% voor CO₂ en NO_x.

Tabel 9: Effect 50% meer aan bouw toegerekende trekker-opleggers.

Categorie	CO ₂ (Mton)	NO _x (kton)	NH ₃ (ton)	PM ₁₀ (ton)
Bestelauto's	1,0	3,4	21	143
Trekker-opleggers	1,1	3,5	80	127
Totaal	2,0 (+14%)	6,9 (+11%)	101 (+23%)	269 (+10%)

In de TNO notitie "*NO_x-reductiedoel, -pad en beleidspakket bouwsector*" is beschreven dat 22% van de voertuigkilometers (bestelwagens en vrachtwagens) bouw gerelateerd zijn (Harmsen et al., 2020). Hiervoor is gebruik gemaakt van een het CBS basisbestand goederenvervoer en een rapport van Buck Consultants International (Buck Consultants International, 2020) waarin de aandelen van verschillende goederenstromen, die gekoppeld zijn aan de bouw, in kaart zijn gebracht.

In de studie van Buck Consultants International is op basis van een andere methodiek getracht het aandeel bouw te schatten, waarbij is uitgegaan van andere bronbestanden om het aandeel van bouw in de emissies (enkel CO₂) te bepalen. Dit betreft maatwerkdata van het CBS over bouwgerelateerd transport (aantal ritten en vervoerd gewicht voor 23 bouwgerelateerde productgroepen gebaseerd op enquêtes over een periode van 2016 t/m 2018) gecombineerd met een correctiefactor voor het aandeel bouw (gebaseerd op de studie Logistieke Marksegmenten).

In de uitkomst van de analyse die is gedaan voor de notitie *NO_x-reductiedoel, -pad en beleidspakket bouwsector* komen de totale emissies door wegverkeer in de bouw hoger uit dan de uitkomst van onze huidige analyse op basis van de SBI-codes (vorige notitie: 8,1 kton NO_x voor zichtjaar 2020, versus 6,3 kton NO_x voor zichtjaar 2020 in de huidige analyse). Dit verschil zit in de basis voor de berekeningen, waarbij in de vorige studie als uitgangspunt goederenvervoer wordt genomen en in de TNO benadering de voertuigen. Dit resulteert met name in een verschil in de inzet van het zware vrachtvervoer, die volgens de nieuwe methode veel lager uitvalt dan bij de vorige.

Daarnaast speelt de definitie van bouwlogistiek een rol bij het bepalen van het aandeel bouw. De definitie van bouwlogistiek hangt samen met de mate waarin goederensoorten een toepassing hebben in bouw en het deel van de keten waarin voertuigen worden ingezet (in de gehele keten versus alleen activiteiten in de opdracht van bouwbedrijven). Dit zorgt ook voor een bepaalde onzekerheidsmarge in de cijfers.

Bijvoorbeeld: export, levering aan winkels, transport van halffabricaten, monteurs van utiliteitsbedrijven, etc. vallen in de strikte zin mogelijk niet onder bouwlogistiek, waarop maatregelen aan kunnen grijpen. In de huidige analyse van het bepalen van het aandeel bouw is de afbakening aangehouden van de integrale logistieke keten (inclusief toelevering aan groothandel en halffabricaten en de onderhoudsketen) aangezien we in de broninformatie niet kunnen differentiëren naar waar een voertuig is ingezet. De gevoeligheidsanalyses geven hier enig houvast in hoeverre een ruimere of smallere interpretatie van bouwlogistiek de emissieschattingen beïnvloedt.

Definitie van aandeel bouwlogistiek

Zoals hierboven kort toegelicht, is er geen eenduidige manier om het aandeel in emissies gerelateerd aan bouwlogistiek vast te stellen, omdat bouwlogistiek niet als een aparte categorie kan worden onderscheiden binnen bestaande goederenvervoerstatistieken en de Emissieregistratie. Uit recente onderzoeken van TNO voor Topsector Logistiek (te verschijnen) en WE Consult (te verschijnen) over stikstofprestatie in de bouwlogistiek woningbouw, blijkt dat er slechts weinig zicht is op de emissieprestatie van de bouwlogistiek als geheel en de verdeling hiervan naar onderliggende sectoren, en activiteiten, zoals woning- en utiliteitsbouw en de verschillende elementen van de GWW.

Net als bij de kennisleemte rondom de omvang en het gebruik van bouwmachines is hierdoor ook beperkt zicht op de mate waarin verschillende type oplossingen bijdragen aan reducties in de verschillende segmenten van de bouw. Om deze kennislacune in te kunnen vullen kan vanuit microdata (bijvoorbeeld bedrijfsdata of data voor individuele bouwprojecten) beter inzicht worden verkregen van de logistieke vervoersstromen en bijbehorende emissiedata behorende bij de bouw. Op basis hiervan kunnen normcijfers voor specifieke bouwactiviteiten worden ontwikkeld (bijvoorbeeld de gemiddelde uitstoot per project van een bepaalde omvang) en kunnen de schattingen van de totale uitstoot in de bouw worden verscherpt. Hiermee kan direct ook goed inzichtelijk worden gemaakt welke type maatregelen het beste werken voor een bepaald bouwsegment.

2.4 Spoorwerktuigen

Deze paragraaf gaat over spoor specifieke werktuigen die worden toegepast voor de aanleg en onderhoud van het spoor. Dit gaat bijvoorbeeld om werkzaamheden rondom ballast, dwarsliggers, spoorstaven en de bovenleiding. Spoorwerktuigen zijn veelal specialistische machines. Er is een grote verscheidenheid aan materieel. Rondom het spoor vinden ook bouwwerkzaamheden plaats met de meer regulier mobiele werktuigen zoals beschreven in paragraaf 2.1. Dit gaat bijvoorbeeld om kunstwerken, tunnels en werkzaamheden op de treinstations.

Grofweg kan onderscheid gemaakt worden in het onderstaande spoor specifieke materieel (bron: ProRail):

- Werktreinen: een werktrein is (vaak) een diesellocomotief die bedoeld is voor het vervoer van bouw- of onderhoudsmaterialen. Deze kunnen zowel ingezet kunnen worden voor bouwwerkzaamheden maar ook voor regulier goederenvervoer.

- **Specialistische spoorwerktuigen:** dit gaat bijvoorbeeld om stopmachines, sporkranen, ombouwtreinen, inspectie- en meettreinen, slijp- en freestienen en hoogwerkers.
- **Rail-weg voertuigen:** dit gaat bijvoorbeeld om krollen (graafmachine op rails) en lasbussen. Met name de krol wordt bij spoorwerkzaamheden vaak ingezet.
- **Spoorespecifiek klein materieel:** zoals kraagboutmachines en (kleine) slijp- en freesmachines en schroef- en boormachines.

Op basis van deze materieeltypen wordt de onderstaande categorisering voorgesteld.

Tabel 10: Categorisatie spoomaterieel.

Categorie	Type materieel	Motorvermogen
Zeer groot	Werktreinen & zeer grote specialistische spoorwerktuigen	560 tot 2000 ⁷ kW
Groot	Specialistische spoorwerktuigen groot & Rail-weg voertuigen	130 tot 560 kW
Middelgroot	Specialistische spoorwerktuigen middel	56 – 130 kW
Klein	nvt	19 – 56 kW
Mini	Klein materieel (benzine en diesel)	<19 kW

Een grove inschatting op basis van gegevens door ProRail, en enkele grotere aannemers in de railinfrastructuur (en een inschatting van hun marktaandeel) leidt tot een inschatting van de onderstaande aantallen machines per categorie:

Tabel 11: Aantal spoormachines per categorie.

Categorie	Aantal machines*
Zeer groot	Ca. 40
Groot	Ca. 65
Middelgroot	Ca. 120
Mini	Ca. 1000

* *Vanwege een gebrek aan registratie, zijn de exacte aantallen onzeker.*

Emissiecijfers spoorwerktuigen

Het beeld over de leeftijd van de machines per categorie is niet compleet. Het materieel is echter specialistisch en daarom over het algemeen relatief oud. Bij diverse machines vindt wel hermotorisering plaats, hierbij wordt echter hetzelfde type motor geplaatst, hierdoor is er geen reductie van emissies. Het grootste deel van het materieel waarvan de leeftijd wel bekend is, is van voor 2006. Slechts een klein deel van het materieel waarvan de leeftijd bekend is, is van na 2011. Dit betekent dat er nauwelijks dieselmaterieel is met een roetfilter of SCR katalysator, ofwel, hoge NO_x en fijnstof emissies per machine. Door de grootte van het materieel is de CO₂ uitstoot per machine ook hoog.

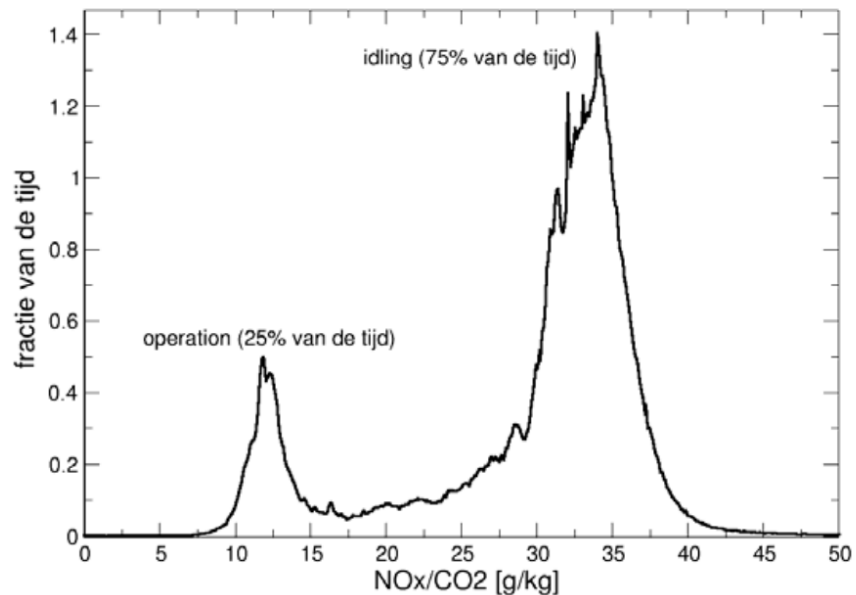
Er is nu ingeschat dat het middelgrote tot aan het zeer grote materieel, in de meeste gevallen, gemiddeld niet meer dan 1000 uur per jaar wordt ingezet, de inzet varieert echter per type machine.

⁷ Indien het motorvermogen van meerdere hulpmotoren bij elkaar wordt opgeteld, kan het gecombineerde motorvermogen oplopen tot ca. 3500 kW (bij enkele machines).

Zo worden bijvoorbeeld rail hoogwerkers (ca. 1600 uur) en diesellocomotieven (ca. 2400 uur) meer ingezet, en bijvoorbeeld een kettinghor minder (ca. 300 uur), Klein materieel wordt doorgaans minder uren per jaar ingezet, de inschatting daarvan is nu 400 uur per jaar.

Een andere belangrijke parameter die veel invloed op emissies heeft is de motorbelasting. TNO heeft in 2017 metingen uitgevoerd aan twee diesellocomotieven, welke werd toegepast voor spoorgoederenvervoer ⁸. Onderstaand figuur laat twee belangrijke elementen zien; 1) groot aandeel 'idling', ofwel stationair draaien. 2) de emissies bij stationair draaien zijn hoog.

Figuur 6 laat zien dat sommige, vooral grotere en oudere motoren zijn geoptimaliseerd op een laag brandstofverbruik bij stationair draaien. In dat geval zijn de NO_x emissies bij stationair draaien, per liter diesel, soms wel drie keer zo hoog als bij hogere motorlast, maar het brandstofverbruik is dan laag. In combinatie met een groot deel stationair draaien vinden de NO_x emissies van deze motoren voor de helft plaats bij lage last. Of dit ook het geval is voor werktreinen en/of specialistische spoorwerktuigen is momenteel niet bekend. Meer informatie is benodigd om de gemiddelde motorbelasting te kunnen bepalen. Meer informatie over het brandstofverbruik per uur zou hiervoor al een eerste stap kunnen zijn, al dan niet via detailmetingen. Voor de emissieberekening is rekening gehouden met een relatief lage motorbelasting (voor het meeste materieel rond de 30% als grove inschatting).



Figuur 6: De NO_x/CO₂ verhouding van een diesellocomotief⁷. Hoge NO_x-emissies bij 'idling', ofwel stationair draaien. Stationair draaien kwam bij deze diesellocomotief zeer veel voor.

Op basis van de typen en aantallen machines, de draaiuren per jaar, en de gemiddelde motorbelasting zijn de onderstaande emissies ingeschat.

⁸ Inzicht in het energieverbruik, de CO₂ uitstoot en de NO_x-uitstoot van het spoorgoederenvervoer, 2017 TNO rapport R11414

In de berekening zitten veel aannames vanwege veel onbekendheid voor wat betreft de vlootsamenstelling en inzet. Meer detailinformatie over uren inzet, en liters verbruikte diesel kan de nauwkeurigheid van de emissieberekening verbeteren. Vanwege het grotere en oudere materieel, kunnen de emissies lokaal zeer hoog zijn.

Tabel 12: Jaarlijkse emissies* afkomstig uit van spoormaterieel.

NO _x [ton]	PM [ton]	CO ₂ [kton]
140 - 215	4 – 6,5	17 – 25

*) Vanwege een gebrek aan registratie (van zowel draaiuren, aantallen machines, en brandstofverbruik), zijn de emissies een grove inschatting.

Dit is het materieel dat ingezet wordt op het spoor bij onderhoud en bouw (erkende bedrijven). Hieronder vallen niet (algemeen) grondverzet, bouw van kunstwerken, werkzaamheden op stations, gebiedsonderhoud, etc.

De grootste bijdragen van de emissies komen door de werktreinen, daarna volgen de stopmachines en de krollen. Gezien de hoge gemiddelde levensduur van het materieel zal de autonome verjonging van het park langzaam verlopen. Daarnaast is de emissiewetgeving voor diesellocomotieven minder streng dan voor mobiele werktuigen (zie paragraaf 3.5.3). De langzame autonome verjonging en de mildere emissiewetgeving voor een deel van het materieel zorgt ervoor dat er geen grote autonome reductie van de emissies wordt verwacht in 2030. Een verbeterd inzicht in de levensduur, en meer details over de toepaste motoren zijn benodigd om een kwantitatieve inschatting voor 2030 te maken.

3 Verschoningsopties

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de mogelijke verschoningsopties voor bouwmachines, voertuigen die worden toegepast voor de bouwlogistiek en spoorwerktuigen. Daarna volgt een overzicht met specifieke verschoningsopties per categorie.

In de bijlage zijn de verschoningsopties en toekomstige ontwikkelingen voor de verschillende categorieën weergegeven als een mogelijke tijdlijn. Tabel 13 geeft een globaal overzicht van waar de verschoningsopties de meeste impact op hebben op het gebied van luchtverontreinigende stoffen en CO₂-uitstoot.

Tabel 13: Verschoningsopties voor voertuigen en mobiele werktuigen op basis van desk-studie

Mogelijke verschoningsopties op voertuig-/machineniveau	Met name impact op	
	Luchtverontreinigende stoffen	CO ₂
Elektrisch (batterij of bekabeld)	x	x*
Waterstof (H ₂)	x (in combinatie met brandstofcel)	x*
Biobrandstoffen		x
Hybride	x (in combinatie met schone dieselmotor)	X
Schone dieselmotor	X	
E-fuels**		x*
Vloeibare waterstofdragers**	x (in combinatie met brandstofcel)	x
Gedrag	x	x

* De mate van verschoning is sterk afhankelijk van de productiemethode van de waterstof en elektriciteit.

*** Toepassing op grotere schaal waarschijnlijk pas na 2030

Onderbouwing maatregelen

Voor een betere inschatting en onderbouwing van de effectiviteit van maatregelen is een verder verbeterd inzicht nodig in de daadwerkelijke emissies en de haalbare reducties in emissies. Een registratie van het materieel en voertuigen, het monitoren van inzet, en boekhouden van draaiuren/kilometers, diesilverbruik, en AdBlue-verbruik zijn daarom cruciaal voor het bepalen van de effectiviteit van mogelijke maatregelen.

Daarnaast is toezicht en handhaving belangrijk. Zonder controle en handhaving zal er een verschil ontstaan tussen geplande en daadwerkelijke emissiereductie.

Voor de toepasbaarheid van maatregelen is het ook belangrijk om meer inzichten te verzamelen in de inzet van bouw materieel en bouwlogistiek per sector (zoals het onderscheid in GWW en woningbouw), alsook de locatie van de bouwplaats (zoals binnenstedelijk versus buitengebied).

3.1 Elektrificatie en waterstof

Elektrisch aangedreven werk- en voertuigen kunnen door middel van accu's opereren of door een vaste bekabelde aansluiting op het elektriciteitsnetwerk. Voor werkzaamheden aan het spoor wordt vaak de spanning van de bovenleiding gehaald, beschikbaarheid van elektriciteit is daardoor niet vanzelfsprekend. In het geval van diesellocomotieven die de betreffende bouwplaats van onderhoudsmaterialen voorziet, zou het wel mogelijk zijn om het grootste deel van het traject met een E-locomotief te rijden (middels de energie via de bovenleiding), het laatste stuk (waarbij geen stroom meer beschikbaar is via bovenleiding) zou dan bijvoorbeeld met een accupakket kunnen. Daarnaast is in veel gebieden wel stroom beschikbaar nabij het spoor, waarmee energie beschikbaar is voor materieel op de bouwplaats, toepassingen hiervan dient nog verder onderzocht te worden.

Waterstof in combinatie met brandstofcel of waterstof in een verbrandingsmotor is ook een mogelijkheid (al is deze laatste niet lokaal uitstootvrij)⁹. De beschikbaarheid van voldoende energie komt in meer detail terug in een aparte notitie over 'laad- en tankinfrastructuur'. Deze is echter wel essentieel, want onder andere het realiseren van een tijdelijke stroomvoorziening met voldoende vermogen maakt elektrificatie van de bouw een flinke uitdaging.

De accuvarianten kunnen met zowel verwisselbare accu's als vaste accu's worden uitgerust. Het verwisselen van accu's kan een uitkomst bieden wanneer er geen, of onvoldoende elektriciteit kan worden gerealiseerd op de bouwplaats. Daarmee kunnen de accu's op een andere locatie worden bijgeladen. Hierbij moeten de extra transport bewegingen en de bijbehorende energievraag (en eventuele uitstoot) ook worden meegerekend. Voor spoorwerktuigen is deze optie (zover bekend) nog niet toegepast.

Wanneer een werktuig permanent aan het elektriciteitsnetwerk kan worden aangesloten is dat de meest efficiënte oplossing voor de benodigde energiebehoefte (laagste energieverliezen). Echter is dat niet voor alle toepassingen mogelijk vanwege de beperkte bewegingsvrijheid of de beschikbaarheid van een aansluiting met voldoende vermogen. Stationaire toepassingen zoals pompen en generatoren, maar ook overslagmachines of hijskranen kunnen op deze manier geëlektrificeerd worden, zonder dat een groot accupakket nodig is.

3.1.1 *Accu's en (historische) ontwikkelingen*

Laadtijden en capaciteit van accu's kunnen potentieel operationele problemen opleveren wanneer een machine of een voertuig geen volledige dag werkzaam kan zijn zonder bij te laden. Indien mogelijk, kan in zo'n geval een andere inrichting van de werkzaamheden (zoals laden tijdens de pauze) worden overwogen. Ook nemen de vervoersbewegingen op de bouwplaats toe omdat er vaker naar een laadstation moet worden gereden.

⁹ Elektrische of waterstof in combinatie met brandstofcelvoertuigen zijn niet geheel uitstootvrij lokaal, er zijn – met name bij wegvoertuigen – nog fijnstofemissies door slijtage van banden, remmen en wegdek.

3.1.2 Ketenrendement

Voertuigen, mobiele werktuigen en spoorwerktuigen die elektrisch worden aangedreven produceren geen lokale uitlaatemissies (Tank-to-Wheel). Afhankelijk van de emissies die gepaard gaan met de energieopwekking kunnen er bij uitstootvrije voer-/ werktuigen wel ketenemissies optreden¹⁰. Bij verduurzaming van de energiesector zullen deze emissies reduceren, bij gelijke inzet van uitstootvrij materieel. Om de ketenemissies zoveel mogelijk te reduceren is het daarom ook van belang dat er voldoende duurzame elektriciteit en duurzame waterstof beschikbaar komt. Over de gehele keten gezien is het totale energierendement van accu/kabel-elektrisch aangedreven werk- en voertuigen veel hoger dan bij traditionele verbrandingsmotoren. Ook scoren deze werk- en voertuigen beter in termen van ketenefficiëntie dan waterstof aangedreven werktuigen. Zowel aan de 'Well-to-Tank' kant, als aan de 'Tank-to-Wheel' kant is accu-elektrisch (of kabel-elektrisch (kabel-elektrisch is meest efficiënt) de efficiëntere oplossing in termen van energiegebruik. Zo becijfert T&E voor heavy-duty trucks (TTW) en JRC (WTT) de typische rendement bij elektriciteit afkomstig van windenergie, zie Tabel 14. Afhankelijk van de aannames, bijvoorbeeld rondom de elektriciteitsproductie, kunnen de resultaten afwijken.

Tabel 14: Typische gemiddelde ketenrendementen voor heavy duty voertuigen (JRC, 2020; Transport & Environment, 2020). Indicatieve waarden, deze gepresenteerde rendementen zijn in de praktijk zeer afhankelijk van de gebruikte brandstofketen/herkomst (WTT) en van het voertuig (en configuratie) en het inzetprofiel (TTW).

Energiedrager	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Wheel
Elektriciteit ¹¹	93% (92%-94%)	82% (81%-85%)	76% (75%-80%)
Waterstof (FCEV) ¹²	54% (51%-65%)	51% (49%-55%)	28% (25%-36%)

3.1.3 Beschikbaarheid

Mobiele werktuigen

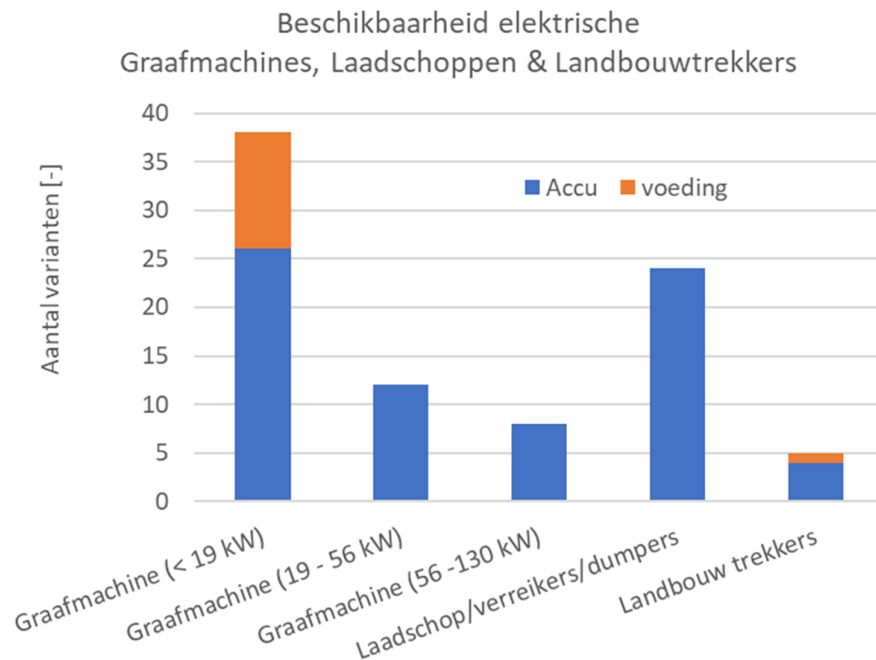
In totaal zijn er momenteel ca. 30 fabrikanten geïnventariseerd die met uitstootvrije machines bezig zijn, ook in de verhuur zijn al diverse elektrische machine verkrijgbaar. Voor het kleine segment (met name tot 19kW maar ook tot 56 kW) is het aanbod van beschikbare batterij-elektrische, maar ook bekabelde werktuigen al relatief groot. Het aanbod van nul-emissie voer- en werktuigen is voor het grotere en zwaardere segment nog beperkt. Zie Figuur 7 voor het aanbod van elektrisch materieel. Naast het materieel in Figuur 7 is het aanbod van elektrisch handheld materieel ook vrij groot, dit gaat bijvoorbeeld om triplaten.

¹⁰ "Naast CO₂-emissies uit de uitlaat, wordt er ook CO₂ geëmitteerd bij de productie en distributie van energiedragers. Voor fossiele brandstoffen zijn deze onder andere het gevolg van de energie die wordt opgewekt om olie te raffineren. Deze emissies in combinatie met de uitlaatemissies, zijn ook wel bekend als 'well-to-wheel' (WTT) of ketenemissies. De emissies voor de productie van de biobrandstof hangen sterk af van de gebruikte grondstof en conversietechniek. Bij de productie van elektriciteit en waterstof wordt wel CO₂ uitgestoten wanneer deze worden opgewekt met behulp van fossiele brandstoffen. Wanneer ze volledig duurzaam worden opgewekt, bijvoorbeeld door middel van wind- of zonne-energie zijn de CO₂-ketenemissies van de voertuigen nul."

Bron: (Verbeek & van Grinsven, 2020)

¹¹ WDEL1: windenergie

¹² WDEL1/CH1: windenergie, elektrolyse, compressie en distributie via pijpleiding.



Figuur 7: Aanbod van zero-emissie bouwvoertuigen, op basis van deskresearch. Bronnen zijn o.a. (Natuur & Milieu, 2019) en communicatie RVO. Laadschoppen zijn veelal de kleine/middel categorie. Landbouw trekkers bevinden zich in de concept / prototype fase. (Datum: zomer 2021).

Opties voor werktuigen op waterstof zijn momenteel nog nauwelijks beschikbaar en zijn in het algemeen duurder dan batterij/kabel-elektrische varianten. Hierdoor lijkt inzet op batterij-elektrisch momenteel haalbaarder dan voor waterstof. Wel zijn er al diverse stroomaggregaten die werken met behulp van waterstof.

Naast de beschikbaarheid van uitstootvrij materieel is ook de beschikbaarheid van voldoende groene stroom of groene waterstof niet vanzelfsprekend. De vraag naar groene stroom en groene waterstof neemt ook toe in andere sectoren (ook buiten de transportsector).

Wegvoertuigen

Ongeveer 0,6% van de huidige vloot van bestelauto's is nul-emissie (januari 2021). Begin 2020 waren er 15 modellen elektrische bestelauto's op de markt. De verwachting is dat dit in 2022 groeit naar 20 modellen (ElaadNL, 2020).

Van de huidige vloot van vrachtauto's en trekker-opleggers is ongeveer 0,1% zero-emissie (januari 2021). De huidige beschikbare ZE-opties voor middelzware en zware voertuigen zijn voornamelijk kleine series, die vaak handmatig elektrisch worden omgebouwd vanuit de productielijn van conventionele varianten. Een voorbeeld is de pilot die wordt gedaan in de DKT Transport VERZET waarin een volledig elektrisch aangedreven kraanwagen en een zero-emissie stenentrekker meedraaien in de dagelijkse operatie om te onderzoeken hoe de inzet van deze zero-emissie bouwvoertuigen operationeel en qua actieradius is.

Spoorwerktuigen

Zover bekend zijn er momenteel nog geen uitstootvrije spoorwerktuigen beschikbaar voor het middelgrote tot zeer grote materieel. Het kleine materieel (zoals kraagboutmachines en slijpmachines) is zover bekend ook nog met name uitgerust met verbrandingsmotoren, al zullen deze naar verwachting relatief snel naar uitstootvrij kunnen gaan. Zoals eerder genoemd, zijn er voorbeelden waarbij er in plaats diesellocomotieven (diesellocs) E-locs kunnen worden ingezet. Omdat de bovenleiding ter plaatse van de werkzaamheden van de spanning is afgehaald, heeft een E-loc alleen voor de 'last-mile' een batterijpakket nodig.

3.1.4 Kosten

De aanschafprijs van een batterij-elektrische machine ligt momenteel ongeveer 2 tot 3 keer hoger dan de prijs van een vergelijkbare conventioneel mobiel werktuig. In de toekomst kunnen schaalvoordelen en technologische ontwikkeling een kostenreductie bewerkstelligen, waardoor de meerprijs van elektrisch materieel kan afnemen. BloombergNEF¹³ beschrijft bijvoorbeeld dat de prijs van Lithium-ion batterijpakketten afgenomen is van circa 1200 dollar per kWh (in jaar 2010) naar circa 200 dollar per kWh in 2018. De verwachting van BloombergNEF is dat de prijs richting 2030 kan afnemen naar 62 dollar per kWh¹⁴. Deze prijzen gelden, echter, voor grote en zeer grote fabrikanten (waar grote hoeveelheden aan accu's worden ingekocht). Voor dergelijke prijzen ook voor de bouwsector van toepassing te laten zijn is daarom een grote inzet op batterij-elektrisch materieel nodig, en/of een strategische inkoopalliantie met grote afnemers.

3.2 Biobrandstoffen

Naast reguliere diesel kunnen ook brandstoffen geproduceerd uit hernieuwbare grondstoffen, aangeduid als 'biobrandstoffen', worden toegepast. Eventueel zijn hier motoraanpassingen voor nodig. Voorbeelden van biobrandstoffen zijn bio-CNG, bio-LNG en dieselvervangers, zoals FAME en HVO. In deze sectie wordt een aantal belangrijke overwegingen aangekaart.

De Tank-To-Wheel-emissies (TTW, uitstoot direct uit de uitlaat van het voer-/werktuig zelf) van biobrandstoffen zijn CO₂-neutraal volgens de internationale IPCC-richtlijnen¹⁵. De daadwerkelijke TTW-emissies zijn vergelijkbaar met de uitstoot van de reguliere brandstof, maar de uitgestoten CO₂ is in een eerder stadium opgenomen door biomassa. Volgens de rekenmethode van het IPCC komt dit ten goede van de mobiliteitssector. Eerder in de keten, bijvoorbeeld bij de productie en transport van biobrandstoffen wordt wel CO₂ geëmitteerd, waardoor er wel CO₂-ketenemissies (WTW) zijn. Daarnaast zijn de effecten van de inzet van biobrandstoffen op luchtkwaliteit (stikstofoxiden en fijnstof) heel beperkt, met name bij de nieuwere motoren (Verbeek, Smokers, & Verbeek, Onderscheidende kenmerken van brandstoftypen als alternatief voor diesel, 2017).

Europa heeft doelstellingen voor het gebruik van hernieuwbare brandstoffen. Deze doelstellingen worden gemonitord volgens Europese richtlijnen, op basis van nationale rapportages.

¹³ <https://www.bloombergquint.com/business/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery>

¹⁴ <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>

¹⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

In Nederland ligt deze taak bij de Nationale Emissieautoriteit (NEa). In de Renewable Energy Directive (RED II, Europese richtlijn hernieuwbare energie) en de Fuel Quality Directive (FQD, Europese richtlijn brandstofkwaliteit) wordt de inzet van biobrandstoffen gereguleerd.

De RED-II, de Renewable Energy Directive, maakt onderscheid tussen vier soorten duurzame brandstoffen:

1. Conventionele biobrandstoffen.
2. Biobrandstoffen van afvalstromen (incl. UCO (used/waste cooking oil) en dierlijk vet). Dit is momenteel de meest gebruikte categorie (>90%).
3. Geavanceerde biobrandstoffen.
4. 'Overig' RFNBO¹⁶ zoals Elektriciteit, waterstof en E-fuels.

Het gebruik van biobrandstoffen uit categorie 1 en 2 wordt gelimiteerd in de Europese richtlijnen.

De hoeveelheid biobrandstof die binnen Europa en mondiaal beschikbaar is, is in principe voldoende om te voldoen aan de behoefte vanuit Nederland. In haar advies Biomassa in balans wijst de SER erop dat de behoefte van de rest van de wereld in deze vergelijking nog niet geheel tot uitdrukking komt, terwijl dit relevant wordt geacht in verband met noodzakelijke import, schaarste en de daaruit voortvloeiende verdelingsvraagstukken. Tevens constateert de SER dat er op ketenniveau mogelijk mismatches kunnen ontstaan tussen bepaalde biograndstofstromen en specifieke toepassingsgebieden (SER, 2020).

Extra inzet naast de jaarverplichting op de Nederlandse markt

Naast de beschikbaarheid is het bij het gebruik van hernieuwbare energiedragers (biobrandstoffen, elektriciteit, waterstof) voor de impact op CO₂ van belang om rekening te houden met het concept van 'additionaliteit'. Op het gebruik van duurzame hernieuwbare brandstoffen rust in Nederland een jaarverplichting voor wegvervoer van 16,4% in 2020, oplopend tot 27,1% in 2030 (inclusief dubbeltellingen). Biobrandstoffen zijn hiervan een onderdeel.

Voor mobiele werktuigen geldt geen specifieke jaarverplichting. Wel vallen mobiele werktuigen onder dezelfde categorie als wegvervoer en dragen biobrandstoffen voor mobiele werktuigen bij aan de jaarverplichting voor wegvervoer.

Leveranciers van brandstoffen zijn verplicht een bepaald aandeel duurzame energie te leveren aan de Nederlandse markt, per GJ geleverde duurzame energie ontvangen ze HBE's¹⁷. Wanneer bijvoorbeeld een hoeveelheid van 100% biobrandstof wordt geleverd voor toepassingen op de bouwplaats, dan levert dit een leverancier HBE's op wanneer de brandstof wordt geregistreerd bij de Nederlandse Emissie Autoriteit. Dat wil zeggen dat wanneer er meer dan evenredig biobrandstoffen worden ingezet op bouwplaatsen, en deze bijdragen aan de jaarverplichting, er minder dan evenredig biobrandstoffen hoeven worden ingezet door bijvoorbeeld het wegvervoer. Administratief gezien is er in dat geval sprake van een verplaatsing van inzet en geen extra verduurzaming.

¹⁶ RFNBO is Renewable Fuels of Non Biological Origin

¹⁷ Hernieuwbare brandstof eenheden.

Dit is een belangrijk punt dat in acht kan worden genomen bij de inzet van biobrandstoffen, maar ook voor de inzet van RFNBO's (afkorting voor hernieuwbare brandstoffen van niet biologische oorsprong) zoals groene waterstof en elektriciteit die wordt geleverd aan vervoer in Nederland.

3.3 Gedrag en logistieke efficiëntieverbetering

3.3.1 *Bouwlogistiek*

Naast het verschonen van voertuigen kan ook worden ingezet op het slimmer inrichten van de logistiek en daarmee voertuigkilometers te besparen.

Hierbij kan gedacht worden aan maatregelen, zoals:

- het gebruik van bouwhubs waar materialen gebundeld kunnen worden,
- het slim inrichten van (retour)stromen door inzet van ketenregie,
- het kiezen voor andere modaliteiten (buiten de scope van deze notitie), en
- het industrialiseren van het bouwproces en het bundelen bij de leverancier (TNO, 2018).

Dit draagt ook bij aan de leefbaarheid in steden.

3.3.2 *Logistieke hubconcepten*

Voor het goederenvervoer is het verbeteren van de beladingsgraad van voertuigen een belangrijke maatregel om het aantal voertuigbewegingen te verminderen. Deze aanpak leidt tot verbetering van de bereikbaarheid en verlaging van zowel de NO_x-als ook de CO₂-uitstoot. Voor stadslogistiek kan dit onder meer worden gedaan door inzet van logistieke hubs (ontkoppelpunt) in combinatie met de inzet van schone of uitstootvrije voertuigen. Hubs kunnen ook weer een nieuwe bron zijn voor lokale emissies op de plek van de hub. Dit dient bij de inrichting van de hub goed in beeld te worden gebracht.

Bij toepassing van hubconcepten wordt (een deel van) het benodigde bouw materiaal eerst vanuit de leverancier met volle voer- of vaartuigen naar de hub gebracht en vervolgens gebundeld just-in-time (JIT) naar de bouwplaats geleverd. Het gebruik van een hub voorkomt inefficiënt transport, waarbij veel directe ritten vanuit de leverancier naar de bouwplaats met slechts gedeeltelijk gevulde vrachtwagens wordt gedaan. Bundeling kan daarnaast betekenen dat het aantal leveringen per dag sterk afneemt (één volle vrachtwagen vanuit de hub in plaats van twee á drie halfvolle vrachtwagens) waardoor ook het bouw materieel (kranen) efficiënter kan worden ingezet. Verdere efficiëntieverbetering kan worden behaald door het combineren van het transport van de levering van bouwmaterialen met retourstromen van bijvoorbeeld bouwafval. De mate waarin dit in de praktijk wordt behaald is nog onzeker. Dit hangt mede samen met organisatorische inrichting.

Er zijn verschillende vormen van hubconcepten / ontkoppelpunten mogelijk (Kin, Nesterova, Van Kempen, De Vries, & Quak, 2020). De concepten verschillen in de locatie waar de hub gevestigd is (bijvoorbeeld een regionale hub buiten de stad of een centraal uitgiftepunt binnen de stad). Daarnaast verschillen de concepten in functie (alleen een ontkoppelpunt of additionele handelingen zoals het organiseren van retourlogistiek) en of het gaat om een (open) samenwerking tussen partijen of een gesloten netwerk.

De inzet van hubconcepten leidt aantoonbaar tot aanzienlijke reductie van transportbewegingen, transportkilometers en gerelateerde emissies (TNO, 2018) (TNO, 2020) (Van Merriënboer & Ludema, 2016). Het vergt echter een andere manier van werken die nog niet gemeengoed is binnen bouwbedrijven. Stimulerende maatregelen en/of verplichting door regelgeving is nodig om te komen tot brede implementatie van deze concepten.

3.3.3 *Ketenregie en control towers*

Naast, of in combinatie met, de toepassing van hubconcepten kan een betere beladingsgraad van bouwlogistiek transport worden gerealiseerd door een verbeterde ketenregie en ketensamenwerking op bouwlogistieke stromen. Daarvoor is inzicht nodig in alle bouwstromen door de gehele bouwlogistieke keten en een integratie van de bouwplanning met de logistieke planning. De traditionele bouwsector moet nog een flinke stap zetten in de ontwikkeling van dergelijke control towers, waarin informatiesystemen van alle ketenschakels aan elkaar worden gekoppeld (TNO, 2018). De verwachting is dat ontwikkeling en toepassing van control towers specifiek voor de bouwsector zorgt voor een versnelling van een brede toepassing van hubconcepten en ketenregie op bouwstromen met als resultaat de gewenste efficiëntieslag in bouwlogistiek. Deze efficiëntieslag kan worden gemaakt voor een specifiek bouwproject, maar kan ook breder toegepast worden door het toepassen van een gebiedsgerichte control tower, waarbij beslissingen en aansturing van (bouw)logistiek plaatsvinden vanuit een gebiedsgerichte aanpak.

3.3.4 *Verandering bouwproces*

Ook innovaties buiten de logistieke sector kunnen een bijdrage leveren aan het verminderen van het aantal logistieke bewegingen. WE Consult (te verschijnen in 2021) onderscheidt een aantal verschillende type innovaties voor de woningbouw.

- Verandering in het productieproces van bouwmaterialen (verandering van materiaalstromen/ketens door bijvoorbeeld hergebruik)
- Verandering in materiaalgebruik (gebruik van lichte constructies of houtbouw)
- Verandering bouwproces (Prefab of Modulair bouwen)

Er is nog veel onbekend over het potentiële effect van deze innovaties op emissiereductie. Een eerste inschatting voor modulair bouwen voor de B&U sector wordt ingeschat op 15 tot 35% vermindering van het aantal transportbewegingen.

3.3.5 *Efficiënte inzet van mobiele werktuigen*

In het algemeen is het stimuleren van efficiënter gebruik van werktuigen belangrijk. Bijvoorbeeld, het onnodig stationair draaien zorgt voor een verhoogd brandstofverbruik, maar kan vooral een grote bijdrage leveren aan de NO_x-emissie (tot zelfs ca. 50% van het totaal in sommige gevallen). Onnodig stationair draaien kan bijvoorbeeld worden voorkomen door een toepassing van een start-stop systeem.

3.3.6 *Efficiënte inzet van spoorwerktuigen*

In paragraaf 2.4. is toegelicht dat een lage motorbelasting, zoals langdurig stationair draaien voor flink verhoogde NO_x-emissies kan zorgen bij dieselloos. Onnodig stationair draaien zou daarom zo veel als mogelijk voorkomen dienen te worden.

Bij modernere vrachtwagens en voor mobiele werktuigen zorgt stationair draaien ook voor verhoogde emissies. Ook voor het kleinere materieel dan de dieselloccs is het vermijden van onnodig stationair draaien daarom van belang.

Daarnaast zou het nuttig zijn om te onderzoeken of de werktreinen (grote dieselloccs) minder ingezet zouden kunnen worden voor het vervoer van bouw- of onderhoudsmaterialen. Bijvoorbeeld door een andere planning van de logistiek. Een mogelijkheid waaraan gedacht kan worden is het gebruik van elektrische treinen voor het vervoer van deze materialen. Dit moet dan gebeuren voordat de spanning van de bovenleiding afgehaald wordt.

3.4 Hybride aandrijving

Hybride opties voor mobiele werktuigen kunnen worden toegepast om het brandstofverbruik van dieselmotoren te verminderen door bijvoorbeeld rem- of zwenkenergie terug te winnen. Het kan ook gaan om een plug-in hybride waarbij de machine ook elektrisch kan werken en oplaadbaar is met een stekker. Om ook als verschoningsoptie in aanmerking te komen is de combinatie met de nieuwste emissienorm van belang (ofwel, het moet gaan om een hybride machine die voldoet aan stage V of euro 6). Voor vrachtwagens zijn er ook plug-in hybrides beschikbaar. Deze kunnen een gedeelte van de trip uitstootvrij rijden, bijvoorbeeld in de binnenstad.

3.5 Schone dieselmotor

3.5.1 *Bouwlogistieke voertuigen (Euro 6d/Euro VI)*

De meest recente emissienormen voor nieuwe wegvoertuigen zijn Euro 6d (vanaf 2018) voor lichte voertuigen en Euro VI (vanaf 2014) voor zware voertuigen. Deze dieselvoertuigen, zoals toegelicht in Hoofdstuk 2.2, zijn substantieel schoner dan hun voorgangers. Lichte voertuigen (bestelwagens) hebben vanaf Euro 5 allemaal een af-fabriek een roetfilter, hierdoor is de uitstoot van fijnstof laag. Vanaf Euro 6d zijn ook de NO_x emissies erg laag, vergelijkbaar met een moderne benzineauto. Vanaf Euro VI hebben vrachtwagens een roetfilter waardoor de uitstoot van fijnstof laag is, tegelijkertijd zijn ook de NO_x emissies fors lager ten opzichte van Euro V. Er zijn nog wel situaties waar verhoogde emissies kunnen optreden, zoals een lage motorbelasting, en bijvoorbeeld langdurig stationair draaien.

Euro 6d en Euro VI zijn geschikt als verschoningsopties voor met name NO_x- en PM₁₀-emissies. Op het gebied van CO₂-emissies is het effect t.o.v. eerdere emissieklassen relatief beperkt.

Met het oog op de introductie van zero-emissiezones vanaf 2025 geldt voor bestelauto's een overgangsregeling waarbij Euro 6-voertuigen tot 2028 nog de zone in mogen. Voor vrachtauto's geldt de overgangsregeling voor Euro VI tot 2030.¹⁸

¹⁸ Zie Kamerbrief [IENW/BSK-2020/191355](#) voor meer achtergrondinformatie.

3.5.2 *Mobiele werktuigen (Stage V en retrofit)*

De nieuwste emissienorm is de Stage V-norm (EU 2016/1628) die is geïntroduceerd in 2019. Zoals eerder beschreven in hoofdstuk 2, verschillen de emissielimieten per vermogensklasse. Met behulp van retrofit (achteraf inbouwen van emissie-nabehandelingssystemen (roetfilter en SCR)) kunnen de emissies van oudere werktuigen (of andere vermogensklassen) worden gereduceerd richting de Stage V-normen.

Praktijkemissies kunnen hoger zijn dan de emissienormen als het gevolg van een ander belastingprofiel, zoals langdurig stationair draaien.

3.5.3 *Spoorwerktuigen (Euro VI, Stage V en retrofit)*

Voor spoorwerktuigen gelden ook de stage-normen. Spoorwerktuigen kunnen vallen onder de aparte eisen voor 'spoorvoertuigen' of onder de eisen voor mobiele werktuigen. Voor spoorvoertuigen is Stage V ook de meest recente emissieklasse, geïntroduceerd in januari 2021. In de emissiewetgeving wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen motoren voor locomotieven en voor treinstellen (in het Engels: "rail locomotives" (RLL) en "railcars" (RLR)). Dit is relevant omdat de emissie-eisen voor de RLL categorie minder streng zijn dan voor RLR. De locomotieven (RLL) zullen geen SCR katalysator en roetfilter nodig hebben om aan de emissie-eisen te voldoen. Bovendien is er geen verschil in de emissielimieten ten opzichte van de voorgaande emissieklasse die was geïntroduceerd in 2012. Voor de treinstellen (RLR) zal een roetfilter nodig zijn om de emissie-eis te halen, of een SCR in deze categorie wordt toegepast is nog niet duidelijk.

Beide spoorvoertuigen die hiervoor zijn benoemd, gaan in de emissiewetgeving om het vervoer van passagiers of goederen, of het vervoer van andere uitrustingsstukken (maar niet de aandrijving daarvan). Spoorvoertuigen die specifiek zijn ontwikkeld voor onderhouds- of constructiewerkzaamheden, of hefverrichtingen, vallen onder de Stage V wetgeving van mobiele werktuigen. De RLL en RLR gaan daarmee om de categorie 'werktreinen' (zeer groot) uit 2.3. Daarnaast kan deze categorie ook gaan om de voorstuwingsmotoren van de specialistische spoorwerktuigen (bijvoorbeeld de stopmachines), indien deze aparte motoren hebben voor de voortstuwing en de hulpfuncties. Dit onderscheid is relevant omdat de Stage V eisen voor spoorvoertuigen beduidend minder streng zijn dan voor mobiele werktuigen met een motor die minder dan 560 kW heeft. Dit geldt met name voor de locomotieven, maar ook voor de treinstellen zijn de NO_x eisen milder dan bij mobiele werktuigen met een motor onder de 560 kW.

Zoals eerder genoemd zijn spoorwerktuigen specialistische machines met een lange levensduur. Het grote en zeer grote materieel kan mogelijk gehermotoriseerd worden. Hierbij kan een nieuwe Stage V motor worden geplaatst. Dit dienen dan wel motoren met een SCR katalysator en roetfilter te zijn. In het geval van het middelgrote en grote materieel zou mogelijk ook een Euro VI motor (zoals toegepast in vrachtwagens) geplaatst kunnen worden, deze zitten namelijk in dezelfde vermogensrange en zijn redelijk compact. Indien de bestaande motor nog lang meegaat, kan een retrofit roetfilter en SCR katalysator worden overwogen. Hetzelfde geldt voor nieuwe Stage V motoren waar geen SCR en/of roetfilter aanwezig is.

3.6 E-fuels

Op de lange termijn (2030-2050) kunnen mogelijk ook zogenaamde *E-fuels* (synthetische brandstoffen) een uitkomst bieden in het reductie-pad naar nul-emissie. Deze brandstoffen (zoals e-diesel, e-methanol en e-LNG) worden gemaakt door het samenvoegen van waterstof en CO₂, waarbij de waterstof geproduceerd wordt uit duurzame elektriciteit. Ze hebben een hogere energiedichtheid ten opzichte van andere duurzame energiedragers (zoals batterij-elektrisch en waterstof) en zijn in gebruik grotendeels vergelijkbaar met bio- en conventionele brandstoffen (toepassing in verbrandingsmotor). Om die reden zijn ze met name geschikt voor zwaar wegtransport over lange afstanden ((Voltachem, Smartport, TNO, 2020); (RWS, 2020)). Ook voor zware mobiele werktuigen die worden ingezet in het buitengebied kan dit in de toekomst mogelijk een interessante optie zijn.

Voor productie van e-fuels is veel duurzame elektriciteit nodig. De verwachting is dat de productie van hernieuwbare elektriciteit in Europa de komende jaren aanzienlijk zal toenemen. Het huidige aandeel van hernieuwbare bronnen in energie is 22% (EU-gemiddelde in 2021), en dit aandeel zal naar verwachting groeien tot 32% in 2030 (EC, 2021). Naast gebruik voor e-fuels is er ook veel vraag vanuit andere sectoren naar duurzame elektriciteit. Doordat er relatief veel rendementsverlies plaatsvindt bij productie van e-fuels, leidt toepassing van duurzame elektriciteit in andere toepassingen vaak tot een tot grotere CO₂-emissiereductie per eenheid hernieuwbare energie.

Ook vloeibare waterstofdragers kunnen mogelijk een rol spelen in het reductie-pad naar nul-emissie op de lange termijn. Voorbeelden van vloeibare waterstofdragers zijn methanol, ammoniak (NH₃) en mierenzuur (zie hiervoor ook paragraaf 6.5). Aan boord van het voertuig of machine dienen de waterstofdragers dan nog omgezet te worden in waterstof. Ook voor productie van waterstof uit duurzame elektriciteit geldt dat er een relatief hoog rendementsverlies plaatsvindt.

Inzet van sommige alternatieve energiedragers heeft veiligheidsconsequenties. Er is nog weinig bekend over de impact hiervan bij inzet op bouwplaatsen. Wel wordt er momenteel veel onderzoek gedaan naar effecten van verschillende alternatieve energiedragers in schepen (zie paragraaf 6.9).

4 Verschoningsopties en toekomstige ontwikkelingen per categorie

In dit hoofdstuk worden verschoningsopties gekoppeld aan de voorgestelde categorieën. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de korte, middellange en lange termijn. Mobiele werktuigen zijn hier samengenomen met spoorwerktuigen.

4.1 Mobiele werktuigen en spoorwerktuigen

Mini en klein materieel (<56 kW)

Zoals eerder toegelicht heeft een moderne machine met een Stage V-dieselmotor in dit segment nog steeds hoge emissies vanwege de milde emissielimieten, en is daardoor nog steeds vervuilend tot in de voorzienbare toekomst. De machines met een Stage V motor van meer dan 19 kW hebben wel een roetfilter en zullen in dit segment in het algemeen flink lagere fijnstof emissies hebben dan hun voorgangers.

Een optie voor de korte termijn om de luchtverontreinigende stoffen te reduceren is om machines met dieselmotor verder te verschonen middels retrofit (achteraf inbouwen van SCR katalysator en/of roetfilter). Retrofit oplossingen zijn vooral relevant voor machines die nog voor langere tijd worden ingezet, voldoende draaiuren maken en waarbij de prijs van een retrofitsysteem niet buiten proporties is ten opzichte van de totale machineprijs. Monitoring van emissieprestaties is voor retrofit oplossingen essentieel. Niet elke retrofit oplossing is in de praktijk even effectief voor wat betreft de emissiereductie.

Het materieel met een motorvermogen kleiner dan 56 kW is het meest geschikt om snel te starten met pilots voor uitstootvrij. Er lopen momenteel al diverse pilots voor het 'mini' en 'kleine' elektrisch materieel. In deze categorieën zijn momenteel meerdere elektrische machines verkrijgbaar op de markt (zie hoofdstuk 3.1.).

Een bouwstroom aansluiting met een relatief laag vermogen kan in veel gevallen al voldoende zijn om een aantal kleine elektrische werktuigen te kunnen gebruiken op de bouwplaats (indien in de buurt van het vaste stroomnet). Voor pompen en aggregaten is in sommige gevallen zelfs alleen een stroomaansluiting benodigd. Het tijdig beschikbaar krijgen van bouwstroom is nog vaak een uitdaging. Bovendien is bouwstroom niet voor elke bouwlocatie vanzelfsprekend een mogelijkheid. In een buitengebied kan de afstand tot het vaste stroomnet groot zijn, waardoor een tijdelijke aansluiting complexer te realiseren is. Hiervoor zou bijvoorbeeld met accuwissels gewerkt kunnen worden, wat operationeel uitdagingen geeft. Afhankelijk van de complexiteit van de energievoorziening kan de stroomprijs oplopen. Indien de stroomprijs te hoog wordt, wordt de investering niet terugverdiend. Het transport van accu's heeft ook een milieu impact die meegewogen dient te worden.

Voor de korte termijn zouden daarom vooral pilots gestart moeten worden om ervaringen op te doen, bij voorkeur met voldoende volume. Zowel voor de infrastructuur als voor de inzet van het materieel.

Middelgroot en (zeer) groot materieel (vanaf 56kW)

Autonome verschoning naar Stage IV (met roetfilter) en V motoren zal de grootste reductie in schadelijke emissies (NO_x en fijnstof) geven voor deze categorie (vanaf 560 kW bestaat er geen Stage IV eis en zou Stage V moeten worden gehanteerd). winst voor schadelijke emissies is mogelijk door het vroegtijdig (eerder dan autonoom) vervangen van machines van Stage IIIB of ouder. De kosteneffectiviteit voor wat betreft de reductie schadelijke emissies zal voor deze optie naar verwachting het meest gunstig zijn. Voor CO₂ is er met reguliere brandstof een beperkt effect. Nieuwe machines zullen wel 10-20% zuiniger zijn en daardoor een equivalent lagere CO₂ emissie hebben. Voor diesellocomotieven heeft de autonome verjonging slechts een beperkt effect (zie paragraaf 3.5).

Retrofit oplossingen (SCR en roetfilter) of een hermotorisering zijn vooral effectief voor materieel pre-Stage IV met een lange levensduur, voldoende draaiuren en/of hoge aanschafkosten, zoals speciale machines. Wanneer de machines nog voor lange tijd ingezet worden en veel draaiuren maken kan dit een oplossing zijn voor schadelijke emissies.

Uitstootvrij materieel van dit formaat zijn af-fabriek nog nauwelijks beschikbaar. Wel zijn er ontwikkelingen op het gebied van elektrificatie (batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch) van grotere mobiele werktuigen. Ook zijn er verschillende bedrijven welke ombouwpakketten leveren. Op korte termijn zou gewerkt moeten worden aan pilots zodat zoveel mogelijk bedrijven (bouwbedrijven, machineleveranciers en infra-bedrijven) ervaringen kunnen opdoen. Deze pilots zouden op de middellange termijn verder opgeschaald kunnen worden om daarna richting marktontwikkeling te gaan. Grootschalige inzet zal naar verwachting na 2030 zijn, als de beschikbaarheid fors is toegenomen, de meerprijs fors is afgenomen en er een goede systematiek is voor de infrastructuur. De infrastructuur wordt complexer bij toenemende vermogens- en energievraag. Ofwel, hoe groter de machines zijn, of hier meer machines er zijn op de bouwplaats, hoe groter de uitdaging. Dit geldt voor locaties die binnen het bereik zijn van het vaste stroomnet, en nog meer voor locaties die buiten het bereik van het vaste stroomnet zijn.

Zover bekend zijn er momenteel nog geen uitstootvrije spoorwerktuigen beschikbaar voor het middelgrote tot zeer grote materieel. Er voorbeelden waarbij er in plaats diesellocomotieven (diesellocs) E-locs kunnen worden ingezet, dit geldt voor de werktreinen (zeer groot materieel). Omdat de bovenleiding ter plaatse van de werkzaamheden van de spanning is afgehaald, heeft een E-loc alleen voor de 'last-mile' een batterijpakket nodig. Ook hiervoor is behoefte aan verdiepend onderzoek en de opzet van pilots.

- 4.1.1 *Mogelijke invulling van verschoningsopties per categorie mobiele werktuigen*
Tabel 16 geeft een mogelijke invulling van de verschoningsopties per categorie weer, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de korte, middellange en lange termijn. Om de ontwikkeling van de ingroei aan te geven wordt gebruik gemaakt van de marktfasen zoals die zijn geïdentificeerd in de Routeradar 2019 Straatbeeldmonitor Wegvervoer (RWS, 2020), zie Tabel 15. De marktfase waarin een type voertuig/machine zich bevindt is bepalend voor de mogelijkheid tot opschaling.

Tabel 15: Marktfasen volgens de Routeradar 2019 Straatbeeldmonitor (RWS, 2020)

Marktfase	Definitie
R&D – onderzoeksfase	Onderzoek, testen van belangrijke componenten
Prototype/pilot	De eerste complete voertuigen met de technologie worden gebouwd.
Marktvoorbereiding/demonstratie	De eerste voertuigen worden door normale gebruikers in de dagelijkse praktijk gebruikt, infra kan heel lokaal georganiseerd zijn. Marktintroductie is nog onzeker.
Marktintroductie/niche	Product is verkrijgbaar (in niche-markten). Infra wordt uitgebreid, meerdere voertuigtypen beschikbaar voor willekeurige gebruikers.
Opschaling	Infra wordt langzaam uitgebreid tot landelijk dekkend.
Beheer	Een stabiele situatie is bereikt. De vraag neemt niet verder toe. Aantallen zijn afhankelijk van de wenselijke penetratie-graad.

Tabel 16: Mogelijke invulling van verschooningsopties per categorie voor mobiele werktuigen en spoorwerktuigen

Categorie	2021-2023	Korte Termijn (2023-2025)	Middellange Termijn (2025-2030)	Lange Termijn (2030-2035)
Algemeen	<ul style="list-style-type: none"> - Stimulering en monitoring efficiënt gebruik. Bijvoorbeeld reductie onnodig stationair draaien. - Specifiek voor spoor: inzet van elektrische treinen voor het vervoer van benodigde materialen. - Monitoring/controle van brandstof- en AdBlue verbruik, draaiuren (geldt ook voor uitstootvrij) en emissies belangrijk ter beoordeling van effectiviteit - Een betere registratie van materieel zorgt voor het verminderen van blinde vlekken - Zonder controle en handhaving op afspraken zal er een verschil zijn, of ontstaan, tussen de geplande en de daadwerkelijke emissiereducties. (Lokale) overheden, bevoegd gezag, en inspectiediensten hebben handvesten, zoals registratie en testen, nodig om in het veld te kunnen controleren op beloofde reducties van emissies. - Operationeel is elektrificatie een flinke uitdaging bij inzet zonder stroomvoorziening, zowel bekabeld als om accu's op te laden, als accu transport belastend is. 			
Mini (<19kW)	- Marktintroductie uitstootvrij	- Opschaling* uitstootvrij		- Opschaling* uitstootvrij → beheer uitstootvrij
Klein materieel (<56 kW)	- Marktintroductie uitstootvrij, incl. ombouw - Evt. retrofit roetfilter en SCR. - Inzet schoon materieel (met roetfilter)	- Opschaling* uitstootvrij - + voorgaande		- Opschaling* uitstootvrij → beheer uitstootvrij - + voorgaande
Middelgroot materieel (tussen 56 en 130 kW)	- Marktvoorbereiding uitstootvrij, incl. ombouw - Inzet schoon conventioneel (roetfilter en SCR) - Retrofit roetfilter en SCR of hermotorisering voor (spoor)specialistisch materieel - Evt. inzet duurzame biobrandstoffen	- Marktintroductie uitstootvrij, incl. ombouw - + voorgaande	- Opschaling* met uitstootvrij - + voorgaande	
Groot en zeer groot materieel (>130 kW)	- Inzet schoon conventioneel (roetfilter en SCR). - Retrofit roetfilter en SCR of hermotorisering voor (spoor)specialistisch materieel en >560 kW - Evt. inzet duurzame biobrandstoffen	- Marktvoorbereiding uitstootvrij, incl. ombouw - + voorgaande	- Marktintroductie uitstootvrij, incl. ombouw → opschaling - + voorgaande	- Opschaling* met uitstootvrij - + voorgaande

Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> - Voorbereidingen van snelle, flexibele en betaalbare stroomvoorziening. Afstanden tot ca. 2 kilometer tot het vaste stroomnet. - Pilots / opschaling grote netaansluiting elektriciteit - Pilots verwisselbare accu's en accucontainers** - Pilots H₂ voorziening en gensets (indien nodig) 	<ul style="list-style-type: none"> - Opschaling van snelle, flexibele en betaalbare stroomvoorziening. Afstanden tot ca. 5 kilometer van het stroomnet. - Opschaling voor grote netaansluiting elektriciteit - Opschaling marktontwikkeling verwisselbare accucontainers - Opschaling H₂ voorziening en gensets op de bouwplaats (indien nodig)
-----------------------	--	--

* De snelheid van opschaling (geldt voor elke categorie in elke fase) is afhankelijk van o.a. het aanbod, de aanbestedingseisen, de kosten, beschikbaarheid van infrastructuur en de opgedane ervaringen.

** Belangrijk om rekening te houden met milieu-impact van transport die nodig is om het wisselen van accu's mogelijk te maken (elders laden).

4.1.2 Stellen van emissie-eisen en controle op defecten en manipulatie

Om de hierboven beschreven verschoningsopties effectief in te kunnen zetten zijn aanvullende (beleids)maatregelen nodig. Dit betreft onder meer het controleren op manipulatie en defecten van emissiecontrolesystemen (zoals het verwijderen van roetfilters). Deze controle wordt verder toegelicht in het onderzoek omtrent toezicht en handhaving.

Bij het stellen van emissie-eisen gaat het vooral om NO_x en fijnstof. In de onderstaande tabel staan de emissielimieten voor fijnstof en NO_x van de verschillende Stages en vermogensklassen samengevat. De doorgetrokken lijnen geven de grote stappen in de eisen voor NO_x en fijnstof en kunnen handvatten bieden in het opstellen van de relevante emissie-eisen. Een roetfilter is noodzakelijk als er 0,015 mg/kWh/PN (1×10^{12} #/kWh) (eis voor fijnstof in emissiewetgeving) staat en een SCR katalysator is nodig bij 0,4 g/kWh. Zoals eerder toegelicht zijn bij kleinere machines van dezelfde klassen de eisen over het algemeen minder streng en de invoeringsdata vertraagd. Bij het stellen van emissie-eisen is het daarom van belang om zowel naar stagenorm als naar vermogensklasse te kijken. MVI-criteria worden in een parallel traject verder ontwikkeld.

Ook bij het stellen van minimale emissie-eisen is toezicht en handhaving van belang. Voor toezicht en handhaving op emissie-eisen is het noodzakelijk een goede registratie van machines en hun milieuklasse te hebben.

Tabel 17: Wettelijke limieten voor de verschillende Stages en vermogensklassen

Vermogen [kW]	<19	19-37	37-56	56-75	75-130	130-560	>560
PM [g/kWh]							
V (2019)	0,4	0,015/PN	0,015/PN	0,015/PN	0,015/PN	0,015/PN	0,045
IV (2014)	-	-	-	0,025	0,025	0,025	-
IIIB (2011)	-	-	0,025	0,025	0,025	0,025	-
IIIA (2006)	-	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	-
II (2002)	-	0,8	0,4	0,4	0,3	0,2	-
I (1999)	-	-	0,85	0,85	0,7	0,54	-
NO_x [g/kWh]							
V (2019)	7,5	4,7	4,7	0,4	0,4	0,4	3,5
IV (2014)	-	-	-	0,4	0,4	0,4	-
IIIB (2011)	-	-	4,7	3,3	3,3	2,0	-
IIIA (2006)	-	7,5	4,7	4,7	4,0	4,0	-
II (2002)	-	8,0	7,0	7,0	6,0	6,0	-
I (1999)	-	-	9,2	9,2	9,2	9,2	-

4.2 Bouwlogistiek

Licht

De inzet van Euro 6d voertuigen is momenteel al beschikbaar om de luchtverontreinigende stoffen te reduceren (NO_x en fijnstof). Daarnaast zijn diverse elektrische bestelauto's beschikbaar. Elektrische bestelauto's bevinden zich in de opschalingsfase (>5000 voertuigen) (RWS, 2020). Naar verwachting kan de 'Total Cost of Ownership' tussen 2025 en 2030 competitief worden met conventionele nieuwe voertuigen.

Middelzwaar en zwaar

De inzet van Euro VI voertuigen is momenteel al beschikbaar om de luchtverontreinigende stoffen te reduceren (NO_x en fijnstof).

Verschillende voertuigfabrikanten zijn gestart met de introductie van elektrische zware vrachtauto's op de markt¹⁹. Eén van de grote uitdaging voor de zware voertuigen is de beperkte actieradius ten opzichte van dieselveertuigen. Hierdoor is het voertuig beperkter inzetbaar. De ontwikkeling van batterij-elektrische heeft een voorsprong op waterstofvoertuigen. Er wordt op dit moment namelijk vooral nog onderzoek gedaan en geëxperimenteerd (pilots) met waterstofvrachtauto's en –trekkers (RWS, 2020). Waterstof is potentieel wel een waardevolle energiedrager, omdat het vooral geschikt lijkt te zijn voor relatief langeafstandstransport vanwege de hoge energiedichtheid (TNO, 2020). Voor langeafstandstransport wordt op de lange termijn (2030-2050) mogelijk ook het gebruik van E-fuels interessant (Voltachem, Smartport, TNO, 2020). Mogelijk zijn waterstof en e-fuels meer van belang voor internationaal transport dan voor bouwlogistiek. Hiervoor moet beter inzicht komen over de inzet van trekker-oplegger combinaties in de bouw.

4.2.1 *Stimulerende beleidsmaatregelen*

Verschillende Europese en Nederlandse beleidsmaatregelen jagen de overgang naar nul-emissietransport aan. In het Nederlandse Klimaatakkoord is bijvoorbeeld opgenomen dat vanaf 2025 wordt gestart met de invoering van zero-emissiezones voor stadslogistiek in 30-40 gemeenten (met een overgangsregeling voor Euro 6/VI-voertuigen). Bovendien moeten volgens de Europese emissienormen nieuwe vrachtwagens vanaf 2025 gemiddeld 15% minder CO₂ uitstoten dan in 2019 en nieuwe bestelauto's gemiddeld 15% dan in 2021. Vanaf 2030 geldt dat nieuwe vrachtwagens gemiddeld 30% minder CO₂ moeten uitstoten ten opzichte van 2019, voor nieuwe bestelauto's ligt de norm op gemiddeld 31% minder dan in 2021.²⁰ In 2022 vindt er een review plaats waarbij de gestelde emissienormen mogelijk nog verder worden uitgebreid of aangescherpt.

4.2.2 *Tank- en laadinfrastructuur*

Voor batterij-elektrische en waterstofvoertuigen is laad-/tankinfrastructuur benodigd. De uitrol hiervan is mede afhankelijk van de vraag naar dergelijke infrastructuur en het aanbod van deze type voertuigen.

¹⁹Volvo Trucks start dit jaar verkoop complete range zware elektrische trucks | Volvo Truck <https://www.volvotrucks.nl/nl-nl/news/press-releases/2021/april/volvo-trucks-start-dit-jaar-verkoop-complete-range-zware-elektrische-trucks.html>

²⁰ CO₂ emission performance standards for cars and vans | Klimaat (europa.eu) en Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles | Klimaat (europa.eu) (geraadpleegd juli 2021)

Bestelauto's kunnen gebruikmaken van de laadinfrastructuur voor personenauto's, maar maken daar intensiever gebruik van. De uitrol van laadinfrastructuur beweegt zich richting de opschalingsfase. Lichte bedrijfsvoertuigen zullen zowel gebruikmaken van private infrastructuur bij bedrijven als van publieke laadpalen en laadpalen thuis op de eigen oprit (ElaadNL, 2020). Zwaardere laadinfrastructuur en tankinfrastructuur voor waterstof bevindt zich nog in de ontwikkelingsfase en vergt extra onderzoek, onder andere naar de laadbehoefte. Voor werkzaamheden aan het spoor wordt vaak de spanning van de bovenleiding gehaald, beschikbaarheid van elektriciteit is daardoor niet vanzelfsprekend. In veel gebieden is echter wel stroom beschikbaar nabij het spoor, toepassingen hiervan dient nog verder onderzocht te worden. In het product 'Tank- en laadinfrastructuur' worden deze onderwerpen verder toegelicht.

4.2.3 *Mogelijke invulling van verschoningsopties per categorie*

Tabel 18 geeft een mogelijke invulling van de verschoningsopties per categorie weer, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de korte, middellange en lange termijn.

De ingroei van elektrische bestel- en vrachtauto's is echter uiterst onzeker en is sterk afhankelijk van de mate van positieve ontwikkelingen op drie randvoorwaarden: de beschikbaarheid, de betaalbaarheid en de toepasbaarheid. De mate waarin stimulerende beleidsmaatregelen, zoals belastingvoordelen en aanschafsubsidies, en regulerende beleidsmaatregelen, zoals de invoer van zero-emissiezones in steden, worden genomen zijn van invloed op de betaalbaarheid. De ingroei is bovendien afhankelijk van andere factoren, zoals de marktvraag, de mate van dekkende laadinfrastructuur en de investeringsbereidheid vanuit de sector.

Om de ontwikkeling van de ingroei van uitstootvrije voertuigen in Tabel 18 aan te geven wordt gebruik gemaakt van de marktfasen zoals die zijn geïdentificeerd in de Routeradar 2019 Straatbeeldmonitor – Wegvervoer (RWS, 2020), zie Tabel 15. De marktfase waarin een type voertuig zich bevindt is bepalend voor de mogelijkheid tot opschaling.

Tabel 18: Mogelijke introductiepaden voor verschoning per categorie bouwlogistiek

Categorie	2021-2023	Korte Termijn (2023-2025)	Middellange Termijn (2025-2030)	Lange Termijn (>2030)
Algemeen	<ul style="list-style-type: none"> - Stimulering en monitoring van logistieke efficiëntieverbetering (maatregelen zoals bouwhubs, industrialisatie, bundelen bij de leverancier, verschuiving naar andere modaliteiten). - Monitoring/controle van brandstof- en AdBlue-verbruik en emissies belangrijk ter beoordeling van effectiviteit - Zonder controle en handhaving zal er een verschil zijn, of ontstaan, tussen de geplande en de daadwerkelijke emissiereducties. 			
Licht (bestelwagens)	<ul style="list-style-type: none"> - Opschalingsfase* uitstootvrij - Inzet schoon conventioneel (Euro 6d) 	<ul style="list-style-type: none"> - Opschalingsfase* uitstootvrij - + voorgaande 	<ul style="list-style-type: none"> - Opschalingsfase* uitstootvrij → beheerfase uitstootvrij - + voorgaande 	Beheerfase uitstootvrij
Middelzwaar	<ul style="list-style-type: none"> - Marktintroductie fase uitstootvrij (incl. ombouw) - Inzet schoon conventioneel (Euro VI) - Evt. extra inzet Duurzame biobrandstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> - Marktintroductie uitstootvrij → - + voorgaande 	<ul style="list-style-type: none"> - Opschaling* uitstootvrij (afhankelijk van aanbod en ervaringen en kosten) - + voorgaande 	- Marktopschaling* uitstootvrij → beheerfase uitstootvrij
Zwaar	<ul style="list-style-type: none"> - Marktvoorbereiding/marktintroductiefase uitstootvrij (incl. ombouw) - Inzet schoon conventioneel (Euro VI) - Evt. extra inzet duurzame biobrandstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> - Marktintroductie fase uitstootvrij (incl. ombouw) - + voorgaande 	<ul style="list-style-type: none"> - Marktintroductie fase uitstootvrij → marktopschaling uitstootvrij (afhankelijk van aanbod en ervaringen) - + voorgaande 	<ul style="list-style-type: none"> - Marktopschaling uitstootvrij → beheerfase uitstootvrij - Introductie en opschaling van E-fuels

* De snelheid van opschaling (geldt voor elke categorie in elke fase) is afhankelijk van o.a. het aanbod, de aanbestedingseisen, de kosten, beschikbaarheid van infrastructuur en de opgedane ervaringen.

5 Voorwaarden en potentiële barrières

De ontwikkeling van het aanbod van nul-emissie mobiele werktuigen en voertuigen is nog in een beginfase. Om die reden is er een aantal voorwaarden/barrières voor de betaalbaarheid, beschikbaarheid en toepasbaarheid van nul-emissie opties (Quak, Koffrie, van Rooijen, & Nesterova, 2017) (Verbeek, et al., 2018).

5.1 Betaalbaarheid

De total cost of ownership²¹ van (zware) elektrische voertuigen zijn nu nog hoger dan van de conventionele varianten. Om financieel aantrekkelijker te worden is een sterke daling nodig van de kosten van de elektriciteitsvoorziening (inclusief laadinfrastructuur) en de prijzen van accu's. Ook is hiervoor voldoende markt vraag nodig.

5.2 Beschikbaarheid

- De beschikbaarheid van middelgrote (>56kW) zero-emissie werktuigen is nog zeer beperkt op dit moment. Prototypes en concept werktuigen worden wel al gepresenteerd voor het grotere segment.
- De accu's beperken het maximale ladinggewicht van voertuigen vanwege het gewicht. Voor bestelauto's kan dit betekenen dat een rijbewijs B niet meer voldoende is. Momenteel loopt er een pilot met een tijdelijke vrijstelling van rijbewijs C voor nul-emissie bestelauto's als onderdeel van de Green Deal Zero Emission Stadslogistiek (Green Deal ZES)²²;
- Voldoende beschikbaarheid van (snel-)laadpalen/waterstoftankstations is van belang;
- Voldoende laadvermogen creëren op de bouwplaats voor het opladen van elektrisch bouw materieel is niet vanzelfsprekend. De locatie, een tijdelijke aard van de voorziening, de stroomvraag, kosten en de benodigde tijd voor de aanleg van de elektriciteitsvoorziening kunnen barrières opwerpen.
- Gezien de trage ontwikkelingen in beschikbaarheid van nul-emissie bouwlogistieke voertuigen is ook het slimmer inrichten van logistieke operaties, en daarmee het verminderen van het aantal voertuigkilometers, belangrijk voor de haalbaarheid van het reductiepad naar nul-emissie.

5.3 Toepasbaarheid

- De actieradius van elektrische voertuigen is beperkter dan vergelijkbare conventionele varianten. Dit vraagt om een verandering van de inzet (bijvoorbeeld: gebruik maken van ontkoppelpunten zoals een hub) en/of voldoende aanbod van (mobiele) snelladers;
- Operationeel is elektrificatie een flinke uitdaging bij inzet zonder stroomvoorziening, zowel bekabeld als om accu's op te laden, als accu transport belastend is.

²¹ Totale kosten van het bezit en gebruik van het voertuig

²² <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/experiment-tijdelijke-vrijstelling-rijbewijsC>, geraadpleegd op 25 mei 2021

- De milieu-impact, als het gevolg van het vervoeren van mobiele accu containers, mag niet worden onderschat.
- Wanneer elektrische werktuigen niet een volledige werkdag op één accu kunnen draaien, kan dat gevolgen hebben voor de werkzaamheden en de planning van een bouwproject.
- Voor werkzaamheden aan het spoor wordt vaak de spanning van de bovenleiding gehaald, beschikbaarheid van elektriciteit is daardoor niet vanzelfsprekend.

6 Vaartuigen die worden gebruikt in de waterbouw

6.1 Inleiding

Als laatste onderdeel in deze notitie worden de vloot, emissies en emissie-reducerende maatregelen in kaart gebracht van vaartuigen die worden ingezet in de waterbouw. Bij de maatregelen wordt hierbij zowel gekeken naar opties die luchtverontreinigende stoffen (zoals NO_x en fijnstof) reduceren als naar opties die broeikasgassen (met name CO₂) reduceren. Het is hierbij belangrijk om onderscheid te maken tussen de mogelijkheden op korte termijn en mogelijkheden op lange termijn.

Het doel van deze activiteit was driedig:

- In kaart brengen van representatieve operationele profielen voor de waterbouvvloot;
- Inschatting van totale emissies voor Nederlands grondgebied op basis van profielen, omvang vloot en aandeel werk in Nederland; en
- Inschatten van de impact van verschillende verschoningsopties.

6.2 Aanpak

Voor de zoete waterbouvvloot is gebruik gemaakt van de resultaten van een onderzoek van TNO voor de Vereniging van Waterbouwers (TNO, 2022).

In dit onderzoek zijn achtereenvolgens de volgende onderzoekstappen doorlopen:

- Inventarisatie van duurzaamheidsdoelstelling op nationaal en EU niveau die van belang zijn voor de zoete waterbouvvloot.
- Opstellen van vlootprofielen: Dit omvat het in kaart brengen van de huidige en toekomstige vloot en de bijbehorende operationele profielen en het in kaart brengen van de huidige milieuprestatie van deze vloot. Deze analyse is opgesteld op basis van informatie die is verzameld bij leden van de Vereniging van Waterbouwers in interviews en informatie die door deze geïnterviewde partijen is aangeleverd. De uitkomsten van deze analyse is geverifieerd in een eerste workshop met verschillende leden van de vereniging.
- Analyse omvang en samenstelling van de vloot: Op basis van de profielen is een enquête uitgezet onder leden waarin bedrijven zijn gevraagd naar de omvang en samenstelling van hun vloot. Op basis van het aantal motordraaiuren, aantal verbruikte liters, leeftijdsklasse van motor en totaal motorvermogen zijn de emissies per schip berekend.
- Het maken van een inventarisatie van duurzaamheidsopties. Dit is gedaan op basis van binnen TNO beschikbare kennis. Deze inventarisatie richtte zich op opties die luchtverontreinigende- en/of broeikasgasemissies reduceert.

Het rapport is in januari 2022 afgerond.

Voor het overige gedeelte van de waterbouvvloot is in het kader van het programma Schoon en Emissieloos Bouwen aanvullend onderzoek gedaan, vergelijkbaar met het onderzoek naar de zoete vloot:

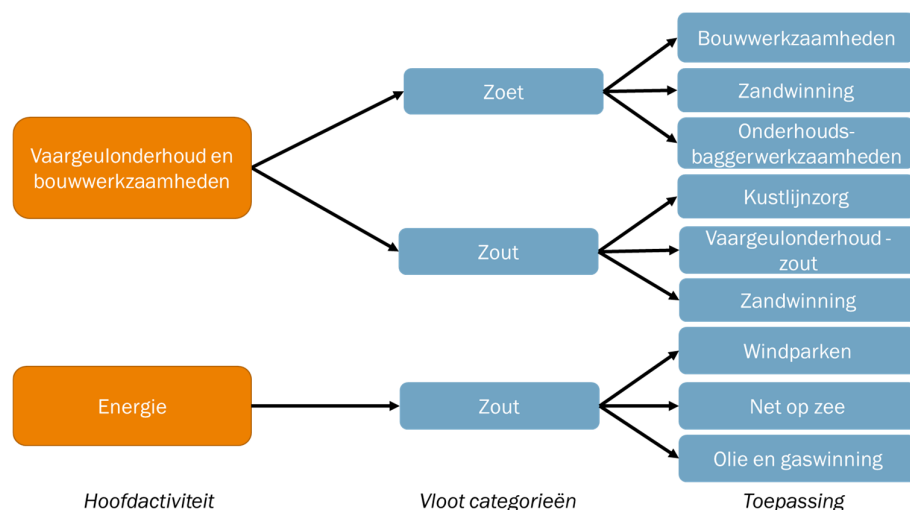
- Opstellen van vlootprofielen: In kaart brengen representatieve operationele profielen voor werkzaamheden die worden uitgevoerd met de zoute waterbouwwloot. Dit wordt gedaan op basis van interviews gehouden met waterbouwers die actief zijn in maritieme waterbouw en data die door partijen beschikbaar werden gesteld. De informatie aangeleverd door deze partijen wordt aangevuld met publiek beschikbare data.
- Inschatten van de totale werkzaamheden die met de vloot worden uitgevoerd op het Nederlandse grondgebied. Dit gebeurde op basis van informatie van Rijkswaterstaat en uit publiek beschikbare bronnen.
- Met behulp van de operationele profielen en de totale werkzaamheden op zee zijn berekeningen uitgevoerd over totale energieinzet en uitstoot.
- Inschatten impact verschooningsopties. Aan de hand van recente inventarisaties in de Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens is een lijst van mogelijke reductieopties opgesteld.

Voor deze opties is bepaald wat het effect is op:

- Reductie van NO_x-, PM- en CO₂-emissies;
- Operationele inzet; en
- Kosten.

6.3 Vlootsamenstelling en emissies

De vloot die wordt ingezet voor waterbouw bestaat uit een aantal verschillende activiteiten. Een ander belangrijk onderscheid is het werkgebied waar de schepen worden ingezet. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen inzet in binnenlandse wateren (ofwel zoet) of inzet op zee (ofwel zout). Onderstaande figuur geeft een overzicht van de verschillende categorieën en vloottoepassingen. De onderdelen zandwinning en olie- en gaswinning maken deel uit van reguliere activiteiten uitgevoerd door de waterbouwsector, maar vallen buiten de scope van het programma Schoon en Emissieloos bouwen.



Figuur 8: Overzicht van de verschillende waterbouwwerkzaamheden

6.3.1 Zoete waterbouw

In deze sectie wordt een korte samenvatting gegeven uit de enquête die is gehouden onder leden van de Vereniging van Waterbouwers. Uit dit onderzoek komt naar voren dat in Nederland 345 zoete waterbouwschepen actief zijn. Daarnaast bestaat de vloot nog uit 269 duwbakken met een zeer kleine hulpmotor aan boord voor de hydrauliek²³.

De samenstelling van de zoete waterbouvvloot laat een grote verscheidenheid zien.

Er zijn 11 voorname operationele profielen onderscheiden die worden ingezet voor verschillende hoofdtaken:

- Schepen die worden ingezet voor zandwinning. Dit betreft stationaire zandzuigers en een gedeelte van de stationaire of mobiele cutterzuigers. Deze activiteit valt buiten de scope van het programma Schoon en Emissieloos Bouwen.
- Schepen die worden ingezet voor onderhouds-baggerwerkzaamheden. Dit betreft mobiele schepen van verschillende omvang zoals hopperzuigers, cutterzuigers, kraanschepen, schuifboten en ondersteunende schepen zoals bakkenzuigers en transportschepen.
- Schepen die worden ingezet voor bouwwerkzaamheden. Deze worden ingezet op verschillende locaties per jaar (heischepen, werkschepen).
- Overige ondersteunende schepen (onder meer duwboten, peilboten, surveyschepen en maaischepen).

De profielen verschillen sterk in:

- Technische kenmerken van het schip en de motoren (aantal motoren en het totale vermogen, leeftijd van de motoren, energiedrager);
- Operationele inzet (aantal uren inzet per week, lengte van de periode dat het schip op een specifieke locatie wordt ingezet).

Op basis van de samenstelling en inzet van de vloot zijn berekeningen gemaakt van de huidige emissies (zie voor een methodologische toelichting (TNO, 2022)). De totale vloot stootte in 2021 ca. 76 kton CO₂, 634 ton NO_x en 18 ton PM uit.

²³ De hier gepresenteerde cijfers zijn de resultaten van de enquête onder leden van de Vereniging van Waterbouwers. Dit is hiermee een onderrepresentatie van de emissies van de totale vloot die in Nederland actief is. Dit zal met name gelden voor de kleinere en overige schepen, zoals bijvoorbeeld maaiboten, schuifboten en kleine werkschepen.

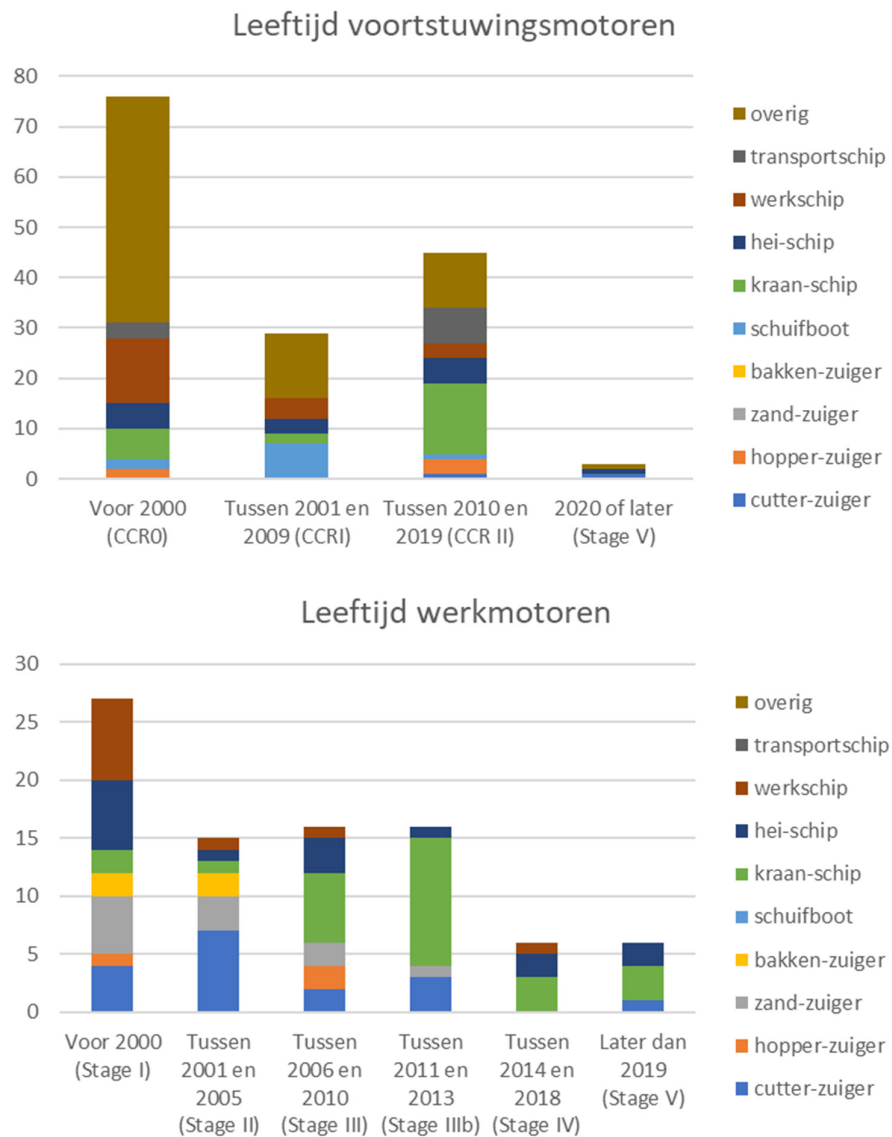
Tabel 19: Omvang en emissies van de zoete waterbouwwloot in 2021* ²⁴

	Aantal	CO _{2eq} kton/jaar	NO _x ton/jaar	PM ₁₀ ton/jaar
Zand-zuiger (stationair)	46	21	162	5,1
Cutter-zuiger - stationair / mobiel	23	4	35	1,0
Hopper-zuiger	10	9	89	2,4
Bakken-zuiger	6	2	22	0,5
Kraanschip	41	17	135	3,6
Schuifboot	14	0	1	0,0
Heischip	19	7	32	0,9
Werkschip	32	2	22	0,7
Transportschip	34	13	116	3,1
Duwbak	269	1	6	0,2
Overige ondersteunende schepen	120	1	15	0,5
Totaal	614	76	634	18

* zie voetnoot 24: (TNO, 2022)

Een belangrijke factor voor de NO_x- en PM-uitstoot is de leeftijd van de motoren. Een significant deel van de voortstuwings- en werkmotoren in de vloot is meer dan 20 jaar oud en heeft nog geen emissieklasse. Dit is te zien in onderstaande figuur waar de leeftijdsverdeling van de werk- en voortstuwingsmotoren vloot van de vloot worden gepresenteerd. Er zijn grote verschillen tussen scheepstypen: werkschepen en overige schepen zijn relatief oud. Kraan- en transportschepen hebben relatief nieuwe motoren. Hier is ook in veel gevallen reeds nabehandeling aanwezig.

²⁴ Zoete waterbouwwloot die in Nederland actief is. Dit zal met name gelden voor de kleinere en overige schepen, zoals bijvoorbeeld maaiboten, schuifboten en kleine werkschepen.



Figuur 9: Leeftijdsverdeling van de voortstuwings- en werkmotoren van de zoete waterbouwwloot
Bron: (TNO, 2022).

Op basis van de huidige vlootsamenstelling is in het rapport een analyse gemaakt van de emissies in 1990 en de verwachte samenstelling in 2030 wanneer geen maatregelen worden genomen. Hierbij is de leeftijdsamenstelling van de vloot over de tijd gelijk gehouden.

Tabel 20: Emissies van de zoete waterbouwwloot in 1990, 2021 en 2030 (zonder toepassing van aanvullende reductieopties).

	1990	2021	2030 autonoom
CO ₂ (Mton)	0,081	0,076	0,062
NO _x (kton)	1,2	0,63	0,57
PM ₁₀ (ton)	35	18	15

6.3.2 Vaargeulonderhoud en bouwwerkzaamheden zout

Binnen deze categorie vallen de activiteiten kustlijn­zorg, zoute vaargeulonderhoud en maritieme commerciële zandwinning.

Kustlijn­zorg en zoute vaargeulonderhoud wordt gedaan in opdracht van de Rijksoverheid en havenbedrijven. Voor de Rijksoverheid wordt jaarlijks ongeveer 24 miljoen ton materiaal gebaggerd. Deze jaarlijkse hoeveelheid is relatief stabiel. Tot 2030 worden geen grote veranderingen verwacht.

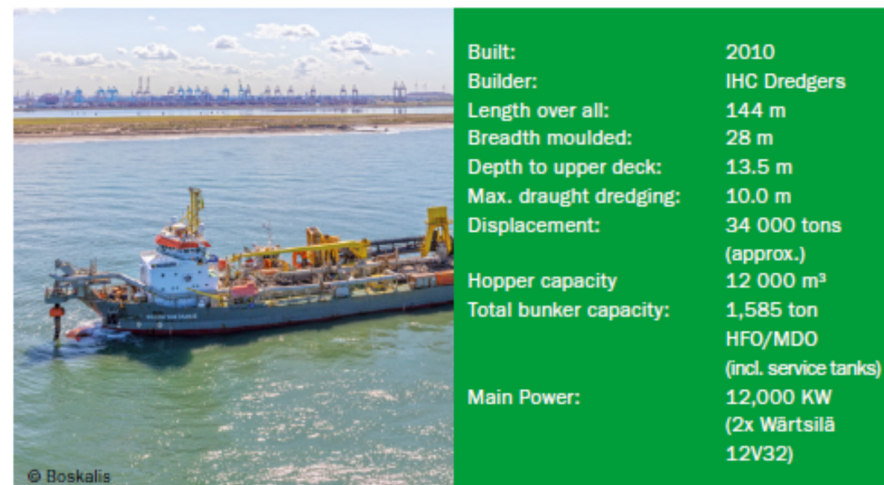
De omvang van het zoute vaargeulonderhoud dat wordt uitgevoerd door havenbedrijven is onbekend. Daarnaast is het ook niet bekend welk aandeel hiervan met zoute of de zoete waterbouwschepen wordt uitgevoerd.

Tabel 21: Omvang van de jaarlijkse hoeveelheden gebaggerd materiaal in 2021.

	Miljoen m ³ (in situ) - 2019
Kustlijn­zorg – vooroever	6,6
Kustlijn­zorg – strand	4,4
Vaargeulonderhoud – zout	13,0
Totaal	24,0

**Inschatting op basis van jaarlijkse kosten 2019 en data uit eerdere jaren. Bron: Objectbeheerregime Kustfundament 2019 en Objectbeheerregime Bodems 2019.*

De werken voor de Rijksoverheid worden uitgezet in tenders. In totaal zijn ca. 15 tot 30 verschillende schepen per jaar aan het werk. Onderstaand schip is een voorbeeld van een maritiem baggerschip dat wordt ingezet voor dergelijke baggerwerkzaamheden.



Figuur 10: Specificaties van de hopper Willem van Oranje Bron: (TNO & MKC, 2021).

De schepen worden niet uitsluitend in Nederland ingezet. De bedrijven opereren hun vloot wereldwijd en zetten schepen in voor Nederland op basis van beschikbaarheid en tenderspecificaties.

Op basis van de totale omvang van de Nederlandse markt, een vertaalslag van gebaggerd materiaal naar brandstofverbruik en emissies per schip is een eerste inschatting gemaakt van de CO₂-, NO_x- en PM-emissies. Deze eerste uitkomsten zijn verder geverifieerd aan de hand van aanvullende data van maritieme waterbouwers.

Vanuit de studie Bepaling milieu-impact Kustlijnzorg-projecten (TNO, 2020) is bekend hoeveel brandstof in de Nederlandse kustlijnzorgprojecten wordt gebruikt. Hiermee is een gemiddelde brandstofverbruik per kuub (m³) bagger berekend die is gebruikt om het totale jaarlijks brandstofverbruik en vervolgens de jaarlijkse CO₂-uitstoot te berekenen.

Voor deze berekening is een bandbreedte aangehouden. Het brandstofverbruik per kuub kan sterk verschillen tussen verschillende werken die worden uitgevoerd (denk aan inzet van verschillende type schepen, het type gebaggerd materiaal of de vaarafstand naar het werk). De gehanteerde bandbreedte is groter voor zoute vaargeulonderhoud dan voor kustlijnzorg, omdat hier meer onzekerheid is.

De inschatting van de totale NO_x- en PM-uitstoot vergt een meer gedetailleerde aanpak op basis van motorkenmerken van de schepen. Deze uitstoot is afhankelijk van de emissieklasse van de motoren, het motorvermogen, de aanwezigheid van eventuele nabehandeling (SCR-katalysator en/of roetfilter), de gebruikte brandstof en de inzetprofielen en belasting per motor. Deze kenmerken zijn opgehaald bij de waterbouwers.

Met de scheepsdata van de waterbouwers is een inschatting gemaakt van de NO_x- en PM-uitstoot van de operatie van de huidige vloot. Deze uitstoot is uitgedrukt in massa NO_x en PM per liter brandstof om vervolgens met het totale brandstofverbruik de totalen te schatten, zie Tabel 22 voor de resultaten.

Let op, in deze cijfers zit een onzekerheid over het brandstofverbruik van boosterstations. Dit zijn machines op het land die worden ingezet om de aanvoer van zand voor strandsuppletie te ondersteunen. Het is niet zeker of het brandstofverbruik van deze boosters wel of niet is meegenomen in het brandstofverbruik van kustlijnzorgprojecten.

Tabel 22: Inschatting van de jaarlijkse emissies voor de kustlijnzorg en zoute vaargeulonderhoud.

Activiteit	Miljoen m ³ (In situ)	Mton CO ₂	kton NO _x		ton PM		
Kustlijnzorg vooroever	6,6	0,01	0,03	0,2	0,3	4,7	7,5
Kustlijnzorg strand	4,4	0,01	0,03	0,2	0,3	4,2	7,9
Zoute vaargeulonderhoud	13,0	0,05	0,10	0,6	1,3	15,9	31,2
Totaal	24,0	0,08	0,16	1,0	2,0	24,7	46,6

Bron: Operationele data van waterbouwers, Bepaling milieu-impact Kustlijnzorg-projecten (TNO, 2020), Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands (Geilenkirchen et al, 2021).

Voor de ontwikkeling naar 2030 wordt verwacht dat de omvang van de werkzaamheden stabiel blijft. Doordat emissies in aanbestedingen via de milieukostenindicator (MKI) zijn opgenomen, is er vanuit bedrijven een incentive om de vloot te verjongen of retrofit oplossingen toe te passen (zie volgende paragraaf).

Naar verwachting zullen de emissies in de komende periode hierdoor afnemen (zie onderstaande tabel).

Tabel 23: Inschatting van de ontwikkeling van de jaarlijkse emissies voor de kustlijnzorg en zoute vaargeulonderhoud tussen 2021 en 2030.

	2021	2025 autonoom	2030 autonoom
CO ₂ - Mton	0,12	0,11	0,11
NO _x – kton	1,5	1,3	1,1
PM - ton	35,7	35,7	35,7

De commerciële zandwinning valt mogelijk buiten de scope van het programma schoon en emissieloos bouwen. Het betreft een majeure activiteit. Per jaar wordt ca. 15 miljoen ton vergund. De daadwerkelijke hoeveelheid gewonnen zand verschilt per jaar en hangt af van de vraag van (met name) infrastructurele werken (ARCADIS & Wageningen Marine Research, 2017) (SWECO, 2017).

Op basis van historische hoeveelheden is een bandbreedte aangehouden van 6 tot 12 miljoen m³.

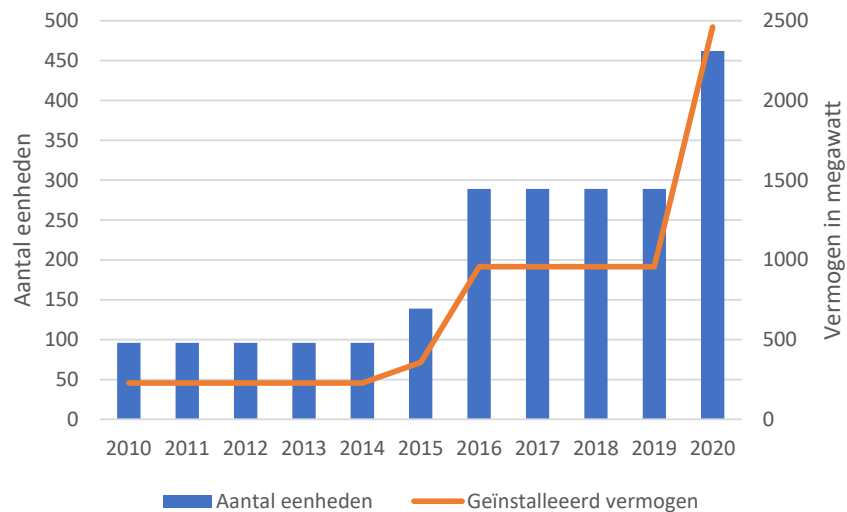
Er is geen informatie bekend over de kenmerken van de vloot die wordt ingezet voor commerciële zandwinning. Voor de berekening van het brandstofverbruik en de emissies is aangesloten bij de factoren die gebruikt zijn voor de kustlijnzorg. Dit kan in de praktijk afwijken. Naar verwachting zal de verjonging van deze vloot minder snel gaan dan in de kustlijnzorg en het zoute vaargeulonderhoud, omdat in commerciële opdrachten MKI een minder sterke rol speelt.

Tabel 24: Inschatting van de jaarlijkse emissies voor de zandwinning in 2021

Activiteit	Miljoen m ³ (In situ)	Mton CO ₂		kton NO _x		ton PM	
Zandwinning op zee - hoog	12	0,03	0,05	0,38	0,62	8	14
Zandwinning op zee - laag	6	0,02	0,02	0,19	0,31	4	7

6.3.3 Offshore

Een belangrijke activiteit bij offshore is installatie en onderhoud van offshore windenergie. In 2020 was ongeveer 2,5 GW offshore wind energiecapaciteit geïnstalleerd (zie onderstaand figuur). Groei van de capaciteit gaat niet geleidelijk, maar projectmatig in grotere hoeveelheden. Wat opvalt is dat de gemiddelde capaciteit per windmolen toeneemt over de tijd (gemiddeld 4 MW in 2016 en 8 MW in 2020).



Figuur 11: Ontwikkeling van capaciteit van wind op zee tussen 2010 en 2020. Bron: (CBS, 2021).

De komende jaren zal de aanleg van wind op zee fors toenemen:

- De totale capaciteit op zee in 2030 inclusief die van geplande projecten bedraagt ~10,5 GW.
- In het Aanvullend ontwerp Programma Noordzee 2022-2027 is de ambitie uitgesproken om deze groei te versnellen tot ~20,5 GW in 2030 en 38 GW in 2040.

Ook zal de schaalvergroting van steeds grotere windmolens verder doorzetten (van 8-10 MW in 2020 tot ca 14 MW in 2025. Naar verwachting groeit dit naar molens van 20 MW). Inzet van installatie- en onderhoudsschepen nemen dus significant toe in de komende jaren. Naar verwachting zullen daarnaast steeds grotere schepen worden ingezet.

Voor offshore wordt een grote verscheidenheid aan schepen ingezet voor installatie en onderhoud (zie onderstaande figuur voor een paar voorbeeldschepen). Voor de installatie van een windmolenpark worden bijvoorbeeld (onder meer) valpijpschepen gebruikt voor het plaatsen van de fundatie, jack-up schepen en kraanschepen voor de installatie. Daarnaast wordt installatie en onderhoud ondersteund door verschillende schepen, zoals toeleverschepen (PSVs), schepen voor personeel (crew tenders) en duikondersteuningsvaartuigen. Een aparte categorie binnen offshore is de aanleg van het net op zee, ofwel bekabeling tussen de offshore windparken en het vaste land. Hiervoor worden onder meer hoppers en kabelleggers ingezet. Deze schepen hebben een grote variëteit aan operationele inzet en motorgebruik.



Kabelleggers



Valpijpschepen



Jack-up installatieschepen



Support schepen

Figuur 12: Voorbeeldschepen voor offshore (Bron: Van Oord, DEME, Jan de Nul, Boskalis)

Voor de berekening van de emissies van offshore wind is uitgegaan van twee scenario's:

- Een vastgesteld beleidsscenario die uitgaat van een groei tot 10,5 GW in 2030;
- Een voorgenomen beleidsscenario die uitgaat van een groei tot 20,5 GW.

Voor de berekening van de jaarlijkse beide scenario's is verondersteld dat de installatie geleidelijk over de jaren plaatsvindt. Voor de uitstoot in 2021 is uitgegaan van het vastgestelde scenario.

Op basis van AERIUS berekeningen voor wind op zee projecten die zijn uitgevoerd in MER-rapportages is input verzameld over de inzet van verschillende schepen (aantal, vermogen en uren inzet) voor verschillende bouwprojecten (ARCADIS, 2021) (Pondera, 2018) (Pondera, 2020) (Pondera, 2020) (Pondera, 2019). Op basis van gedetailleerde vlootinformatie vanuit waterbouwers zijn berekeningen uitgevoerd over totale energie inzet en uitstoot per type schip voor de verschillende projecten. Vervolgens is een inschatting gemaakt van de NO_x-uitstoot per MW windpark. De uitkomsten zijn besproken met waterbouwers in interviews. Hieruit bleek dat de uitstoot in de praktijk erg afhankelijk is van aantal windmolen (MW per windmolen) en afstand van de kust tot het park. Om deze reden is besloten ook voor dit segment een bandbreedte aan te houden. Deze is vormgegeven rondom de omvang van het gemiddelde geïnstalleerde object.

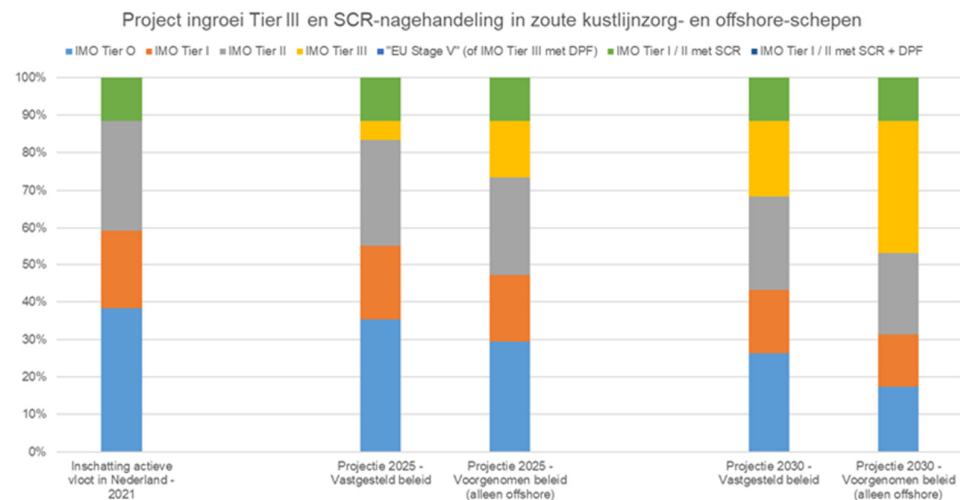
Nast offshore wind vinden ook activiteiten plaats voor olie en gas. Dit betreft voornamelijk bevoorrading en onderhoud van de ~100 operationele platforms. In de komende jaren zal daarnaast activiteit plaats vinden in het ontmantelen van platforms die niet meer in gebruik zijn, ofwel deze om te bouwen naar andere werkzaamheden zoals elektrolyse en opslag van elektriciteit naar waterstof. Binnen het kader van deze studie kon niet worden vastgesteld wat de omvang is van de vlootinzet voor deze activiteit. Daarnaast valt olie- en gaswinning buiten de scope van het programma Schoon en Emissieloos Bouwen.

In onderstaande tabel staat de uitkomst van de analyse voor het zichtjaar 2021.

Tabel 25: Inschatting van de jaarlijkse emissies voor inzet van waterbouwvaartuigen in de offshore.

Activiteit	Mton CO ₂		kton NO _x		ton PM	
Windparken	0,08	0,10	0,9	1,2	17	21
Net op zee	0,03	0,04	0,5	0,6	6	8
Olie en gaswinning op zee	?	?	?	?	?	?
Totaal	0,11	0,14	1,3	1,8	23	29

Voor de autonome ontwikkeling van de emissies is naast de omvang van de werkzaamheden op zee ook de autonome ontwikkeling van de ingezette vaartuigen van belang. Uit gesprekken met waterbouwers komt naar voren dat er reeds incentives bestaan om met name het moderne gedeelte van de vloot in te zetten voor Nederlandse werken. De bedrijven verwachten dat dit doorzet naar de toekomst. Dit zal in grotere mate gelden voor het voorgenomen scenario (20 GW in 2030), aangezien hier meer nieuwbouw plaats zal vinden als gevolg van de grotere opgave gecombineerd met de behoefte naar grotere installatieschepen als gevolg van de schaalvergroting. De NO_x uitstoot van deze nieuwe schepen zijn veel lager dan het gemiddelde van de huidige vloot (zie een verdere toelichting over Tier-klassen in de volgende paragraaf).



Figuur 13: Projectie van de ingroei van de inzet van tier III en SCR nabehandeling in het vastgestelde en voorgenomen scenario.

De uitkomsten van deze autonome prognose is weergegeven in onderstaande tabel. Hierbij is uitgegaan van het gemiddelde van de bandbreedte voor 2021 die is gepresenteerd in Tabel 25. De figuur laat zien dat in het vastgestelde scenario de emissies afnemen ten opzichte van de situatie in 2021. In het voorgenomen scenario nemen de emissies sterk toe tot 2025, hierna nemen de emissies.

Tabel 26: Emissies als gevolg van vastgesteld en voorgenomen beleid voor 2025 en 2030.

	2021	Scenario	2025	2030
CO ₂ – Mton	0,13	<i>Vastgesteld – 10,5 GW</i>	0,12	0,12
		<i>Voorgenomen – 20,5 GW</i>	0,28	0,25
NO _x – kton	1,5	<i>Vastgesteld – 10,5 GW</i>	1,38	1,13
		<i>Voorgenomen – 20,5 GW</i>	3,11	2,55
PM – kton	0,03	<i>Vastgesteld – 10,5 GW</i>	0,03	0,03
		<i>Voorgenomen – 20,5 GW</i>	0,06	0,06

6.4 Reductiemaatregelen waterbouw

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de impact van verschillende reductieopties. Hierin wordt vooral aandacht gegeven aan inzet van alternatieve energiedragers (biobrandstoffen, LNG, methanol, ammonia, waterstof, etc.); en aanpassing van het aandrijfsysteem (inzet van schone verbrandingsmotoren, brandstofcellen of elektrische aandrijflijnen).

Achtereenvolgens wordt in deze notitie de volgende onderwerpen behandeld:

- een overzicht van de alternatieven die zijn meegenomen in deze analyse en de technologische rijpheid hiervan,
- de verwachte bijdrage aan reductie van NO_x- en PM-emissies
- de verwachte bijdrage aan reductie van CO₂-emissies
- Impact op de operationele inzet/ het ruimtegebruik aan boord
- Impact op de investerings- en operationele kosten

In de analyse is gebruik gemaakt van standaardschepen voor baggeren en offshore die zijn opgesteld in de Green Deal validatieregeling.

De informatie uit deze sectie is een samenvatting van recent onderzoek naar de effecten van inzet van verschillende reductiemaatregelen:

- MARIN & TNO (2020), Vervolgstappen validatie methodieken ten behoeve van transitie naar emissieloze scheepvaart. Referentie schepen en hun missie profiel en stand der techniek van alternatieve energiedragers en -omzetters
- MARIN & TNO (2021), Validation scheme for the Green Deal for Shipping, Inland Shipping and Ports (C-230) - Validation of alternative fuels, hydrogen in a combustion engine.
- TNO & MKC (redactie) (2021), Green Maritime Methanol. Towards a Zero Emission Shipping Industry.
- TNO (2021), Verkenning brandstoftransitie zeevaart.

6.5 Onderzochte energiedragers en -omzetters en hun 'volwassenheid'

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende energiedragers die in de analyse zijn meegenomen. Alternatieve energiedragers kunnen verschillen in het type (bijv. methanol of waterstof), maar daarbinnen zijn er ook verschillende varianten als gevolg van het productieproces (bijvoorbeeld een fossiele bron, een bio route of gebruik van een synthetisch productieproces). Toepassing van de verschillende technieken kan gebeuren bij nieuwe schepen (nieuwbouw), maar is soms ook mogelijk om in te bouwen in bestaande schepen (retrofit).

Voor elke energiedrager is per productiemethode het bijbehorende TRL (Technology Readiness Level) niveau gegeven (gebaseerd op verschillende bronstudies), zowel voor dit moment en de verwachte kennisontwikkeling naar 2030. De schaal hiervan loopt van 1 (fundamenteel onderzoek) tot 10 (volwassen). Het TRL level van 2030 is onzeker omdat dat sterk afhankelijk is van de ontwikkelingen (projecten, productontwikkeling, demonstraties) welke tussen 2020 en 2030 plaats zullen vinden. Dit is meestal afhankelijk van financieringsinstrumenten van de overheid (wereldwijd, Europees, nationaal).

Opgemerkt moet worden dat deze lijst niet uitputtend is en dat binnen de varianten ook ontwikkeling is. Voor bijvoorbeeld batterijen wordt nog gewerkt aan verschillende innovaties in accutechnologie en ook bij biobrandstoffen zijn er nog nieuwe herkomstbronnen en productieprocessen in ontwikkeling.

Tabel 27: Verwachte TRL van verschillende energiedragers en aandrijflijnen.

Alternatief	Brandstof	TRL 2020	TRL 2030
1. Alternatieve brandstoffen in een verbrandingsmotor	MGO	10	10
	HFO (0.5 % S)	10	10
	HVO	10	10
	FAME	10	10
	E-diesel	5/6	6/8
	GTL	10	10
	LPG	10	10
	BLPG	10	10
	LNG	10	10
	LBG (bio-LNG)	6/8	10
	e-LG	5/6	6/8
	Methanol (grijs)	8	10
	Biomethanol	6/8	10
	E-Methanol	5/6	6/8
	DME	6/8	9/10
	BioDME	6/8	9/10
	E-DME	5/6	6/8
	Ethanol Lignocellulosic hydrolysis	6/8	9/10
	Ethanol - Sugar / starch hydrolysis	10	10
	Ammonia (grijs)	6	8/9
Waterstof (Grijs)	7/8	8/9	
Waterstof (Elektrolyse)	5/6	6/8	
2. Alternatieve energiedragers met een andere energieomzetter	Batterij-Elektrisch (NL groen)	7/8	9/10
	Waterstof (Grijs) in PEM-brandstofcel	6/8	8/9
	Waterstof (elektrolyse) in brandstofcel	5/6	6/8
	Methanol (grijs) in brandstofcel	6/8	8
	Biomethanol in brandstofcel	6/8	8
	E-Methanol in brandstofcel	4/5	?
	Ammonia (grijs) in brandstofcel	6/8	8
	E-Ammonia in brandstofcel	5/6	6/8
	LOHC in brandstofcel	5/6	8
	Waterstof (ijzerpoeder) in brandstofcel	4	?
	LCH4 in brandstofcel	4/5	?

Bron: TNO & MARIN 2020 (bewerkt voor inschatting situatie 2021).

6.6 Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies voor de zoute waterbouw

Het effect van toepassing van nieuwe energiedragers op luchtverontreinigende emissies (NO_x, SO_x, PM) is van een aantal factoren afhankelijk. De uitstoot van SO_x is afhankelijk van het zwavelgehalte in de brandstof. Voor NO_x en PM is de uitstoot afhankelijk van de energiedrager en het verbrandingsproces van de motoren van het schip. Uitstoot van luchtverontreinigende emissies kunnen daarnaast op het schip worden opgevangen door een nabehandelingssysteem. Voor een aantal energiedragers (ammoniak) is nog weinig meetdata beschikbaar bij verbrandingsmotoren. Ook voor een aantal energiedragers in combinatie met brandstofcellen is veel onbekend.

Voor het bepalen van de reductie van NO_x-uitstoot van de reductiemaatregel, is het van belang om inzicht te hebben in de emissieklasse waar het schip in de oude en nieuwe situatie aan voldoet. Voor de zeevaart wordt de emissieklasse aangeduid als Tier-klasse. Dit systeem is vastgesteld door de *International Maritime Organisation* (IMO) en werkt op een zelfde wijze als de Stage-classes voor bouwmaschinen. De Tier-klassen waaraan moet worden voldaan zijn afhankelijk van de bouwjaar van het schip (dus niet de motor van het schip zoals bij binnenvaart) en het toerental van het schip. Tier I en II gelden internationaal. Tier III normen gelden alleen wanneer schepen opereren in een Emission Control Area (ECA). Sinds 2016 geldt dit in Noord-Amerika. Vanaf 2021 geldt dit ook voor de Noordzee en de Baltische Zee. Zoals blijkt uit onderstaande tabel zijn de emissie-eisen voor Tier III strikter dan Tier I en II (~75% lager dan Tier II).

Tabel 28: NO_x-emissielimieten voor de zeevaart.

Klasse	Bouwjaar schip	NO _x emissielimieten (g/kWh)		
		n = snelheid motor (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
Tier I	2000 - 2010	17,0	$45 \cdot n^{(-0,2)}$	9,8
			bijv. 720 rpm – 12,1	
Tier II	2011 - 2020	14,4	$44 \cdot n^{(-0,23)}$	7,7
			bijv. 720 rpm – 9,7	
Tier III	2021 (Noordzee)	3,4	$9 \cdot n^{(-0,2)}$	2,0
			bijv. 720 rpm – 2,4	

IMO (2021), Nitrogen Oxides (NO_x) – Regulation 13

Voor het halen van Tier III NO_x-eis, zal voor de meeste energiedragers in combinatie met een verbrandingsmotor een emissiecontrolesysteem noodzakelijk zijn. Voor diesel en biodiesel zal dat over het algemeen SCR (Selective Catalytic Reduction) of EGR (exhaust gas recirculation) zijn. Voor methanol kan nabehandeling of waterbijmenging worden toegepast. Bij toepassing van LNG (monofuel), het gebruik van batterij-elektrische aandrijving of brandstofcellen is nabehandeling over het algemeen niet nodig.

Tabel 29: Luchtverontreinigende emissies van verschillende energiedragers en aandrijflijnen.

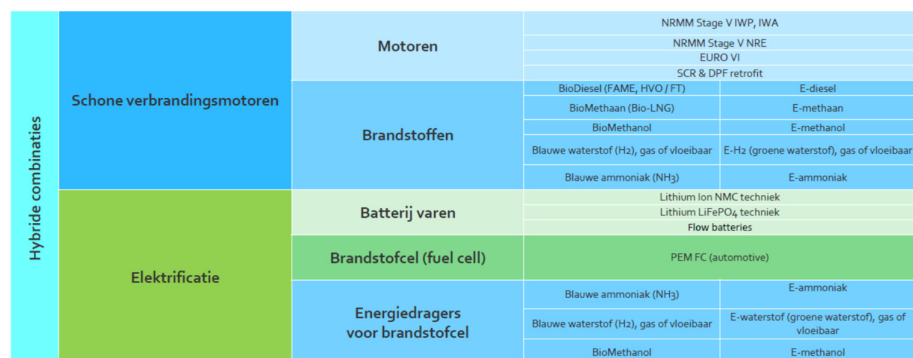
Aandrijflijn	Brandstof	NO _x (g/kWh) medium speed motor engine out (Tier II equivalent)	NO _x nabehandeling noodzakelijk voor behalen Tier III	PM (g/kWh)	SO _x (g/kWh)
1. Alternatieve brandstoffen in een verbrandingsmotor	MGO	8,6	Ja	0,23	0,36
	HFO (0.5 % S)	12,4	Ja	0,74	2
	HVO	8 – 8,6	Ja	0,1 – 2,2	~0
	E-diesel	8 – 8,6	Ja	~0,1	~0
	LNG	2*	Nee, of SCR*	0,02	0,009
	Methanol	~ 5	EGR, SCR of water bijmenging	0,034	0,007
	Ammonia	?	Waarschijnlijk SCR	?	~0
2. Alternatieve energiedragers met een andere energie- omzetter	Elektrisch (NL groen)	~0	Nee	~0	~0
	Waterstof (elektrolyse) in brandstofcel	~0	Nee	~0	~0
	Methanol in brandstofcel	~0	?	~0	~0
	Ammonia in brandstofcel	~0	?	~0	~0
	LOHC in brandstofcel	0	Nee	0	0
	Waterstof (ijzerpoeder) in brandstofcel	0	Nee	0	0
	LCH4 in brandstofcel	?	?	?	?

* SCR niet nodig bij pre-mix LNG (soms aangeduid als Otto-LNG). SCR wel nodig bij direct-injectie LNG (DI-LNG). Dit is wel de optie waarbij methaanslip vele malen lager is.
Bron: TNO & MARIN 2020

6.7 Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies voor de zoete waterbouw

Voor het reduceren van luchtverontreinigende emissies voor de zoete vloot bestaan vergelijkbaar met de zeevaart een aantal opties (zie schematisch in onderstaande figuur):

- Gebruik van een schone verbrandingsmotor (al dan niet in combinatie met een andere energiedrager);
- Elektrificatie van de aandrijflijn in combinatie met batterijpakketten of een brandstofcel;
- Hybride combinaties van bovenstaande.



Figuur 14: Schematisch overzicht van verschillende routes voor verschoning van de binnenvaart.

In het geval van een verbrandingsmotor is voor de uitstoot van NO_x en PM₁₀ met name de emissieklasse van de motor bepalend. De emissieklasse geldt voor de binnenvaart op het niveau van de motor (en niet het schip zoals bij de Tier-klassen in de zeevaart). Voor de NO_x- en PM-uitstoot zijn de normen met name bij intreding van stage V (vanaf 2020) veel strikter geworden (zie onderstaande tabel).

Het effect van inbouw van (aandrijvingen op) nieuwe energiedragers op NO_x en PM is afhankelijk van de energiedrager en het verbrandingsproces van de motoren van het schip. Voor methanol zal nog steeds NO_x-nabehandeling noodzakelijk zijn om aan Stage V te voldoen. Bij gebruik van brandstofcellen en batterijen is er geen uitstoot van NO_x of PM.

Tabel 30: Emissielimieten voor de binnenvaart .

	Jaar intrede	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (n/kWh)
CCR0	-	-	-	-	-	-
CCR1	2003	5,0	1,0	9,2 - 12,98	0,54	-
CCR2	2007	3,5	1,0	6,0 - 11,0	0,2	-
Stage V (IWP)	2020	3,5	0,19	1,8	0,015	1x10 ¹²

6.8 Verwacht effect op CO₂-emissies

Bij het in kaart brengen van de CO₂-uitstoot van alternatieve energiedragers wordt gekeken naar twee type emissies:

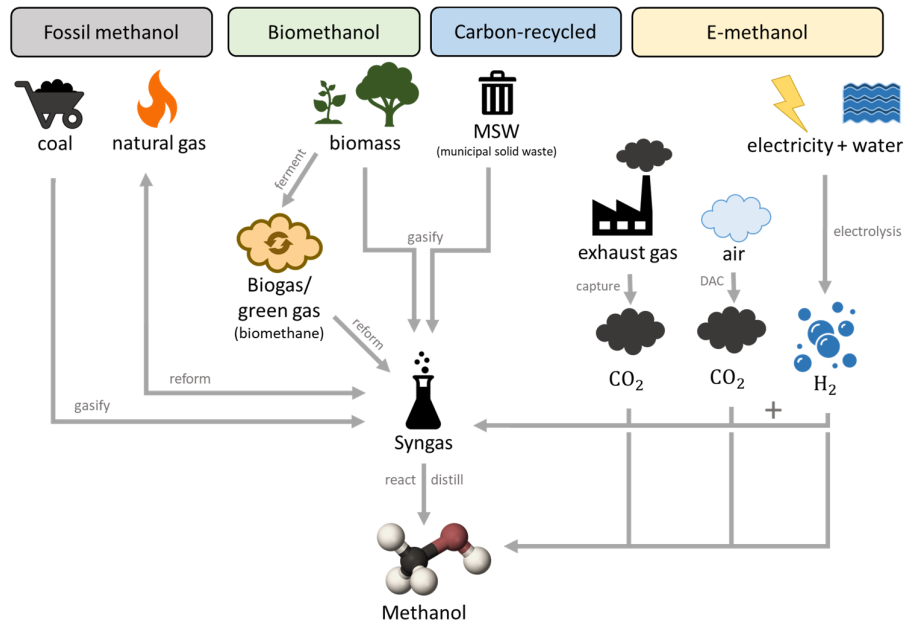
- Emissies in de productieketen (de upstream of well-to-tank emissies); en
- Het effect op emissies in het vaartuig zelf (tank-to-propeller emissies).

De well-to-tank emissies worden met name bepaald door de herkomst van de energiedragers (grondstofketens). De tank-to-propeller emissies hangen samen met de samenstelling van de energiedrager en de efficiëntie van het energieomzetting. Deze is niet afhankelijk van de herkomstbron. Waterbouw die wordt ingezet op de zoete wateren (vallend onder de binnenvaart regeling), valt vanaf 2022 onder de jaarverplichting (zie paragraaf 3.2). Zeevaart is als opt-in opgenomen tot 2025. Verwacht wordt dat dit dan zal worden vervangen door sectorspecifiek beleid volgend uit het Europese Fit for 55 programma (Ministerie van Infrastructuur en waterstaat, 2021).

Brandstoffen kunnen worden geproduceerd uit verschillende grondstofketens:

- Fossiele brandstof, geproduceerd uit bronnen zoals olie of gas.
- Bio-route, geproduceerd vanuit verschillende grondstoffen en verwerkingstechnieken (zie volgende sheet). Onderdeel hiervan is brandstof geproduceerd van afvalstromen, zoals huisafval of gerecycled vet.
- E-fuels, geproduceerd vanuit waterstof en een koolstofbron of stikstof in het geval van ammonia. De waterstof kan afkomstig zijn vanuit elektrolyse, maar eventueel ook vanuit fossiel (grijs), eventueel in combinatie met carbon capture (blauw).

Als voorbeeld worden hiernaast de vier routes voor methanol beschreven.

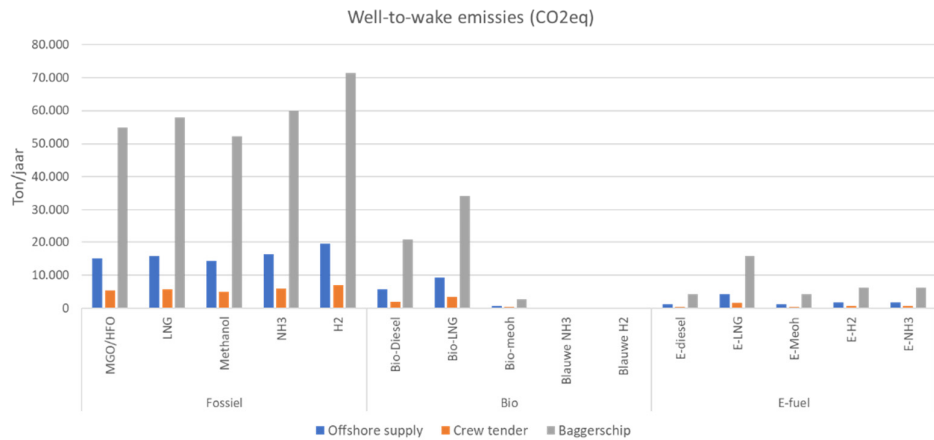


Figuur 15: Schematisch overzicht van verschillende productieroutes van methanol. Bron: TNO & MKC (red) 2021).

Uit literatuur komt naar voren dat de productieroute leidend is in de CO₂-uitstoot over de gehele keten heen. Dit geldt voor energiedragers in een verbrandingsmotor, maar ook bij gebruik van alternatieve aandrijflijnen zoals batterij-elektrische aandrijving of het gebruik van brandstofcellen.

In het geval van bijvoorbeeld waterstof is er geen of nauwelijks sprake van een CO₂-reductie wanneer deze een fossiele herkomstbron heeft. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de waarden voor de verschillende standaardschepen. In de tabel zijn voor de meeste brandstoffen niet de CH₄- en N₂O-waarden opgenomen, omdat deze in de meeste gevallen een marginale bijdrage levert. Uitzondering hierop is het gebruik van vloeibaar gas (LNG, bio-LNG of e-LNG). De emissies van methaanslip zijn significant.

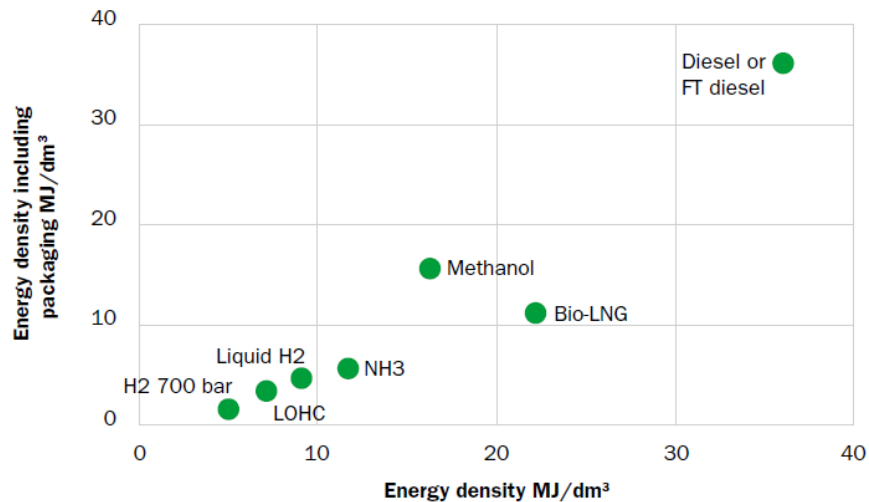
Belangrijke kanttekening bij inzet e-fuels is het rendementsverlies bij productie. Zie hiervoor ook paragraaf 3.6.



Figuur 16: Well-to-wake CO₂-emissies voor verschillende energiedragers bij verschillende productieroutes (ton per schip per jaar). Bron: TNO 2021.

6.9 Impact op de operationele inzet/ het ruimtegebruik aan boord

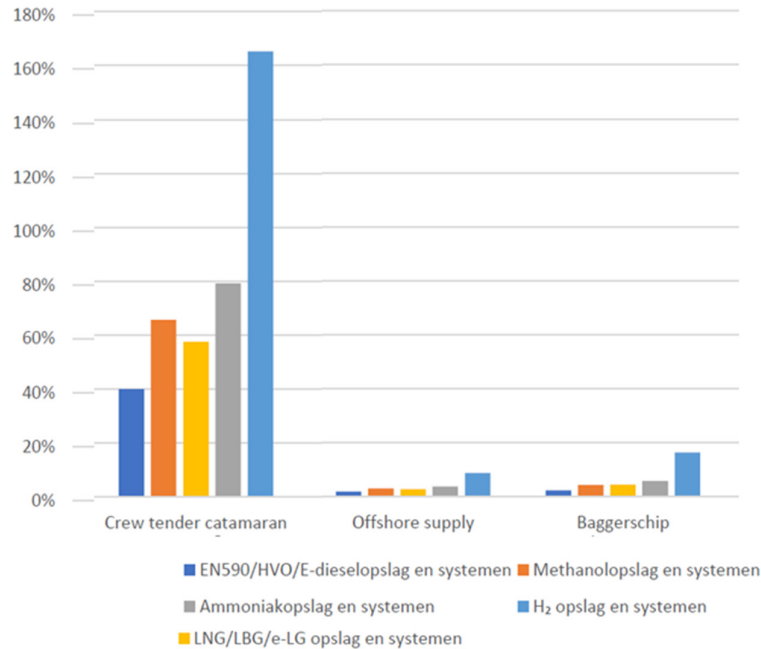
De toepasbaarheid van alternatieve energiedragers voor de verschillende operationele profielen is voor een groot deel afhankelijk van de energiedichtheid. Hoe hoger de energiedichtheid van de energiedrager, hoe minder opslagcapaciteit nodig is om de benodigde werkzaamheden uit te voeren (of hoe groter de operationele reikwijdte van het schip is). Onderstaande figuur laat de energiedichtheid zien van verschillende brandstoffen. Veel alternatieve brandstoffen hebben een lagere energiedichtheid dan de diesel in de binnenvaart wordt gebruikt of MGO of HFO die momenteel in de zeevaart wordt toegepast.



Figuur 17: Energiedichtheid van verschillende brandstoffen (Bron: TNO & MKC 2021)

Het effect van opslag van alternatieve energiedragers aan boord verschillen sterk tussen verschillende scheepstypen en in de operationele omstandigheden waarin een schip wordt ingezet.

Als voorbeeld wordt in onderstaande figuur de volumeverhouding tussen verschillende aandrijf-/opslagsystemen en het rompvolume getoond voor drie zeeschepen. Hieruit wordt duidelijk dat bijv. voor H₂-opslag en systemen voor een crewtender een ontwerpslag nodig is, anders is deze optie niet haalbaar



Figuur 18: Volumeverhouding tussen systemen en rompvolume (Bron: MARIN & TNO 2021)

Er zijn verschillende veiligheidsaspecten waar rekening mee moet worden gehouden bij het inrichten van de energievoorziening en het gebruik aan boord. Belangrijke punten in de uitwerking betreffen brand- en explosiegevaar, toxiciteit en milieuschade.

- Voor diesel varianten (bio en e-diesel) en LNG zijn de effecten op veiligheid bekend en zijn veiligheidsrichtlijnen reeds voldoende ontwikkeld voor zowel de zeevaart als de binnenvaart.
- Ook voor opladen en gebruik van batterij-elektrische schepen zijn reeds veel richtlijnen beschikbaar. Aan de scheepzijde hebben klassebureaus regulering ontwikkeld voor typegoedkeuring. Ook voor het bunkeren zijn standaarden en regelgeving ontwikkeld (IEC IEC/ISO/IEEE 80005-3, IEC IEC/ISO/IEEE 80005-1 en IFC 608).
- Voor andere alternatieve energiedragers zijn veelal nog geen standaarden beschikbaar. Wel is er veel kennis beschikbaar vanuit de recente ervaring met LNG als scheepsbrandstof voor het inrichten van het veiligheidsproces, waarbij de methode van equivalente veiligheid kan worden gebruikt (SOLAS regulation II-1/55). IGF (veiligheidscode van IMO voor schepen die varen op gassen of brandstoffen met een laag vlammpunt) geven richtlijnen voor bunker- operaties aan de scheepzijde voor de zeevaart. Momenteel worden de veiligheidsaspecten voor alternatieve brandstoffen in meerdere nationale en Europese projecten in kaart gebracht.

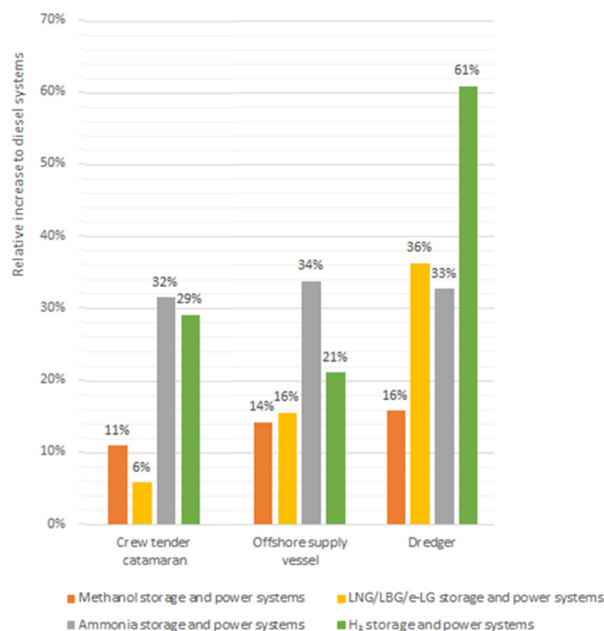
- Voor de binnenvaart zijn richtlijnen voor waterstof en methanol nog in ontwikkeling door CCNR en CESNI. Naar verwachting worden deze in januari 2024 geïmplementeerd. Tot die tijd worden vergunningen op pilotbasis afgegeven. Daarnaast moet met de vaarwegbeheerder afstemming plaats vinden over voeren van veiligheidskegels.
- Aan de infrastructuurzijde dient case-by-case samen met omgevingsdiensten in kaart te worden gebracht wat de minimale benodigde afstanden zijn. In Europese werkgroepen worden veiligheidsstandaarden aan de infrastructuurzijde verder uitgewerkt.

6.10 Impact op kosten

Voor de investeringskosten van nieuwe energiedragers die niet als drop-in kunnen worden toegevoegd aan diesel of MGO zijn een aantal elementen relevant:

- De kosten van het energieomzettingssysteem (verbrandingsmotor, brandstofcellen, batterijoplossing);
- Energieopslag; en
- Eventuele nabehandeling.

Volgens de huidige inschattingen zal een verandering naar een andere energiedrager leiden tot hogere kosten. Deze stijging zal het grootst zijn in het geval van gebruik van waterstof, in verband met de verwachte hoge opslagkosten. De mate waarin dit speelt hangt sterk af van de aanpassing die wordt gedaan in de autonomie van het schip. Bij een gelijkblijvend scheepsdesign zal bijvoorbeeld de meerprijs voor waterstof in een kleiner schip minder impact hebben dan andere oplossingen (zie onderstaande figuur), maar zal de operationele reikwijdte sterk reduceren. Een oplossing zou kunnen zijn om het scheepsdesign aan te passen, wat leidt tot substantieel hogere kosten.



Figuur 19: Relatieve meerkosten van investeringen in verschillende aandrijfsystemen ten opzichte van diesel of MGO aandrijfsysteem (Bron: MARIN & TNO 2021).

De ontwikkeling van de operationele kosten hangen samen met bredere ontwikkelingen voor fossiele, bio- en synthetische brandstoffen:

- Naar verwachting van belangrijke instituten (IEA en EIA) blijft de komende jaren de prijs van fossiele brandstoffen op een stabiel niveau (met dezelfde prijsfluctuaties als in de huidige markt), onder meer door de opkomst van schalieolie en –gas. EIA voorspelt dit zelfs in een scenario met hoge wereldwijde economische groei. Een prijsopdrijvend effect zal vooral worden ingegeven door beleid, met name op internationaal niveau. Een voorbeeld hiervan is de inzet van CO₂-beprijzing.
- Voor biobrandstoffen is de marktprijs op korte (binnen 5 jaren) en middellange (2025-2030) termijn sterk afhankelijk van beleid (RED II) en de prijsstelling bij aanbieders. Op lange termijn wordt voor nieuwe biobrandstoffen zoals methanol een daling verwacht tussen de 5% en 20% (IEA 2020), onder meer door verbeteringen in de productiemethoden en lagere financieringskosten.
- Voor de synthetische brandstoffen (E-fuels) is de prijsstelling zeer onzeker. Belangrijke factoren zijn de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs (groei aanbod duurzame energie), wat de basis is voor de prijs van waterstofproductie en de prijs van duurzame bronnen van CO₂ (direct air capture).

7 Bibliografie

- ARCADIS & Wageningen Marine Research. (2017). *Zandwinning Noordzee 2018-2027*.
- ARCADIS. (2021). *Passende beoordeling Net op Zee Hollandse Kust (West Beta)*.
- CBS. (2021). *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*.
- Dellaert, S., van Mensch, P., Bhoraskar, A., & van der Mark, P. (2021). *Eindrapport data onderzoek mobiele machines in Nederland*.
- ElaadNL. (2020). *Outlook Elektrisch op bestelling: de ontwikkeling van elektrische bestelvoertuigen in Nederland t/m 2035*.
- Hulskotte, J., & Verbeek, R. (2009). *Emissiemodel Mobiele Machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstof Afzet*.
- Kin, B., Nesterova, N., Van Kempen, E., De Vries, J., & Quak, H. (2020). *Deliverable 3.1: Last mile logistics concepts. TNO 2020 P10594*.
- Ligterink, N., Dellaert, S., & van Mensch, P. (2021). *AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NOx en NH3 uitstoot van mobiele werktuigen*.
- Ministerie van Infrastructuur en waterstaat. (2021). *Besluit van 20 december 2021 tot wijziging van het Besluit energie vervoer in verband met de implementatie van Richtlijn (EU) 2018/2001*. Opgehaald van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2021-619.html>
- Natuur & Milieu. (2019). *Elektrische mobiele werktuigen in beeld*.
- Pondera. (2018). *Passende Beoordeling Hollandse Kust (Noord) - Kavel V*.
- Pondera. (2019). *Net op zee Hollandse Kust (noord) en Hollandse Kust (west Alpha)*.
- Pondera. (2020). *Passende Beoordeling Hollandse Kust (West) - Kavel VI*.
- Pondera. (2020). *Passende Beoordeling Hollandse Kust (West) - Kavel VII*.
- Quak, H., Koffrie, R., van Rooijen, T., & Nesterova, N. (2017). *Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe. D3.2: Economics of EVs for City Logistics - Report*. FREVUE.
- RWS. (2020). *Routeradar 2019 Innovatiemonitor - techniekontwikkeling*.
- RWS. (2020). *Routeradar 2019 Straatbeeldmonitor Wegvervoer*.
- SER. (2020). *Biomassa in balans. Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biobrandstoffen*.
- SWECO. (2017). *Winning ophoogzand Noordzee*.
- TNO & MKC. (2021). *Green Maritime Methanol. Towards a zero emission shipping industry*.
- TNO. (2018). *Duurzame bouwlogistiek voor binnenstedelijke woning- en utiliteitsbouw: ervaringen en aanbevelingen*. Den Haag: TNO.
- TNO. (2020). *Amsterdam Vaart! 2019 Resultaten duurzame bouwlogistiek over water. TNO 2020 R10260*.
- TNO. (2020). *Programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijnroeg*.
- TNO. (2020). *Waterstof voor verbrandingsmotoren in zwaar materieel. Een betaalbaar en betrouwbaar alternatief op weg naar 'zero emission'*.
- TNO. (2022). *Verkenning duurzaamheidsopties zoete waterbouwvloot*.
- Van Merriënboer, S., & Ludema, M. (2016). *TKI project '4C in Bouwlogistiek'*.
- Verbeek, M., & van Grinsven, A. (2020). *Factsheet: vergelijking vrachtwagens op verschillende energiedragers*. Den Haag: TNO 2020 R10784 - 21.
- Verbeek, M., Smokers, R., & Verbeek, R. (2017). *Onderscheidende kenmerken van brandstoftypen als alternatief voor diesel*. Den Haag: TNO 2017 R10847.

Verbeek, M., van Gijlswijk, R., van Zyl, S., van Eijk, E., Vermeulen, R., Huismans, H., & Smokers, R. (2018). *Assessments with respect to the EU HDV CO2 legislation: Work in support of the Dutch position on EU regulation on the CO2 emissions of heavy-duty vehicles*. Den Haag: TNO 2018 R10214.

Voltachem, Smartport, TNO. (2020). *E-fuels: towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation*.

8 Ondertekening

Den Haag, 10 juni 2022

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke at the end.

Janneke de Vries
Projectmanager

TNO

A handwritten signature in blue ink, featuring a long, sweeping horizontal stroke that extends to the right.

Pim van Mensch
Auteur

A Indeling SBI-codes naar 'Bouw' en 'Mogelijk Bouw'

Tabel 31: SBI-codes toegeedeeld aan 'Bouw'

812	Winning van zand, grind en klei
2319	Vervaardiging en bewerking van overig glas, inclusief technisch glaswerk
2363	Vervaardiging van storklare beton
2731	Vervaardiging van kabels van optische vezels
4110	Projectontwikkeling
4120	Algemene burgerlijke en utiliteitsbouw
4212	Bouw van boven- en ondergrondse spoorweg
4213	Bouw van kunstwerken
4221	Leggen van rioleringen, buizen en pijpleidingen; aanleg van bronbemaling
4222	Leggen van elektriciteits- en telecommunicatiekabels
4291	Natte waterbouw
4299	Bouw van overige civieltechnische werken (rest)
4311	Slopen van bouwwerken
4312	Grondverzet
4313	Proefboren
4321	Elektrotechnische bouwinstallatie
4322	Loodgieters- en fitterswerk; installatie van sanitair en van verwarmings- en luchtbehandelingsapparatuur
4329	Overige bouwinstallatie
4331	Stukadoren
4332	Bouwtimmeren
4333	Afwerken van vloeren en wanden
4334	Schilderen en glaszetten
4339	Overige afwerken van gebouwen
4391	Dakdekken en bouwen van dakconstructies
4399	Overige gespecialiseerde werkzaamheden in de bouw
7732	Verhuur en lease van machines en installaties voor de bouw
16231	Vervaardiging van deuren, ramen en kozijnen van hout
42111	Wegenbouw
42112	Stratenmaken
43221	Loodgieters- en fitterswerk; installatie van sanitair
43222	Installatie van verwarmings- en luchtbehandelingsapparatuur
43991	Heien en andere funderingswerkzaamheden
43992	Vlechten van betonstaal
43993	Metselen en voegen
43999	Overige gespecialiseerde werkzaamheden in de bouw (rest)
46731	Groothandel in hout en plaatmateriaal
46734	Groothandel in vlakglas
46735	Groothandel in zand en grind
46736	Groothandel in tegels en plavuizen
46737	Groothandel in sanitaire artikelen en sanitair installatiemateriaal
46738	Groothandel gespecialiseerd in overige bouwmaterialen
46739	Groothandel in bouwmaterialen algemeen assortiment
47528	Bouwmarkten en andere winkels in bouwmaterialen algemeen assortiment

Tabel 32: SBI-codes toegedeeld aan 'Mogelijk bouw'

3811	Inzameling van onschadelijk afval
3812	Inzameling van schadelijk afval
3900	Sanering en overig afvalbeheer
4613	Handelsbemiddeling in hout, vlakglas, sanitair en bouwmaterialen
4941	Goederenvervoer over de weg (geen verhuizingen)
5221	Dienstverlening voor vervoer over land
5222	Dienstverlening voor vervoer over water
6420	Financiële holdings
6491	Financiële lease
7712	Ingenieurs en overig technisch ontwerp en advies
7731	Verhuur en lease van landbouwmachines en -werktuigen
7739	Verhuur en lease van overige machines en werktuigen en van overige goederen
46741	Groothandel in ijzer- en metaalwaren
52291	Expediteurs, cargadoors, bevrachters en andere tussenpersonen in het goederenvervoer
70102	Holdings (geen financiële)
77111	Verhuur van personenauto's en lichte bedrijfsauto's (geen operational lease)
77112	Operational lease van personenauto's en lichte bedrijfsauto's
77399	Verhuur en lease van overige machines en werktuigen en van overige goederen (geen automaten)
78202	Uitleenbureaus

B Emissielimieten mobiele werktuigen

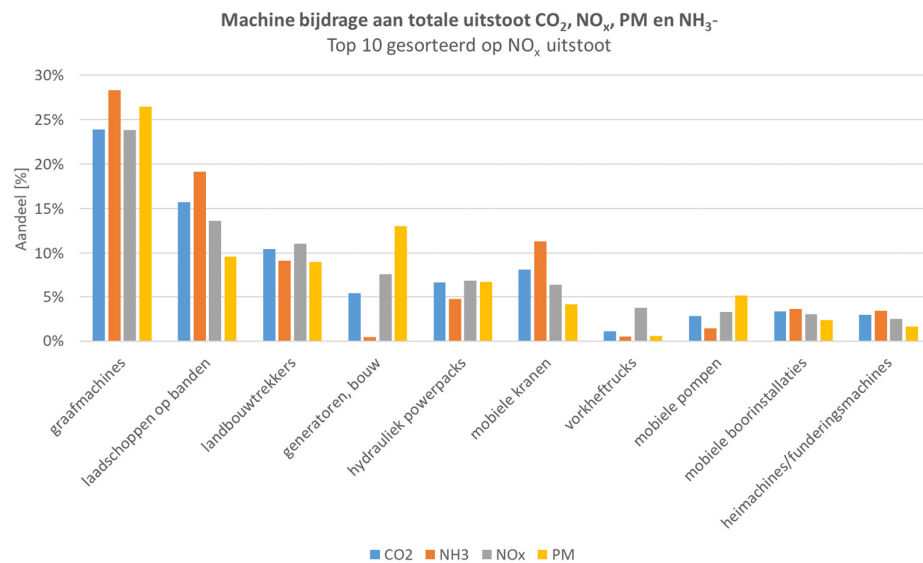
Tabel 33: Emissielimieten per Stagenorm (<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>)

Categorie	Vermogens-klasse	Datum	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
	kW		g/kWh					#/kWh
Fase I								
A	130 ≤ P ≤ 560	1999.01	5	1,3		9,2	0,54	
B	75 ≤ P < 130	1999.01	5	1,3		9,2	0,7	
C	37 ≤ P < 75	1999.04	6,5	1,3		9,2	0,85	
Fase II								
E	130 ≤ P ≤ 560	2002.01	3,5	1		6	0,2	
F	75 ≤ P < 130	2003.01	5	1		6	0,3	
G	37 ≤ P < 75	2004.01	5	1,3		7	0,4	
D	18 ≤ P < 37	2001.01	5,5	1,5		8	0,8	
Fase III A								
H	130 ≤ P ≤ 560	2006.01	3,5	-	4	-	0,2	
I	75 ≤ P < 130	2007.01	5	-	4	-	0,3	
J	37 ≤ P < 75	2008.01	5	-	4,7	-	0,4	
K	19 ≤ P < 37	2007.01	5,5	-	7,5	-	0,6	
Fase III B								
L	130 ≤ P ≤ 560	2011.01	3,5	0,19	-	2	0,025	
M	75 ≤ P < 130	2012.01	5	0,19	-	3,3	0,025	
N	56 ≤ P < 75	2012.01	5	0,19	-	3,3	0,025	
P	37 ≤ P < 56	2013.01	5	-	4,7	-	0,025	
Stage IV								
Q	130 ≤ P ≤ 560	2014.01	3,5	0,19		0,4	0,025	
R	56 ≤ P < 130	2014.1	5	0,19		0,4	0,025	
Stage V								
NRE-v/c-1	P < 8	2019	8		7,5		0,4	-
NRE-v/c-2	8 ≤ P < 19	2019	6,6		7,5		0,4	-
NRE-v/c-3	19 ≤ P < 37	2019	5		4,7		0,015	1×10 ¹²
NRE-v/c-4	37 ≤ P < 56	2019	5		4,7		0,015	1×10 ¹²
NRE-v/c-5	56 ≤ P < 130	2020	5	0,19		0,4	0,015	1×10 ¹²
NRE-v/c-6	130 ≤ P ≤ 560	2019	3,5	0,19		0,4	0,015	1×10 ¹²
NRE-v/c-7	P > 560	2019	3,5	0,19		3,5	0,045	

C Overzicht emissiebijdrage per machinetype

Het EMMA model bevat verschillende typen mobiele machines. Onderstaand figuur toont dat de het grootste deel van de emissies in de bouwsector volgens EMMA afkomstig is van graafmachines, laadschoppen, landbouwtrekkers (ingezet in de bouw), generatoren en mobiele kranen.

De onderstaande machines zorgen volgens EMMA tezamen voor ca. 80% van zowel de NO_x-, fijnstof- als CO₂-emissies.

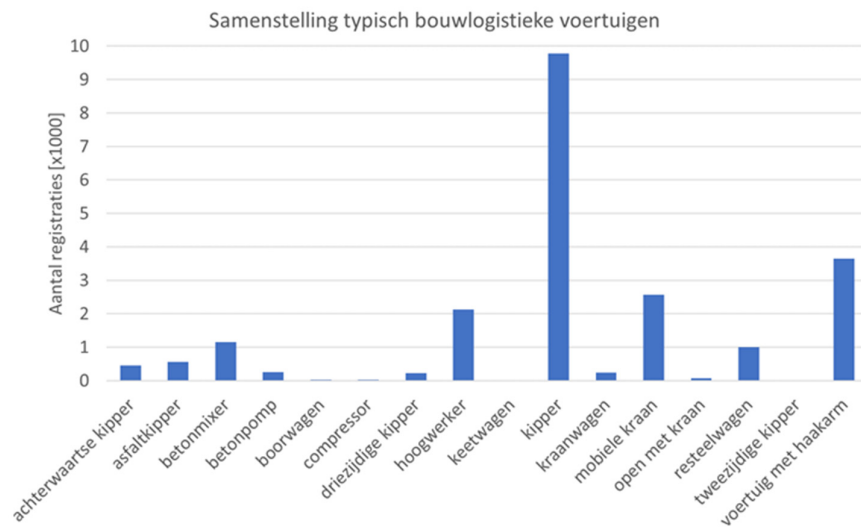


Figuur 20: NO_x, NH₃ PM- en CO₂-emissies per machinetype voor zichtjaar 2020 als aandeel van de totale uitstoot, gesorteerd op top 10 NO_x uitstoot.

D Samenstelling bouwlogistieke voertuigen

Tabel 34: Typisch bouwlogistieke voertuigen o.b.v. RDW-inrichting

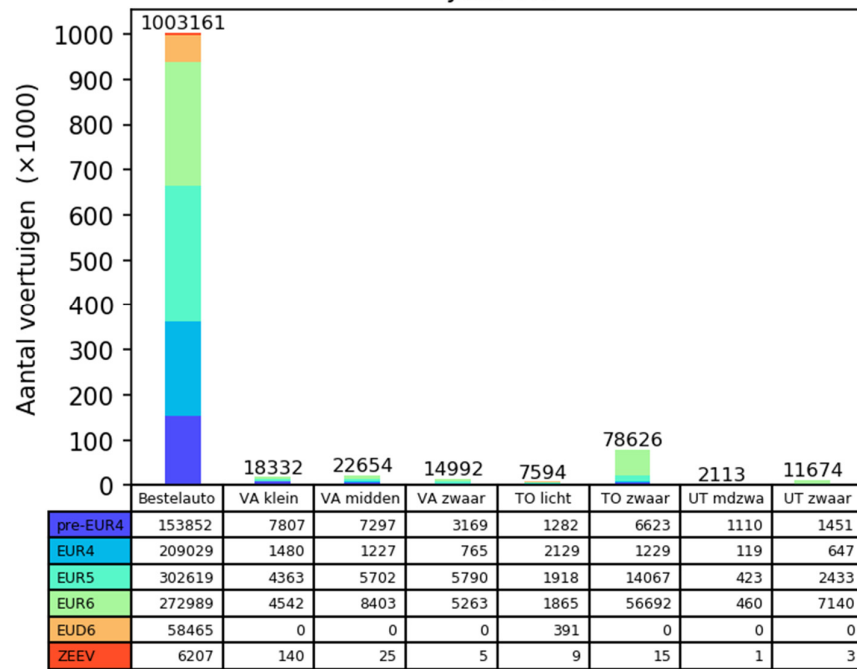
Inrichting	
Achterwaartse kipper	Keetwagen
Asfaltkipper	Kipper
Betonmixer	Kraanwagen
Betonpomp	Mobiele kraan
Boorwagen	Resteelwagen
Compressor	Open met kraan
Driezijdige kipper	Tweezijdige kipper
Hoogwerker	Voertuig met haakarm



Figuur 21: Samenstelling van de vloot van de typisch bouwlogistieke voertuigen uit Tabel 34 (jan. '21).

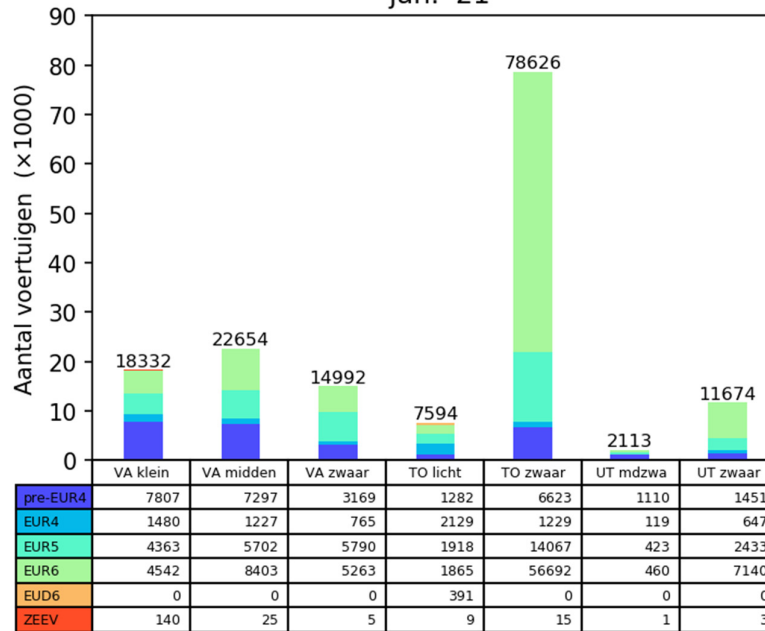
De grafieken in deze bijlage, geven informatie over alle voertuigen in de vloot binnen de getoonde voertuigtypes en dus niet alléén van voertuigen met een inzet in bouwlogistiek. Duidelijk niet-bouwlogistieke voertuigen, zoals ambulances of veewagens, zijn hier wel van uitgesloten. VA = vrachtauto, TO = trekker-oplegger, UT=utiliteitsvoertuig.

Aantal voertuigen naar emissieklasse per voertuigtype jan. '21



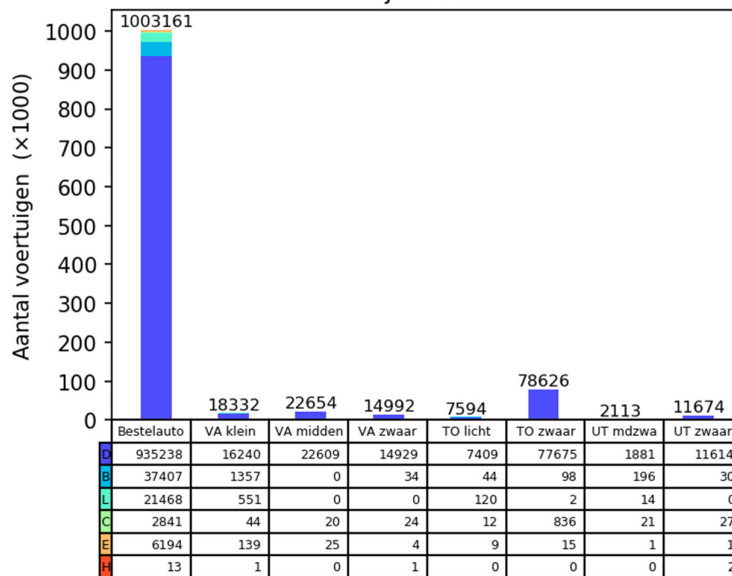
Figuur 22: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 3) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar emissieklasse (pre-EUR4 = lagere emissienorm dan Euro 4/Euro IV, EUR4 = emissienorm Euro 4/IV, EUR5 = emissienorm Euro 5/V, EUR6 = emissienorm Euro 6/VI, EUD6 = emissienorm Euro 6d, ZEEV = nul-emissie).

Aantal voertuigen naar emissieklasse per voertuigtype
jan. '21

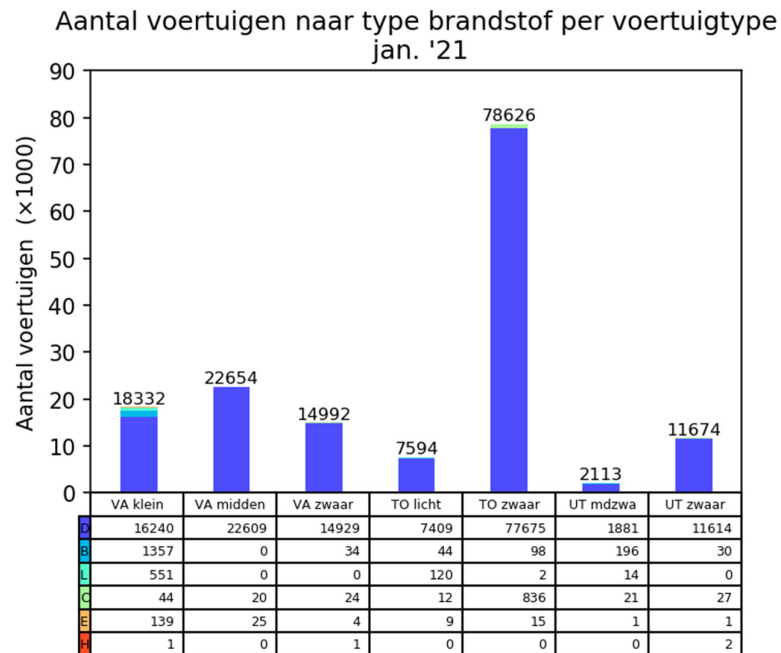


Figuur 23: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 3) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar emissieklasse (pre-EUR4 = lagere emissienorm dan Euro 4/Euro IV, EUR4 = emissienorm Euro 4/IV, EUR5 = emissienorm Euro 5/V, EUR6 = emissienorm Euro 6/VI, EUD6 = emissienorm Euro 6d, ZEEV = nul-emissie) – **exclusief bestelauto's**.

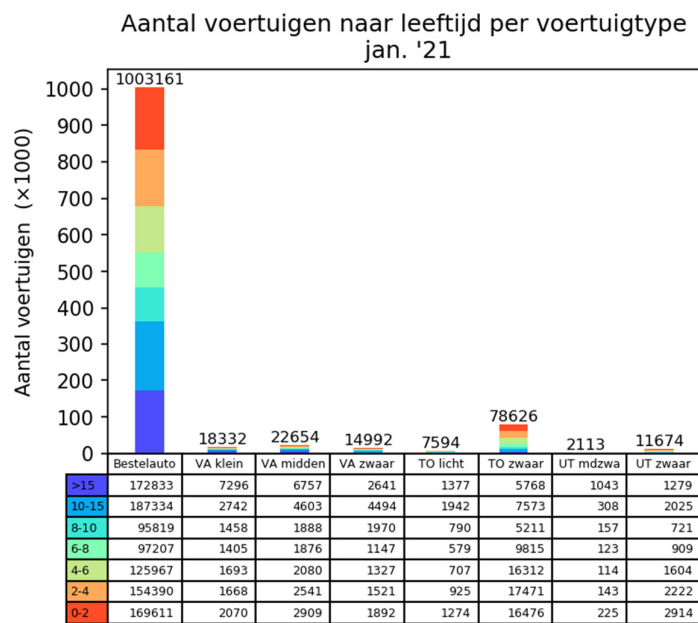
Aantal voertuigen naar type brandstof per voertuigtype
jan. '21



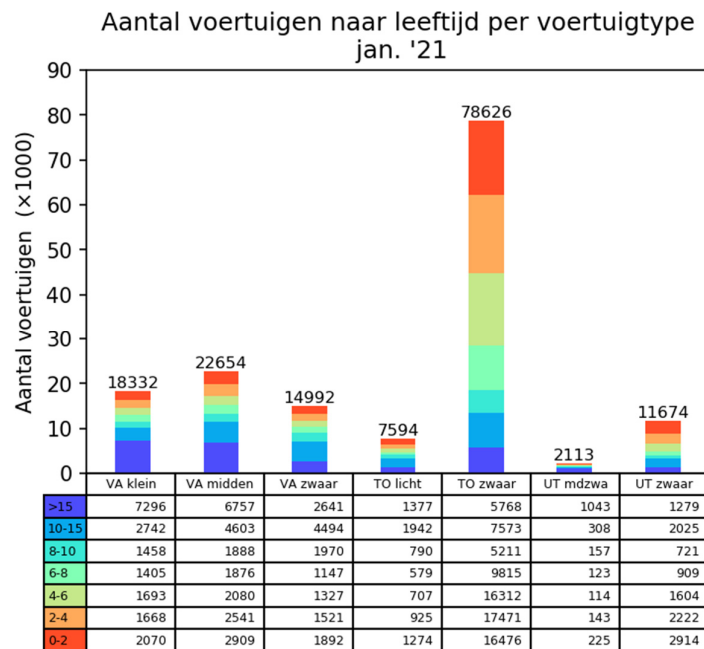
Figuur 24: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 3) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar brandstofsoort (D=diesel, B=benzine, L=LPG, C=CNG, E=elektrisch, H=waterstof).



Figuur 25: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 3) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar randstofssoort (D=diesel, B=benzine, L=LPG, C=CNG, E=elektrisch, H=waterstof) – **exclusief bestelauto's**.

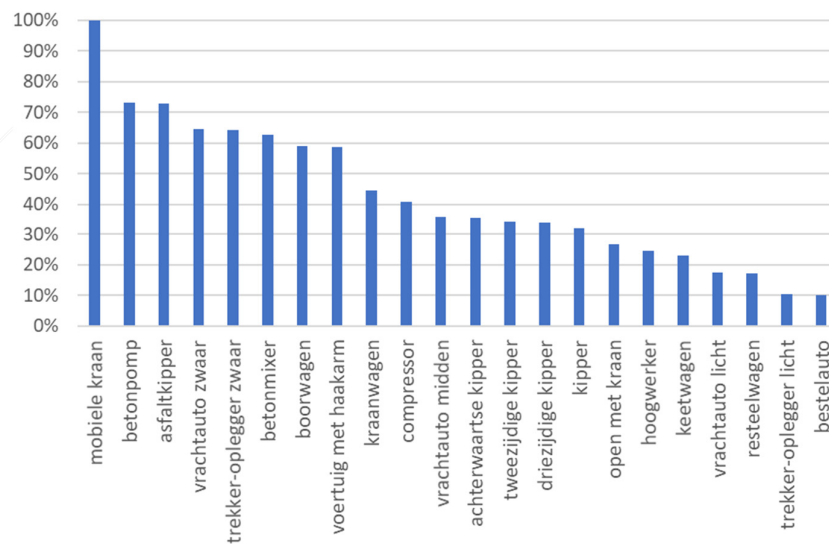


Figuur 26: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 3) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar leeftijd in jaren.



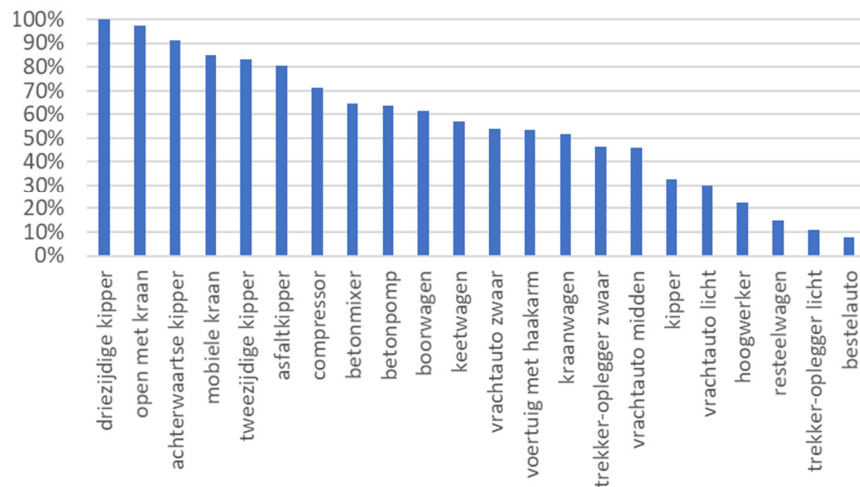
Figuur 27: Aantal voertuigen voor een selectie van voertuigtypes in de Nederlandse vloot (Tabel 2) die relevant zijn voor bouwlogistiek uitgesplitst naar leeftijd in jaren –**exclusief bestelauto's**.

Verhouding CO₂-uitstoot per km (stad) tussen voertuigtypes



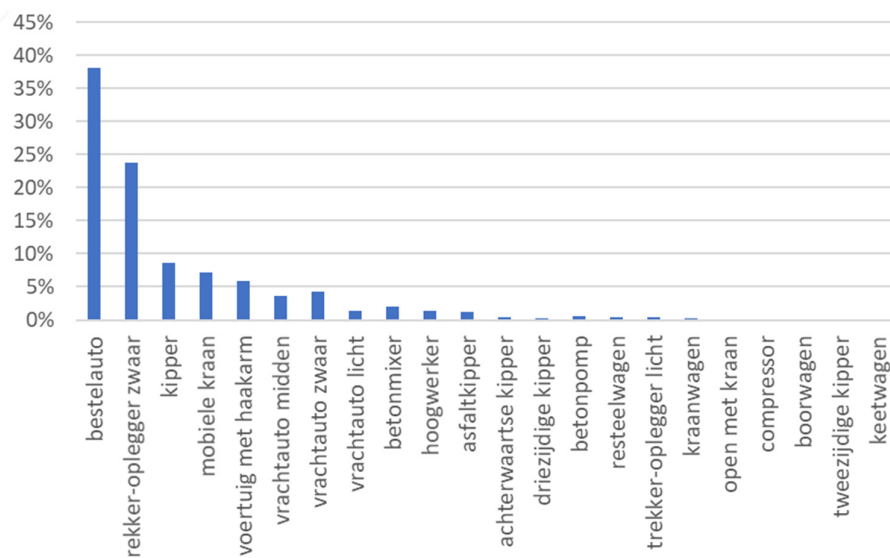
Figuur 28: Verhoudingen tussen de verschillende voertuigtypes van de emissiefactor CO₂ per kilometer in de stad (zichtjaar 2020). Dit is een gewogen gemiddelde op basis van de eigenschappen (leeftijd, Euroklasse, brandstof) van de voertuigen in de vloot per voertuigtype. De verhoudingen kunnen veranderen bij nieuwe voertuigen. De uitstoot op de bouwplaats zelf en de onzekerheid die daarbij komt kijken met betrekking tot stationair draaien is hierin niet meegenomen.

Verhouding NO_x-uitstoot per km (stad) tussen voertuigtypes



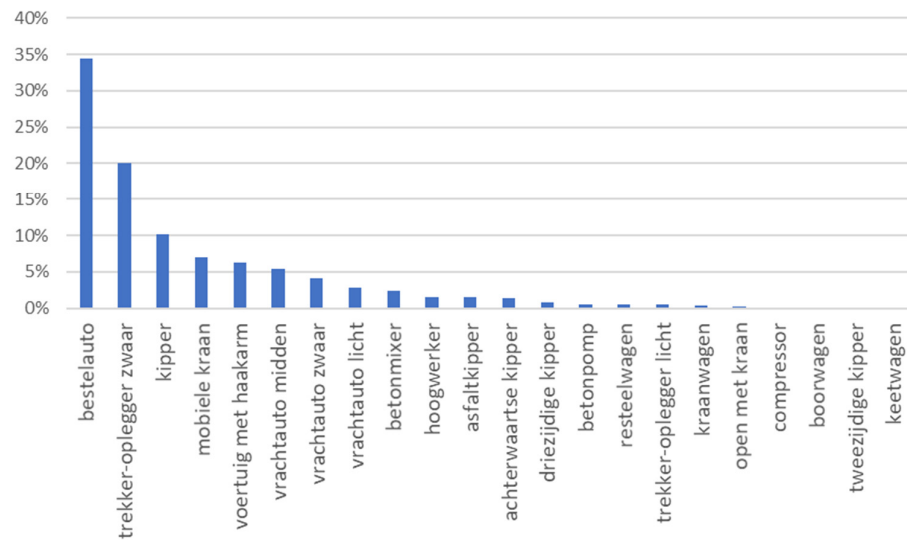
Figuur 29: Verhoudingen tussen de verschillende voertuigtypes van de emissiefactor NO_x per kilometer in de stad (zichtjaar 2020). Dit is een gewogen gemiddelde op basis van de eigenschappen (leeftijd, Euroklasse, brandstof) van de voertuigen in de vloot per voertuigtype. De verhoudingen kunnen veranderen bij nieuwe voertuigen. De uitstoot op de bouwplaats zelf en de onzekerheid die daarbij komt kijken met betrekking tot stationair draaien is hierin niet meegenomen.

Aandeel voertuigtype in CO₂-uitstoot (stad) o.b.v. aantallen per voertuigtype, uitgaande van evenredige inzet



Figuur 30: Het aandeel in CO₂-uitstoot per voertuigtype, waarin per voertuigtype ook het aantal voertuigen is meegewogen (hierbij is uitgegaan van evenredige inzet). Zichtjaar 2020.

Aandeel voertuigtype in NO_x-uitstoot (stad) o.b.v. aantallen per voertuigtype, uitgaande van evenredige inzet



Figuur 31: Het aandeel in NO_x-uitstoot per voertuigtype, waarin per voertuigtype het aantal voertuigen ook is meegewogen (hierbij is uitgegaan van evenredige inzet). Zichtjaar 2020.