



Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.tno.nl

T 055 549 34 93
F 055 549 32 01
info@mep.tno.nl

TNO-rapport

R 2003/438

**Emissiefactoren van zeeschepen voor de
toepassing in de jaarlijkse emissieberekeningen**

| | |
|---------------|--|
| Datum | 4 november 2003 |
| Auteur(s) | Hans Oonk Jan Hulskotte René Koch Gerard Kuipers Joep van Ling |
| Projectnummer | 34599 |
| Trefwoorden | Emissies Scheepvaart NO _x PM CO NMVOC CO ₂ |
| Bestemd voor | Ministerie van Verkeer en Waterstaat DG Rijkswaterstaat T.a.v. mw. drs. P. Paffen Postbus 1031 3000 BA Rotterdam |

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 onderzoeksovereenkomsten 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.

Samenvatting en conclusies

In het kader van het project Emissieregistratie en Monitoring Scheepvaart (EMS) is een deelonderzoek uitgevoerd voor de afleiding van emissiefactoren voor motoren in de zeevaart. Voor de emissiefactoren wordt onderscheid wordt gemaakt tussen:

- motortype: tweetakt of viertakt;
- soort brandstof: lichte stookolie (MDO) of zware stookolie (HFO);
- bouwjaar van de motor;
- bedrijfstoestand: % maximum vermogen

Op basis van beschikbare metingen en literatuur worden de emissiefactoren in tabel S1 tot en met S3 voorgesteld.

Tabel S1 Emissiefactoren voor lage-toerenmotoren (tweetaktmotoren, in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO |
|-----------|-----|----|-----------------|-----------|-----------|
| < 1974 | 2,9 | 14 | 76 | 8,1 | 2,4 |
| 1975-1879 | 3,0 | 15 | 90 | 8,5 | 2,5 |
| 1980-1984 | 3,2 | 16 | 100 | 8,9 | 2,6 |
| 1985-1989 | 3,3 | 14 | 111 | 9,4 | 2,8 |
| 1990-1994 | 2,9 | 11 | 103 | 9,7 | 2,3 |
| 1995-1999 | 2,4 | 12 | 88 | 8,8 | 1,8 |
| 2000 | 1,8 | 12 | Tabel 7 | 8,9 | 1,8 |

Tabel S2 Emissiefactoren voor medium en hoge toerenmotoren (viertaktmotoren, in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO |
|-----------|-----|----|-----------------|-----------|-----------|
| < 1974 | 2,7 | 13 | 53 | 3,6 | 2,2 |
| 1975-1879 | 2,8 | 14 | 65 | 3,7 | 2,3 |
| 1980-1984 | 2,9 | 15 | 73 | 3,9 | 2,4 |
| 1985-1989 | 3,1 | 13 | 82 | 4,1 | 2,6 |
| 1990-1994 | 2,6 | 11 | 74 | 4,2 | 2,1 |
| 1995-1999 | 2,2 | 11 | 59 | 3,9 | 1,6 |
| 2000 | 1,6 | 11 | Tabel 7 | 3,7 | 1,6 |

Tabel S3 NO_x-emissiefactor voor motoren na 2000(g per kWh)

| Toerental | NO _x -emissie (g / kWh) | NO _x -emissie (kg / ton brandstof) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| < 130 rpm | 14,5 | 79 |
| tussen 130 en 2000 rpm | $38 \cdot n^{-0,2}$ | |
| boven 2000 rpm | 8,3 | 42 |

De emissiefactoren in bovenstaande tabellen dienen te worden gecorrigeerd voor de bedrijfstoestand van het schip. Deze correctiefactoren worden weergegeven in tabel S4. Voor buitengaats vaart blijkt de deellast gemiddeld 85% van het maximaal vermogen te bedragen. Voor binnengaats vaart en manoeuvreren bedraagt de deellast 10-40% van het maximaal vermogen.

Tabel S4 Correctiefactoren op de emissiefactoren uit de tabellen S1 tot en met S3

| Deellast | NO _x | CO | HC | PM |
|----------|-----------------|------|------|------|
| 85% | 0,97 | 0,70 | 0,84 | 0,97 |
| 50% | 1,00 | 1,12 | 1,03 | 1,01 |
| 45% | 1,01 | 1,23 | 1,09 | 1,01 |
| 40% | 1,02 | 1,38 | 1,16 | 1,03 |
| 35% | 1,03 | 1,56 | 1,27 | 1,05 |
| 30% | 1,04 | 1,80 | 1,42 | 1,08 |
| 25% | 1,06 | 2,14 | 1,65 | 1,12 |
| 20% | 1,10 | 2,66 | 2,02 | 1,19 |
| 15% | 1,17 | 3,51 | 2,74 | 1,32 |
| 10% | 1,34 | 5,22 | 4,46 | 1,63 |

Tijdens stilliggen worden de emissies vooral veroorzaakt door hulpmotoren en boilers. De emissiefactoren hiervoor worden gegeven in tabel S5.

Tabel S5 Emissiefactoren voor hulpmotoren en boilers (in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO |
|--------------------|-----|------|-----------------|-----------|-----------|
| <i>Hulpmotoren</i> | | | | | |
| < 1974 | 5,1 | 19,1 | 43 | 3,4 | 2,6 |
| 1975-1979 | 3,5 | 16,1 | 57 | 3,5 | 2,6 |
| 1980-1984 | 3,1 | 13,8 | 67 | 3,6 | 2,7 |
| 1985-1989 | 2,7 | 11,8 | 73 | 3,6 | 2,3 |
| 1990-1994 | 2,3 | 10,0 | 64 | 3,6 | 1,8 |
| 1995-1999 | 2,0 | 8,8 | 54 | 3,4 | 1,5 |
| na 2000 | 1,5 | 7,5 | 40 | 3,5 | 1,5 |
| <i>Boilers</i> | | | | | |
| alle jaren | 0,8 | 1,6 | 4,1 | 2 | 2 |

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting en conclusies | 2 |
| 1 | Inleiding..... | 5 |
| 2 | Aanpak | 6 |
| 3 | Emissies van individuele motoren | 7 |
| 3.1 | Algemeen..... | 7 |
| 3.2 | Motoren voor 2000 | 7 |
| 3.3 | Motoren vanaf 2000..... | 11 |
| 3.4 | Correctie voor emissies bij binnengaatsse vaart, manoeuvreren en stilliggen | 13 |
| 3.5 | Hulpmotoren en boilers..... | 15 |
| 3.6 | Veroudering..... | 16 |
| 4 | Naar een systeem voor vaststellen emissies | 17 |
| 5 | Toekomstige up-dates | 19 |
| 6 | Referenties..... | 20 |
| 7 | Verantwoording | 21 |

1 Inleiding

Het project Emissieregistratie en Monitoring Scheepvaart (EMS) van Rijkswaterstaat ambieert alle milieubelasting als gevolg van zeevaart in kaart te brengen. Om de emissies te reduceren is in internationaal verband een emissienormering ingesteld. Het gevolg hiervan zal zijn dat op termijn emissiefactoren zullen afnemen.

Om de emissies uit zeevaart en de effecten van de emissienormering nader in kaart te brengen is dit deelonderzoek uitgevoerd. Het doel van dit deelonderzoek is de afleiding van emissiefactoren van emissies naar de lucht voor zeevaart voor NO_x, CO, onverbrande koolwaterstoffen (HC) en deeltjes (PM). De afleiding dient zodanig te zijn dat deze systematisch, transparant en herhaalbaar is. Hierdoor wordt het in de toekomst mogelijk om periodiek veranderingen van emissiefactoren als gevolg van emissienormering en autonome wijzigingen te kunnen vaststellen.

De emissiefactoren zullen worden toegepast in een model dat emissies beschrijft. Dit model wordt gevoed vanuit een bestand van scheepsbewegingen dat door MARIN is opgebouwd op basis van een bestand van Lloyds Fairplay. Tijdens deze studie is een eerste berekening met de hier voorgestelde emissiefactoren uitgevoerd. De resultaten hiervan worden in hoofdstuk 4 beschreven.

2 Aanpak

Het project is uitgevoerd in een aantal fasen:

1. *Vaststellen categorie-indeling*

De motoren die in de zeevaart worden toegepast verschillen onderling aanzienlijk. Als gevolg hiervan bestaat ook een grote spreiding in specifieke emissies van de motoren. De emissie van een motor wordt bepaald door een aantal factoren (als toerental, vermogen, vermogensdichtheid, soort insputting, etc.). In deze eerste fase is een categorie-indeling voor motoren gekozen.

2. *Emissiefactoren per categorie*

Voor iedere categorie (combinatie van bouwjaar- en toerentalklasse) zijn vervolgens de emissies (in g per kWh en kg per ton diesel) vastgesteld op basis van:

- bij TNO beschikbare IMO-certificeringsgegevens
- open literatuur
- navraag bij motorleveranciers

3. *Invloed bedrijfstoestand*

De in fase 2 verkregen emissiefactoren zijn gerelateerd aan de resultaten van de certificeringsmetingen en zijn dus gemiddelden over alle soorten van activiteiten. De vraag is hoe gemeten emissies tijdens een certificeringsmeting zich verhouden tot de gemiddelde emissie onder werkelijke omstandigheden. Deze vraag is beantwoord op basis van beschikbare certificeringsmetingen en door informatie uit de literatuur. Hierbij is nagegaan welk effect de werkpunten van de motor (toerental/koppel) hebben op de emissies. Correcties voor emissiefactoren zijn uiteindelijk vastgesteld voor vier bedrijfstoestanden:

- varen buitengaats
- varen binnengaats
- manoeuvreren
- stilliggen

4. *Invloed veroudering motor*

Om de effecten van veroudering van de motor te beschrijven wordt in de literatuur soms correctiefactoren voorgesteld. Deze factoren zijn in deze studie beoordeeld en vergeleken met ervaringen van TNO-Wegtransportmiddelen met veroudering van Euro-0 en Euro-1 dieselmotoren voor wegverkeer. Uiteindelijk zijn goede argumenten gevonden om geen verouderingsfactoren toe te passen.

5. *Proefberekening: koppeling met MARIN-bestand*

Als laatste stap in deze studie is door MARIN een proefberekening uitgevoerd om hanteerbaarheid van de emissiefactoren te valideren.

3 Emissies van individuele motoren

3.1 Algemeen

In zeevaart worden zowel tweetakt als viertakt dieselmotoren gebruikt. De tweetakt motor is een lage-toeren motor en wordt vooral gebruikt voor de hele grote vermogens. Door het lage toerental (rond 120 toeren per minuut, rpm) bestaat in de cilinder een lange uitbrandtijd, met als gevolg een hoge energie-efficiency, maar ook veel tijd om bij de heersende temperaturen NO_x te vormen. Viertakt motoren draaien aanzienlijk sneller (1200 tot 3000 rpm) maar hebben een iets lagere energie-efficiency, maar ook lagere NO_x -emissies. Het verschil in toerental is relevant voor de emissie en ook relevant voor de emissieregelgeving, vandaar dat in deze afleiding van emissiefactoren ook consequent het onderscheid tussen hoge en lage-toerenmotoren wordt aangehouden.

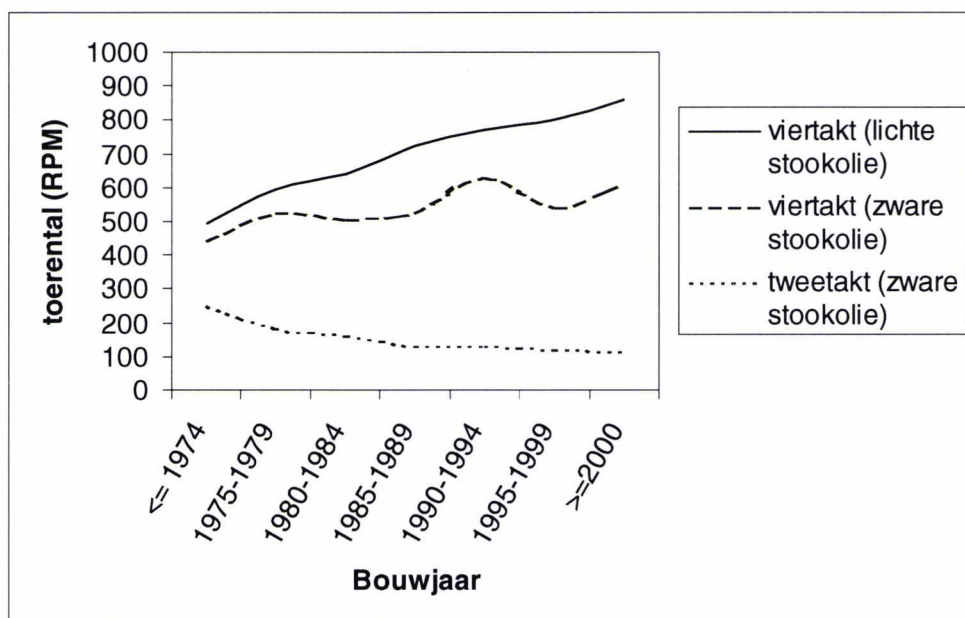
Voor NO_x -emissies van zeeschepen zijn in 1997 eisen geformuleerd door de International Maritime Organisation (IMO). Formeel zijn deze eisen, ook bekend als MARPOL 73/78, op 1 januari 2000 van kracht geworden. De IMO-eisen hebben vrijwel terstond een invloed gehad op de NO_x -emissies uit de motoren: door deze IMO-eisen zijn de NO_x -emissies met zo'n 30% gereduceerd ten opzichte van emissies van motoren direct voor invoering van de IMO-eisen (Wärtsilä, 2003a). Tegelijkertijd is ook de verplichting ontstaan om voor alle typen motoren certificeringsmetingen uit te voeren. Hierdoor komt op structurele wijze een grote hoeveelheid aan emissiemetingen beschikbaar, waardoor emissiefactoren van motoren van na 2000 beter onderbouwd zijn af te leiden.

3.2 Motoren voor 2000

Voor motoren van voor het van kracht worden van de IMO-eisen is slechts beperkt emissieinformatie beschikbaar. De meest uitgebreide set aan metingen is in 1995 uitgevoerd en geïnterpreteerd in de vorm van emissiefactoren door Lloyd's Register (Lloyd's, 1990).

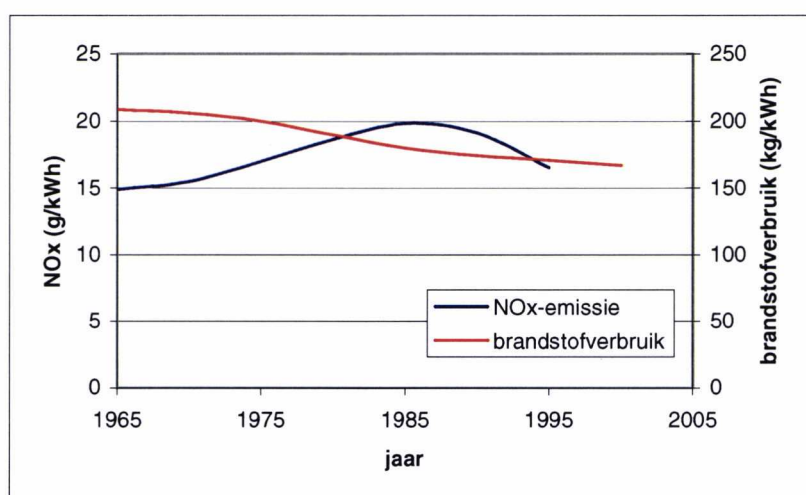
Lloyd's emissiefactoren en ontwikkeling van emissies in de tijd

Deze emissiefactoren van Lloyd's zijn gemiddelde emissiefactoren. In de Lloyd's emissiefactoren is echter geen rekening gehouden met een ontwikkeling van emissies over een aantal bouwjaren, als gevolg van ontwikkelingen in de motortechnologie tussen begin jaren zestig tot eind jaren. Technisch zijn de motoren er flink op vooruit gegaan en de nieuwere viertakt-motoren hebben bijvoorbeeld gemiddeld een hoger toerental en hogere werkdruk dan de oudere motoren (zie figuur 1). In de jaren zestig werden motoren vooral robuust ontworpen, om een lange levensduur te garanderen. Het verbrandingsproces van deze motoren is daarom niet optimaal en de motoren bereiken niet de vermogensdichtheid van moderne motoren.



Figuur 1 - Ontwikkeling gemiddelde toerentallen in de zeevaart

Na de energiecrisis begin jaren '70 richtten de motorfabrikanten zich steeds meer op verlaging van het brandstofverbruik en een verhoging van de vermogensdichtheid (vermogen/cylinderinhoud) van de motor. Voor volledige verbranding werd in de regel gewerkt met een hoge luchtvermaat. De hoge cilindertemperaturen en de luchtvermaat zorgden voor verhoogde NO_x -vorming (zie figuur 2). De aandacht voor NO_x -emissies begin jaren negentig en de regelgeving die daaruit voortvloeide zorgde uiteindelijk weer voor een afname van NO_x -emissies, waarschijnlijk tot het niveau van voor de jaren '70 (Wärtsilä, 2003a, 2003b, EUB/Germanische Lloyd, 2001).

Figuur 2 - Ontwikkeling van NO_x -emissies en energie-efficiency van een Wärtsilä tweetaktmotor

Kwantificering van ontwikkeling emissies

TNO-Wegtransportmiddelen heeft in het kader van deze studie beschikbare informatie verzameld en opnieuw geïnterpreteerd en heeft de ontwikkeling van emissies tot 2005 ingeschat, zoals weergegeven in de tabellen 1 tot en met 4. De informatie waarop deze emissiefactoren zijn gebaseerd is:

- Emissiemetingen van Lloyd's (1990);
- Informatie verkregen door navraag bij Wärtsillä (2003a). Wärtsilä geeft o.a. aan dat de IMO-normen indertijd zodanig gekozen zijn dat een emissiereductie van 30% werd gerealiseerd. NO_x-emissies direct voor ingaan van de IMO-normen lagen dus ongeveer 30% hoger;
- De ontwikkeling van de NO_x-emissie en verbruik bij lage-toerenmotoren van Wärtsillä (2003b, zie figuur 1). De ontwikkeling van het medium speed verbruik betreft een schatting van TNO-WT;
- Emissiemetingen aan binnenvaartmotoren verzameld in het kader van een Duitse inventarisatie van emissies uit binnenvaart (EUB/Germanische Lloyd, 2001);
- Expertise van TNO-WT voor ontwikkeling emissiefactoren bij Euro-0 en Euro-1 dieselmotoren, toegepast bij wegtransport;
- Een aantal individuele emissiemetingen aan scheepsmotoren, welke in de loop van de tijd uitgevoerd zijn, o.a. een meting uit 1972 aan emissies van een Bolnez-motor.

De emissiefactoren zijn als volgt afgeleid:

- Voor de ontwikkeling van de NO_x-emissie is uitgegaan van de ontwikkeling van emissies in de loop van de tijd, als weergegeven door Wärtsilä. Voor lage-toeren motoren wordt hierbij aangenomen dat de NO_x-emissie tot 4 g/kWh hoger is dan de emissie van hoge-toeren-motoren (conform IMO-eis). De ontwikkeling van emissiefactoren en het verschil tussen lage- en hoge toerenmotoren komt goed overeen met (a) de emissiefactoren afgeleid door Lloyds (1990) en (b) TNO metingen rond 1980 aan vrachtwagen motoren (200 kW) en een 2-takt scheepsmotor met drukvulling. Ook de Duitse metingen (EUB/Germanische Lloyd, 2001) vallen vrijwel volledig binnen de range: De Duitse metingen geven NO_x-emissies van gemiddeld 13 g/kWh NO_x bij direct ingespoten motoren;
- bij HC, CO is, uitgaande van de emissies die voor de nieuwere motoren zijn gemeten, waarbij de emissies lineair toenemen, teruggaand in de tijd. De emissies van motoren van voor 1972 blijven echter zeer onzeker;
- PM-emissies van oudere motoren zijn ingeschat op basis van het waarneembaar zijn van de pluim. Een PM van 0.6 tot 0.8 g/kWh geeft zichtbare maar niet extreme rook. Naar alle waarschijnlijkheid werden de oude motoren daarop afgesteld;
- voor het brandstofverbruik van lage-toeren motoren is de ontwikkeling als geschetst door Wärtsilä (2003b) aangenomen. Voor hoge toeren motoren is uitgegaan van een geleidelijke overgang van vrij-aanzuigende (~ 225 g/kWh) naar drukge vulde motoren (~ 180 g/kWh).

Tabel 1 Emissiefactoren voor lage-toerenmotoren (tweetaktmotoren, in g per kWh)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO | Fuel Cons. |
|-----------|-----|-----|-----------------|-----------|-----------|---------------|
| < 1974 | 0,6 | 3,0 | 16 | 1,7 | 0,5 | 210 |
| 1975-1879 | 0,6 | 3,0 | 18 | 1,7 | 0,5 | 200 |
| 1980-1984 | 0,6 | 3,0 | 19 | 1,7 | 0,5 | 190 |
| 1985-1989 | 0,6 | 2,5 | 20 | 1,7 | 0,5 | 180 |
| 1990-1994 | 0,5 | 2,0 | 18 | 1,7 | 0,4 | 175 |
| 1995-1999 | 0,4 | 2,0 | 15 | 1,5 | 0,3 | 170 |
| 2000 | 0,3 | 2,0 | Tabel 7 | 1,5 | 0,3 | 168 |

Tabel 2 Emissiefactoren voor medium en hoge toerenmotoren (viertaktmotoren, in g per kWh)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO | Fuel Cons. |
|-----------|-----|-----|-----------------|-----------|-----------|---------------|
| < 1974 | 0,6 | 3,0 | 12 | 0,8 | 0,5 | 225 |
| 1975-1879 | 0,6 | 3,0 | 14 | 0,8 | 0,5 | 215 |
| 1980-1984 | 0,6 | 3,0 | 15 | 0,8 | 0,5 | 205 |
| 1985-1989 | 0,6 | 2,5 | 16 | 0,8 | 0,5 | 195 |
| 1990-1994 | 0,5 | 2,0 | 14 | 0,8 | 0,4 | 190 |
| 1995-1999 | 0,4 | 2,0 | 11 | 0,7 | 0,3 | 185 |
| 2000 | 0,3 | 2,0 | Tabel 7 | 0,7 | 0,3 | 183 |

Tabel 3 Emissiefactoren voor lage-toerenmotoren (tweetaktmotoren, in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO |
|-----------|-----|----|-----------------|-----------|-----------|
| < 1974 | 2,9 | 14 | 76 | 8,1 | 2,4 |
| 1975-1879 | 3,0 | 15 | 90 | 8,5 | 2,5 |
| 1980-1984 | 3,2 | 16 | 100 | 8,9 | 2,6 |
| 1985-1989 | 3,3 | 14 | 111 | 9,4 | 2,8 |
| 1990-1994 | 2,9 | 11 | 103 | 9,7 | 2,3 |
| 1995-1999 | 2,4 | 12 | 88 | 8,8 | 1,8 |
| 2000 | 1,8 | 12 | Tabel 7 | 8,9 | 1,8 |

Tabel 4 Emissiefactoren voor medium en hoge toerenmotoren (viertaktmotoren, in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM | PM |
|-----------|-----|----|-----------------|-----|-----|
| | | | | HFO | MDO |
| < 1974 | 2,7 | 13 | 53 | 3,6 | 2,2 |
| 1975-1879 | 2,8 | 14 | 65 | 3,7 | 2,3 |
| 1980-1984 | 2,9 | 15 | 73 | 3,9 | 2,4 |
| 1985-1989 | 3,1 | 13 | 82 | 4,1 | 2,6 |
| 1990-1994 | 2,6 | 11 | 74 | 4,2 | 2,1 |
| 1995-1999 | 2,2 | 11 | 59 | 3,9 | 1,6 |
| 2000 | 1,6 | 11 | Tabel 7 | 3,7 | 1,6 |

Voor de volledigheid is in onderstaande tabel nog de emissies van stoom- en gasturbine aangedreven schepen weergegeven (Hulskotte en Koch, 2000).

Tabel 5 Emissiefactoren voor stoom- en gasturbine aangedreven schepen (in kg per ton brandstof)

| | HC | CO | NO _x HFO | NO _x MDO | PM HFO | PM MDO |
|----|-----|-----|------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| ST | 0,2 | 0,5 | 3,3 | 7 | 2,5 | 2,1 |
| TB | 0,1 | 0,5 | | 16 | | 1,1 |

Kwaliteit van de emissiefactoren

- de emissiefactoren voor schepen voor 1975 zijn gebaseerd op enkele incidentele metingen. De meetmethode en de motorinstellingen zijn hierbij niet altijd even goed gedocumenteerd. Deze factoren zijn dus relatief onzeker;
- aan emissiefactoren van schepen tussen 1980 en 1990 is in 1990 uitgebreid gemeten, o.a. bij het vaststellen van de Lloyd’s emissiefactoren. Deze emissiefactoren zijn dus redelijk onderbouwd. Uitzondering zijn de emissiefactoren voor PM. Aan deze emissies is intertijd is minder aandacht geschonken en zijn dus minder betrouwbaar;
- de emissiefactoren voor schepen in de periode tussen uitkomen van de Lloydsstudie en het van kracht worden van de IMO-eisen zijn niet gebaseerd op een grootschalig meetprogramma en mogelijk weer wat minder betrouwbaar dan de emissiefactoren uit de periode ervoor.

3.3 **Motoren vanaf 2000**

Overgang pre-IMO- en IMO-tijdperk

De overgang in emissies tussen het pre-IMO tijdperk en het IMO-tijdperk is zeer waarschijnlijk een vrij abrupte geweest. Vooruitlopend op de IMO-eisen verkochten de meeste motorfabrikanten eind jaren '90 een A en een B-versie van hun motoren. Het verschil tussen versie was gelegen in insputing en afstellingen, welke in het ene geval leidden tot optimaal energieverbruik en verhoogde NO_x-emissies; in het andere geval leidde dit tot NO_x-emissies binnen de IMO-norm, ten koste van een iets hoger energieverbruik. Navraag bij motorleveranciers leert dat voor 2000 bijna geen type B-motoren werden verkocht, terwijl na het van kracht worden van de IMO-alleen maar

type B-motoren zijn verkocht (Geveke, 2003; Wärtsilä, 2003). Kortom: de motorleveranciers waren al ruim voor 2000 technisch klaar voor de IMO-regelgeving; om economische redenen (besparing brandstofconsumptie) is door de reders zo lang als mogelijk gewacht met het daadwerkelijk aanschaffen van motoren die aan IMO-eisen voldoen. Er is dus zeer waarschijnlijk geen sprake van geen geleidelijke maar van een zeer abrupte overgang tussen de emissiefactor van motoren verkocht in 1999 en emissiefactoren van motoren uit 2000.

Toepasbaarheid IMO-certificeringsmetingen als emissiefactor

Scheepsmotoren worden getoetst aan de IMO-eisen door de emissies te meten onder stationaire omstandigheden in een aantal werkpunten, welke verschillen in belasting en toerental. ISO-8170 definieert een test-cyclus E3, welke een gewogen gemiddelde is van 4 werkpunten (zie tabel 6). Deze cyclus is ontworpen om het normaal gebruik van een motor tijdens alle maritieme operaties te simuleren (US-EPA, 2003).

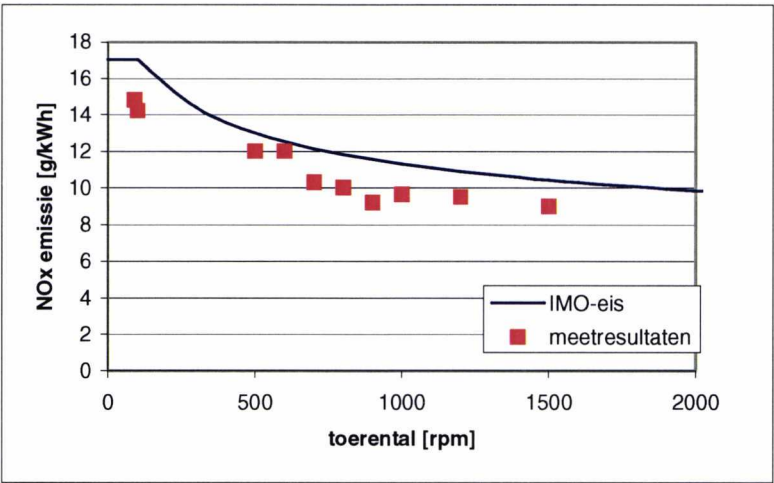
Tabel 6 Opbouw test-cyclus E3 voor propellor-law heavy-duty

| | | | | |
|-------------|-----|-----|------|------|
| Belasting % | 100 | 75 | 50 | 25 |
| Toerental % | 100 | 91 | 80 | 63 |
| Weegfactor | 0,2 | 0,5 | 0,15 | 0,15 |

IMO-Certificeringsmetingen worden uitgevoerd aan nieuwe motoren. Deze motoren zijn niet aan slijtage onderhevig geweest en eventuele veroudering heeft nog geen invloed gehad op de emissies. In hoofdstuk 3.6 wordt nader ingegaan op. Om die reden kunnen de resultaten van een E3-cyclus als representatief worden beschouwd voor de emissies van een zeegaand schip.

Emissiefactoren vanaf 2000

De emissies van NO_x worden gereguleerd door de IMO-normstelling. In deze studie zijn de resultaten van IMO-certificeringsmetingen, uitgevoerd door TNO) verzameld en afgezet tegen de norm (zie figuur 3). Gemiddeld blijken nieuwe motoren op 85% van de maximale emissies binnen de IMO-norm te realiseren. De emissiefactoren voor zeevaart worden weergegeven in tabel 7.



Figuur 3 - IMO-eis en door TNO gemeten NO_x-emissie voor IMO-gecertificeerde motoren

Tabel 7 IMO-norm en NO_x-emissiefactoren voor zeevaart

| Toerental | IMO-norm (g/kWh) | NO _x -emissie (g / kWh) | NOx-emissie (kg / ton brandstof) |
|------------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| < 130 rpm | 17,0 | 14,5 | 79 |
| tussen 130 en 2000 rpm | $45 \cdot n^{-0,2}$ | $38 \cdot n^{-0,2}$ | |
| boven 2000 rpm | 9,8 | 8,3 | 42 |

Voor HC, CO, PM-emissies en het specifieke energieverbruik wordt verwezen naar tabellen 1 tot en met 4.

3.4 Correctie voor emissies bij binnengaatse vaart, manoeuvreren en stilliggen

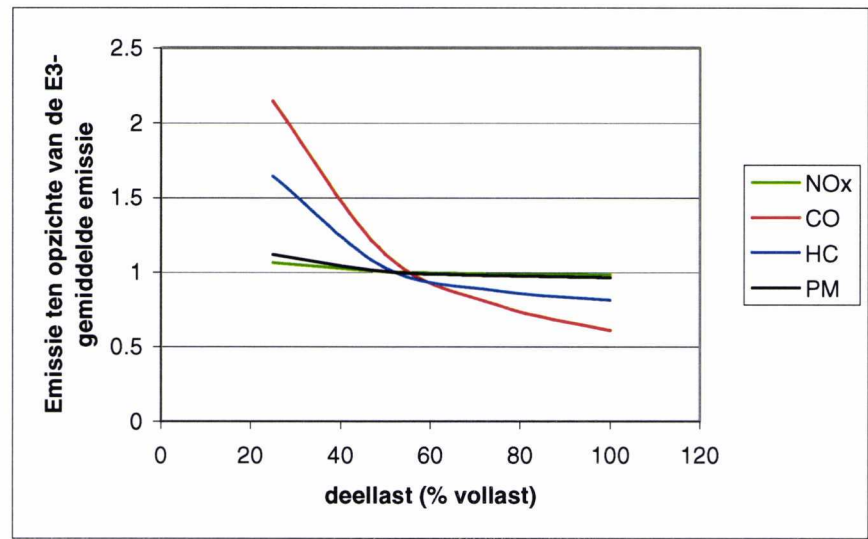
De test-cyclus E3 is een gemiddelde over alle activiteiten uit zeevaart en derhalve niet representatief voor de individuele activiteiten die kunnen worden onderscheiden: buitengaatse vaart, binnengaatse vaart, manoeuvreren en stilliggen.

In dit project is op drie manieren geprobeerd correcties voor deze drie wijzen van opereren vast te stellen voor emissiefactoren in de tabellen 1 tot en met 6 vast te stellen:

- Uit emissiemetingen van Lloyd’s (1995), op een achttal schepen tijdens werkelijke manoeuvres in de haven;
- Door een interpretatie van deelresultaten van 15 certificeringsmetingen die TNO voor derden heeft uitgevoerd;
- Op basis van een inventarisatie van US-EPA (2000), welke op haar beurt weer gebaseerd is op metingen van Lloyd’s en US Coast Guard (in totaal 471 metingen aan 58 motoren).

De resultaten van US-EPA blijken het meest betrouwbaar en worden niet weersproken door de resultaten van Lloyd’s en TNO.

US-EPA (2000) leidt relaties af, welke de gemiddelde emissie van schepen weergeven als functie van deellast (als percentage van de maximale belasting). In deze studie is dit omgerekend naar een gemiddelde afwijking van de emissie ten opzichte van het gemiddeld resultaat van een E3-cyclus. Het resultaat hiervan staat weergegeven in tabel 8 en figuur 4.



Figuur 4 - Correcties op de emissiefactoren bij deellast ten opzichte van het gemiddelde over de E3-cyclus

Tabel 8 Correcties op de emissiefactoren bij deellast ten opzichte van het gemiddelde over de E3-cyclus

| Deellast | NO _x | CO | HC | PM |
|----------|-----------------|------|------|------|
| 85% | 0,97 | 0,70 | 0,84 | 0,97 |
| 50% | 1,00 | 1,12 | 1,03 | 1,01 |
| 45% | 1,01 | 1,23 | 1,09 | 1,01 |
| 40% | 1,02 | 1,38 | 1,16 | 1,03 |
| 35% | 1,03 | 1,56 | 1,27 | 1,05 |
| 30% | 1,04 | 1,80 | 1,42 | 1,08 |
| 25% | 1,06 | 2,14 | 1,65 | 1,12 |
| 20% | 1,10 | 2,66 | 2,02 | 1,19 |
| 15% | 1,17 | 3,51 | 2,74 | 1,32 |
| 10% | 1,34 | 5,22 | 4,46 | 1,63 |

In hetzelfde rapport geeft US-EPA (2000) typische waarden voor deellast bij de verschillende activiteiten. Deze blijken af te hangen van het soort schip en kunnen variëren tussen 10 en 40% voor binnengaatse vaart en 10-20% voor manoeuvreren (tabel 9). Voor buitengaatse vaart blijkt de uit een enquête de deellast 85% te zijn.

Tabel 9 Voorstellen voor deellast bij verschillende activiteiten

| | deellast |
|-----------------------------------|----------|
| <i>Buitengaatse vaart</i> | |
| Alle schepen | 85% |
| <i>Binnengaatse vaart</i> | |
| Bulk carriers, tankers | 40% |
| General cargo | 35% |
| Passagiersschepen | 20% |
| Container/RORO/Reefer/Autocarrier | 30% |
| <i>Manoeuvreren</i> | |
| Bulk carriers, tankers | 20% |
| General cargo | 20% |
| Passagiersschepen | 10% |
| Container/RORO/Reefer/Autocarrier | 15% |

Stilliggen

Energieverbruik is waarschijnlijk vooral afkomstig van inzet van hulpmotoren. Zie hiervoor 3.5.

3.5 **Hulpmotoren en boilers**

De hulpmotoren die op zeeschepen worden toegepast zijn veelal dezelfde motoren die ook in de binnenvaart worden toegepast. Om deze reden zijn de emissiefactoren voor dieselmotoren in de binnenvaart geldig als emissiefactor voor hulpmotoren in de zeevaart (zie tabel 10, Oonk et al., 2003). Het is niet altijd zo dat hulpmotoren draaien op lichte stookolie. In sommige schepen wordt de hulpmotor gestookt met zware olie. Op veel schepen (vooral tankers) wordt in de energievoorziening voorzien door middel van boilers. In tabel 10 zijn ook hiervoor emissiefactoren opgenomen (Bakkum et al., 1987).

Tabel 10 Emissiefactoren voor hulpmotoren en boilers (in kg per ton brandstof)

| Jaar | HC | CO | NO _x | PM HFO | PM MDO |
|--------------------|-----|------|-----------------|-----------|-----------|
| <i>hulpmotoren</i> | | | | | |
| < 1974 | 5,1 | 19,1 | 43 | 3,4 | 2,6 |
| 1975-1979 | 3,5 | 16,1 | 57 | 3,5 | 2,6 |
| 1980-1984 | 3,1 | 13,8 | 67 | 3,6 | 2,7 |
| 1985-1989 | 2,7 | 11,8 | 73 | 3,6 | 2,3 |
| 1990-1994 | 2,3 | 10,0 | 64 | 3,6 | 1,8 |
| 1995-1999 | 2,0 | 8,8 | 54 | 3,4 | 1,5 |
| na 2000 | 1,5 | 7,5 | 40 | 3,5 | 1,5 |
| <i>boilers</i> | | | | | |
| alle jaren | 0,8 | 1,6 | 4,1 | 2 | 0,7 |

3.6 Veroudering

Voor emissiefactoren worden soms correctiefactoren voorgesteld om de verandering van het emissiepatroon als gevolg van veroudering te beschrijven (bijvoorbeeld EUB/Germanische Lloyd, 1995; Corinair, 1996). Bij gebruik van deze correctiefactor wordt verondersteld dat emissies lineair in de tijd blijven toenemen (of afnemen voor in het geval van NO_x). De correctiefactor wordt veelal voorgesteld als het product van de leeftijd van de motor en een constante.

Er bestaan echter een aantal bezwaren tegen het toepassen van deze factoren:

- de emissiefactoren in de tabellen 1 tot en met 6 zijn afgeleid van metingen van niet nieuwe motoren, welke al wat aan veroudering hebben ondergaan. Het doen alsof de emissiefactoren uit de tabellen 1 tot en met 6 betrekking hebben op nieuwe motoren en daaroverheen nog een stuk veroudering te poneren leidt dus mogelijk tot een verdubbeling van een stuk veroudering;
- fysisch is het niet voor te stellen dat veroudering lineair tot in het oneindige voortschrijdt; het lijkt logisch om te veronderstellen dat een vrij stationaire toestand terechtkomen. Dit is belangrijk als je motorenpark relatief oud is;
- door gebrek aan emissiemetingen blijkt het al moeilijk om betrouwbare emissiefactoren voor motoren van voor 2000 (zie ook hoofdstuk 3.2). Het lijkt dan bijna onmogelijk dat voldoende emissiefactoren voorhanden zijn om verouderingsgetallen op te baseren;
- voor wegtransport zijn wel meer emissiemetingen beschikbaar. Een recent onderzoek van TNO-Wegtransportmiddelen in het kader van het Europese Artemis-project heeft hier aandacht aan besteed. Voor Euro-1 Heavy Duty dieselmotoren kon geen verband tussen emissiefactoren en kilometrage (tot 450.000 km) worden afgeleid, noch voor NO_x , CO, HC als PM (Riemersma, 2003). Euro-1-dieselmotoren voor wegtransport lijken nog redelijk op de motoren die op schepen worden toegepast. Alleen motoren voor wegtransport worden veel dynamischer bedreven dan motoren voor scheepvaart, dus kan worden verwacht dat veroudering sneller optreedt.

Om deze redenen wordt hier voorgesteld geen correctiefactor voor veroudering aan te houden.

4 Naar een systeem voor vaststellen emissies

Emissies worden berekend door de emissiefactoren uit dit rapport te vermenigvuldigen met emissieverklarende variabelen.

Emissieverklarende variabelen worden geleverd door MARIN. MARIN heeft een bestand opgebouwd van buitengaats scheepbewegingen zowel tussen Nederlandse havens en naar havens in het buitenland. Voor het bepalen van emissies van het Nederlandse Continentale Plat zijn voor iedere combinatie van plaats van vertrek en plaats van bestemming en per leeftijdscategorie het aantal reizen per jaar vastgelegd.

De emissies van NO_x, CO, HC en PM worden berekend uit afstand gedeeld door de snelheid, het motorvermogen en de emissiefactoren uit de tabellen 3 en 4 (Hulskotte et al., 2003).

De bovenbeschreven berekeningen zijn uitgevoerd door MARIN en de resultaten voor 2000 worden in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 11 Emissies als gevolg van zeevaart op het Nederlands continentale plat in het jaar 2000 (in kton per jaar)

| | HC | NO _x | CO | PM | CO ₂ |
|-----------|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|
| < 1974 | 0,1 | 1 | 0,3 | 0,1 | 80 |
| 1975-1879 | 0,3 | 7 | 1,4 | 0,7 | 310 |
| 1980-1984 | 0,7 | 19 | 3,3 | 1,7 | 700 |
| 1985-1989 | 0,5 | 17 | 2,2 | 1,3 | 520 |
| 1990-1994 | 0,4 | 12 | 1,4 | 0,9 | 410 |
| 1995-1999 | 0,5 | 17 | 2,6 | 1,5 | 720 |
| > 2000 | 0,5 | 20 | 3,0 | 1,8 | 840 |
| Totaal | 2,9 | 95 | 15 | 8,0 | 3570 |

Tabel 12 Emissies van viertakt en tweetakt-motoren (in kton per jaar)

| | HC | NO _x | CO | PM | CO ₂ |
|-------------|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|
| hoge toeren | 1,2 | 33,1 | 6,0 | 2,4 | 1560 |
| lage toeren | 1,7 | 60,0 | 8,3 | 5,5 | 2010 |

Tabel 13 Emissies van hoofd- en hulpmotoren (in kton per jaar)

| | HC | NO _x | CO | PM | CO ₂ |
|--------------|-----|-----------------|------|-----|-----------------|
| hoofdmotoren | 2,8 | 91 | 13,9 | 7,9 | 3510 |
| hulpmotoren | 0,1 | 4 | 0,7 | 0,1 | 190 |

Enkele conclusies:

- De emissiefactoren blijken goed hanteerbaar;
- De bijdrage van de alleroudste schepen aan de totale emissie blijft beperkt tot maximaal 3%. Omdat de emissiefactoren van deze schepen relatief het onzekerst, is de gevoeligheid van het eindresultaat hiervoor dus niet zo groot. Eenzelfde conclusie kan worden getrokken voor de emissies uit hulpmotoren, waarvoor de emissiefactoren ook relatief onzeker zijn vergeleken met de emissiefactoren voor zeevaart. Met name betrouwbaarheid van de emissiefactoren voor de alleroudste schepen is beperkt. Een belangrijke conclusie uit bovenstaande tabellen is dat de consequentie van deze onzekerheden beperkt lijkt te blijven tot enkele procenten van het eindresultaat;
- De gemiddelde emissies in Nederland worden in tabel 14 vergeleken met de Lloyd's emissiefactoren (1990). De gemiddelde emissies in deze studie blijken iets verhoogd te zijn, waarschijnlijk omdat de Lloyd's emissiefactoren vooral zijn gebaseerd op schepen uit de jaren '80, terwijl in deze studie emissiefactoren deels zijn gebaseerd op oudere motoren, met iets hogere emissies.

Tabel 14 Vergelijking met Lloyds emissiefactoren (Lloyds, 1990)

| | HC | NO _x | CO | PM |
|------------------------|-----|-----------------|----|-----|
| <i>Viertaktmotoren</i> | | | | |
| Deze studie | 2,5 | 69 | 13 | 5,0 |
| Lloyd's (1990) | 2,7 | 59 | 8 | - |
| <i>Tweetaktmotoren</i> | | | | |
| Deze studie | 2,6 | 94 | 13 | 8,7 |
| Lloyds (1990) | 2,5 | 84 | 9 | - |

5 Toekomstige up-dates

De methodiek om te komen tot emissiefactoren is eenvoudig. De resultaten van genormaliseerde certificeringsmetingen zijn direct de relevante emissiefactoren. Ook de onderverdeling tussen tweetakt (lage toerenmotoren) en viertakt (middel- en hoge toeren) is gangbaar. Om die reden kunnen emissiemetingen die elders worden verricht direct worden ingezet om de emissiefactoren in deze studie te verifiëren en eventueel opnieuw vast te stellen.

Er zijn twee omstandigheden, die een up-date van de emissiefactoren in deze studie wenselijk cq. noodzakelijk kunnen maken.

- indien nieuwe inzichten of meetgegevens beschikbaar komen voor zeeschepen uit de jaren 1970 tot en met 2007, waardoor aanpassing van emissiefactoren mogelijk wenselijk is:
 - de emissiefactoren voor schepen voor 1975 is vrij onzeker en zou kunnen worden verbeterd. Het is echter onwaarschijnlijk dat nog ergens ter wereld een groot meetprogramma zal worden opgezet om deze emissiefactoren te verbeteren. Deze emissies dragen ook beperkt bij aan de totale emissies, dus heeft een verbetering van deze factoren ook geen hoge prioriteit;
 - aan emissiefactoren van schepen tussen 1980 en 1990 is in 1990 uitgebreid gemeten, o.a. bij het vaststellen van de Lloyd's emissiefactoren. Deze emissiefactoren zijn dus redelijk onderbouwd en naar alle waarschijnlijkheid zullen nieuwe inzichten hier geen drastische veranderingen teweegbrengen. Uitzondering zijn de emissiefactoren voor PM-emissies. Deze zijn intertijd niet gemeten, maar berusten op een schatting en zijn dus mogelijk wel voor verbetering vatbaar;
 - de emissiefactoren voor schepen in de periode tussen uitkomen van de Lloydsstudie en het van kracht worden van de IMO-eisen zijn niet gebaseerd op een grootschalig meetprogramma en zijn voor verbetering vatbaar. Omdat de emissies uit deze periode wel belangrijk zijn voor de hedendaagse emissies bestaat de kans dat er ergens nog wat emissiemetingen zullen worden uitgevoerd;
 - de emissiefactoren na de periode van de IMO-metingen zijn goed onderbouwd door resultaten van certificeringsmetingen. Het is niet te verwachten dat deze emissiefactoren aanpassing behoeven.
- Op het moment dat nieuwe regelgeving van kracht wordt (waarschijnlijk in 2007), wordt het noodzakelijk een nieuw bouwjaar toe te voegen aan de tabellen met emissiefactoren.

6 Referenties

Bakkum A., Hudly H.J., Kiers A., 1987, Emissieregistratie van vuurhaarden, TNO-rapport R86/207b, TNO-MT, Apeldoorn.

Corinair, 1996, Emission inventory guidebook other mobile sources and machinery.

EUB/Germanische Lloyd, 2001, Erarbeitung von Verfahren zur Ermittlung der Luftschadstoffemissionen von in Betrieb.

Geveke, (G. Groot Enzerink, R. Braams) 2003, Personal communication.

Hulskotte, J. Broekhuizen, D., Bolt E.W.B., 2003, EMS-protocol: Emissies door verbrandingsmotoren van zeeschepen op het Nederlands Continentaal Plat, Rijkswaterstaat, Rotterdam.

Hulskotte J., Koch R., 2000, Emissiefactoren zeeschepen, TNO-MEP R 2000/221, TNO, Apeldoorn.

Lloyd's, 1990, Marine exhaust emissions research programme: Steady state operation, Lloyd's Register of Shipping, London. Verenigd Koninkrijk.

Lloyd's, 1995, Marine exhaust emissions research programme: Phase II summary report, Lloyd's Register of Shipping, London. Verenigd Koninkrijk.

Oonk H., Hulskotte J., Koch R., Kuipers G., van Ling J., 2003, Emissiefactoren voor de binnenscheepvaart, TNO-rapport, TNO-Apeldoorn.

Riemersma, 2003, Personal communication, TNO-Wegtransportmiddelen.

US-EPA, 2000, Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data, US-EPA420-R00-002, US-EPA, Arlington, USA.

US-EPA, 2003, Control of Emissions of Air Pollution from New CI Marine Engines at or Above 37 Kilowatts, <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/1998/May/Day-2/a13791.htm>.

Wärtsilä (J. Hellen) 2003a, Personal communication.

Wärtsilä 2003b, Wärtsilä-web-site: www.wartsila.com.

7 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
DG Rijkswaterstaat
T.a.v. mw. drs. P. Paffen
Postbus 1031
3000 BA Rotterdam

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Hans Oonk
Jan Hulskotte
René Koch
Gerard Kuipers
Joep van Ling

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

TNO-Wegtransportmiddelen

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

april – juni 2003

Ondertekening:



Ir. J. Oonk
projectleider

Goedgekeurd door:



Ir. H.S. Buijtenhek
afdelingshoofd