

Praktijkemissies van een generatorset op biogas en een vergelijking van milieukosten met die van andere laadoplossingen

TNO 2025 R10614 – 17 maart 2025

**Praktijkemissies van een generatorset op
biogas en een vergelijking van milieukosten
met die van andere laadoplossingen**

Auteurs	R.J. (Robin) Vermeulen, R.N. (René) van Gijlswijk
Exemplaar nummer	2025-STL-RAP-100356692
Aantal pagina's	44 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	RWS, Zaaknummer 31189200
Projectnaam	Gashouders - Emissiemeetprogramma
Projectnummer	060.55228

Alle rechten voorbehouden

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

© 2025 TNO

Samenvatting

Rijkswaterstaat heeft de ambitie om vanaf 2030 op bouwplaatsen emissieloos te werken. Beschikbaarheid van voldoende laadvoorzieningen om batterijen van elektrisch bouw materieel op te kunnen laden is daarvoor essentieel, maar netaansluitingen zijn niet altijd (tijdig) realiseerbaar. Om lokaal over voldoende laadcapaciteit te kunnen beschikken om de batterijen op te laden is een concept ontwikkeld waarbij gebruik wordt gemaakt van een generatorset met een motor die draait op biogas. Het bedrijf Powercrumbs heeft een biogas gevoede generatorset ontwikkeld met een laadvermogen van 220 kW. Rijkswaterstaat wil graag weten of de inzet van deze generatorset een goede maatregel is ten aanzien van de milieukosten.

Rijkswaterstaat heeft daarom aan TNO gevraagd om 1) een praktijkemissiemeting uit te voeren aan deze generatorset en 2) qua milieukosten een vergelijking te maken met andere laadoplossingen. Dit rapport beschrijft de aanpak en resultaten van beide onderdelen van dit project afzonderlijk.

Resultaten en conclusies van de uitgevoerde praktijkemissiemetingen.

De uitgevoerde metingen aan de generatorset op biogas geven inzicht in het niveau van de praktijkemissies uit de uitlaat van de biogasmotor. Het gaat om de emissies van de prioritaire stoffen, zoals stikstofoxides (NO_x) en fijnstof (PM, Particulate Matter) en de emissie van de broeikasgassen kooldioxide (CO_2) en methaan (CH_4).

De metingen lieten zien dat de uitstoot van NO_x zeer laag is ($<0,1$ g/kWh) wanneer de generatorset op een hoog vermogen draait. Voor een typisch laadprofiel voor batterijen met voldoende capaciteit en een lader met voldoende vermogen wordt dit hoge vermogen gehaald. De NO_x -emissie nemen, echter, fors toe (tot 40 keer hoger) wanneer het laadvermogen lager is dan 50%. Dit komt doordat het NO_x -reductiesysteem dan niet meer werkt. We adviseren om de gebruiker van de instructie te voorzien dat de generatorset alleen ingezet kan worden voor het laden van batterijen met voldoende capaciteit en met een lader van voldoende capaciteit, zodat het gevraagde laadvermogen van de generatorset overwegend hoger ligt dan 50%.

De resultaten lieten ook zien dat de motor het broeikasgas methaan uitstoot, als CO_2 -equivalent was dat 15% van de gemeten CO_2 -emissie. Een hoge methaanslip is kenmerkend voor het gebruikte motortype dat draait met een arm mengsel. De fijnstofuitstoot is laag en vergelijkbaar met het niveau van een dieselmotor met roetfilter.

De gemeten waarden en inzichten in het emissiegedrag zijn meegenomen voor het bepalen van de typische gemiddelde emissiewaarden van de generatorset op biogas. De emissiewaarden zijn gebruikt voor het bepalen van de Milieukosten Indicator (MKI) van de biogasgenerator, waarbij zowel de methaanuitstoot als de NO_x -emissie bijdragen aan de milieukosten.

Resultaten en conclusies van het vergelijk van de milieukosten.

De milieukosten van de Powercrumbs biogasgenerator zijn vergeleken met andere varianten van energievoorziening op de bouwplaats.

Voor een eerlijk vergelijk is uitgegaan van de volgende functionele eenheid:

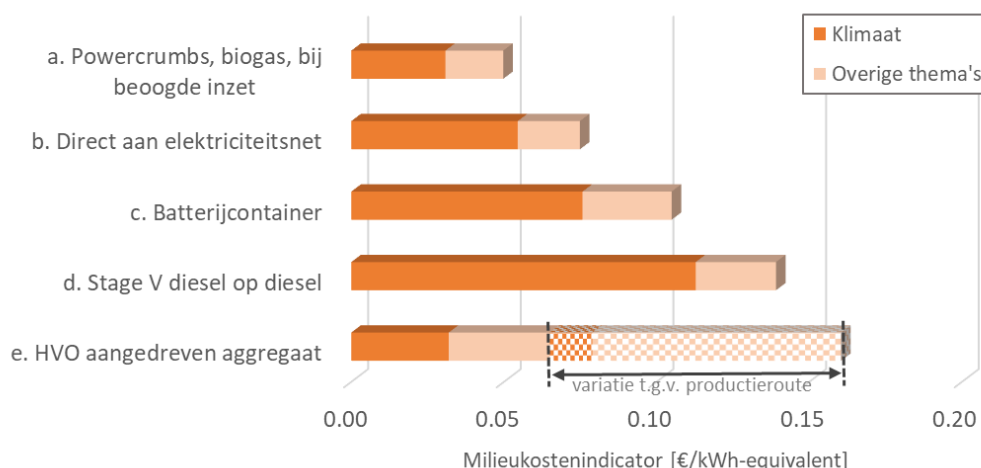
“Het gebruik van een middelgrote graafmachine (ca. 16t, 75-130 kW) op een bouwplaats, uitgedrukt in de hoeveelheid arbeid die door de motor verricht kan worden met 1 kWh elektriciteit (230VAC) aan de stekker van een elektrische graafmachine.”

De volgende varianten zijn doorerekend:

- elektrische graafmachine, direct geladen met de Powercrumbs generator in combinatie met biogas, het resultaat is alleen geldig bij beoogde inzet (overwegend meer dan 50% laadvermogen bij het laden).
- elektrische graafmachine, direct geladen uit het elektriciteitsnet.
- elektrische graafmachine, geladen met batterijcontainer, die op zijn beurt wordt geladen vanuit het elektriciteitsnet.
- Stage V dieselgraafmachine op diesel.
- elektrische graafmachine, geladen met dieselaggregaat op HVO*.

*) Vrijwel gelijktijdig met de afronding van dit project heeft Rijkswaterstaat op 16 december 2024 versie 4.1 van het ‘Protocol berekenen en aantonen MKI waarde’ uitgebracht. Daarin is de waardering van de milieukosten van HVO brandstof gelijkgesteld aan die van reguliere diesel waarmee het protocol de ambitie (inzetten op emissieloos materieel) volgt. Voor dit rapport is besloten om het milieueffect van de toepassing van HVO toch te laten zien, om het referentiekader compleet te maken. De milieubelasting is sterk afhankelijk van de gebruikte grondstof en aanvoerroute. Dat is in de grafiek hieronder met de zwarte pijlen geïllustreerd.

Voor variant a is uitgegaan van de resultaten van de LCA die door Ecochain voor Powercrumbs is gemaakt, aangevuld met gegevens uit de Nationale Milieudatabase voor gebruik van de opgewekte stroom in een graafmachine. Voor de overige varianten zijn de invoergegevens zoveel mogelijk gebaseerd op de Nationale Milieudatabase, tenzij TNO eigen meetdata en modellen voorhanden had. De indicatieve milieukosten per kWh-equivalent zijn weergegeven in de volgende grafiek.



De laagste milieukosten worden gehaald door variant a), deze heeft een MKI van net onder de 0,05 Euro per kWh. Variant e) heeft eveneens lage milieukosten, maar dat geldt alleen voor de meest gunstige productieroute (afgewerkte frituurolie; zonder het geblokte deel). Met de minst gunstige productieroute (koolzaadolie) zijn de milieukosten van variant e) het hoogst (balkje inclusief het geblokte deel).

De resultaten van variant e) zijn voor MKI-berekeningen überhaupt illustratief, omdat conform het meest recente protocol² voor het berekenen van MKI de waardering van de milieukosten van HVO wordt gelijkgesteld aan die van reguliere diesel.

De bijdrage van klimaatverandering aan de MKI is voor alle varianten de helft of meer. Op de tweede plaats komt fijnstof; niet door directe emissies uit de uitlaat, maar door processen in de brandstofketens en bouw/sloop van de machine.

De variant c) met batterijcontainer is 40% hoger dan de 'directe' variant b). Dat komt door productie/afganging van de batterijcontainer zelf, door elektrische verliezen en door het transport van en naar de lader.

Voor variant a) is een gevoeligheidsanalyse gedaan, waarbij gebruik gemaakt is van de meetdata voor drie lastprofielen. Daaruit blijkt dat de situatie waarbij de Powercrumbs-generator laag belast wordt, bijvoorbeeld bij het laden van bouwmachines met minder dan 50% van het maximum laadvermogen van de generatorset (~110 kW), leidt tot een MKI die bijna 70% hoger is dan in de basissituatie. Dat komt voor de helft door hogere NO_x-emissies, die leiden tot sterkere vermesting en smogvorming, en voor een derde door de toegenomen fijnstofemissie en methaanslip. Verder is het rendement van de motor bij lage belasting iets lager.

Variant b) wordt vergelijkbaar met de twee beste varianten a) en e), als uitgegaan wordt van 100% hernieuwbare elektriciteit. De levensduur van de accucontainer in variant c), in laadcycli, en de frequentie van het transport naar de lader hebben een grote invloed op de MKI-waarde. Bij dagelijks laden wordt de MKI bijna 40% hoger ten opzichte van wekelijks laden. Ook als de levensduur van de accu dan beter benut kan worden, resteert toch nog een +25%.

² Rijkswaterstaat, Protocol berekenen en aantonen MKI waarde, versie 4.1, 16 december 2024.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doel	7
1.3 Aanpak	7
1.4 Dit rapport	8
2 Emissies van een biogasgenerator	9
2.1 Methode	9
2.2 Meetresultaten	12
2.3 Representatieve emissiewaardes	23
3 Milieukosten	26
3.1 Inleiding	26
3.2 Aanpak	26
3.3 Gebruikte gegevens	28
3.4 Resultaten	31
3.5 Gevoeligheidsanalyse	33
4 Conclusies en aanbevelingen	37
Referenties	40
Ondertekening	41
Bijlagen	
Bijlage A: Brandstofanalyse	42
Bijlage B: Controle van het uitlaatgasdebiet	43

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Op het project krib- en oeververlaging van het Pannerdensch Kanaal (KOP) is ‘emissieloos’ gewerkt door inzet van elektrisch materieel. Dit is een belangrijke stap naar de ambitie om op de bouwplaatsen van projecten van Rijkswaterstaat (RWS) vanaf 2030 geen schadelijke stoffen meer uit te stoten door mobiele werktuigen en transportmiddelen. Eén van de grootste uitdagingen hierbij is de laadvoorziening voor het elektrische materieel. Netaansluitingen zijn niet altijd tijdig realiseerbaar of hebben te maken met een transportbeperking. Daarbij zijn er nog indirecte ketenemissies bij het gebruik van netstroom (bij de huidige energiemix). Om materieel overal schoon en met voldoende vermogen te kunnen laden, kan elektriciteit opgewekt worden met een generator die op biogas draait. Dit biogas wordt lokaal geproduceerd uit afvalstromen zoals rioolslib.

Het bedrijf ‘Powercrumbs’ heeft de afgelopen twee jaar ervaring opgedaan met de inzet van biogas op bouwprojecten voor kleinere laadvermogens tot 100kW. In het project KOP wordt de stap naar grotere laadvermogens gemaakt, die nodig zijn om een veelvoud van elektrisch materieel te kunnen laden. Om een cijfermatige onderbouwing van de milieuwinst van het laden op biogas met grote vermogens te testen, wil het transitiepad ‘Weg dijk en Spoormaterieel’ van RWS een praktijkemissiemeting en een vergelijking van de milieukosten met andere alternatieven laten uitvoeren.

1.2 Doel

Het doel van het project is het vaststellen van de milieu-impact van het gebruik van biogas als brandstof voor een speciaal daarvoor ontwikkelde generatorset die gebruikt wordt voor het laden van bouw materieel met een motorvermogen tot 250kW. De milieu-impact wordt bepaald met de MKI-methode (Milieukosten Indicator) (Flapper, 2023). De milieu-kostenindicator van dit laadconcept wordt vergeleken met de uitgangssituatie; conventionele diesel aangedreven stage V bouw machines, elektrische bouw machines, direct geladen uit het elektriciteitsnet en enkele voor de hand liggende alternatieve scenario’s zoals het aanleveren van een batterijcontainer en een dieselgeneratorset op HVO.

Op basis van deze resultaten kan RWS beoordelen wanneer en hoe het laden op biogas de komende jaren bij kan dragen aan het behalen van haar emissiereductiedoelstellingen als onderdeel van het duurzaam aanbesteden van projecten.

1.3 Aanpak

Voor de berekening van de MKI van het concept van ‘elektriciteitsopwekking met een biogasgenerator’ is het onder meer nodig om de uitstoot van een reeks milieubelastende stoffen te weten. Het concept en de milieukosten zijn reeds uitgewerkt voor elektriciteitsopwekking met lage vermogens tot 100kW. Opwekking van hogere vermogens tot ongeveer 250 kW is nog niet opgenomen in de nationale milieudatabase en vergt uitvoering van een emissiemeetprogramma om het niveau van de uitstoot van de milieubelastende stoffen te bepalen.

Hiervoor zijn door TNO emissiemetingen uitgevoerd aan de uitlaat van de motor van een 300 kVA biogasgenerator van Powercrumbs. De resultaten van de metingen zijn door TNO gebruikt voor het maken van een inschatting van de praktijkemissies bij representatieve laadszenario's op de bouwplaats. Deze inschatting levert de emissiegetallen op die als invoer zijn gebruikt voor de berekening van de milieukosten voor elektriciteitsopwekking met een 300 kVA biogasgenerator ten behoeve van het laden van mobiele werktuigen. De bepaling van de procesboom en de berekening van de milieukostenindicator zijn gedaan volgens de Bepalingmethode Milieuprestatie Bouwwerken. Dit is namens Powercrumbs uitgevoerd door een extern bureau en maakte geen deel uit van de opdracht aan TNO. De aanpak van het project is schematisch weergegeven in Figuur 1.1.

De uitkomsten hiervan zijn gebruikt voor het vergelijk van de MKI van de biogasgenerator in de volgende situaties:

- a) elektrische graafmachine, direct geladen met de Powercrumbs biogasgenerator in combinatie met biogas, bij beoogde inzet (overwegend meer dan 50% laadvermogen bij het laden).
- b) elektrische graafmachine, direct geladen uit het elektriciteitsnet.
- c) elektrische graafmachine, geladen met batterijcontainer, die op zijn beurt wordt geladen vanuit het elektriciteitsnet.
- d) Stage V dieselgraafmachine op diesel.
- e) elektrische graafmachine, geladen met dieselaggregaat op HVO².



Figuur 1.1: Overzicht van het project met de verschillende stappen van praktijkemissiemeting van de generatorset op biogas naar het vergelijk van de MKI van deze generatorset met alternatieve scenario's.

1.4 Dit rapport

Het onderhavige rapport is opgedeeld in twee delen die elk een verschillend onderdeel van het onderzoek beschrijven, namelijk:

- Hoofdstuk 2 Emissies Van een biogasgenerator: De aanpak en de resultaten van de uitgevoerde praktijkemissiemetingen en het bepalen van de praktijkemissies.
- Hoofdstuk 3 Milieukosten. De aanpak en de resultaten van het bepalen van de indicatieve Milieukosten van realistische alternatieve varianten en het uitgevoerde vergelijk van de milieukosten van de generatorset op biogas met de varianten.

² Vrijwel gelijktijdig met de afronding van dit project heeft Rijkswaterstaat op 16 december 2024 versie 4.1 van het 'Protocol berekenen en aantonen MKI waarde' uitgebracht. Daarin is de waardering van de milieukosten van HVO brandstof gelijkgesteld aan die van reguliere diesel waarmee het protocol de ambitie (inzetten op emissieloos materieel) volgt. Voor dit rapport is besloten om het milieueffect van de toepassing van HVO toch te laten zien, om het referentiekader compleet te maken. De milieubelasting is sterk afhankelijk van de gebruikte grondstof en aanvoerroute.

2 Emissies van een biogasgenerator

Voor het berekenen van de milieukosten van de biogasgenerator is het nodig om het niveau van de uitstoot van de emissies van de biogasgenerator naar de lucht vast te stellen van CO₂, CO, NO_x, C_xH_x en fijnstof (PM₁₀ deeltjes < 10 µm)(2021). Hiervoor zijn door TNO emissiemetingen uitgevoerd aan de uitlaat van de motor van de biogasgenerator. De resultaten hiervan worden besproken in paragraaf 2.2. De resultaten van de metingen zijn door TNO gebruikt voor het maken van een inschatting van de praktijkemissies voor representatieve laadsce­nario's op de bouwplaats. Dit wordt in paragraaf 2.3 besproken.

2.1 Methode

Gemeten zijn een reeks milieubelastende gassen, te weten NO_x met een onderscheid naar NO en NO₂, CO₂, CO en THC in g/h, g/kWh en g/Nm³ brandstof. THC (total hydro-carbons, totale koolwaterstoffen) is gemeten ter indicatie van de CH₄-emissie. Methaan is een sterk broeikasgas en de uitstoot daarvan is een risico bij gasmotoren. Voorts is ook de deeltjesaantallenuitstoot gemeten. De MKI methode brengt de PM₁₀ in rekening, waarmee fijnstof wordt bedoeld met een diameter <10µm. Een gasmotor emitteert met name deeltjes kleiner dan 100 nm waarvan de massa-emissie erg laag en moeilijk in het veld meetbaar is. Om een indicatie te krijgen van de uitstoot van de kleine deeltjes is besloten om in plaats van de fijnstofmassa deeltjesaantallen uit de uitlaat te meten.

De metingen zijn verricht bij een reeks lastpunten en na een koude start. Het gebruikte meetinstrument is een PEMS (Portable Emissions Measurement System) van het type Horiba GS01 (TNO TUI nr. 60150508) die tevens is uitgerust met een Horiba PN (Particle Number) instrument voor het meten van de deeltjesaantallenconcentratie in uitlaatgas. PEMS wordt voorgeschreven voor de metingen die worden gedaan voor de officiële typegoedkeuring van personenauto's en vrachtauto's en de monitoring van motoren van niet voor de weg bestemde machines, zoals voorgeschreven in EU Euro 6 RDE (Real Driving Emissions), Euro VI ISC (In-Service Conformity), EU NRMM (Non-Road Mobile Machinery) Stage V ISM (In-Service Monitoring) en 40 CFR 1065-sub part J (V.S.).

De HORIBA PEMS apparatuur bevat instrumenten die werken volgens de volgende meetprincipes om de verschillende stoffen in het uitlaatgas te meten: voor CO en CO₂ NDIR (Non-Dispersive Infrared), voor NO_x, NO en NO₂ CLD (Chemoluminescence Detection), voor THC FID (Flame Ionisation Detection) en voor deeltjesaantallen een CPC (Condensation Particle Counter). Er zijn geen polycyclische aromaten (PAKs) apart gemeten. Het is de verwachting dat de koolwaterstoffen (van de FID meting) grotendeels bestaan uit CH₄, en een kleine fractie gevormde andere koolwaterstoffen, maar geen noemenswaardige PAKs.



Figuur 2.1: Overzichtsfoto van de meetopstelling. Op de uitlaat van de biogasmotor is een meetbuis gemonteerd met de uitlaatgasdebietmeter van PEMS. Op deze meetbuis zijn aansluitingen en verwarmde leidingen aangebracht voor het bemonsteren en transporteren van het uitlaatgas naar het PEMS-meetinstrument. Deze is opgesteld in de bestelwagen. PEMS meet de concentraties van een reeks schadelijke stoffen in het bemonsterde uitlaatgas. Naast de bestelwagen staan de flessen met ikgassen en brandstof voor de PEMS. Niet op de foto zichtbaar is een zogenaamde 'load bank'. Deze wordt gebruikt om de generator van de biogasgeneratorset elektrisch te belasten. De mate van belasting is instelbaar.

2.1.1 Genset en motorgegevens

De motor die de generator aandrijft betreft een 6 cilinder motor die draait met een arm lucht-brandstofmengsel, met vonkontsteking en een lage druk gasmengsysteem en is voorzien van een SCR systeem om de NO_x-emissie uit de motor te reduceren.

In Figuur 2.2 staat het typeplaatje van de generatorset met enkele gegevens van de generator en de verbrandingsmotor. De motor is vrij nieuw en heeft minimaal 40 uur gedraaid. De meetresultaten zijn dus geldig voor een vrij nieuwe motor en SCR. Mogelijke veroudering over de levensduur en de invloed daarvan op emissies is moeilijk vast te stellen en is niet meegenomen in dit onderzoek.



Figuur 2.2: Typeplaatje van de generatorset met enkele specificaties van de motor en de generator.

2.1.2 Brandstof

De gebruikte brandstof is biogas. De fracties van de bestanddelen zijn weergegeven in Bijlage A.

2.1.3 Meetprogramma

Het meetprogramma is uitgevoerd zoals beschreven in Tabel 2.1. Om goed inzicht te verkrijgen in de optredende emissies zijn metingen verricht bij verschillende motorlastpunten. De metingen zijn uitgevoerd op 18 en 19 maart 2024. Op beide meetdagen is begonnen met een kalibratie en controle van het PEMS meetsysteem.

Tabel 2.1: Meetprogramma voor de metingen op 18 en 19 maart 2024.

		Motorlastpunt [%]	Opmerkingen
18-3-2024	13:05 - 15:17		PEMS gas and PN controle
	16:13	10 + koude start	
	16:25	75	
	16:29	100	
	16:35	0	
19-3-2024	8:35 - 10:28		PEMS gas and PN controle
	11:03	0	
	11:15	20	
	11:45	40	

		Motorlastpunt [%]	Opmerkingen
	12:04	60	
	12:10	80	
	12:20	100	
Motorlast variatie ten behoeve van bepalen SCR start/AdBlue doseerstart	12:30 - 12:58	40, 45, 50, 48, 45, 43, 45, 48, 50	

2.2 Meetresultaten

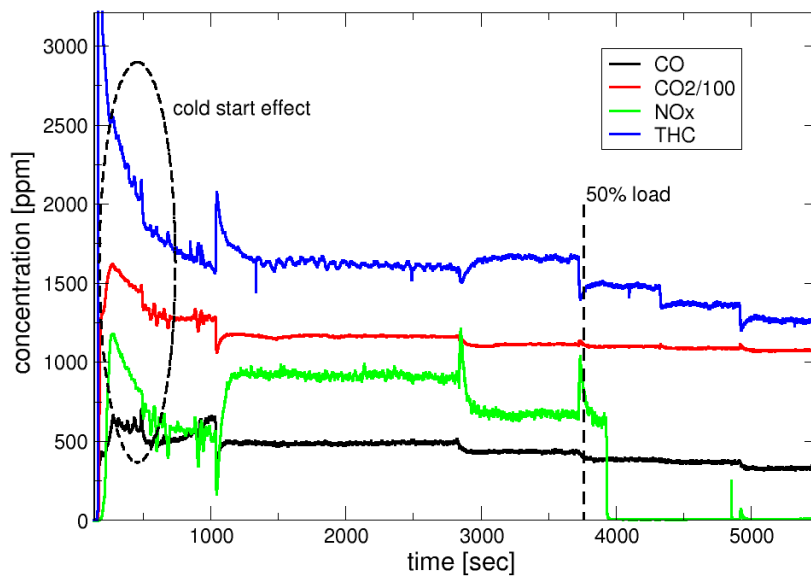
De motor is vanaf de koude start in stappen steeds zwaarder belast door de generator aan te sluiten op een instelbare 'load bank'. De motor maakte een duidelijke stap naar lagere NO_x-emissie in het gebied van 40% naar 60% motorlast (tijdens de meetdag op 19 maart). Er is daarom ingezoomd, tijdens het tweede deel van de metingen, op deze motorbelastingen door de motorlast rond deze waarden toe of af te laten nemen. Het SCR (Selective Catalytic Reduction) systeem van de generatorset voor de reductie van de NO_x-emissie gaat aan bij 50% motorlast en weer uit bij 43% motorlast. Dit is perfect reproduceerbaar gebleken.

Voorafgaand aan het berekenen van de emissies aan de hand van de ingewonnen meetwaarden, zijn een aantal analyses gedaan om inzicht te krijgen in het motorgedrag. Deze betroffen de uitlaatgasvolumestroom, zie Bijlage B en de momentane meetwaarden van de gemeten gasvormige stoffen, zie 2.2.1 en 2.2.2.

2.2.1 Gasvormige uitstoot

Gemeten ruwe concentraties in het uitlaatgas

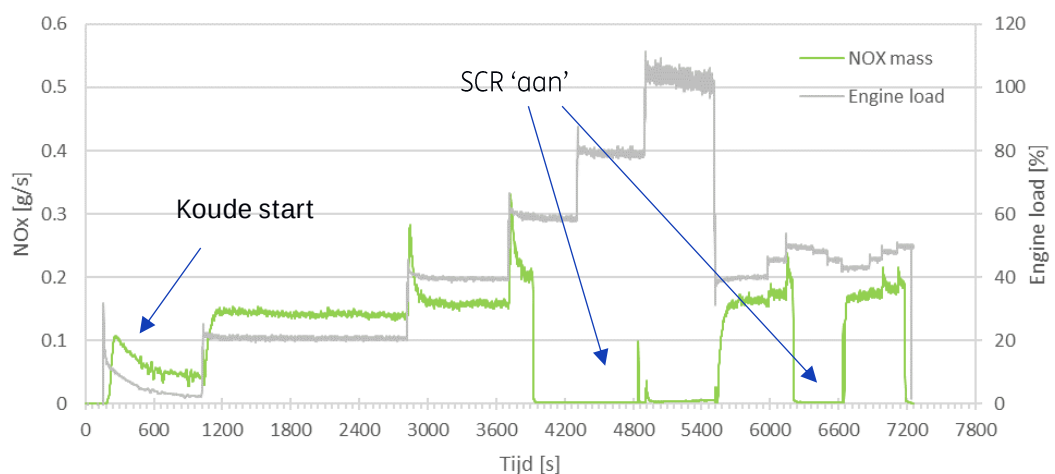
Figuur 2.3 laat de gemeten concentraties gasvormige stoffen zien tijdens de meetdag van 19 maart 2024 en dient ter illustratie van het emissiegedrag na een koude start en over de die dag gemeten motorlastpunten. Een koude start piek is te zien voor de concentraties van NO_x, THC (met name onverbrand methaan) en CO₂. Bij het stapsgewijs opbouwen van het motorvermogen neemt de NO_x concentratie wat toe, maar na het bereiken van ongeveer 50% motorlast daalt de NO_x-emissie flink. De methaanslip neemt dan ook wat af.



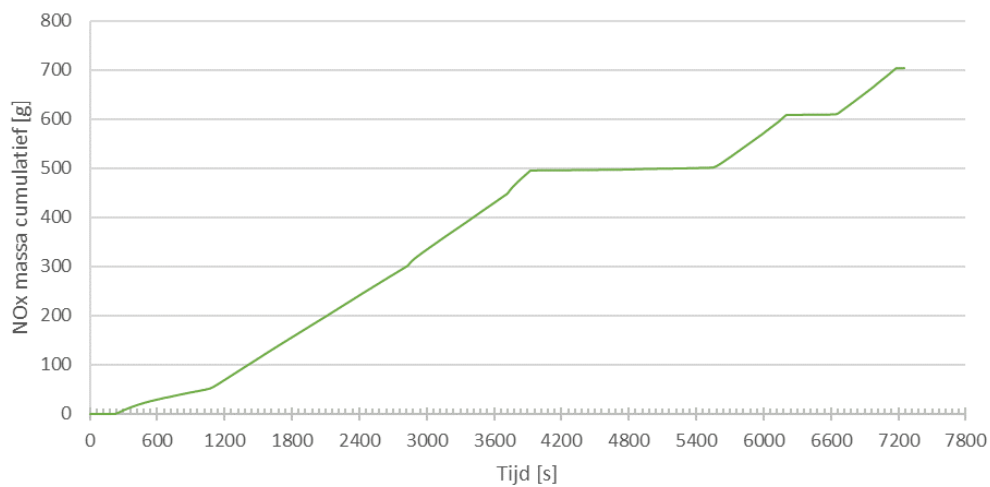
Figuur 2.3: Gemeten concentraties gasvormige stoffen tijdens de meetdag van 19 maart 2024. Grafiek ter illustratie van het emissiegedrag.

Massa-emissie NO_x

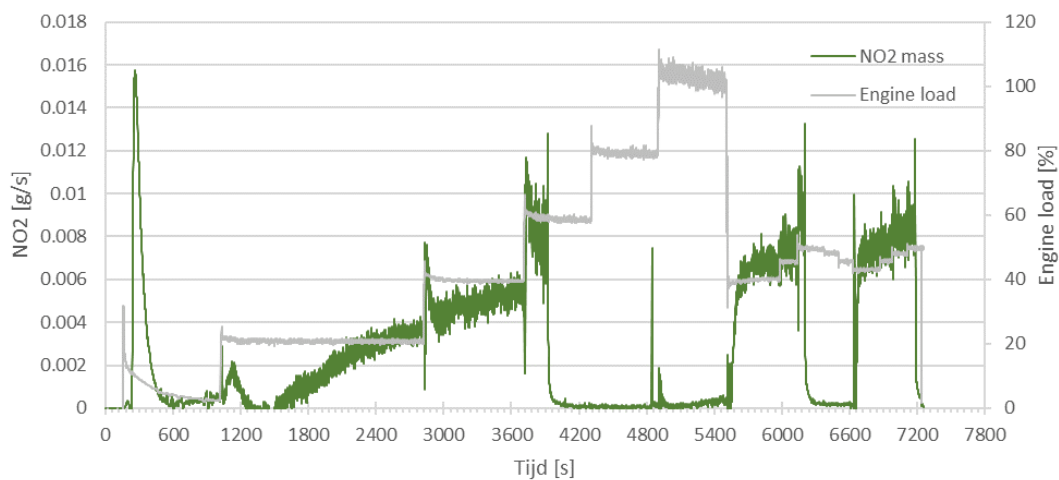
De NO_x massa-emissie onder 50% motorlast laat tevens een stapsgewijze toename zien bij toename van het vermogen en neemt fors af boven ongeveer 50% van het maximum vermogen. De motorlast is tijdens de testdag op 19 maart tevens in stappen veranderd in het gebied van 40-50% motorlast. Figuur 2.4 geeft een grafiek van de ingestelde motorlast en de gemeten NO_x-emissie als functie van de tijd. In Figuur 2.5 is de bijbehorende cumulatieve NO_x-emissie weergegeven. Figuur 2.6 en Figuur 2.7 geven de resultaten voor NO₂ weer. De NO₂ fractie in NO_x is meestal rond de 2% en daarmee laag (zie Figuur 2.8). Figuur 2.8).



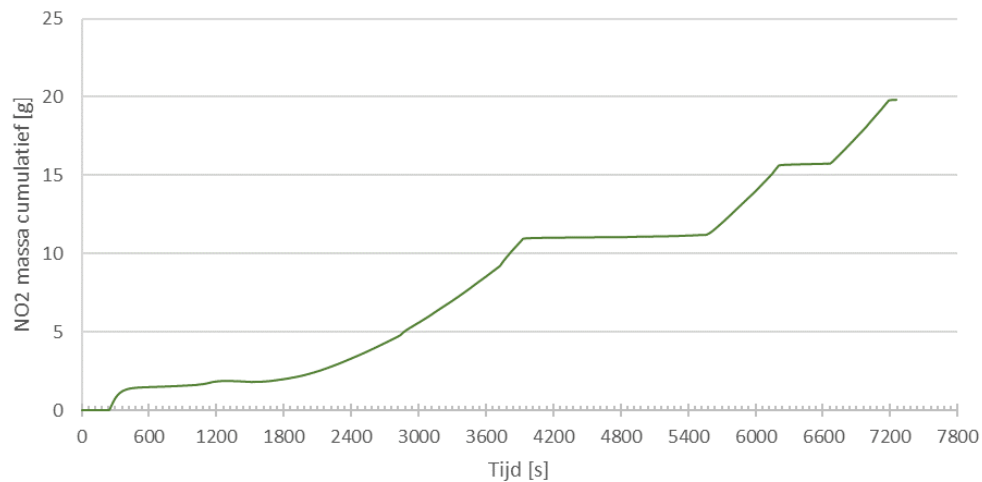
Figuur 2.4: NO_x-emissie en motorlast. De NO_x-emissie neemt stapsgewijs toe bij het toenemen van het motorvermogen onder de 50%, maar daalt sterk bij een motorlast boven ongeveer 50%. Er is een kleine koude start piek in de NO_x-concentratie zichtbaar.



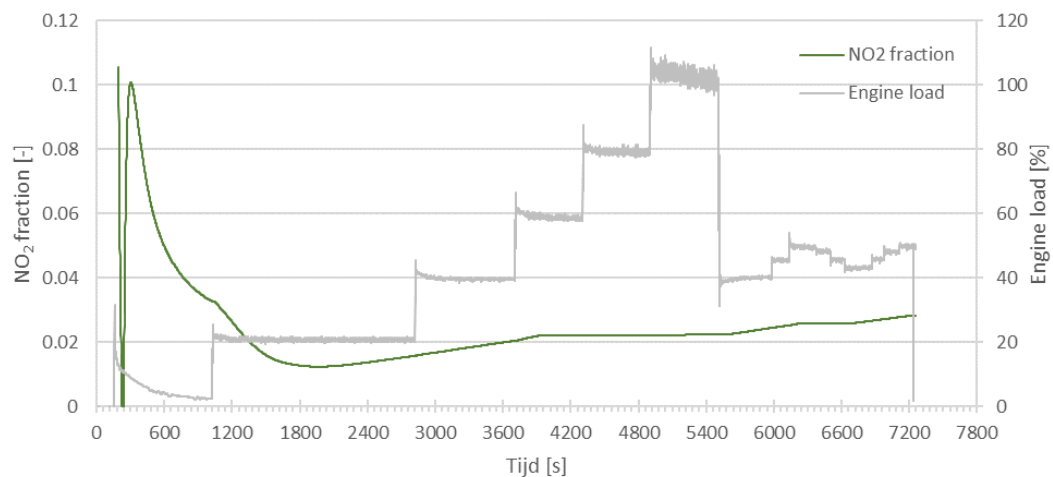
Figuur 2.5: Cumulatieve NO_x-emissie. De NO_x-emissie neemt toe met de motorlast tot ongeveer 50%. Daarna daalt de NO_x-emissie scherp naar een lager niveau omdat de SCR dan aan gaat. De cumulatieve NO_x-emissie neemt daardoor nauwelijks meer toe tot het punt waarbij de motorlast weer onder de 43% komt. De invloed van de koude start is zeer beperkt.



Figuur 2.6: Na een korte piek neemt NO₂ af om weer toe te nemen wanneer de motor last toeneemt. Net als voor NO_x neemt NO₂ sterk af boven de 50% motorlast.



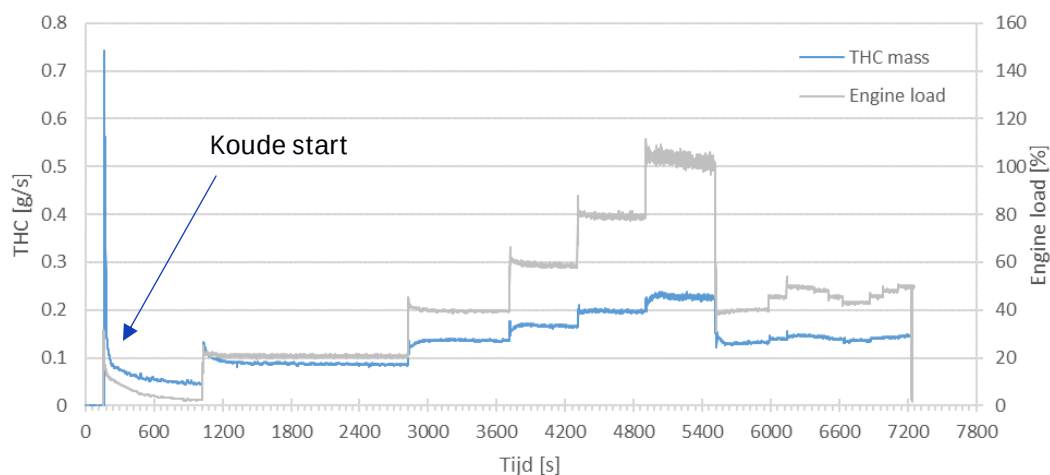
Figuur 2.7: Cumulatieve NO₂ uitstoot. De NO₂ uitstoot neemt toe met de motorlast tot ongeveer 50%. Daarna daalt de NO₂ uitstoot scherp naar een lager niveau omdat de SCR aan gaat. De invloed van de koude start is zeer beperkt.



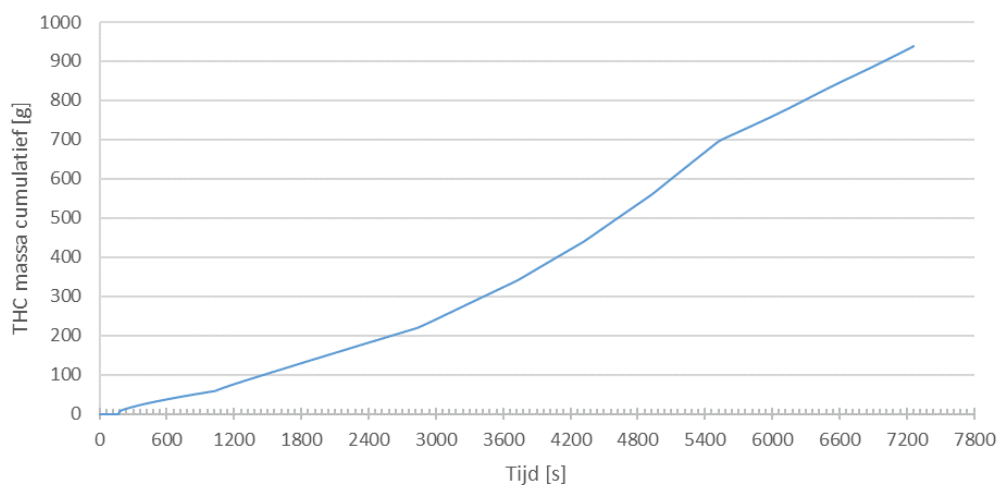
Figuur 2.8: De NO₂ fractie (in NO_x) is ongeveer 0.1 na de koude start en neemt af tot ongeveer 0.02.

Massa-emissie THC (Methaan)

De aanname is dat bijna alle THC methaan is (op de ten opzichte van methaan zeer lage concentratie gevormde koolwaterstoffen na). Dit omdat de gebruikte brandstof volgens de analyse met name de koolwaterstof methaan bevat en eventuele aanwezige zwaardere koolwaterstoffen makkelijker oxideren in het verbrandingsproces waarmee de koolwaterstoffenuitstoot met name uit CH₄ bestaat. De resultaten laten een korte koude startpiek zien. Bij hogere belasting neemt de THC - en dus de CH₄ - uitstoot geleidelijk toe en wanneer de SCR aan is, in Figuur 2.9 na 5400s, daalt de methaanuitstoot weer. Figuur 2.10 toont de cumulatieve uitstoot van koolwaterstoffen.

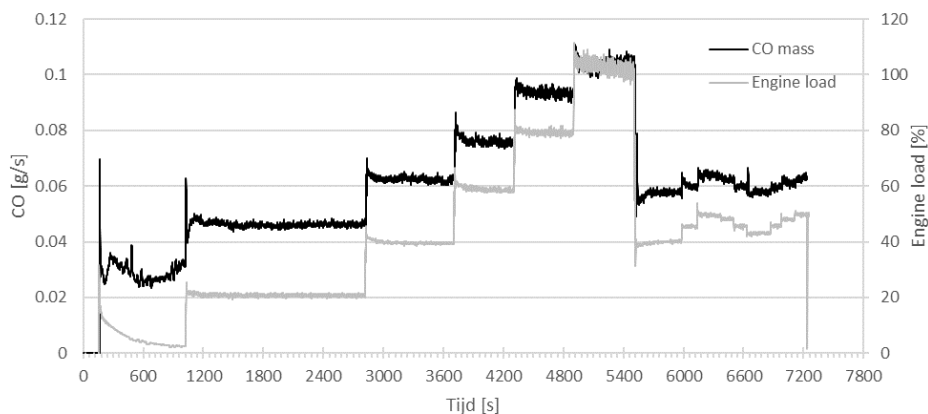


Figuur 2.9: THC (methaan) emissie en motorlast. De THC neemt stapsgewijs toe met motorlast. Er is een korte koude- startpiek zichtbaar. De emissie neemt af wanneer de SCR actief wordt.

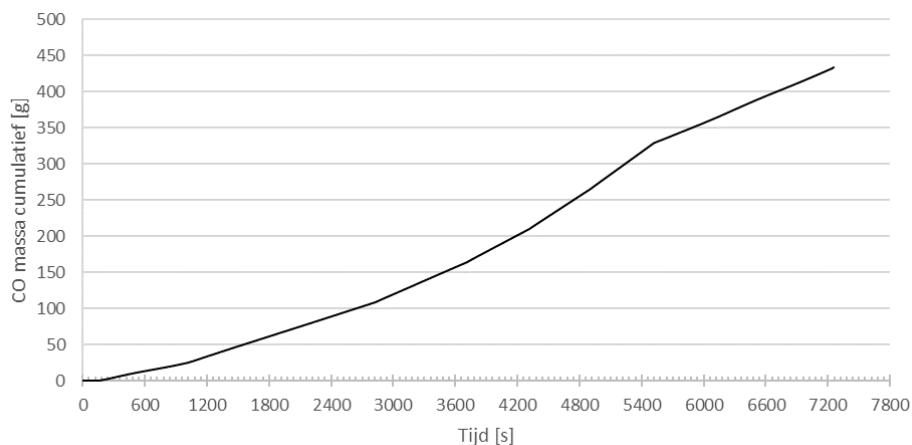


Figuur 2.10: Cumulatieve uitstoot van koolwaterstoffen.

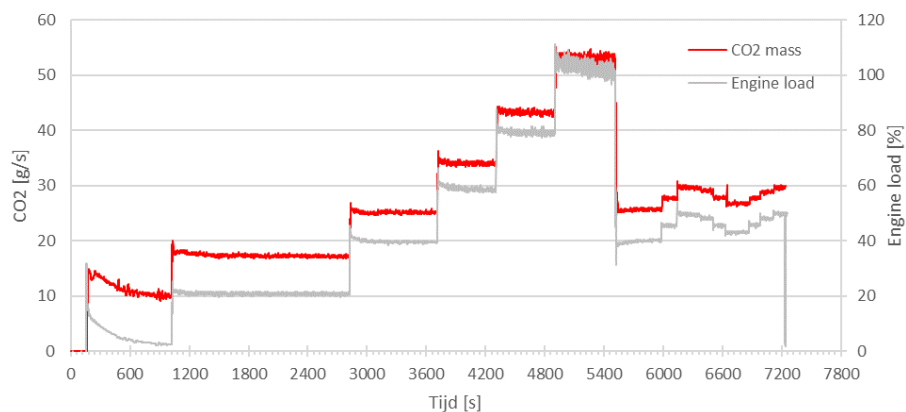
Onderstaande Figuur 2.11, Figuur 2.12, Figuur 2.13, Figuur 2.14, tonen resp. de uitstoot van CO bij toenemende motorlast, de cumulatieve CO uitstoot, de uitstoot van CO₂ bij toenemende motorlast en de cumulatieve uitstoot van CO₂.



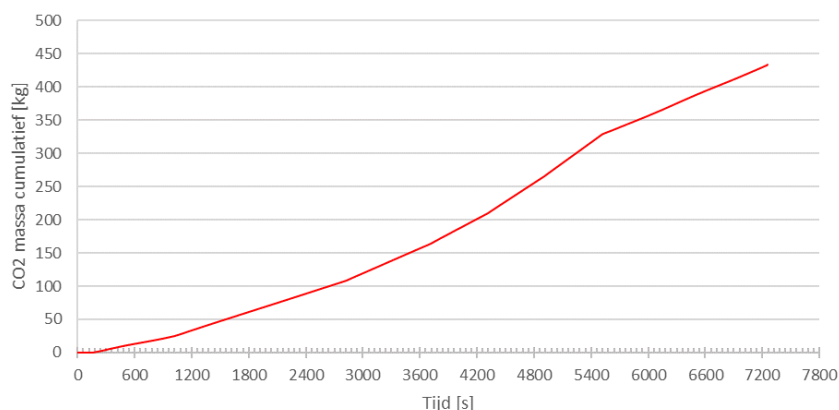
Figuur 2.11: CO emissie en motorlast. De CO emissie neemt stapsgewijs toe met motorlast. De emissie neemt af wanneer de SCR actief wordt.



Figuur 2.12: Cumulatieve uitstoot van koolmonoxide.



Figuur 2.13: CO₂-emissie en motorlast. De CO₂-emissie neemt stapsgewijs toe met motorlast. Na de koude start is de CO₂-emissie tijdelijk licht verhoogd door het hogere brandstofverbruik wat met name wordt veroorzaakt door de hogere inwendige weerstand van de motor wanneer deze koud is.

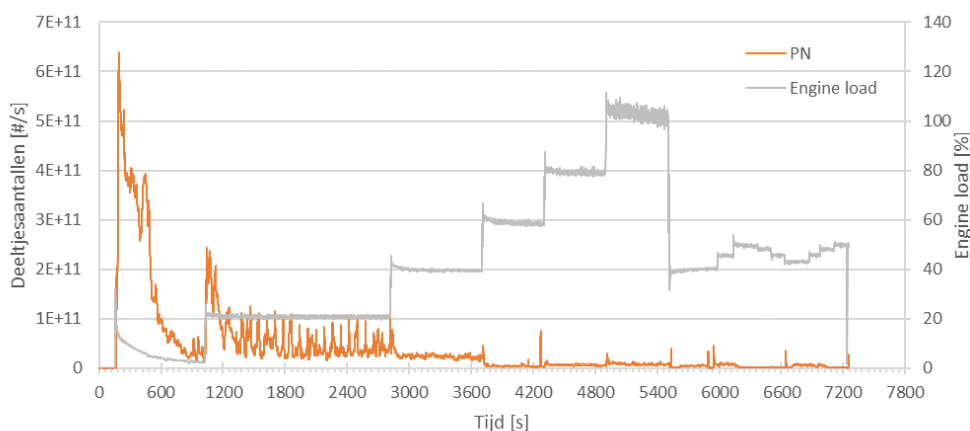


Figuur 2.14: Cumulatieve uitstoot van kooldioxide.

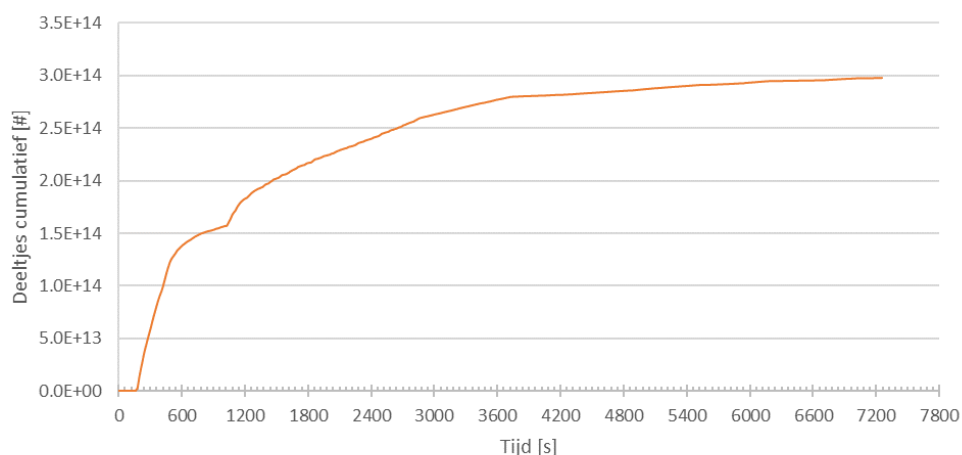
2.2.2 Fijnstofuitstoot

De gemeten fijnstofuitstoot is de deeltjesaantallenuitstoot. Dit in plaats van de reguliere deeltjesmassa-emissie. De voornaamste reden is dat de massa-emissie van fijnstof van gasmotoren doorgaans relatief laag is ten opzichte van dieselmotoren en in het veld moeilijk meetbaar. De deeltjesaantallenuitstoot is een goede indicator voor fijnstofuitstoot en hiermee kan gecontroleerd worden of een motor inderdaad substantieel minder deeltjes uitstoot dan bijvoorbeeld een reguliere dieselmotor zonder roetfilter.

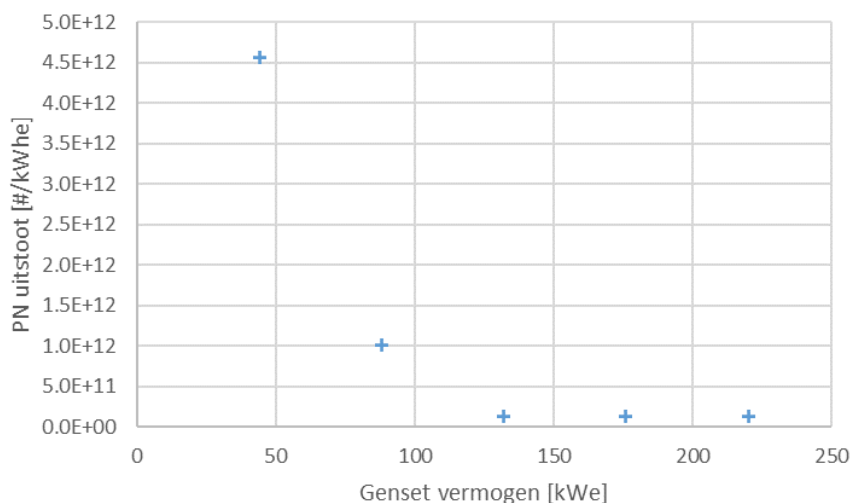
De deeltjesaantallenmeting is uitgevoerd met de CPC (Condensation Particle Counter) van het PEMS PN instrument. De meting laat een grote piek zien in deeltjes bij de start van de motor, zie Figuur 2.15. Deze daalt in ongeveer 10 minuten, en waarschijnlijk langzaam omdat de motor stationair draait. Na 1100 seconden gaat de motor op 20% last draaien, en nemen de deeltjesemissies weer iets toe tot het niveau weer is gedaald na ongeveer 1300s. De fijnstofuitstoot is bij de koude start in totaal $1,9 \cdot 10^{14}$ deeltjes. Na ruim een uur bereikt de uitlaatgastemperatuur 350 °C en wordt de SCR actief, de deeltjesaantallenuitstoot daalt dan verder naar $1,6 \cdot 10^{10}$ deeltjes per seconde. Figuur 2.16 geeft de cumulatieve deeltjesaantallenuitstoot en Figuur 2.17 geeft de uitstoot van vaste deeltjes per geleverde hoeveelheid arbeid versus geleverd elektrisch vermogen van de generatorset.



Figuur 2.15: Deeltjesaantallen uitstoot, waarbij vooral na de koude start deeltjesaantallen hoog zijn en geleidelijk afnemen totdat de motor goed is opgewarmd.



Figuur 2.16: Cumulatieve deeltjesaantallen uitstoot. De bijdrage van de koude start is substantieel.



Figuur 2.17: uitstoot van vaste deeltjes (PN, Particle Number) per hoeveelheid geleverde arbeid versus geleverd elektrisch vermogen van de genset. Bij laag vermogen is er nog invloed van de koude start, zie ook Figuur 2.15.

De deeltjesemissie van een gasmotor hangt veelal samen met de olie om de motor te smeren. Bij lage temperaturen, bij een koude start, levert dit deels verbrande- en onverbrande stoffen, die als deeltjes uit de motor komen.

De uitstoot van vaste deeltjes (PN=Particle Number) is $4,5 \times 10^{12}$ / kWh bij 20% vermogen (44 kWh) tot $1,3 \times 10^{11}$ / kWh bij een hoger generatorvermogen in het bereik van 132 tot 220 kWh. Gewogen over de D2 cyclus (Tabel 2.2) is dit 5×10^{11} / kWh. Om dit in perspectief te plaatsen, over een typegoedkeuringstest mag de uitstoot maximaal 1×10^{12} deeltjes per kWh (geleverd door de motor) en 0,015 mg per kWh (geleverd door motor) bedragen, dit gewogen over alle D2 testpunten³. Bij een geschat energiegebruik van 1 kWh/km van een Euro VI motor in een reguliere trekker-oplegger combinatie is het niveau ongeveer $0,7 - 1,6 \times 10^{11}$ / kWh. Voor de lagere motorlast is de uitstoot nog verhoogd omdat de motor nog aan het opwarmen was, zie Figuur 2.15.

³ ISO 8178

De extra uitstoot van deeltjes ten gevolge van de koude start wordt geschat op $1.9 \cdot 10^{14}$ deeltjes per koude start. Een koude start wordt echter niet meegenomen in de 5-mode D2 test voor typegoedkeuring van motoren voor generatorsets. De emissiemeetwaarden zijn bovendien gebaseerd op de gemeten elektrische arbeid van de generator terwijl de typegoedkeuring uitgaat van de arbeid geleverd door de motor. Omdat de arbeid van de generator lager is dan die van de motor vanwege het rendement van de generator, zal de emissie in g/kWh door de motor nog ongeveer 20% lager uitvallen. Daarom is het de verwachting dat de motor, wanneer deze warm is, ruimschoots onder de limietwaarde blijft. Daarbij ligt bij een warme motor de uitstoot van vaste deeltjes van de gasmotor ongeveer op het niveau van een Euro VI vrachtwagenmotor met roetfilter. Na een koude start en bij zeer lage last is de uitstoot hoger.

2.2.3 Emissieniveaus

In Tabel 2.2, Tabel 2.3, Tabel 2.4 en Tabel 2.5 staan de emissiewaarden per lastpunt in verschillende eenheden. In Tabel 2.2 staat onderaan ook het gewogen emissieresultaat over de D2 test cyclus die wordt gebruikt voor de typegoedkeuring van motoren van generatorsets volgens de Europese NRMM (Non-road Mobile Machinery) wetgeving.

Tabel 2.2: De emissies in g/kWh (gram per kilowattuur geleverde elektriciteit door de generatorset), voor de verschillende lastpunten.

	Load/ Torque	NRSC D2 weeg- factoren	CO	CO ₂	CH ₄	NO _x	NO ₂	NMHC	PN
Mode	[%]	[-]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[/kWh]
1	10	0.05	6.1	2206	11.3	13.6	0.27	0.06	4.0E+12
2	25	0.25	3.4	1328	6.5	8.2	0.16	0.03	1.8E+12
3	50	0.30	2.3	1036	4.7	0.05	0.001	0.02	5.0E+11
4	75	0.30	1.8	938	3.9	0.07	0.001	0.02	1.3E+11
5	100	0.10	1.4	889	3.4	0.09	0.002	0.02	1.3E+11
Gewogen D2			2.12	1013	4.42	1.13	0.02	0.02	5E+11

Tabel 2.3: Brandstofverbruik en rendementen, voor de verschillende vermogens. Motorrendement (as) is geschat op basis van het geleverde elektrische vermogen, en 7% vaste verliezen bij de omzetting van mechanisch naar elektrisch vermogen.

	Last / Koppel motor	NRSC D2 weegfactoren	Last [kWe]	Overall rendement	Last	Motor rendement	Brandstof	Brandstof
Mode	[%]	[-]	[kWe]	[%]	[kWm]	[%]	[kW]	[Nm3/u]
1	10	0.05	22	15.7%	23.54	16.8%	139.8	25.0
2	25	0.25	55	26.1%	58.85	28.0%	210.4	37.6
3	50	0.30	110	33.5%	117.7	35.9%	328.2	58.6
4	75	0.30	165	37.0%	176.55	39.6%	445.9	79.6
5	100	0.10	220	39.0%	235.4	41.8%	563.6	100.6

Tabel 2.4: De emissies per uur, voor de verschillende vermogens.

	Last / Koppel motor	NRSC D2 weegfac- toren	CO	CO ₂	CH ₄	NO _x	NO ₂	NMHC ge- baseerd op schatting 5% van THC	THC
Mode	[%]	[-]	[g/u]	[kg/u]	[g/u]	[g/u]	[g/h]	[g/u]	[g/u]
1	10	0.05	134	48.5	249	300	6.0	1.25	250
2	25	0.25	188	73.1	359	450	9.0	1.80	361
3	50	0.30	257	113.9	519	6.0	0.1	2.61	521
4	75	0.30	300	154.8	648	12.1	0.2	3.26	652
5	100	0.10	317	195.6	749	20.5	0.4	3.76	752

Tabel 2.5: De emissies per normaalvolume biogas.

	Last / Koppel motor	NRSC D2 weegfac- toren	CO	CO ₂	CH ₄	NO _x	NO ₂	NMHC	THC
Mode	[%]	[-]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]	[g/Nm ³ biogas]
1	10	0.05	5.4	1904	10.0	12.0	0.24	0.05	10.0
2	25	0.25	5.0	1906	9.6	12.0	0.24	0.05	9.6
3	50	0.30	4.4	1910	8.8	0.1	0.002	0.04	8.9
4	75	0.30	3.8	1913	8.1	0.2	0.004	0.04	8.2
5	100	0.10	3.2	1916	7.4	0.2	0.004	0.04	7.5

2.2.4 Bespreking resultaten

Voor het niveau van de NO_x-emissie zijn de efficiency en de werking van het SCR systeem en de AdBlue dosering relevant. Een SCR werkt pas bij een zekere temperatuur die moet worden bereikt door opwarming met warmte uit de uitlaatgassen van de motor. Bij lage motorlasten bevat uitlaatgas vaak niet voldoende warmte en kan het gebeuren dat een SCR niet op temperatuur komt of door de relatief koude uitlaatgassen weer afkoelt tot beneden de werktemperatuur. De SCR regeling op deze motor is echter heel simpel: aan bij 50% last, uit bij 43% last, ongeacht de temperatuur van de SCR. Als de SCR aan is, is de NO_x-emissie laag (<0.1 g/kWh). De waarden zijn dan ruim onder de eisen van de NRMM Stage V wetgeving van 0,4 g/kWh. Als de SCR uit is, is de NO_x-emissie ruwweg 10 tot 40 keer hoger. Er is dus een duidelijke stap in het niveau van de NO_x-emissie en de NO_x-emissie hangt dus sterk af van deze stap in motorlast. De extra emissie ten gevolge van de koude start is beperkt. Er is een kleine toename te zien.

Lage last dient voor NO_x in rekening gebracht te worden bij het bepalen van representatieve emissiewaardes voor de MKI berekening. We maken voor NO_x een onderscheid in generatorvermogen lager en hoger dan 50%.

En bij aanvang van een laadsessie zal de NO_x-emissie ook bij een vermogen hoger dan 50% tijdelijk verhoogd zijn omdat de katalysator nog moet opwarmen.

De methaanuitstoot is met 3.4 tot 11.3 g/kWe significant en laat een bijna lineair verband zien tussen motorlast en niveau van de uitstoot, waarbij bij lage last de methaanuitstoot in CO₂-equivalent 15% is van de gemeten CO₂-emissie en bij hoge last 11%, hierbij gebruik makend van een GWP (Global Warming Potential) van 29,8 (IPCC AR6 2021, 100 jaar). Dit niveau is ook over alle lastpunten ruim hoger dan de limiet voor Stage V non-road engines (nre v/c 6, $130 \leq P \leq 560$) die 1.1 g/kWh bedraagt voor de totale hoeveelheid uitgestoten koolwaterstoffen (HC) en die geldt voor een formele test.

De motor van de generatorset is een ottomotor die met een arm brandstof-luchtmengsel draait. De gasvormige brandstof wordt bij een lage druk in het inlaattraject gedoseerd. Voor dit type motor geldt over het algemeen dat er relatief veel methaanslip optreedt. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld een stoichiometrisch (regulier mengsel) draaiende motor met een driewegkatalysator. Een driewegkatalysator kan de methaanuitstoot van een motor doorgaans goed oxideren en daarmee het niveau fors verlagen. Een driewegkatalysator kan echter niet worden toegepast op een motor die met een arm mengsel draait. De gebruikte motor maakt daarom gebruik van een SCR-systeem om de NO_x-emissie van de motor te reduceren. Een SCR reduceert geen methaan. Een motor die arm draait en waarbij de brandstof in het inlaattraject wordt gedoseerd, heeft daarbij ook een hogere uitstoot direct uit de motor, met name omdat een deel van de methaan niet verbrandt in de koelere plekken van de verbrandingskamer.

Verder moet opgemerkt worden dat de directe CO₂-emissie per kWh geleverde motorarbeid beduidend hoger ligt dan bij een dieselmotor met een vergelijkbaar vermogen vanwege de hoge fractie CO₂ in het gebruikte biogas (38,8%, zie Bijlage A). Dit ondanks de lagere CO₂-uitstoot per eenheid van energie van methaan. Ter vergelijking, een dieselmotor van een vrachtwagen heeft een directe specifieke CO₂-emissie van typisch zo'n 660 gram per kWh geleverde motorarbeid terwijl de biogasmotor bij gemiddelde last zo'n 900-1000 g/kWh uitstoot. Dit is exclusief de methaanuitstoot.

De koude start geeft voor een periode tot 20 minuten sterk verhoogde fijnstofemissies. Daarna dalen deeltjesaantallen, licht afhankelijk van de motorbelasting met enkele mg per kW. De extra uitstoot wordt geschat op $1.9 \cdot 10^{14}$ deeltjes. Omdat de deeltjesaantallen-emissie bij warme motor ruimschoots lager ligt dan de limietwaarde (NRMM, stage V) wordt aangenomen dat ook de fijnstofmassa-emissie onder de limietwaarde blijft bij reguliere inzet. Alleen bij zeer lage motorlast kan de arbeidspecifieke uitstoot toenemen omdat de waarde in de noemer (kWhe) erg laag wordt, maar dan draait de motor op laag vermogen en produceert zo lage emissies. De koude start heeft verhoogde aantallen emissies maar de dichtheid van de deeltjes is laag en zal dus een beperkte bijdrage hebben aan de fijnstofmassa. Voor de fijnstofmassa-emissie is het aannemelijk dat deze onder de limietwaarde van 15 mg/kWh voor een stage V motor blijft. Deze waarde geldt voor de motor. Voor de generatorset is de waarde ongeveer 19 mg/kWhe opgewekt vermogen, rekening houdend met het rendement van de generator. Gezien de geringe invloed op de MKI wordt de fijnstofmassa-emissie waarde op 19 mg/kWhe gesteld.

2.3 Representatieve emissiewaardes

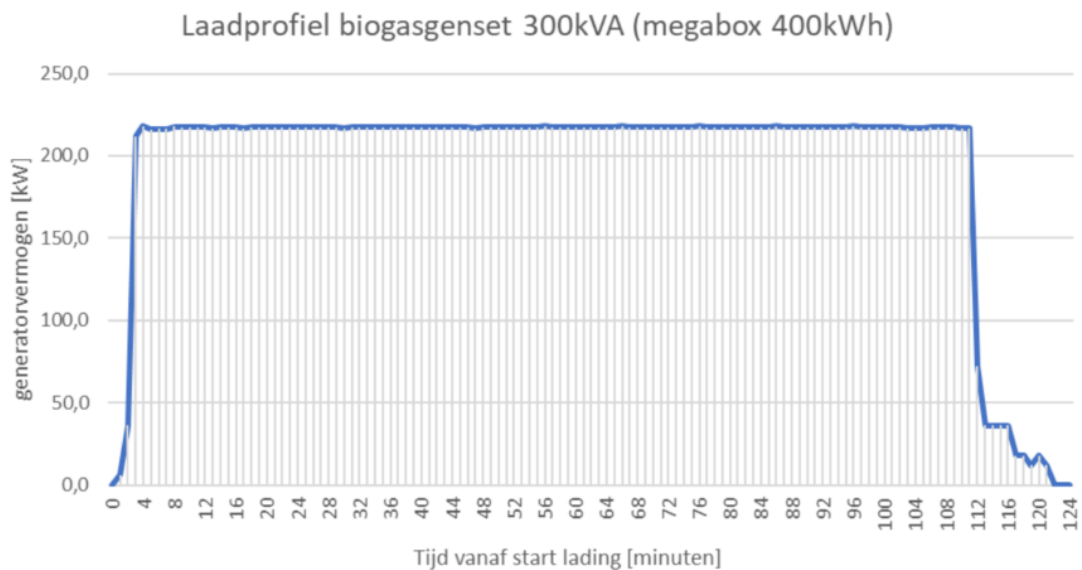
De emissies die zijn gemeten per vast lastpunt van de generatorset dienen met behulp van representatieve laadprofielen te worden omgerekend naar emissiewaardes die als invoer voor de MKI-LCA kunnen worden gebruikt. Uit 'Memo Laadprofiel analyse ten behoeve van TNO emissiemeting 300 kVA biogasgenerator' blijkt het volgende ten aanzien van de praktijkinzet :

"...Door het gebruik van verschillende laadpaalconfiguraties en de beperkte laadstroom naar de accu's, verschillen de dagelijkse laadprofielen onderling aanzienlijk. Bij een volwaardige lading van 1 accupack volgt een laadcyclus nagenoeg de hele laadtijd de maximale capaciteit. Een voorbeeld hiervan is een laadcyclus van 7 juni 2023 (grafiek op volgende pagina). Uit de data van de volledige projectladingen blijkt verder dat er relatief vaak deelladingen plaats vinden, bijvoorbeeld omdat er meerdere accu's aangesloten zijn en ze niet tegelijkertijd vol zijn. In dat geval bleek de laadpaal niet in staat het volledige vermogen naar de resterende accupack te sturen. Een voorbeeld van een deellading is de laadcyclus van 16 mei.

Uit de totale projectdata blijkt dat vanwege dit effect van 'deellading' 33% de opgewekte kWh op deellast van de generatorset is geladen, 55% op vollast en de rest tussen deze waarden in of eronder. Het vermogen waarop op deellast gedraaid wordt is afhankelijk van de laadpaal en accucapaciteit. Gedurende het project KOP waren de laadpalen de beperkende factor, waardoor er veel op twee vermogensranges in deellast gedraaid is, 45 en 90 kW.

Wanneer er geen beperking in de laadcapaciteit is dan zal, ook bij wisselende acculadingen, in principe altijd op vollast geladen worden. Alleen bij de start en tegen het einde van de acculading daalt het motorvermogen kortstondig door een lager laadvermogen van de accupack. Dit patroon zien we ook bij de kleinere generator waar de laadpaal niet de beperkende factor was. Het afgeleide laadprofiel van één 400 kWh accupack is in onderstaande figuur te zien. Hier is te zien dat er over een periode van meerdere uren de accupack met constante stroom worden opgeladen. Rond het begin en in meerdere mate aan het eind van de laadcyclus is een lager laadvermogen te zien. Het laadgedrag aan het begin en eind van de lading verschilt in detail maar is algemeen van dezelfde duur en deelvermogen. Zo daalt het laadvermogen de laatste 10-20 minuten naar ± 10 kW (5% motorvermogen), voordat deze afschakelt.."

"...Voorgaande vertaald naar een motorvermogen van 300kVA (220kW) levert een generieklaadprofiel op voor een megabox 400 (400kWh). Dit profiel gaat uit van een onbeperkte laadcapaciteit van de laadpaal (of directe lading zonder gebruik van een laadpaal). Als representatieve praktijksituatie kan een deellast van 33% van de tijd genomen worden. Dit komt overeen met de realisatie in Project KOP, maar zal in toekomstige project lager zijn door optimalisatie van het gehele laadsysteem..."



Figuur 2.18: Laadprofiel bij onbeperkte laadcapaciteit waarbij de generatorset een groot deel van de tijd op vollast draait om een accupack van 400kWh te laden. Bij accupacks met een lagere capaciteit zal het vermogen lager liggen. Bij beperking van het laadvermogen, bijvoorbeeld door een laadpaal met een lager laadvermogen zal het vermogen van de generator set lager liggen en zal bij gelijke grote capaciteit van 400kWh de laadtijd toenemen.

Er zijn drie situaties te onderscheiden:

Onbeperkt: als er geen beperking in de laadcapaciteit is, of als er een beperking is waarbij het maximale laadvermogen hoger ligt dan 50% van de capaciteit van de generatorset. Ook bij wisselende acculadingen zal in principe altijd op vollast geladen worden. Alleen bij de start en tegen het einde van de acculading daalt het motorvermogen kortstondig door een lager laadvermogen van de accupack.

Deels beperkt: als de hoge laadcapaciteit ($kWe > 50\%$) voor meer dan 66% van de tijd wordt benut maar er ook deellast voorkomt ($kWe < 50\%$). Als representatieve praktijksituatie is een deellast van 33% van de tijd genomen. Dit komt overeen met de realisatie in Project KOP, maar zal in toekomstige projecten waarschijnlijk lager zijn door optimalisatie van het gehele laadsysteem.

Beperkt: als gedurende een aanzienlijk deel van het project slechts beperkte laadcapaciteit beschikbaar is ($kWe < 50\%$) of slechts een enkele batterij met een lage capaciteit waarbij de laadcapaciteit van de generator set lager dan 50% blijft.

Tabel 2.6: Afgeleide emissiewaardes voor de generatorset op biogas voor het leveren van 400kWh.

	Onbeperkt	Deels beperkt	Beperkt
CO [g/kWhe]	1.9	2.1	3.4
CO ₂ [g/kWhe]	956	1005	1340
CH ₄ [g/kWhe]	4.0	4.3	6.6
NO _x [g/kWhe]	0.3	1.3	8.3
NO ₂ [g/kWhe]	0.00	0.02	0.16
PM [g/kWhe]	0.019	0.019	0.019
Rendement motor [%]	39	37	28
Rendement genset [%]	36	35	26

Wanneer minder capaciteit moet worden geleverd, bijvoorbeeld voor een kleinere accupack zullen de emissies licht toenemen omdat het aandeel draaien op lage last bij opbouwen en afbouwen van het laadvermogen, wat gepaard gaat met doorgaans hogere emissies, wat groter is.

Tabel 2.7: Afgeleide emissiewaardes voor de generatorset op biogas voor het leveren van 200kWh.

	Onbeperkt	Deels beperkt	Beperkt
CO [g/kWhe]	1.9	2.1	3.5
CO ₂ [g/kWhe]	974	1029	1353
CH ₄ [g/kWhe]	4.1	4.5	6.6
NO _x [g/kWhe]	0.4	1.6	8.4
NO ₂ [g/kWhe]	0.01	0.03	0.16
PM [g/kWhe]	0.019	0.019	0.019
Rendement motor [%]	39	38	28
Rendement genset [%]	37	35	26

3 Milieukosten

3.1 Inleiding

Powercrumbs heeft in 2021 (update in 2024) door Ecochain een milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA) laten uitvoeren van de 200-300 kVA biogasgenerator, conform de Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken versie 1.1.

De functionele eenheid van die LCA is:

De productie en verbranding van gezuiverd biogas, uitgedrukt per m³ bij normaalcondities (0°C en 101.325 Pa) en verpakt beschikbaar onder een druk van 200 Bar.

De LCA is compleet gemaakt met emissiegegevens per functionele eenheid, op basis van de meetdata uit hoofdstuk 2 van dit rapport. Het uiteindelijke resultaat van de studie, na toetsing, moet zijn de opname van de biogasgenerator als kaart in de Nationale Milieudatabase voor Bouw en GWW-werken. De berekende éénpuntsscore voor het gebruik van de generator, de Milieukostenindicator-waarde (MKI), kan gebruikt worden voor het berekenen van de milieu-impact bij voorstellen voor aanbestedingen aan Rijkswaterstaat.

De gasgenerator zal voornamelijk gebruikt gaan worden om elektrische bouwmachines op te laden op of nabij de bouwplaats. Op verzoek van Rijkswaterstaat heeft TNO de uitkomst van de LCA-studie van Powercrumbs, die door TNO 'as is' is aangenomen, vergeleken met een aantal alternatieve oplossingen voor de energievoorziening van machines op de bouwplaats. Omdat het om een specifiek toepassingsgebied gaat, is het voor de vergelijkbaarheid wel nodig om de scope van de Powercrumbs-LCA uit te breiden naar productie en afdanking van de bouwmachine; zie paragraaf 3.2.3.

3.2 Aanpak

3.2.1 Doel

Het doel van de vergelijking is het verschaffen van inzicht in de verhouding van milieueffecten, uitgedrukt in MKI, van diverse varianten voor de inzet van bouwmachines op een bouwplaats, inclusief de energievoorziening en eventueel -opslag. Dat betekent dat in dit hoofdstuk gestreefd is naar goede vergelijkbaarheid qua compleetheid en datakwaliteit, maar niet naar de hoogste accuraatheid. Ook is de Bepalingsmethode (zie paragraaf 3.1) niet in detail gevolgd.

Het vermogen van de biogasgenerator sluit aan bij het laadvermogen van grotere machines. Voor de vergelijking is gekozen voor een mid-size graafmachine, waarbij de elektrische variant voorzien is van een 400 kWh accu.

3.2.2 Functionele eenheid

De functionele eenheid voor de vergelijking is:

Het gebruik van een middelgrote graafmachine (ca. 16t, 75-130 kW) op een bouwplaats, uitgedrukt in de hoeveelheid arbeid die door de motor verricht kan worden met 1 kWh elektriciteit (230VAC) aan de stekker van een elektrische graafmachine.

De functionele eenheid is wat complex. Er is gekozen voor 1 kWh aan de stekker als uitgangspunt, omdat de auteurs een hoeveelheid elektriciteit een logischer en tastbaarder eenheid vinden dan een hoeveelheid arbeid aan de motoras. In Tabel 3.1 is een lijst van varianten te zien, en de bijbehorende reference flows (materiaal- of energiestroom die nodig is om de functionele eenheid te vervullen). In de laatste kolom is te zien hoe bijvoorbeeld is berekend hoeveel diesel bij een dieselmachine nodig is om hetzelfde werk te verrichten als 1 kWh in een elektrische machine.

Tabel 3.1: Varianten vergelijking MKI.

Code	Variant	Reference flow	Staat gelijk aan
a	Elektrische graafmachine, direct geladen met Powercrumbs ('deels beperkt')	1 kWh AC uit generator	1 kWh AC aan de laadaansluiting van de graafmachine
b	Elektrische graafmachine, direct geladen uit het elektriciteitsnet	1 kWh AC uit het elektriciteitsnet, mix groen/grijs	1 kWh AC aan de laadaansluiting van de graafmachine
c	Elektrische graafmachine, geladen met batterijcontainer, die op zijn beurt wordt geladen vanuit het elektriciteitsnet	1 kWh AC aan de laadaansluiting van de graafmachine	
d	Stage V dieselgraafmachine op diesel	0,248 liter diesel*	Beschikbare arbeid gelijk aan dat van een elektrische machine bij 1 kWh AC aan de laadaansluiting
e	Elektrische graafmachine, geladen met dieselaggregaat op HVO	0.184 kg HVO*	1 kWh AC aan de laadaansluiting van de graafmachine

*) De berekening en aannames zijn verderop toegelicht.

Er is gekozen voor een middelgrote graafmachine met een inzetprofiel representatief voor GWW-werken en passend bij de Powerbox van Powercrumbs voor het laden van vermogens rond 200kW. Het inzetprofiel beïnvloedt het energiegebruik bij alle varianten, maar ook de uitlaatgasemissies van de dieselmachine in de vergelijking.

Vrijwel gelijktijdig met de afronding van dit project heeft Rijkswaterstaat op 16 december 2024 versie 4.1 van het 'Protocol berekenen en aantonen MKI waarde', uitgebracht. Daarin is de waardering van de milieukosten van HVO brandstof gelijk gesteld aan die van reguliere diesel waarmee het protocol de ambitie ('inzetten op emissieloos materieel') van het 'Transitiepad Weg-, Dijk- en Spoormaterieel (WDSM)' volgt.

Voor dit rapport is besloten om het milieueffect van de toepassing van HVO toch te laten zien, om het referentiekader compleet te maken. De milieubelasting is sterk afhankelijk van de gebruikte grondstof en aanvoerroute. Dat is in de resultaten geïllustreerd.

3.2.3 Scope

De vergelijking is indicatief. Dat betekent dat de resultaten bedoeld zijn om de milieukosten van het gebruik van de Powercrumbs biogasgenerator in perspectief te plaatsen. Ze zijn geschikt om de rangorde van de verschillende varianten aan te geven, maar niet om een exacte MKI-waarde aan elke variant toe te kennen.

De scope van de vergelijking omvat:

- Productiefase A1-A3
- Transport naar de bouwplaats A4
- Gebruiksfase B1
- Sloopfase C1-C4

Niet meegenomen zijn:

- Onderhoud B2-B5
- Milieubaten recycling en hergebruik D

De productie en afdanking van graafmachine, aggregaat, accucontainer en gasgenerator zijn wel meegenomen.

Bij het basisscenario, de Powercrumbs gasgenerator, is de productie en afdanking van de graafmachine toegevoegd aan het resultaat van de Powercrumbs-LCA om de vergelijking kloppend te maken.

3.2.4 Inventory en impact assessment

Qua methode is zoveel mogelijk aangesloten bij de Powercrumbs-LCA:

- Bepalingsmethode versie 1.1
- Nationale Milieudatabase versie 3.9
- Weegset EN15804+A1 en A2
- A1-data op basis van ecoinvent 3.6, A2-data op basis van ecoinvent 3.9.1

Voor de vergelijking is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van beschikbare data uit de Nationale Milieudatabase, aangevuld met bij TNO aanwezige databronnen. De gebruikte bron voor elk proces/fase is te vinden in paragraaf 3.3.

3.3 Gebruikte gegevens

Tabel 3.2 geeft de gemaakte keuzes weer. De gebruikte inventarisatiedata per proces is weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.2: Uitgangspunten.

Item	Waarde	Bron	Toelichting
Laadverlies elektrische bouwmaschine AC/DC	15%	Metingen aan personenauto's ⁴	
Overall rendement elektrische bouwmaschine	76%	NMD	Overgenomen uit NMD, kaart 0510. Is inclusief laadverlies. 2.75/3.6.
Percentage groene stroom NL net	47%	CBS 'Hernieuwbare energie in Nederland 2023'	2023
Rendement over laad-ontlaadcyclus accucontainer	77%	Inschatting	Schatting verlies: AC>DC: 10%. DC>AC: 10%. Mobiele DC-lader: 5%
Capaciteit accucontainer	4000 kWh	Berekening behoefte per week + ontladaverlies	1 middelgrote mobiele kraan + 1 rupskraan ⁵ , 40u-werkweek, 1x per week container wisselen ca. 3400 kWh nodig incl 10% marge.
Levensduur accucontainer	1000 cycli	Inschatting	1000 cycli is bij wekelijks wisselen ca. 20 jaar
Transport accucontainer voor laden	50 km enkele reis	Aanname	Naar eigen terrein indien in de regio, anders naar publieke snellader
Allocatie productie en sloop elektrische machine	2.91 x 10 ⁻⁶ p/kWh	NMD	
Allocatie productie en sloop dieselmachine		NMD	
Allocatie productie en sloop dieselaggregaat		NMD	Op basis van MJ in brandstof
Rendement dieselgraafmachine	Ca. 31%	NMD	BSFC 270 g/kWh
Rendement aggregaatmotor HVO	39%	Gelijkgesteld aan Powercrumbs	Komt overeen met een BSFC van 214 g/kWh
Rendement generator	93%	Inschatting n.a.v. metingen	7% verlies bij elektriciteitsopwekking.

⁴ Ruiter, J.M. de, Stelwagen, U., Gijlswijk, R.N. van, Analysis of the emission performance of vehicles tested within the Green NCAP programme, 2024-STL-REP-100352950, TNO, 2024.

⁵ Gebaseerd op energiegebruik uit resultaten monitoring elektrische graafmachines De Bouwplaats van Morgen, <https://publications.tno.nl/publication/34643295/humX67IH/TNO-2024-P11947.pdf>

Tabel 3.3: Inventarisatiedata.

Variant	Proces	Bron	Toelichting
a. Powercrumbs	LCA Powercrumbs	LCA Powercrumbs	Omgerekend naar 1 kWh
	Productie en sloop elektrische bouwmaschine	NMD, uit proces 510 gehaald	
b. Netstroom	Gebruik elektrische machine inclusief productie en sloop; grijze stroom	NMD proces 510	
	Gebruik elektrische machine inclusief productie en sloop; groene stroom	NMD proces 511	
c. Batterijcontainer	Gebruik elektrische machine inclusief productie en sloop; grijze stroom	NMD proces 510	
	Gebruik elektrische machine inclusief productie en sloop; groene stroom	NMD proces 511	
	Verlies grijze stroom door laden/ontladen en AC/DC-omzetting en vv	NMD proces 494	Deze elektriciteit bereikt nooit de machine, dus ex productie/sloop
	Verlies groene stroom door laden/ontladen en AC/DC-omzetting en vv	NMD proces 496	Deze elektriciteit bereikt nooit de machine, dus ex productie/sloop
	Accu in container	NMD "Accu, Lithium-ion, per kWh accucapaciteit (o.b.v. 5kg per kWh)"	Toewijzing o.b.v. 4000 kWh, 1000 cycli
	Container	50% NMD 316, 50% NMD 233	Warmgewalst staal, constructieprofielen; en staalplaat, verzinkt. 2200 kg totale massa leeg
	Elektronica / inverters	Geen data	
	Transport naar/van laadpunt	NMD proces 324	Transport, vrachtwagen >32 ton, euro 6 diesel
d. Stage V op diesel	Gebruik dieselmachine incl. productie en sloop	NMD proces 344, emissies NO _x en PM verwijderd	Emissies apart gemodelleerd
	Emissies NO _x en PM	EMMA-MEPHISTO model TNO, profiel dhi, 75-130 kW	1,533 g NO _x /kWh 0,009 g PM/kWh
	Aanlevering diesel naar bouwplaats	NMD proces 324	100 km *2

Variant	Proces	Bron	Toelichting
e. Generator op HVO	Productie HVO	JRC ⁶ WTW v5. Used cooking oil route	
	Productie en sloop elektrische bouwmachine	NMD, uit proces 510 gehaald	
	Emissies dieselaggregaat	Gelijk gesteld aan die uit een dieselgraafmachine, op basis van proces 344	Alleen de luchtemissies ex NO _x en PM uit 344
	Emissies NO _x en PM	EMMA-MEPHISTO model TNO, profiel fpi, 130-300 kW	1,417 g NO _x /kWh 0,006 g PM/kWh
	Productie en afdanking aggregaat	Ecoinvent 'Building machine {GLO} market for building machine Cut-off, U'	Deze kaart wordt ook gebruikt in NMD
	Aanlevering HVO naar bouwplaats	NMD proces 324	100 km *2

Variant a, b, c en e zijn gebaseerd op een elektrische machine, die steeds aan de stekker 1 kWh elektriciteit gebruikt. Variant d is een machine met verbrandingsmotor. De vergelijking is gebaseerd op het feit dat elke variant dezelfde arbeid moet kunnen leveren, dus dezelfde hoeveelheid grondverzet. De berekening is als volgt:

Een elektrische graafmachine, uitgaande van een uit diesel omgebouwde machine, nu nog gangbaar in de >56kW-klasse, levert aan de uitgaande as van de elektromotor ongeveer 760 Wh voor elke kWh die aan de stekker binnenkomt (zie ook Tabel 3.2). Een dieselmotor levert bij een rendement van ca. 31% ongeveer 3,08 kWh per liter diesel. Dat betekent dat om 760 Wh te leveren er $760/3080 = 0,25$ liter diesel nodig is.

De energie-inhoud van HVO per liter is ongeveer 4% lager, maar overigens wel afhankelijk van het merk en de herkomst. Met de dichtheid van HVO van 0,78 g/ml betekent dit dat 0,81 kg HVO nodig is om 1 liter diesel te vervangen.

De Powercrumbs-LCA heeft als rekeneenheid 1 Nm³ biogas. De omrekening naar 1 kWh is door Powercrumbs gedaan op basis van een onderste stookwaarde van 21,2 MJ/m³ en een generatorsetrendement van 35%. Dat leidt tot een benodigde 0,484 m³ per opgewekte kWh.

3.4 Resultaten

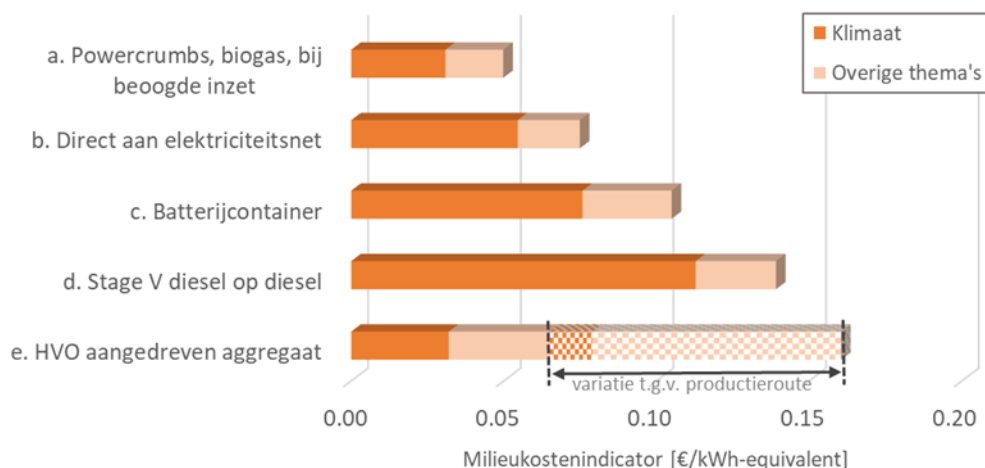
Figuur 3.1 toont de Milieukostenindicator voor Powercrumbs op basis van biogas, bij beoogde inzet (variant "deels beperkt") en de verschillende andere oplossingen op de bouwplaats. Ter illustratie is de bijdrage van het thema klimaatverandering apart getoond.

Zoals beschreven is de eenheid:

⁶ European Commission: Joint Research Centre, PRUSSI, M., YUGO, M., DE PRADA, L., PADELLA, M., EDWARDS, R. and LONZA, L., JEC Well-to-Tank report v5, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/959137>, JRC119036.

Het gebruik van een middelgrote graafmachine (ca. 16t, 75-130 kW) op een bouwplaats, uitgedrukt in de hoeveelheid arbeid die door de motor verricht kan worden met 1 kWh elektriciteit (230VAC) aan de stekker van een elektrische graafmachine.

Bij de dieselvariant d. en HVO-variant e. is de hoeveelheid arbeid van de machine gelijk gesteld aan de arbeid van de elektrische machine.



Figuur 3.1: Resultaten MKI-vergelijking.

Te zien is dat de laagste MKI wordt gehaald door de Powercrumbs biogas-oplossing bij beoogde inzet (bij gebruik van biogas en bij voldoende laadvermogen ('deels beperkt', zie paragraaf 2.3)), gevolgd door de meest gunstige variant⁷ van het aggregaat op HVO (dus zonder het geblokte deel), met een MKI van net onder de 5 cent per kWh, resp. 6,5 ct/kWh. De slechtst scorende varianten zijn het HVO-aangedreven aggregaat (ongunstigste variant – met het geblokte deel) en de dieselmachine met 14-16 cent/kWh.

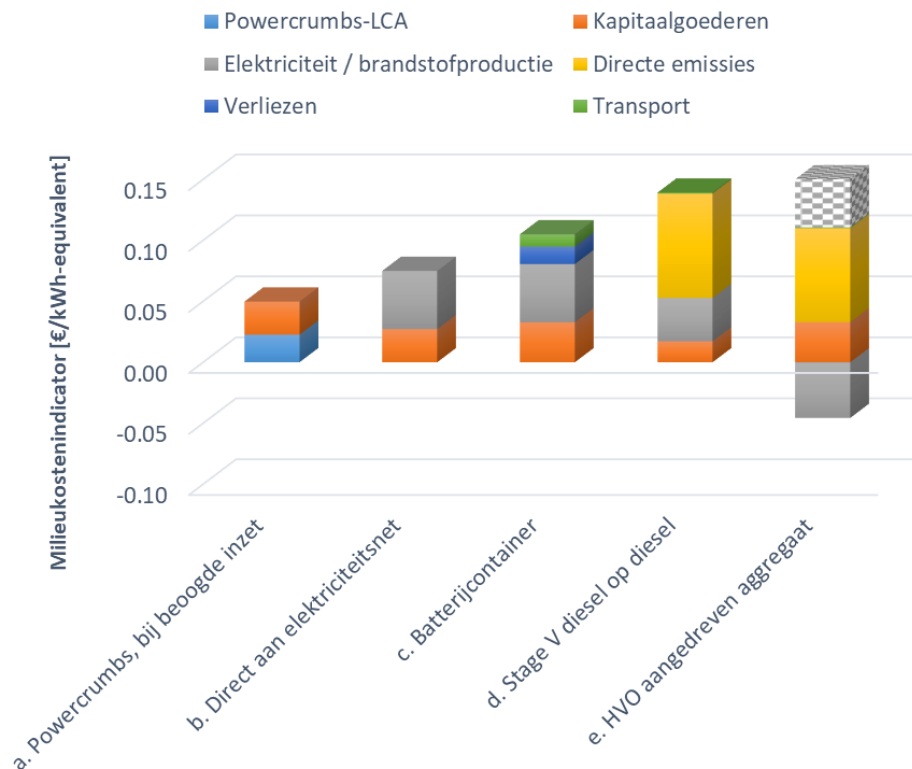
De bijdrage van klimaatverandering is voor alle varianten de helft of meer. De impactcategorie die na klimaatverandering in alle gevallen het meest bijdraagt is fijnstof (particulate matter). Dat wordt vooral veroorzaakt tijdens productie van de brandstof of productie en afdanking van de machine. De Stage V dieselmachines zijn uitgerust met een roetfilter, wat de directe emissies verhoudingsgewijs laag maakt. Overigens bevat ecoinvent, de achtergronddatabase waarop veel processen in de Nationale Milieudatabase zijn gebaseerd, verouderde data voor brandstoffen en machines, waardoor de fijnstofemissies overschat kunnen zijn. De directe uitstoot van NOx uit de Stage V dieselmachine draagt slechts ca. 4% bij aan de MKI van de dieselvariant. De indirecte emissies van stikstof kunnen echter veel meer bijdragen: afhankelijk van de variant 3-23%. Deze zijn echter ook onzeker en waarschijnlijk overschat door verouderde literatuurdata. Het belang van stikstof in de MKI wordt overigens mede bepaald door de toegekende weegfactor in de methodiek (milieuprijs⁸).

De variant c. batterijcontainer heeft een hogere MKI dan de 'direct aan elektriciteitsnet'-variant.

⁷ De meest gunstige variant is de afgewerkte-frituuroolie-productieroute. De minst gunstige variant is op koolzaadolie gebaseerd. Palmolie scoort daartussenin, door andere milieuthema's dan klimaat.

⁸ De weegfactoren zijn afgeleid uit een onderzoek van CE Delft.

Dat komt enerzijds door het feit dat meer elektriciteit moet worden opgewekt om de verliezen tijdens het laden en ontladen en bij AC/DC-omzetting te compenseren, en anderzijds door de productie en afdanking van de accucontainer en het transport van de container om wekelijks te laden. Dit is goed te zien in Figuur 3.2, waar de resultaten zijn uitgesplitst naar enkele categorieën.



Figuur 3.2: Uitsplitsing resultaten MKI-vergelijking

Toelichting bij de legenda:

- De Powercrumbs-LCA is niet verder uitgesplitst.
- Met kapitaalgoederen wordt bedoeld: productie en afdanking van de elektrische- of dieselgraafmachine en aggregaat.
- De post 'verliezen' toont de extra elektriciteitsproductie die nodig is om de verliezen in laad/ontlaadcycli en AC/DC-omzetting te compenseren.
- Het geblokte balkje bij de rechterkolom geeft het verschil weer tussen de gunstigste en minst gunstigste variant. Voor de gunstigste kan het geblokte deel dus weggedacht worden.

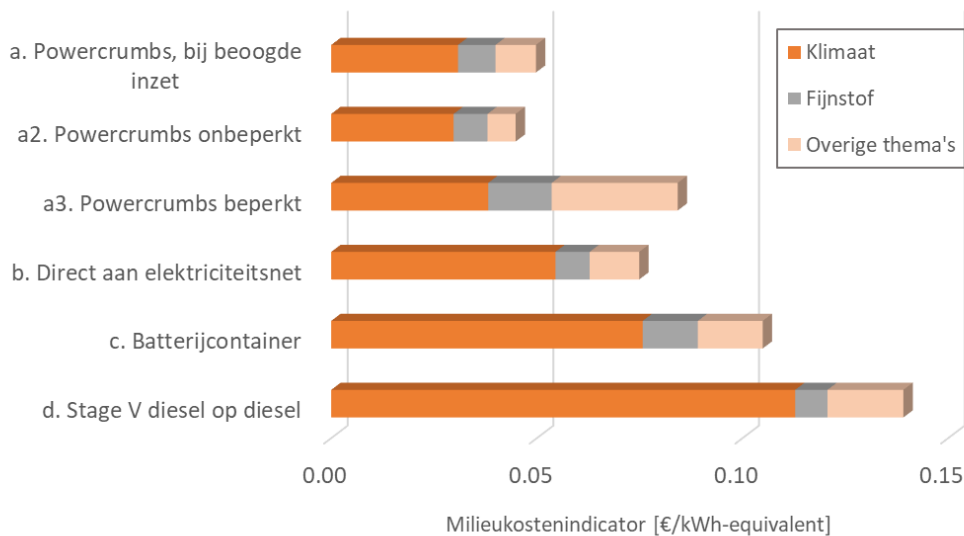
De negatieve milieukosten bij de productie van HVO worden veroorzaakt door de opname van CO₂ uit de atmosfeer bij de plantgroei. Deze CO₂ komt weer vrij bij de verbranding van de HVO, wat te zien is aan het gele balkje.

3.5 Gevoeligheidsanalyse

De resultaten in paragraaf 3.4 zijn indicatief, en gevoelig voor de gemaakte keuzes in deze studie. Hieronder worden enkele van die keuzes en aannames gevarieerd, om te zien hoe gevoelig de uitkomsten en de rangschikking van de varianten is.

Powercrumbs

De in paragraaf 2.3 uitgewerkte drie situaties en bijbehorend emissieprofiel leiden tot verschillende MKI-waarden. Een lagere laadstroom en daarmee lagere motorlast leidt tot hogere emissies van de generator. Een hogere en constantere last leidt tot lagere emissies. In Figuur 3.3 is het effect te zien op de totale MKI voor de Powercrumbs-variant. Voor de eenvoud is optie e. hier weggelaten.

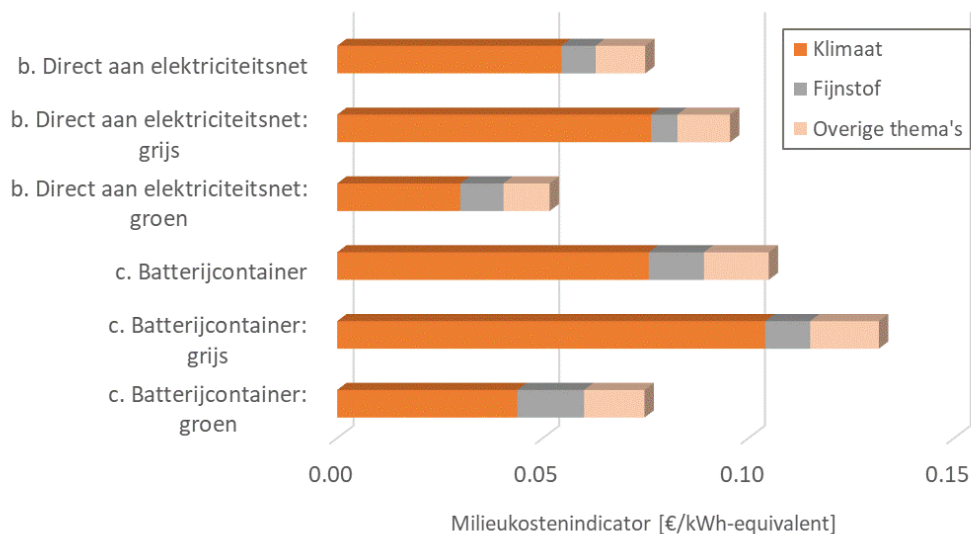


Figuur 3.3: Gevoeligheidsanalyse: drie situaties Powercrumbs.

De situatie 'onbeperkt' leidt tot een iets lagere MKI-waarde, het 'beperkt'-profiel geeft juist een fors hogere MKI-waarde. Dit wordt voor de helft (52%) veroorzaakt door een hogere stikstofemissie, wat effect heeft op vermesting (eutrophication) en smogvorming. Ook de fijnstofemissie neemt toe, zoals te zien in de grijze balkjes in de grafiek; dit draagt 16% bij aan de toegenomen MKI-waarde. Nog eens 19% van de toename wordt veroorzaakt door de gestegen methaanslip (zie ook Tabel 2.6), te zien in het balkje 'klimaat' in de grafiek.

Elektriciteitsmix

De milieu-impact van de varianten die op elektriciteit uit het net zijn gebaseerd, is sterk afhankelijk van de samenstelling van de elektriciteitsmix. In de basisvariant is het aandeel groene opwekking op 47% gesteld, conform CBS voor het jaar 2023. Een 100% groene (hier: hernieuwbare) of grijze mix levert de volgende resultaten, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4: Gevoeligheidsanalyse: grijze en groene elektriciteitsmix bij de varianten 'Direct aan elektriciteitsnet' en 'Batterijcontainer'.

Een variant met groen opgewekte elektriciteit direct uit het net pakt ongeveer gelijk uit met de Powercrumbs basis, ca. 5 cent/kWh. De vergelijking is wat hypothetisch, omdat de Powercrumbs biogasgenerator wordt toegepast waar geen netaansluiting beschikbaar is, of als deze niet genoeg capaciteit heeft.

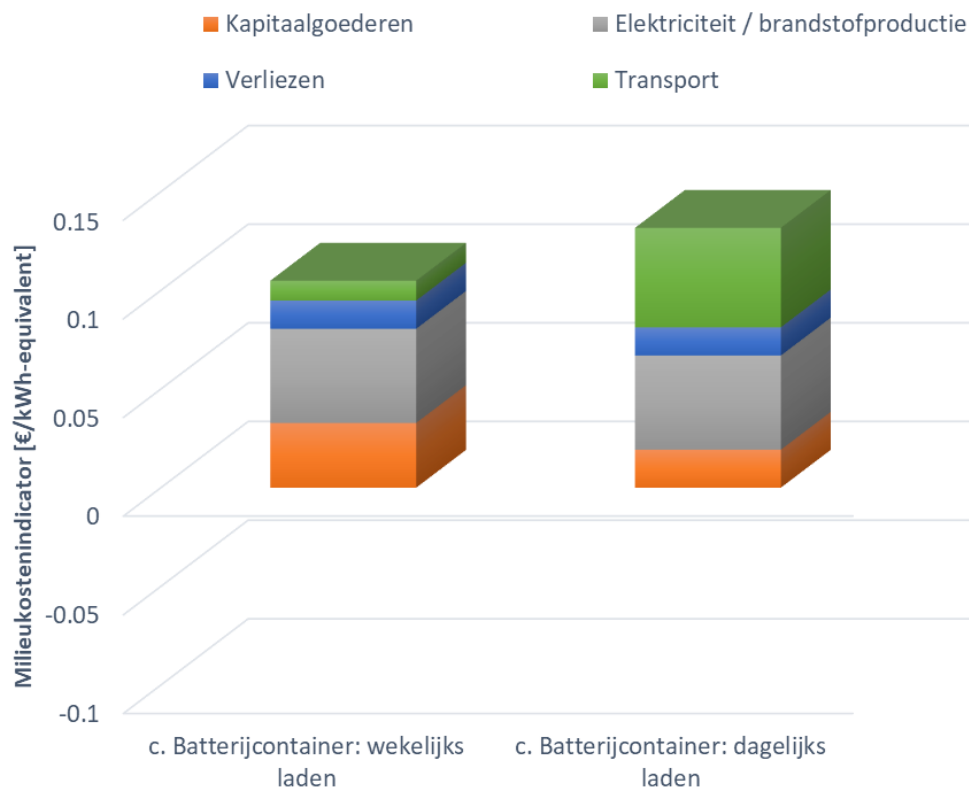
Opvallend is dat de score op het fijnstof-thema hoger is bij groene stroom dan bij grijze stroom. De vorm van de elektriciteitsdata in de NMD laat diepere analyse echter niet toe.

Aannames accucontainer

De accucontainer is geschaald op één keer per week laden voor het bedrijf van twee graafmachines. Het is wel zo dat de grootte van de accu nauwelijks invloed heeft op de milieu-impact, mits de levensduur in cycli niet verandert. Een accu met halve capaciteit betekent de helft van de MKI voor productie, als we puur naar de li-ion modules kijken. Ze worden ook tweemaal zo snel afgeschreven. Daardoor is de toegewezen milieubelasting per kWh elektriciteit gelijk.

De levensduur in cycli is wel van belang. Deze is gesteld op 1000 cycli, bijna 20 jaar bij deze toepassing. Dat is een erg lage gebruiksintensiteit voor een dergelijke accu, en het is de vraag of de accu 20 jaar meegaat. Bij dagelijks laden van de container wordt het transport naar en van de lader juist belangrijker.

Figuur 3.5 toont de effecten van het dagelijks laden van de accucontainer. Dat wil zeggen, een accucontainer met een vijfmaal lagere capaciteit, of het laden van 10 machines per dag. De levensduur is gesteld op 2000 cycli, dat komt in dit geval overeen met 8 jaar.



Figuur 3.5: Gevoeligheidsanalyse: dagelijks laden van batterijcontainer.

De stijging van de MKI door het transport van de accu voor het laden is groter dan de daling door de halvering van de MKI van de accu.

De transportafstand is gesteld op 50 km enkele reis. Indien het laden in de buurt kan worden gedaan, neemt het groene balkje navenant af met de afstand.

4 Conclusies en aanbevelingen

Emissiemetingen

De uitgevoerde metingen aan de generatorset op biogas geven inzicht in het niveau van de praktijkemissies uit de uitlaat van de biogasmotor. Het gaat om de emissies van de prioritaire stoffen, zoals stikstofoxides (NO_x) en fijnstof (PM, Particulate Matter) en de emissie van de broeikasgassen kooldioxide (CO₂) en methaan (CH₄).

De metingen lieten zien dat de uitstoot van NO_x zeer laag is (<0,1 g/kWh) wanneer de generatorset op een hoog vermogen draait. Voor een typisch laadprofiel voor batterijen met voldoende capaciteit en een lader met voldoende vermogen wordt dit hoge vermogen gehaald. De NO_x-emissie neemt echter fors toe (tot 40 keer hoger) wanneer het laadvermogen lager is dan 50%. Dit komt doordat het NO_x-reductiesysteem dan niet meer werkt. We adviseren om de gebruiker van de instructie te voorzien dat de generatorset alleen ingezet kan worden voor het laden van batterijen met voldoende capaciteit en met een lader van voldoende capaciteit, zodat het gevraagde laadvermogen van de generatorset overwegend hoger ligt dan 50%.

De resultaten lieten ook zien dat de motor het broeikasgas methaan uitstoot, als CO₂-equivalent was dat 15% van de gemeten CO₂ uitstoot. Een hoge methaanslip is kenmerkend voor het gebruikte motortype wat draait met een arm mengsel. De fijnstofuitstoot is laag en vergelijkbaar met het niveau van een dieselmotor met roetfilter.

De gemeten waarden en inzichten in het emissiegedrag zijn meegenomen voor het bepalen van de typische gemiddelde emissiewaarden van de generatorset op biogas. De emissiewaarden zijn gebruikt voor het bepalen van de Milieukosten Indicator (MKI) van de biogasgenerator, waarbij zowel de methaanuitstoot als de NO_x-emissie aanzienlijk bijdragen aan de milieukosten.

Resultaten en conclusies van het vergelijk van de milieukosten.

De milieukosten van de Powercrumbs biogasgenerator zijn vergeleken met andere varianten van energievoorziening op de bouwplaats.

Voor een eerlijk vergelijk is uitgegaan van de volgende functionele eenheid:

“Het gebruik van een middelgrote graafmachine (ca. 16t, 75-130 kW) op een bouwplaats, uitgedrukt in de hoeveelheid arbeid die door de motor verricht kan worden met 1 kWh elektriciteit (230VAC) aan de stekker van een elektrische graafmachine.”

De volgende varianten zijn doorgerekend:

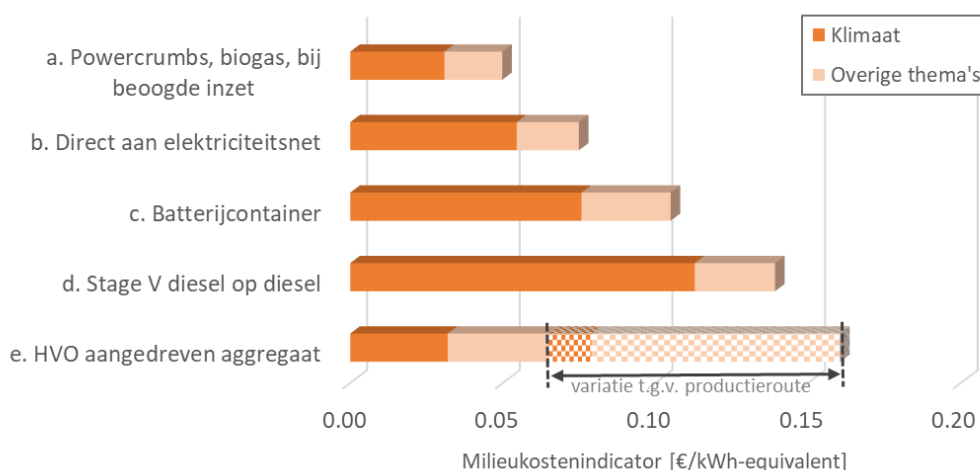
- a. elektrische graafmachine, direct geladen met Powercrumbs in combinatie met biogas, het resultaat is alleen geldig bij beoogde inzet (overwegend meer dan 50% laadvermogen bij het laden).
- b. elektrische graafmachine, direct geladen uit het elektriciteitsnet.

- c. elektrische graafmachine, geladen met batterijcontainer, die op zijn beurt wordt geladen vanuit het elektriciteitsnet.
- d. Stage V dieselgraafmachine op diesel.
- e. elektrische graafmachine, geladen met dieselaggregaat op HVO*.

*) Vrijwel gelijktijdig met de afronding van dit project heeft Rijkswaterstaat op 16 december 2024 versie 4.1 van het 'Protocol berekenen en aantonen MKI waarde' uitgebracht. Daarin is de waardering van de milieukosten van HVO brandstof gelijkgesteld aan die van reguliere diesel waarmee het protocol de ambitie (inzetten op emissieloos materieel) volgt. Voor dit rapport is besloten om het milieueffect van de toepassing van HVO toch te laten zien, om het referentiekader compleet te maken. De milieubelasting is sterk afhankelijk van de gebruikte grondstof en aanvoerroute. Dat is in de figuur hieronder met de zwarte pijlen geïllustreerd.

Voor variant a. is uitgegaan van de resultaten van de LCA die door Ecochain voor Powercrumbs is gemaakt, aangevuld met gegevens uit de Nationale Milieudatabase voor gebruik van de opgewekte stroom in een graafmachine.

Voor de overige varianten zijn de invoergegevens zoveel mogelijk gebaseerd op de Nationale Milieudatabase, tenzij TNO eigen meetdata en modellen voorhanden had. De indicatieve milieukosten per kWh-equivalent zijn weergegeven in de volgende grafiek:



De laagste milieukosten worden gehaald door variant a., deze heeft een MKI van net onder de 0,05 Euro per kWh. Variant e. heeft eveneens lage milieukosten, maar dat geldt alleen voor de meest gunstige productieroute (afgewerkte frituurolie; zonder het geblokte deel). Met de minst gunstige productieroute (koolzaadolie) zijn de milieukosten van variant e. het hoogst (balkje inclusief het geblokte deel). De resultaten van variant e. zijn voor MKI-berekeningen überhaupt illustratief, omdat conform het meest recente protocol⁹ voor het berekenen van MKI de waardering van de milieukosten van HVO wordt gelijkgesteld aan reguliere diesel.

De bijdrage van klimaatverandering aan de MKI is voor alle varianten de helft of meer. Op de tweede plaats komt fijnstof; niet door directe emissies uit de uitlaat, maar door processen in de brandstofketens en bouw/sloop van de machine.

De variant met batterijcontainer is 40% hoger dan de 'directe' variant b. Dat komt door productie/afgankelijk van de batterijcontainer zelf, door elektrische verliezen en door het transport van en naar de lader.

⁹ Rijkswaterstaat, Protocol berekenen en aantonen MKI waarde, versie 4.1, 16 december 2024.

Voor variant a. is een gevoeligheidsanalyse gedaan, waarbij gebruik gemaakt is van de meetdata voor drie lastprofielen. Daaruit blijkt dat de situatie waarbij de Powercrumbs-generator laag belast wordt, bijvoorbeeld bij het laden van bouwmachines met minder dan 50% van het maximum laadvermogen van de generatorset (110 kW), leidt tot een MKI die bijna 70% hoger is dan in de basissituatie. Dat komt voor de helft door hogere NO_x-emissies, die leiden tot sterkere vermesting en smogvorming, en voor een derde door de toegenomen fijnstofemissie en methaanslip. Verder is het rendement van de motor bij lage belasting iets lager.

Variant b. wordt vergelijkbaar met de twee beste varianten a. en e., als uitgegaan wordt van 100% hernieuwbare elektriciteit. De levensduur van de accucontainer in variant c., in laadcycli, en de frequentie van het transport naar de lader hebben een grote invloed op de MKI-waarde. Bij dagelijks laden wordt de MKI bijna 40% hoger t.o.v. wekelijks laden. Ook als de levensduur van de accu dan beter benut kan worden, resteert toch nog een +25%.

Referenties

Flapper, J. (2023, December 11). Protocol berekenen en aantonen MKI-waarde. Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud (GPO).

Flapper, J (2024, 14 december), Protocol berekenen en aantonen MKI waarde, Rijkswaterstaat Grote projecten en Onderhoud (GPO)

Mamakos, Athanasios & Schwelberger, Matthias & Fierz, Martin & Giechaskiel, Barouch. (2019). Effect of Selective Catalytic Reduction on Exhaust Non-volatile Particle Emissions of Euro VI Heavy-Duty Compression Ignition Vehicles. *Aerosol Science and Technology*. 53. 1-16. 10.1080/02786826.2019.1610153.

Tim van der Kruk (TNO), Mark Bolech (TNO), Mariëlle van Elderen (SGS) en Martijn van Hövell (SGS). (2021, November 9). LCA Rapportage categorie 3 data Nationale Milieudatabase Brandstof-machinecombinaties Hoofdstuk 1000 t/m 8000 Processen. Stichting Nationale Milieudatabase.

Mamakos, Athanasios & Schwelberger, Matthias & Fierz, Martin & Giechaskiel, Barouch. (2019). Effect of Selective Catalytic Reduction on Exhaust Non-volatile Particle Emissions of Euro VI Heavy-Duty Compression Ignition Vehicles. *Aerosol Science and Technology*. 53. 1-16. 10.1080/02786826.2019.1610153.

Ilias Vouitsis, Leonidas Ntziachristos, Christos Samaras, Zissis Samaras, Particulate mass and number emission factors for road vehicles based on literature data and relevant gap filling methods, *Atmospheric Environment*, Volume 168, 2017, Pages 75-89, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.010>.

Ondertekening

TNO | Mobility & Built Environment | Den Haag, 17 maart 2025

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Hoegee', with a stylized, somewhat abstract form.

Jan Hoegee
Interim Research Manager

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. Vermeulen', with a more fluid and cursive style.

Robin Vermeulen
Auteur

Bijlage A

Brandstofanalyse



GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH • Bruchstr. 5c • 45883 Gelsenkirchen

Ingenia Consultants & Engineers BV

Esp 118

5633 AA Eindhoven



Test Report No.: 2024P215380 / 1

Our order no. 24205844 / 001

Date of arrival 26.03.2024

Taking of sample by customer

Material biogas

Project F034-2480345

Sample name Powercrumbs,
PC-GH022-TNO.
Sampling date: 18-3-2024

Start/End of Analysis 26.03.2024 - 09.04.2024

Parameter	Unit	Result	LOQ	Method
GC-MS Screening VOC		siehe Anlage		DIN EN ISO 16017-1: 2001-10* 2
Carbon dioxide	Vol-%	38,8	0,1	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Methane	Vol-%	56,2	0,1	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Carbon monoxide	Vol-%	<0,100	0,1	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Hydrogen	Vol-%	<0,50	0,5	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Oxygen	Vol-%	1,48	0,1	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Nitrogen	Vol-%	3,52	0,5	DIN 51872-4: 1990-06* 2
Propane	Vol-%	<0,0020	0,0015	DIN 51872-4: 1990-06* 2

Testing laboratory: GBA Gelsenkirchen

With * marked methods are accredited methods. Detection limits (LOQ) may vary depending on the matrix of the sample.

The results are only based on the items tested. No responsibility is taken for the correctness of the sampling if the samples were not taken by GBA or on their behalf. In this case, the results refer to the sample as received. The GBA test report may not be published without the express written consent of the GBA Group, nor may excerpts of it be reproduced without permission. GBA's decision rules can be seen in the general terms and conditions.

Dok.-Nr.: ML 510-02 # 8

Page 1 of 2 Pages for Test Report No.: 2024P215380 / 1

GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH
Bruchstr. 5c, 45883 Gelsenkirchen
Telefon +49 (0)209 / 97 619 - 0
Fax +49 (0)209 / 97 619-785
E-Mail gelsenkirchen@gba-group.de
www.gba-group.com

HypoVereinsbank
IBAN DE45 2003 0000 0050 4043 92
SWIFT BIC HYVEDE3300
Commerzbank Hamburg
IBAN DE67 2004 0000 0449 6444 00
SWIFT BIC COBADE33HAN

Sitz der Gesellschaft:
Hamburg
Handelsregister:
Hamburg HRB 42774
USt-Id.Nr. DE 118 554 138
St.-Nr. 47/723/00196

Geschäftsführer:
Ralf Murzen,
Ole Borchert,
Alexander Kleinke,
Dr. Dominik Obeloer



Gelsenkirchen, 09.04.2024

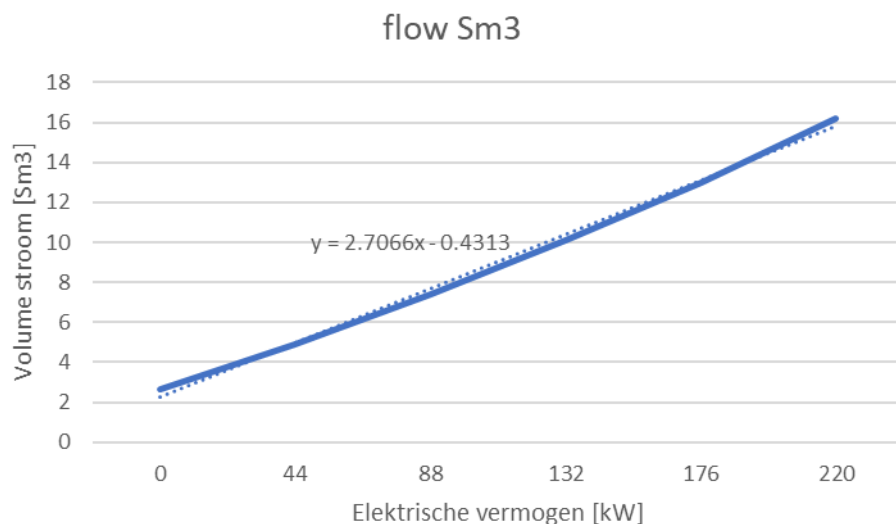
This report was generated automatically and is valid without signature.

I. A. J. Klein
Project manager

Bijlage B

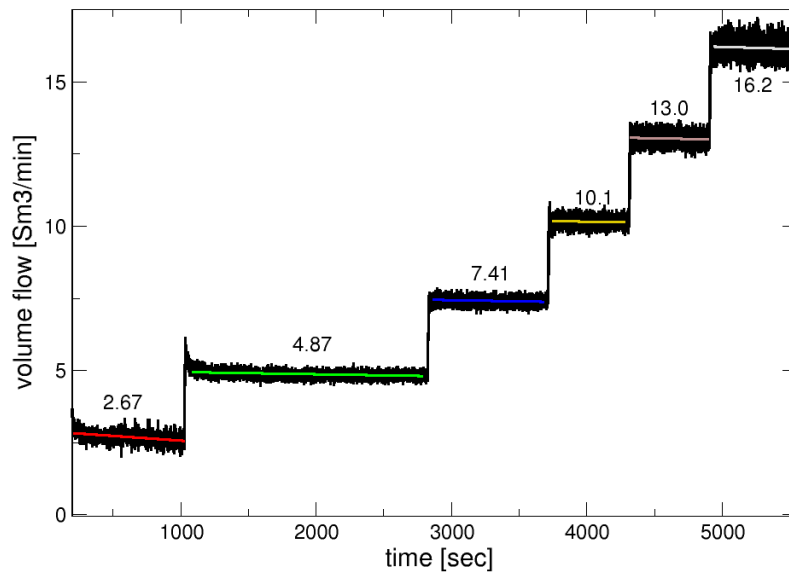
Controle van het uitlaatgasdebiet

Hierna wordt de controle van het gemeten uitlaatgasdebiet beschreven. De volumestroom van het uitlaatgas neemt proportioneel toe met de vermogensvraag. Het verband is nagenoeg lineair. De offset bij stationair draaien (dat wil zeggen $P = 0$ kW) is substantieel, in vergelijking met een diesелgenerator, waarschijnlijk omdat er toch een grote hoeveelheid gas door de motor gaat, met de daarmee geassocieerde motorverliezen.



Figuur B.1: Per 20% meer geleverd vermogen neemt de volumestroom met 2,71 Nm³ toe.

De volumestromen bij de verschillende vermogens zijn gefit op het gemiddelde per vast motorlastpunt. Er lijkt een lichte daling te zijn in de volumestroom over de duur, per lastpunt, wat mogelijk komt door het stabiliseren van de temperatuurmeting die nodig is om de stroomsnelheid van het gas te converteren naar normaalvolumes. De PEMS meetapparatuur werkt met standaardvolumes en met een hogere referentietemperatuur.



Figuur B.2: De fits van de lastpunten 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, en 100%. Een licht verloop (minder dan 5%) in de fits is zichtbaar.

De motor bij 0% last draait 2.67 nm³/min, en bij elke stap in vermogen is er nagenoeg een constante toename van de volumeflow. Dit komt uit op 3.44 Nm³/u per kW vermogen, bovenop de vaste 149 Nm³/u voor de interne verliezen: ($\rho = 1.29$, vanwege 40% CO₂ in het biogas)

$$Q[\text{Nm}^3/\text{u}] = 149 + 3.44 * P[\text{kW}]$$

De concentraties hebben een zwakke relatie met vermogen, naast effecten van de koude start.

Met een nagenoeg constante 11% CO₂, is de volumeratio lucht-biogas dus 8:1, en is er voor 1 kWh $3.44/9 = 0.382$ nm³ biogas nodig. ($\rho[\text{kg}/\text{m}^3] = 1.9636$)

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl