

Memo

www.tno.nl

norbert.ligterink@tno.nl

+31611700533

Aan RIVM-AERIUS

Van Norbert Ligterink

Onderwerp Werkmotoren zoete en zoute waterbouw voor
AERIUS 2023

Datum

18 september 2023

Onze referentie

100350634

Projectnr. 06049664

Werkmotoren op werkschepen conform de AUB methodiek

Motoren op werkschepen komen voor in een grote variatie en worden verschillend ingezet al naargelang het type werktuig en de soort activiteit. Hieronder vallen bijvoorbeeld het aandrijven van kranen, lieren, baggerpompen, damwandtrillers, etc. (zie bijvoorbeeld TNO rapporten 2022 R11048 en 2023 R11233 voor emissiemetingen en praktijkvoorbeelden). De emissies uit dergelijke motoren zijn afhankelijk van de geldende wetgeving bij toelating, en de inzet van de motor. In een deel van de gevallen, namelijk voor normale NRMM (Non-Road Mobile Machinery) motoren, kan hiervoor zonder aanpassing de bestaande AUB methodiek (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik, TNO rapport 2021 R12305) toegepast worden. Deze methodiek is in de basis ook bruikbaar voor motoren aan boord van werkschepen, maar hiervoor kunnen andere emissie-eisen gelden. Voor werkschepen moet de bestaande AUB methodiek daarom worden uitgebreid met twee wetgevingsklassen:

1. **Stage V-IWP/IWA (Inland Waterway Propulsion/Auxiliary)** wetgeving: speciale eisen aan motoren op schepen voor voortstuwing en als hulpmotor voor de binnenvaart, vanaf 2019.
2. **IMO/MARPOL Tier I (2000), II (2009), en III (2019)** emissiewetgeving voor hulpmotoren op werkschepen op zee.

Voor werkmotoren aan boord, met vermogens boven de 560 kW, gelden er Stage IIIA vanaf 2006 eisen, maar deze zijn zodanig zwak dat al deze motoren in de categorie X vallen, met hoge emissielimieten (7,2-11 g/kWh NO_x+HC) en emissies vergelijkbaar met andere oude motoren.

Aan de Stage V-IWA zijn zwakkere emissie-eisen gesteld dan de normale Stage V. De eisen voor Stage V-IWA zijn meer vergelijkbaar met de oudere Stage IIIB voor kleinere motoren onder de 130 kW, welke geldt voor NRMM motoren uit de periode 2007 – 2014. Ook bij de grotere hulpmotoren Stage V-IWA zijn de NO_x emissielimieten een factor 4,5 hoger dan voor land gebonden mobiele machines. Het is daarom niet per se noodzakelijk dat er een SCR (Selective Catalytic Reduction) gemonteerd is op deze motoren. Dat hangt ook samen met de beperkte testprocedure. In Tabel 1 zijn de emissielimieten weergegeven.

Tabel 1 The Stage-V (IWP/IWA) emissielimieten voor binnenvaart, uitgesplitst naar motorvermogen.

motorvermogen	Limiet [g/kWh]
[19-75) kW	5.4 (NO _x +HC)
[75-130) kW	4.7 (NO _x +HC)
[130-300) kW	2.1 (NO _x)
[300-...) kW	1.8 (NO _x)

Deze motoren vallen daarmee in vergelijkbare vermogens en emissieklassen als de normale NRMM. De vermogens 19-130 kW zijn vergelijkbaar met Stage-IIIA met 4 tot 6 g/kWh. De vermogens boven de 130 kW zijn vergelijkbaar met Stage-IIIB met 2 tot 4 g/kWh. De limiet van 1.8 g/kWh valt net onder de 2 g/kWh. In hoeverre de praktijkemissies aansluiten bij de precieze emissielimieten is sterk afhankelijk van de gebruikte testprocedure, en in het bijzonder de voorgeschreven motorbelastingpunten. Bij gebruik

van de E2 testcyclus, en in mindere mate de E1 testcyclus (waarbij gebruik wordt gemaakt van een constante 75% motorbelasting), kunnen de Stage V-IWP/IWA emissielimieten worden behaald zonder een SCR toe te passen.

In metingen aan boord in de praktijk zijn de Stage-V IWA gekeurde motoren nog niet waargenomen en gemeten in de praktijk. De markt voor dergelijke motoren is waarschijnlijk erg klein, zodat er geen aparte keuring wordt toegepast. Instanties die schepen certificeren geven wel aan dat zij controleren op Stage-V IWA motorcertificering. De verwachting is dat ze is steeds grotere mate ingezet gaan worden.

Voor IWA zijn motoren groter dan voor NRMM en dus ook de emissies bij het laagste brandstofverbruik. Bij substantiële motorbelasting is de factor nox_f1 , ofwel het brandstofverbruik, bepalend voor de NO_x uitstoot van machines zonder SCR. Voor de zoete waterbouw is de AUB rekensheet uitgebreid met een aparte classificatie van IWA motoren, in X, A, B, en C, waarbij het verschil tussen B en C in de toepassing van een SCR zit:

invoer	diesel		zonder SCR	met SCR	SCR	benzine/LPG				
groep	X	A	B	C	D	E				
wettelijke eis	>6 g/kWh	4-6 g/kWh	2-4 g/kWh	2-4 g/kWh	<2 g/kWh	alle				
brandstof [liters]	35	30	20	110	100	40				
draaiuren [hr]	30	15	12	20	20					
AdBlue [liters]				3	5					
Resultaat			check	ok	ok					
NOx [kg]	1.2	0.675	0.36	1.47	1.1	0.16	totaal	4.805	NOx [kg]	
NH3 [kg]	0.0002625	0.000225	0.00015	0.0264	0.024	0.0003	0.0510375	NH3 [kg]		
classificatie	[...-2001]	[2002-2005]	[2006-2010]	[2011-2013]	[2014-2018]	[2019-...]				voor binnenvaart gekeurde motoren
vermogen [kW]	Stage-I	Stage-II	Stage-IIIA	Stage-IIIB	Stage-IV	Stage-V				Stage V (IWA)
(...-56)	X	X	X	A	A	A				vermogen [kW]
(56-75)	X	X	A	A	D	D				(...-19)
(75-560)	X	A	B	B/C	D	D				(19-130)
(560-...)	X	X	X	X	X	B/C				(130-...)
parameters										
kg NOx/NH3	X	A	B	C	D	E				
nox_f1	0.03	0.02	0.015	0.025	0.033	0.004	per liter diesel/benzine/LPG			
nox_f2	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005		per uur			
nox_f3				-0.46	-0.46		per liter AdBlue			
nh3_f1	0.0000075	0.0000075	0.0000075	0.00024	0.00024	0.0000075	per liter diesel/benzine/LPG			

De IMO wetgeving is een andere wetgeving waaraan alle zee scheepsmotoren, van de grootste (langzaam lopers, tweetakt, etc.) tot aan de kleinste 130 kW motoren, moeten voldoen. De emissie-eisen zijn afhankelijk van het toerental, en gebaseerd op emissies en emissies reducerende maatregelen bij bestaande technologieën, waarbij de grootste motoren de zwakste emissie-eisen hebben Zie Figuur. .

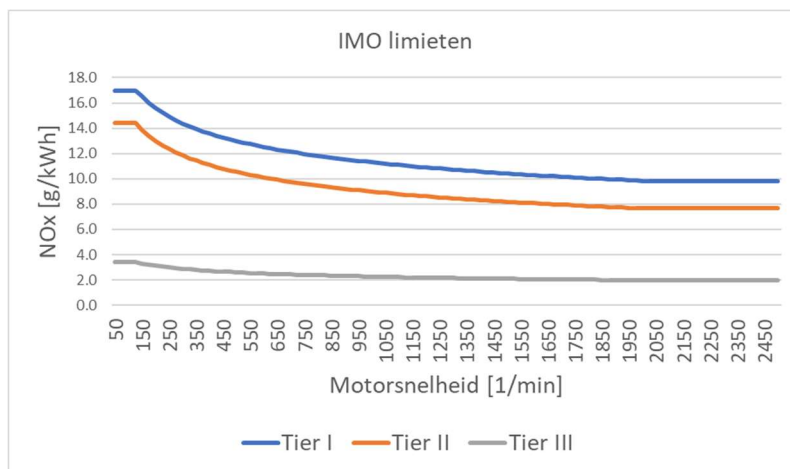


Figure IMO NOx emissielimieten als functie van motorsnelheid. De limiet is constant onder de 130 [min⁻¹] motorsnelheid en boven de 2000 [min⁻¹].

De strengste limieten gelden voor de snelste en kleinste motoren. Grote scheepsmotoren kunnen zeer lage snelheden hebben. Werkmotoren, ook de grote, hebben vaak een motorsnelheid bij maximaal vermogen ("rated speed") van 1400 [min⁻¹] of meer. In het geval van $n=1400$ [min⁻¹] is de emissielimiet slechts 8% minder streng dan voor de vaste limiet voor $n=2000$ [min⁻¹] of meer. Alleen voor zeer lage toerentallen wordt de limiet substantieel minder streng, en deze zijn ongebruikelijk voor werkmotoren. Daarom wordt een vaste emissiefactor gehanteerd voor alle werkmotoren van dezelfde Tier-klasse (zie Tabel 2).

De verwachting is dat deze motoren worden gekeurd met een variabel toerental zoals bij toepassing als motor van een pomp of kraan, dus niet als generator. Dat maakt het waarschijnlijk dat de Tier III uitgevoerd is met SCR, ook omdat vanwege onderhoudseisen deze motoren over het algemeen niet uitgerust zijn met EGR technologie, en daarom SCR technologie nodig is om de Tier III eis van 1.96 g/kWh te halen.

Tabel 2 de IMO wetgeving afhankelijk van toerental bij maximaal vermogen.

NOx [g/kWh]	onder 130 min ⁻¹	130-2000 min ⁻¹	boven 2000 min ⁻¹
Tier I	17.0	$45 * n^{-0.2}$	9.8
Tier II	14.4	$44 * n^{-0.23}$	7.7
Tier III	3.4	$9 * n^{-0.2}$	1.96

De vertaling naar de AUB methodiek levert voor de werkmotoren die onder IMO gekeurd zijn de volgende rekensheet:

invoer	diesel					
groep	X	A	B	C	met SCR	
wettelijke eis	>10 g/kWh	8-10 g/kWh	4-8 g/kWh	1-4 g/kWh	max motorsnelheid ~ 2000 RPM	
brandstof [liters]	40	50	500	500		
draaiuren [hr]	5	5	20	20		
AdBlue [liters]				15		
				ok		
Resultaat					totaal	
NOx [kg]	2.075	2.075	15.3	5.9	25.35	NOx [kg]
NH3 [kg]	0.0003	0.000375	0.00375	0.12	0.124425	NH3 [kg]
IMO classificatie	[..1999]	[2000-2010]	[2010-2018]	[2019...]		
vermogen [kW]	pre-Tier	Tier I	Tier II	Tier III		
< 130 kW	X	X	X	X		
> 130 kW	X	A	B	C		
parameters						
kg NOx/NH3	X	A	B	C		
nox_f1	0.050	0.040	0.030	0.025	per liter diesel	
nox_f2	0.015	0.015	0.015	0.015	per uur	
nox_f3				-0.46	per liter AdBlue	
nh3_f1	0.0000075	0.0000075	0.0000075	0.00024	per liter diesel	

Voor IMO zijn de factoren in de AUB formule afgeleid, uitgaande van een gemiddeld hoger geïnstalleerd vermogen dan voor NRMM en minder strenge IMO limieten in de zeevaart. Daarom is de factor nox_f1 hoger die vooral de extra emissies bij stationair draaien in beschouwing nemen, op basis van het geassocieerde brandstofverbruik bij stationair draaien, zonder de geassocieerde arbeid (kWh). De AUB formule past, met een kleine marge, bij de emissielimieten van de machines, in het geval van hogere en constante motorbelasting en een warme, goed functionerende SCR. Dat komt ook overeen met de praktijk, waarbij bij hoge constante motorlast, zoals in de wettelijke test, de limieten gehaald worden. Daarmee kunnen factoren geschaald worden aan de limieten. Bij lagere motorbelasting gaat het brandstofverbruik per geleverde arbeid omhoog. Het voordeel van de AUB methode is dat dat effect impliciet is afgevangen omdat niet de arbeid maar het brandstofverbruik maatgevend is voor de emissies in de AUB methode. Verder zijn er afwijkingen naar boven van de emissies per brandstofverbruik, omdat bij lage motorlast en stationair draaien, veelal ondervertegenwoordigd in de wettelijke test, de motor geoptimaliseerd is op brandstofverbruik, met hogere NOx emissies als gevolg. Deze emissies schalen met de interne verliezen van de motor en daarmee met de grootte van de motor.