

Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300 AH Apeldoorn

[www.mep.tno.nl](http://www.mep.tno.nl)

T 055 549 34 93  
F 055 549 32 01  
[info@mep.tno.nl](mailto:info@mep.tno.nl)

**TNO-rapport**

**R 2002/294**

**Emissiefactoren voor methaan en lachgas uit de  
luchtvaart en scheepvaart**

Datum	juni 2002
Auteurs	Dr.ir. H.A.C. Denier van der Gon Ir. J.H.J. Hulskotte
Projectnummer	33167
Trefwoorden	- bunkers - brandstoffen - broeikasgassen - lachgas - methaan - vliegtuigen - schepen - luchtvaart - scheepvaart
Bestemd voor	Nederlandse onderneming voor energie en milieu (NOVEM) Utrecht

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 onderzoekopdrachten 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.

## Inhoud

Inhoud .....	2
Samenvatting .....	3
Summary .....	5
1. Inleiding .....	8
1.1 Doel van deze studie .....	8
1.2 Opzet van het rapport .....	8
2. Luchtvaart .....	10
2.2 De IPCC emissiefactoren voor CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O afkomstig uit de luchtvaart .....	12
2.3 CORINAIR emission inventory guidebook.....	13
2.4 Literatuur overzicht emissiefactoren voor CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O .....	15
2.5 Discussie.....	17
2.6 Testfaciliteit metingen versus in-situ meting op cruise hoogte. ....	18
2.7 Geadviseerde emissiefactoren voor CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O emissie door luchtvaart.....	19
3. Scheepvaart.....	23
3.1 Scheepsbrandstoffen .....	23
3.2 Scheepsmotoren.....	24
3.3 IPCC emissiefactoren .....	24
3.4 Overige emissiefactoren .....	25
3.5 Discussie.....	28
3.6 Toekomstige N <sub>2</sub> O emissies van schepen .....	29
3.7 Geadviseerde CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O emissiefactoren voor de scheepvaart .....	29
4. Adviezen voor toekomstig onderzoek.....	31
4.1 luchtvaart .....	31
4.2 scheepvaart .....	31
5. Geraadpleegde literatuur .....	33
6. Verantwoording .....	37
Bijlage 1 Voorbeelden van vliegtuigtypen en emissiefactoren per LTO cyclus (Table 1-50; IPCC, 1997)	
Bijlage 2 Aantal LTO's, emissiefactoren, emissie van CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O en brandstofverbruik op Schiphol per vliegtuigtype in 2000	

## Samenvatting

Het doel van deze studie was het vaststellen en wetenschappelijk onderbouwen van emissiefactoren voor lachgas (N<sub>2</sub>O) en methaan (CH<sub>4</sub>) bij de verbranding van internationale bunkerbrandstoffen op basis van literatuuronderzoek ten behoeve van de rapportage van broeikasgasemissies aan de UNFCCC. De term “internationale bunkerbrandstoffen” wordt gebruikt om de consumptie van brandstof voor internationale transportactiviteiten aan te duiden. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beveelt aan dat elk land schattingen maakt van de broeikasgasemissies tengevolge van de internationale bunkerbrandstoffen verkocht binnen de nationale grenzen en beveelt tevens aan deze emissies apart van de nationale emissies te rapporteren.

Daar schepen en vliegtuigen aanzienlijk verschillen in de dynamiek van de emissies en de typen brandstof die gebruikt worden, worden de luchtvaart en scheepvaart apart behandeld in dit rapport. Het IPCC (1997) heeft een zogenaamde default methode gepubliceerd voor het vaststellen van de emissies van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> uit internationale bunkerbrandstoffen. Voor zowel de luchtvaart als de scheepvaart zijn eerst de onderliggende gegevens en kwaliteit van de IPCC default factoren kort besproken waarna emissiefactoren uit andere literatuur besproken is. In tabel S1 zijn de geadviseerde emissiefactoren voor verbranding van internationale bunkerbrandstoffen samengevat. Voor CH<sub>4</sub> emissie uit scheepsmotoren wordt, op basis van het beschikbare materiaal, geadviseerd af te wijken van de IPCC default waarde. De hier geadviseerde waarde is een factor 3 lager dan de IPCC default waarde als gevolg van een overschatting door IPCC (1997) van de CH<sub>4</sub> fractie in de totale VOC emissie van scheepsmotoren.

Tabel S1 Geadviseerde emissiefactoren voor verbranding van internationale bunkerbrandstoffen.

Luchtvaart vliegbeweging	Eenheid	CH <sub>4</sub> Emissiefactor		N <sub>2</sub> O Emissiefactor <sup>a)</sup>	
		IPCC (1997)	deze studie	IPCC (1997)	deze studie
LTO <sup>b)</sup> gemiddelde vloot	Kg/LTO <sup>b)</sup>	1.5	-	0.2	-
LTO oude vloot	Kg/LTO	7	7	0.2	0.2
LTO Nederland <sup>c)</sup>	Kg/LTO		0.23		0.08
Cruise	g/kg brandstof	0	0	0.1 <sup>d)</sup>	0.1 <sup>d)</sup>
Over all (cruise + LTO) <sup>e)</sup>	g/kg brandstof	-	0.015	-	0.1 <sup>d)</sup>
<b>Scheepvaart</b>					
Zeeschepen met dieselmotoren	g/kg brandstof	0.3	0.1	0.08	0.08

a) Voor luchtvaart gebaseerd op Tier 1 methode (IPCC, 1997).

b) LTO = Landing en Take-Off cyclus

c) Gemiddelde voor alle vliegtuigen met herkomst of bestemming Nederland.

d) Onzekere factor, range is 0.1-1.3 g/kg brandstof.

e) Op basis van een recente RIVM-studie (Jansen, 2002) is afgeleid dat het aandeel van de LTO in het energiegebruik van vluchten vanaf Schiphol naar hun eindbestemming en terug circa 5% bedraagt.

De N<sub>2</sub>O emissiefactor tijdens kruisvlucht (cruise, Tabel S1) is erg onzeker. De gepubliceerde metingen verschillen onderling sterk, wat hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt wordt door de verschillende motoren waaraan gemeten is, m.a.w. de N<sub>2</sub>O emissie tijdens kruisvlucht zou een specifieke eigenschap van het motortype kunnen zijn. De range in de metingen is 0.1-1.3 g/kg brandstof, de IPCC default factor zit daarmee aan de onderkant van de range. Het aantal vliegtuigmotoren waaraan daadwerkelijk N<sub>2</sub>O tijdens cruise condities gemeten is, is dermate klein dat momenteel niet goed te zeggen is welke meetwaarde representatief is voor welk type motor. Het is daarom vooralsnog onverstandig om af te wijken van de IPCC default factor maar de verwachting is dat indien er meer metingen beschikbaar komen deze emissiefactor zal veranderen en naar boven toe bijgesteld moet worden. Op basis van de beschikbare metingen zou een “best guess” gemiddelde waarde 0.3 g/kg brandstof zijn. Alle N<sub>2</sub>O emissiefactoren voor de luchtvaart zijn gebaseerd op de IPCC Tier 1 methode (IPCC, 1997).

Voor zowel de luchtvaart als de scheepvaart geldt dat de global warming potential van de uitlaatgasemissies sterk gedomineerd wordt door de CO<sub>2</sub> emissies (Tabel S2). De directe CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissies van vliegtuigmotoren en scheepsmotoren leveren een geringe bijdrage aan de mondiale budgetten van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>. Twee onderwerpen waar aanvullend onderzoek een sterke verbetering van de emissiefactoren zou bewerkstelligen zijn (1) metingen van N<sub>2</sub>O emissies uit nog niet bemeeten typen vliegtuigmotoren tijdens cruisecondities en (2) emissiemetingen van CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en VOC in de uitlaatgassen van enkele representatieve scheepsdieselmotoren.

Tabel S2 Emissies van CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O bij verbranding van internationale bunkerbrandstoffen in de internationale luchtvaart en scheepvaart uitgedrukt in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton brandstof.

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>a)</sup>		N <sub>2</sub> O <sup>a)</sup>	
		IPCC	deze studie	IPCC	deze studie
kg CO <sub>2</sub> eq/ton brandstof					
Luchtvaart					
Over all (cruise + LTO) <sup>b)</sup>	3156	- <sup>c)</sup>	0.3	- <sup>c)</sup>	31
Scheepvaart					
Zeeschepen met dieselmotoren <sup>b)</sup>	3160	6.3	2.1	25	25

a) De GWP (100 jr tijdshorizon) van CH<sub>4</sub> is 21 en van N<sub>2</sub>O is 310.

b) Emissiefactoren afkomstig uit Tabel S1.

c) IPCC geeft geen emissiefactor voor kruisvlucht en LTO tezamen.

## Summary

The aim of the current study is a scientific assessment of the emission factors for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and methane (CH<sub>4</sub>) to be used by the Netherlands when reporting N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions generated by combustion of international bunker fuels. The term "international bunker fuels" is used to denote the consumption of fuel for international transport activities, consisting primarily of residual and distillate fuel oil for ships and kerosene-based jet fuel for aircraft. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recommends that every country estimate emissions from international bunker fuels sold within national boundaries, but that these emissions would be reported separately and, as far as possible, excluded from national totals.

The reporting of emissions generated by fuel sold for international transportation by air or by sea separated from national totals are outlined in the Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1997). These inventory guidelines offer a default methodology available to any country that wishes to use it. The aviation sector and the marine sector differ considerably in their dynamics and the fuel types used and are therefore treated separately in this report. For each sector the IPCC default methodology, the emissions factors involved, their quality and the underlying data are discussed. Subsequently other emission factors from the open literature are discussed. The advised N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission factors for international bunker fuels are summarized in table S1. For CH<sub>4</sub> emissions from shipping it is advised to use a different factor than the IPCC default value because the IPCC methodology overestimates the CH<sub>4</sub> emissions by a factor of 3. The cause of this overestimation is that CH<sub>4</sub> emissions are not directly measured but derived from measurements of total volatile organic carbon (VOC) emissions. The IPCC guidelines assume an unrealistic high fraction of CH<sub>4</sub> (12%) in the total VOC emissions from combustion of bunker fuels in the marine sector which result in an unrealistically high emission factor. Although direct measurements of CH<sub>4</sub> emissions are very limited, the available data show that the CH<sub>4</sub> fraction of total VOC emissions from marine diesel engines is in the range of 2-6%.

*Tabel S1 IPCC emission factors and advised emission factors for N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions generated by combustion of international bunker fuels.*

Aviation	Unit	CH <sub>4</sub> Emission factor		N <sub>2</sub> O Emission factor <sup>a)</sup>	
		IPCC (1997)	this study	IPCC (1997)	this study
LTO <sup>b)</sup> average fleet	Kg/LTO <sup>b)</sup>	1.5	-	0.2	-
LTO old fleet	Kg/LTO	7	7	0.2	0.2
LTO the Netherlands <sup>c)</sup>	Kg/LTO		0.23		0.08
Cruise	g/kg fuel	0	0	0.1 <sup>d)</sup>	0.1 <sup>d)</sup>
Over all (cruise + LTO) <sup>e)</sup>	g/kg fuel	-	0.015	-	0.1 <sup>d)</sup>
Shipping					
Marine diesel engines	g/kg fuel	0.3	0.1	0.08	0.08

a) For aviation based on Tier 1 method (IPCC, 1997).

b) LTO = Landing en Take-Off cycle.

c) Average for all aircraft with origin or destination the Netherlands.

d) Uncertain factor, – see text. The range is 0.1-1.3 g/kg fuel.

e) Calculated using a recent RIVM study (Jansen, 2002) from which it can be derived that the share of LTO in the energy use of flights from Schiphol airport back and forth is approximately 5%. IPCC (1997) does not provide an over all emissionfactor.

The N<sub>2</sub>O emission factor during cruise conditions (Table S1) is highly uncertain. The published measurements show large differences, which is most likely caused by the different engines that were used. Therefore, the N<sub>2</sub>O emission during cruise conditions may well be an engine-specific trait. The range in the measured emission factors is 0.1-1.3 g/kg fuel. The IPCC default factor is at the low end of this range. Unfortunately, the number of engines that have been assessed is so small that it is at present not possible to say which value is representative for what type of engine. Therefore, as of yet it appears unwise to deviate from the IPCC default factor although this is more for transparency and procedural reasons. It is anticipated that when more measurements become available the N<sub>2</sub>O emission factor for aviation will have to be elevated. A best guess average value based on what is currently published would be 0.3 g/kg fuel.

For both the aviation sector and the marine sector the global warming potential of the engine emissions is dominated by the CO<sub>2</sub> emissions, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O play a minor role only (Table S2). The CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissions from aviation and shipping contribute only a small part to the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O global budgets.

Two issues where additional research would strongly reduce the uncertainty of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions generated by combustion of international bunker fuels are (1) measurements of N<sub>2</sub>O emissions from a range of currently used aviation engines during cruise conditions and (2) emission measurements of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en VOC from a number of representative marine diesel engines.

*Table S2 Emissions of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O from combustion of international bunker fuels in the aviation sector and marine sector expressed as CO<sub>2</sub> equivalent per ton fuel.*

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>a)</sup>		N <sub>2</sub> O <sup>a)</sup>	
		IPCC	this study	IPCC	this study
kg CO <sub>2</sub> eq/ton fuel					
Aviation					
Over all (cruise + LTO) <sup>b)</sup>	3156	- <sup>c)</sup>	0.3	- <sup>c)</sup>	31
Shipping					
Marine diesel engines <sup>b)</sup>	3160	6.3	2.1	25	25

a) The GWP (100 yr time horizon) used for CH<sub>4</sub> is 21 and for N<sub>2</sub>O is 310.

b) Emission factors from Table S1.

c) IPCC does not present an emission factor for cruise and LTO together.

## 1. Inleiding

De term "internationale bunkerbrandstoffen" wordt gebruikt om de consumptie van brandstof voor internationale transportactiviteiten aan te duiden. Internationale bunkerbrandstoffen worden verbrand tijdens internationaal verkeer door schepen op zee en door vliegtuigen. De hierbij vrijkomende emissies dienen opgenomen te worden in mondiale broeikasgasbudgetten en -emissieschattingen maar zijn niet op individuele landen terug te voeren. In deze context beveelt het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aan dat elk land schattingen maakt van de broeikasgasemissies tengevolge van de internationale bunkerbrandstoffen verkocht binnen de nationale grenzen en beveelt tevens aan deze emissies apart van de nationale emissies te rapporteren. Tot nu toe werd door Nederland enkel de emissie van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) uit de verbranding van bunkerbrandstoffen gerapporteerd in de National Communication aan de United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (Tabel 1). Indien Nederland ook de emissies van lachgas (N<sub>2</sub>O) en methaan (CH<sub>4</sub>) wil rapporteren zijn hiervoor emissiefactoren voor het vrijkomen van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> bij de verbranding van bunkerbrandstoffen in de lucht- en scheepvaart nodig.

Tabel 1 Emissies van CO<sub>2</sub> afkomstig van internationale bunkerbrandstoffen in 1990 (Dutch National Communication to UNFCCC, may 1999).

Luchtvaart	Zeevaart	Totaal
CO <sub>2</sub> emissie (Giga gram)		
4500	35900	40400

### 1.1 Doel van deze studie

Het vaststellen en wetenschappelijk onderbouwen van emissiefactoren voor lachgas (N<sub>2</sub>O) en methaan (CH<sub>4</sub>) bij de verbranding van internationale bunkerbrandstoffen op basis van literatuuronderzoek ten behoeve van de rapportage van broeikasgasemissies aan de UNFCCC.

### 1.2 Opzet van het rapport

Internationale bunkerbrandstoffen worden verbrand door de lucht- en scheepvaart. Daar schepen en vliegtuigen aanzienlijk verschillen in de dynamiek van de emissies en de typen brandstof die gebruikt worden, worden de luchtvaart en scheepvaart apart behandeld. Het IPCC (1997) heeft in de "Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" een default methode gepubliceerd voor het vaststellen van de emissies van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> uit internationale bunkerbrandstoffen (IPCC, 1997). Naast IPCC is EMEP een andere belangrijke organisatie die verbranding van bunkerbrandstoffen een plaats geeft in emissie-inventarisaties



(EMEP/CORINAIR, 2002). Zowel in het hoofdstuk voor luchtvaart als de scheepvaart wordt de IPCC methode kort neergezet en geanalyseerd wat de onderliggende gegevens en aannamen zijn. Daarnaast wordt op basis van een literatuuronderzoek aanvullende gegevens gepresenteerd en geëvalueerd of er significante verbetering van de IPCC emissiefactoren behaald kan worden. In de conclusies wordt kort ingegaan op de zwakke plekken van de voorgestelde emissiefactoren en inventarisatie methodiek en hoe dit eventueel verbeterd zou kunnen worden.

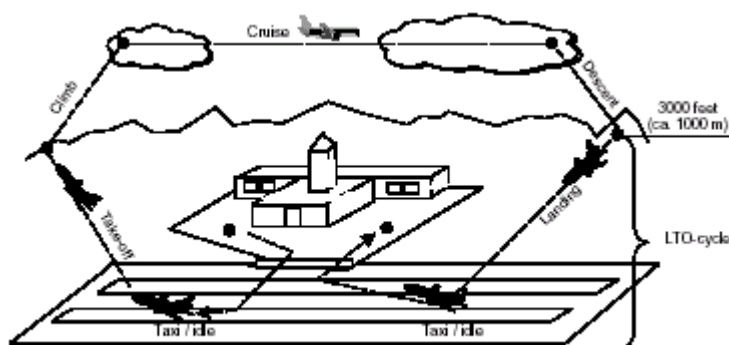
## 2. Luchtvaart

In de literatuur worden drie typen luchtvaart onderscheiden te weten

1. Commerciële luchtvaart (commercial or civil aviation), commercieel vliegtuigtransport van passagiers en goederen
2. Militaire luchtvaart (military aviation), luchtvaart behorend bij de nationale krijgsmacht
3. Kleine luchtvaart (general aviation), recreatieluchtvaart en kleine bedrijfsvliegtuigen

In het kader van emissies vrijkomend bij de verbranding van internationale bunkerbrandstoffen is vooral de eerste categorie van belang. Er is een constante lange-termijngroei van de burgerluchtvaart. Het passagiersverkeer met lijnvluchten is over de afgelopen 10 jaar met 60% toegenomen. De verwachting voor de komende 10-15 jaar is dat de vraag naar commercieel luchtverkeer zal groeien met ongeveer 5% per jaar (Brasseur et al., 1998), hoewel er zeker regionale variaties in de vraag zullen zijn. In tegenstelling tot de burgerluchtvaart wordt voor de militaire luchtvaart geen groei voorzien, deze wordt verwacht constant te blijven of zelfs enigszins terug te lopen. Het gevolg hiervan is dat toekomstige militaire luchtvaartactiviteiten een afnemend deel van het totale luchtvaartbrandstofgebruik en -emissies vertegenwoordigden (IPCC, 1999). Luchtvaartbrandstof komt momenteel overeen met 2–3% van het totale mondiale verbruik aan fossiele brandstof, het merendeel (> 80%) hiervan wordt verbruikt in de commerciële luchtvaart. Ter vergelijking, de gehele transportsector is momenteel verantwoordelijk voor 20-25% van alle fossiele brandstofconsumptie. De luchtvaart consumeert dus 13% van het fossiele brandstofverbruik in de transportsector, wegtransport is met 80% veruit de belangrijkste verbruiker in de transportsector (IPCC, 1999).

De CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissies die vrijkomen bij de verbranding zijn een functie van motoreigenschappen, vliegcondities en vluchtfase; opstijgen, kruisvlucht (“cruise”), dalen en landen. CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissies hebben wezenlijk verschillende oorzaken. Methaan en niet-methaan vluchtige koolwaterstoffen (NMVOC) emissies zijn het product van incomplete verbranding en vinden voornamelijk plaats gedurende opstijgen, dalen en landen, deze combinatie van vluchtfasen met een karakteristieke tijdsduur van elke fase wordt aangeduid als de LTO-cyclus (Landing – Take Off cyclus, zie Figuur 1). En dan met name in het gedeelte Taxi/IDLE. In sommige statistieken wordt een landing of een opstijging als één beweging beschouwd. In dit rapport worden een landing en opstijging tezamen beschouwd als één volledige LTO-cyclus.



Figuur 1 Standaard vliegbewegingen (EMEP/CORINAIR, 2001).

Emissies gedurende de LTO cyclus worden vaak gerapporteerd als g stof per LTO cyclus i.p.v. g /kg brandstof. Wiesen et al. (1994) rapporteren dat gedurende de cruise fase geen  $\text{CH}_4$  wordt geëmitteerd maar dat het aanwezig  $\text{CH}_4$  in de uitlaatgassen overeenkomt met de atmosferisch concentratie ( $\sim 1.7$  ppm).  $\text{N}_2\text{O}$  (en  $\text{NO}_x$ ) worden voornamelijk geproduceerd door de oxidatie van atmosferisch stikstof en de emissie vindt vooral plaats in de cruise fase. Emissies gedurende de cruise fase worden doorgaans uitgedrukt in g/kg brandstof.

### 2.1.1 Bunkerbrandstoffen voor de luchtvaart

De belangrijkste vliegtuigbrandstof is kerosine (Jet A1). Het kleine aandeel vliegtuigbenzine (aviation gas) daalt langzaam van ca. 4% in 1970 tot 1,3% in 1990. Kerosine is de standaard brandstof in de commerciële luchtvaart, vliegtuigbenzine wordt vooral gebruikt in de kleine luchtvaart. Hoewel de  $\text{CH}_4$  emissiefactor van vliegtuigbenzine hoger is, en de  $\text{N}_2\text{O}$  emissiefactor lager is, dan van kerosine (tabel 2) is het aandeel aviation gas in internationale bunkerbrandstoffen dermate klein dat een onderscheid naar brandstof een verwaarloosbaar effect op de totale  $\text{CH}_4$  en  $\text{N}_2\text{O}$  emissies heeft. In de militaire luchtvaart wordt ook nog gebruik gemaakt van Naphta-type jet fuel in turbojet en turboprop vliegtuigmotoren, dit is hier niet relevant en wordt verder niet behandeld in dit rapport.

Tabel 2 Emissiefactoren voor twee typen vliegtuigbrandstof.

Brandstof	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	CO	NMVOC <sup>a)</sup>	Referentie
	g/kg brandstof					
Kerosine (Jet A1)	0.087	0.1	12.5	5.2	0.78	EPA (2001)
Vliegtuigbenzine (Aviation gasoline)	2.64	0.04				EPA (2001)

<sup>a)</sup> NMVOC = Non-Methane Volatile Organic Compound.

### 2.1.2 Activiteit categorieën in de luchtvaart

Voor het berekenen van emissies worden in de luchtvaart vier typen activiteiten onderscheiden

1. Binnenlands luchthavenverkeer (LTO<sup>1</sup> – cycli < 914m hoogte)
2. Internationaal luchthavenverkeer (LTO – cycli < 914m hoogte)
3. Binnenlands cruise verkeer (> 914 m hoogte)
4. Internationaal cruise verkeer (> 914 m hoogte).

## 2.2 De IPCC emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O afkomstig uit de luchtvaart

IPCC presenteert default (standaard) emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O afkomstig uit de luchtvaart (tabel 3), voor de volledigheid zijn ook de emissiefactoren van andere stoffen opgenomen.

### 2.2.1 Methaan

IPCC (1997) verwijst voor de herkomst van de CH<sub>4</sub> emissiefactoren naar Wiesen (1994) en ICAO (1995). De ICAO (1995) emissie gegevens bevatten echter geen metingen voor CH<sub>4</sub>, maar enkel voor totaal VOC. IPCC (1997) neemt aan dat de VOC emissies voor 10% uit CH<sub>4</sub> bestaan en voor 90% uit NMVOC. Volgens de voetnoot bij Tabel 3 is deze aanname gebaseerd op Olivier (1991). Uit Olivier (1991) blijkt dat de splitsing van VOC in CH<sub>4</sub> en NMVOC gebaseerd op is op VOC profielen gemeten door Shareef et al. (1988) in opdracht van de US EPA. (Tabel 4).

---

<sup>1</sup> LTO = Landing and Take-Off cycle, 914 m = 3000 ft.

Tabel 3 Default emissiefactoren en brandstofgebruik in de internationale luchtvaart (LTO emissie factoren zijn per vliegtuig) (IPCC, 1997).

	Brandstof Consumptie	Emissiefactoren						
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>(a)</sup>	N <sub>2</sub> O <sup>(b)</sup>	NO <sub>x</sub>	CO	NM VOC <sup>(a)</sup>	SO <sub>2</sub>
LTO gemiddelde vloot (kg/LTO)	2500	7900	1.5	0.2	41	50	15	2.5
LTO oude vloot (kg/LTO)	2400	7560	7	0.2	23.6	101	66	2.4
Cruise (kg/t brandstof)		3150	0	0.1	17	5	2.7	1

Noot: De emissiefactoren zijn berekend als gewogen gemiddelden voor een aantal veelvoorkomende vliegtuigen. De internationale gemiddelde vloot is vertegenwoordigd door de Airbus A300, Boeing B767, B747 en McDonald Douglas DC10, terwijl de oude vloot vertegenwoordigd is door de Boeing B707, Boeing B747 and McDonald Douglas DC8.

- (a) Voor CH<sub>4</sub> en NMVOC is aangenomen dat de emissiefactoren voor LTO cycli respectievelijk overeenkomen met 10% and 90% van het totaal VOC. (Olivier, 1991). Wiesen et al. (1994) suggereert dat gedurende cruise geen CH<sub>4</sub> wordt geëmitteerd.
- (b) Schattingen gebaseerd op Tier 1 default waarden (IPCC, 1997).

Tabel 4 Fractie CH<sub>4</sub> (%) in VOC profiel gedurende vliegtuig LTO cyclus voor drie verschillende typen luchtvaart (Shareef et al., 1988).

	Commerciële luchtvaart	Militaire luchtvaart	Kleine luchtvaart
Fractie CH <sub>4</sub> in VOC profiel <sup>1)</sup> (%)	9.57	9.38	10.95

<sup>1)</sup> Compositieprofiel voor elke type luchtvaart is gebaseerd metingen gedurende de verschillende fasen van de LTO cyclus en gewogen naar gemiddelde specifieke tijd voor elke fase in de LTO cyclus.

### 2.3 CORINAIR emission inventory guidebook

EMEP/CORINAIR deelt emissie genererende activiteiten in naar zogenaamde SNAP codes (Selected Nomenclature for Air Pollution) en adviseert emissiefactoren om per SNAP code de emissie te kunnen berekenen. De CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissiefactoren voor de luchtvaart volgens de zogenaamde “Very Simple Methodology” staan in Tabel 5. De gemiddelde internationale vliegtuigvloot in Tabel 5 is vertegenwoordigd door een vliegtuigtype voor lange afstanden. De emissiefactoren voor de gemiddelde vloot en de oude vloot (Tabel 5) zijn lager dan de door IPCC voorgestelde waarden (Tabel 3), mogelijk veroorzaakt door een andere keus m.b.t. de definitie van gemiddelde en oude vloot.

EMEP/CORINAIR (2001) presenteert ook een meer gedetailleerde methodologie doch voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O voegt dit weinig toe. De tabellen voor deze gedetailleerde methode zijn beschikbaar op

[http://reports.eea.eu.int/technical\\_report\\_2001\\_3/en/B851vs2.3spreadsheet1.pdf](http://reports.eea.eu.int/technical_report_2001_3/en/B851vs2.3spreadsheet1.pdf).

De N<sub>2</sub>O emissie berekening per vliegtuig is niet anders dan het brandstofgebruik per LTO cyclus voor dat type vliegtuig vermenigvuldigd met een vaste N<sub>2</sub>O emissie per kg brandstofverbruik (zie bijv. in Tabel 5 – N<sub>2</sub>O emissiefactor = 10<sup>-4</sup> x brandstofverbruik). De CH<sub>4</sub> emissiefactoren per vliegtuig zijn op een zelfde manier

afgeleid als de IPCC default methode, namelijk m.b.v. de aanname dat de CH<sub>4</sub> emissie gelijk is aan 10% van de VOC emissie (Tabel 4).

Tabel 5 EMEP/CORINAIR emissiefactoren en brandstofverbruik voor de meest simpele emissieschattingmethodologie. Emissiefactoren zijn gegeven op “representatief-vliegtuig” basis.

Internationale vluchten	Fuel	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
LTO (kg/LTO) – Average fleet (B767)	1617	5094	0.1	0.2
LTO (kg/LTO) – Average fleet (short distance, B737-400)	825	2600	0.1	0.1
LTO (kg/LTO) – Average fleet (long distance, B747-400)	3400	10717	0.2	0.3
LTO (kg/LTO) – Old fleet (DC10)	2400	7500	2.3	0.2
LTO (kg/LTO) – Old fleet (short distance, B737-100)	920	2900	0.1	0.1
LTO (kg/LTO) – Old fleet (long distance, B747-100)	3400	10754	3.7	0.3
Cruise (kg/tonne)- Average fleet (B767)	-	3150	0	0.1
Cruise (kg/tonne)- Old fleet (DC10)	-	3150	0	0.1

Bron: Tabel 8.2 Corinair emission inventory guidebook (EMEP/CORINAIR, 2002).

Tabel 6 Emissie van methaan van vliegtuigmotoren bij verschillende vermogendinstellingen.

Stuwdruk (Thrust)	Motor type			
	TF-39 <sup>1)</sup>	CFM-56 <sup>1)</sup>	PW-305 <sup>2)</sup>	Reverse annular flow combustor <sup>3)</sup>
	CH <sub>4</sub> (ppm)			
Onbelast	9.42	5.58		
5.5%			2.97 ± 0.25	
19%				0.47-1.22
24%			1.05 ± 0.15	
30%	1.63	0.58		1.09-1.58
33%			0.76 ± 0.14	
71%			0.30 ± 0.14	
80%	1.09	0.44		
85%				0.23
96%			0.22 ± 0.17	
100%				0.15

<sup>1)</sup> Spicer et al. (1994), gebruikt in militaire jets.

<sup>2)</sup> Wiesen et al. (1994), veel gebruikt in middelgrote vliegtuigen, burgerluchtvaart.

<sup>3)</sup> Wiesen et al. (1996), is gebruik in kleine zakenvliegtuigen.

Noot: Niet opgenomen in de tabellen zijn de meetwaarden van Katzman en Libby (1975) daar het metingen betreft van militaire vliegtuigmotoren met afterburning turbojet motoren ontworpen voor supersonische vluchten.

## 2.4 Literatuur overzicht emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O

De concentratie CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O in de uitlaatgassen van vliegtuig turbinemotoren is slechts in een zeer beperkt aantal studies bepaald (Tabel 6 en 7). Vergelijking van de emissie data uit Tabel 6 met de CH<sub>4</sub> concentratie in omgevingslucht (ca. 1.7 ppm) leert dat hoewel CH<sub>4</sub> emissie data onder vluchtcondities slechts voor een beperkt aantal motoren beschikbaar zijn, CH<sub>4</sub> enkel bijdraagt aan de verbrandingsproducten als de motor onbelast (stationair) draait. CH<sub>4</sub> emissies vinden dus enkel plaats tijdens het taxiën, stationair draaien en mogelijk tijdens het landen mits de motor dan onbelast draait. Bij hogere stuwdruk is het meeste van de CH<sub>4</sub> in de uitlaatgassen waarschijnlijk afkomstig van de omgevingslucht die gebruikt wordt voor de verbranding (Wiesen et al, 1994), de gemeten concentraties bij hogere stuwdruk zijn ook in de orde van grootte atmosferische CH<sub>4</sub> concentraties (1-2 ppm). De conclusie is dat gedurende cruise omstandigheden geen CH<sub>4</sub> emissie plaats vindt en berekening van CH<sub>4</sub> emissie door bunkerbrandstoffen in de luchtvaart gebaseerd dient te worden op brandstofverbruik tijdens de LTO cycli. Tegelijkertijd vindt er volgens IPCC (1999) en KLM (2002) wel emissie van koolwaterstoffen plaats tijdens kruisvlucht. Dit is gebaseerd op berekening van de emissies volgens een methode gepubliceerd door Baughcum et al. (1996) en is voor het mondiale internationale luchtverkeer weergegeven in Tabel 7. Het lijkt onwaarschijnlijk dat CH<sub>4</sub> volledig zou ontbreken in het VOC profiel van deze koolwaterstofemissies. Op basis van Tabel 7 zou gebruikmakend van het VOC profiel uit Tabel 4 een CH<sub>4</sub> emissie van luchtverkeer geschat worden van 0.003 Tg/yr. De bijdrage van de luchtvaart aan het mondiale CH<sub>4</sub> budget van ~550 Tg/yr is dus zeer klein. Indien uit Tabel 7 een CH<sub>4</sub> emissiefactor afgeleid zou worden voor bunkerbrandstoffen in de luchtvaart bedraagt deze 0.1 g CH<sub>4</sub> /kg brandstof. Dit is aanzienlijk hoger dan de geadviseerde CH<sub>4</sub> emissiefactor van 0.015 g/kg brandstof (Tabel 9). De oorzaak van het verschil is dat bij de afleiding uit Tabel 7 CH<sub>4</sub> emissies tijdens kruisvlucht niet nul zijn verondersteld zoals in Tabel 9 en Tabel 3 (IPCC, 1997). Hoewel de emissiefactor afgeleid van Tabel 7 niet overgenomen wordt is het nuttig hier melding van te maken daar dit het verschil tussen verschillende (toekomstige) inventarisaties kan verklaren.

Tabel 7 Brandstofverbruik en koolwaterstofemissies van internationaal luchtverkeer 1982–92.

Jaar	Brandstof <sup>a)</sup>	Koolwaterstoffen <sup>a)</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>b)</sup>	CH <sub>4</sub> emissiefactor
	Tg/jr	Tg/jr	Tg/jr	g/kg brandstof
1982	19.2	0.02	0.002	0.10
1983	20.9	0.02	0.002	0.10
1984	24.7	0.03	0.003	0.12
1985	24.9	0.02	0.002	0.08
1986	26.7	0.03	0.003	0.11
1987	30.0	0.03	0.003	0.10
1988	32.6	0.03	0.003	0.09
1989	35.8	0.03	0.003	0.08
1990	37.2	0.04	0.004	0.11
1991	36.3	0.04	0.004	0.11
1992	39.3	0.03	0.003	0.08

a) bron: Schmitt and Brunner (1997), IPCC (1999).

b) methaan is afgeleid van koolwaterstoffen met het profiel van Shareef (1988), zie Tabel 4.

Tabel 8 Metingen van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> emissie uit vliegtuigmotoren.

Motortype	N <sub>2</sub> O Emissie (g N <sub>2</sub> O /kg brandstof)	CH <sub>4</sub> emissie (g CH <sub>4</sub> /kg brandstof)	Referentie
PW 305	0.11 ± 0.08	0.007-0.137 <sup>a)</sup>	Wiesen et al. (1994)
RB 211	0.05-0.55 (avg 0.15) <sup>b)</sup>	1-2 ppm <sup>c)</sup>	Wiesen et al. (1994)
CFM56-5C2	1.3 <sup>d)</sup>		Heland and Schäfer (1998)
F101 en F110		1-2 ppm	Spicer (1992)
Flame tube with low emissions concept fuel injector	0.004-0.2	0.01-1.2 <sup>e)</sup>	Wey and Lee (2002)

a) Hoogste waarde (0.137) komt overeen met 5.5% stuwdruk, laagste waarde (0.007) met 96% stuwdruk voor de PW 305 motor in tabel 6.

b) N<sub>2</sub>O concentraties nemen toe bij toenemende motorbelasting.

c) Onafhankelijk van de motorbelasting, concentraties gelijk aan omgevingslucht.

d) Bij onbelast stationair draaien was de N<sub>2</sub>O emissie beneden de detectielimiet, de hier gerapporteerde waarde geldt voor hogere stuwdruk overeenkomend met cruise condities.

e) enkel bij stationair draaien (lage stuwdruk) zijn de CH<sub>4</sub> emissies hoger dan de achtergrondconcentratie (~1.8 ppm).



## 2.5 Discussie

CH<sub>4</sub> emissie is het gevolg van onvolledige verbranding en de meetresultaten, hoewel slechts afkomstig van een beperkt aantal motoren, geven een duidelijk beeld. Bij een stuwkracht van 30% en hoger, dus ook tijdens kruisvlucht, is er geen noemenswaardige CH<sub>4</sub> emissie, enkel de emissie tijdens de LTO cyclus is van belang. Het is niet geheel duidelijk hoe deze observaties passen binnen de door IPCC (1999) berekende en goed onderbouwde koolwaterstofemissies tijdens kruisvlucht. Luchtvaartmaatschappijen rapporteren op basis van dezelfde methodiek eveneens koolwaterstofemissies tijdens kruisvlucht (KLM, 2002). Het is onwaarschijnlijk dat deze koolwaterstofemissies geen CH<sub>4</sub> bevatten doch voor het mondiale CH<sub>4</sub> budget is het verwaarloosbaar. In dit rapport wordt verder de CH<sub>4</sub> emissie tijdens kruisvlucht als verwaarloosbaar verondersteld, overeenkomstig IPCC (1997) en andere CH<sub>4</sub> emissie-inventarisaties, echter met de kanttekening dat er wel een ogenschijnlijke tegenstelling bestaat tussen deze aanname en de emissie van koolwaterstoffen tijdens kruisvlucht zoals berekend door IPCC (1999). Een mogelijke verklaring is dat de ingaande omgevingslucht-CH<sub>4</sub> (deels) verbrandt en de netto CH<sub>4</sub> emissie (opgebouwd uit omgevingslucht plus verbrandingsemisies) hierdoor onder de achtergrondconcentratie van 1.8 ppm blijft.

In de IPCC (1997) en CORINAIR methodologie wordt meer nauwkeurigheid gesuggereerd dan werkelijk voor handen is. VOC emissies per vliegtuig zijn bekend uit de ICAO emissie database maar de afleiding van CH<sub>4</sub> emissies hieruit is voor alle vliegtuigen hetzelfde volgens het VOC profiel van Shareef (1988) (VOC = 10% CH<sub>4</sub> + 90% NMVOC) dat ook gebruikt is door Olivier (1991). Hoewel het profiel van Shareef (1988), hier opgenomen als Tabel 4, het beste is wat voor handen is, is het niet onderbouwd door CH<sub>4</sub> metingen aan veel verschillende vliegtuigmotoren. Dit blijft een zwakke schakel maar vooralsnog is er geen reden om van het profiel in Tabel 4 af te wijken en is de conclusie dat CH<sub>4</sub> emissies van internationale bunkerbrandstoffen uit de luchtvaart geen significante bijdrage aan het mondiale CH<sub>4</sub> budget leveren.

Voor N<sub>2</sub>O is de situatie complexer. De range van de metingen van Wiesen et al. (1994) voor twee oudere typen motoren loopt van 0.05-0.55 g/kg brandstof (Tabel 8) doch de hoge waarden behoren tot de uitschieters in de metingen. Het gemiddelde van de metingen van Wiesen et al. (1994) bij een stuwdruk representatief voor cruise condities is 0.15 g/kg brandstof. De N<sub>2</sub>O emissie gerapporteerd door Heland and Schäfer (1998) is aanzienlijk hoger (Tabel 8). Heland and Schäfer (1998) suggereren dat dit mogelijk veroorzaakt wordt door het low-NO<sub>x</sub> design van de CFM56-5C2 motor, zij hebben echter ook een andere meetmethode gehanteerd (ground-based FTIR emissie spectroscopische analyse), wat ook een oorzaak van het verschil kan zijn. De CFM56-5C2 (hier geïnstalleerd op een Lufthansa Airbus A340) wordt beschouwd als de huidige state-of-the-art motortechnologie en de verwachting is dat dit type motor vooral op lange-afstandsvliegtuigen ingezet zal worden. Indien de N<sub>2</sub>O meting van Heland and Schäfer (1998) representatief voor nieuwere typen motoren zou zijn, dan zal in de toekomst de N<sub>2</sub>O emissie van vlieg-

tuigmotoren een grotere, maar nog steeds marginale, bijdrage aan het mondiale  $N_2O$  budget leveren.

In de afgelopen 30 jaar zijn vliegtuigmotoren efficiënter geworden en de verwachting als gevolg van hoge brandstofprijzen is dat deze trend door blijft gaan. Hierdoor zullen  $CH_4$  emissiefactoren zeker niet stijgen en mogelijk afnemen omdat brandstofverbranding geoptimaliseerd wordt.  $N_2O$  emissiefactoren voor de nieuwe vloot kunnen mogelijk hoger liggen dan voor de vloot die vervangen wordt. Een hogere  $N_2O$  emissiefactor kan het gevolg zijn van verschillende oorzaken, zoals hogere verbrandingstemperaturen of het terugdringen van andere emissies zoals  $NO_x$ . In de ontwikkeling van vliegtuigmotoren vinden twee verschillende ontwikkelingen plaats. Enerzijds gericht op hoge efficiency maar dit gaat gepaard met hoge  $NO_x$  emissies, anderzijds gericht op lage  $NO_x$  emissies, zoals de CFM56-5C2 uit de studie van Heland and Schäfer (1998). Daar de prioriteit in emissiereductie nadrukkelijk op  $NO_x$  is gericht is er weinig aandacht voor een eventuele (geringe) stijging in de  $N_2O$  emissies. Een set van  $N_2O$  emissiemetingen voor een range aan motortypen is momenteel niet beschikbaar en een éénduidige uitspraak over de emissiefactoren van de toekomstige vloot is daarom niet te geven. Door de toename van de passagierscapaciteit per vliegtuig in de nieuwe vloot verwacht men wel dat de emissies per passagier zullen dalen (EMEP/CORINAIR, 2001). Een ruwe berekening van de mondiale emissie in 1990 zoals uitgevoerd door Wiesen et al (1994) maar nu met de emissie-index van Heland and Schäfer (1998) (Tabel 8) suggereert dat de geschatte bijdrage aan het mondiale  $N_2O$  budget (16 Tg/jr, IPCC (2001)) dan ~1.4% zou zijn. Hoewel er momenteel onvoldoende metingen zijn om hier een meer definitieve uitspraak over te doen, geeft dit aan dat  $N_2O$  emissies uit vliegtuigmotoren ook in de toekomst geen belangrijke bijdrage aan het mondiale  $N_2O$  budget zullen leveren.

## 2.6 Testfaciliteit metingen versus in-situ meting op cruise hoogte.

Een probleem bij de vaststelling van de bronsterkte van vliegtuigemissies tijdens cruise condities was tot op heden dat de emissiemetingen allen gedaan waren aan vliegtuigmotoren in speciale, op de aarde gesitueerde, indoor faciliteiten. Het is onzeker of emissie indices afgeleid van dit type data ook representatief zijn voor vliegtuigen op cruisehoogte (9-13 km). Vay et al. (1998) hebben in-situ metingen van o.a.  $N_2O$  en  $CH_4$  gedaan in de uitlaatgassporen van een T-39, B-757 en DC-8 vliegtuig. Deze metingen zijn uitgevoerd door met een meetvliegtuig achter een ander vliegtuig aan te vliegen. Voor  $CH_4$  zijn de in-situ metingen in overeenstemming met eerdere waarnemingen in testfaciliteiten (o.a. Wiesen et al., 1994) en duiden erop dat vliegtuigen opererend onder cruisecondities een sink zijn voor  $CH_4$ . De uitgaande gassen bevatten lagere concentraties  $CH_4$  dan de inkomende omgevingslucht, dus ook een deel van de omgevingslucht  $CH_4$  wordt verbrand.  $N_2O$  bleek tijdens de in-situ metingen van Vay et al. (1998) geen belangrijke component van de uitlaatgassen te zijn, in overeenstemming met eerdere in-situ metingen van

Fahey et al. (1995). Daar  $N_2O$  concentraties ook in de studie van Fahey et al. (1995) onder de detectielimiet liggen kan uit de in-situ metingen enkel een bovenlimiet afgeleid worden van  $6.6 \text{ g kg}^{-1}$  brandstof. Deze limiet is aanzienlijk hoger dan de emissie-index van  $\sim 0.1 \text{ g kg}^{-1}$  brandstof zoals gemeten in de uitlaatgassen van vliegtuigmotoren in speciale hoogte testkamers. Zonder verdere observaties in uitlaatgaspluimen met een lagere verdunning kunnen in-situ metingen de  $N_2O$  emissie-index niet nauwkeuriger inperken.

## 2.7 Geadviseerde emissiefactoren voor $CH_4$ en $N_2O$ emissie door luchtvaart

Er zijn momenteel geen betere emissiefactoren voor handen dan nu door IPCC en EMEP geadviseerd worden. De  $N_2O$  emissiefactor tijdens cruise ( $0.1 \text{ g/kg}$  brandstof, Tabel 3) is erg onzeker. De gepubliceerde metingen verschillen onderling sterk, wat hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt wordt door de verschillende motoren waaraan gemeten is, m.a.w. de  $N_2O$  emissie tijdens cruise condities zou een specifieke eigenschap van het motortype kunnen zijn. De range in de metingen is  $0.1$ – $1.3 \text{ g/kg}$  brandstof. De IPCC default factor van  $0.1 \text{ g/kg}$  (Tabel 3) zit daarmee aan de onderkant van de range en onder de gemiddelden zoals gepresenteerd voor twee veel voorkomende motoren, respectievelijk de RB 211 (Wiesen et al., 1994) en de CFM56-5C2. (Heland and Schäfer, 1998). Het aantal vliegtuigmotoren waaraan daadwerkelijk  $N_2O$  tijdens cruise condities gemeten is, is echter dermate klein dat momenteel niet goed te zeggen is welke meetwaarde representatief is voor welk type motor. Het is daarom vooralsnog onverstandig om af te wijken van de IPCC default factor maar de verwachting is dat indien er meer metingen beschikbaar komen deze emissiefactor zal veranderen en naar boven toe bijgesteld moet worden. Op basis van de beschikbare metingen zou een “best guess” waarde  $0.3 \text{ g/kg}$  brandstof zijn, een factor 3 hoger dan de huidige IPCC default waarde. Deze “best guess” emissie-index ligt nog ruim onder de bovenlimiet afgeleid van de in-situ metingen (Fahey et al., 1995), terwijl juist de in-situ metingen in uitlaatgaspluimen van vliegtuigen op cruisehoogte bevestigen dat  $N_2O$  geen belangrijke component van de uitlaatgassen is. Dit alles duidt erop dat de IPCC default factor een onderschatting is maar er zullen eerst meer metingen beschikbaar moeten komen alvorens er goed onderbouwd een andere emissiefactor vastgesteld kan worden. Daarnaast zijn van vliegtuigen uitgerust met een zogenaamde turbopropmotor geen emissiemetingen bekend. Dit type vliegtuigmotor vertegenwoordigt ongeveer 10–20% van het brandstofverbruik in de commerciële luchtvaart. Hoewel het interne deel van de turbopropmotor niet wezenlijk anders is dan de meer algemene turbofanmotor zou het voor  $N_2O$  emissies toch verschil kunnen maken daar de verbrandingstemperatuur lager ligt.

De basis van de  $CH_4$  en  $N_2O$  emissiefactoren is te smal om tot definitieve goede emissiefactoren te komen. Voor  $N_2O$  wordt geadviseerd vooralsnog niet af te wijken van de nu door IPCC geadviseerde standaard emissiefactor van  $0.1 \text{ g/kg}$  brand-

stof, hoewel deze waarschijnlijk een onderschatting van de N<sub>2</sub>O emissies is. De geadviseerde N<sub>2</sub>O emissiefactor per LTO (Tabel 8) wijkt enkel af van de IPCC emissiefactor voor een “gemiddelde vloot” omdat de IPCC tier 1 methode toegepast is op Nederlandse data, de onderliggende emissiefactor per kg brandstof is dezelfde. De belangrijkste overweging om niet van IPCC emissiefactor af te wijken is dat emissies door verbranding van internationale bunkerbrandstoffen in de rapportage naar de UNFCCC vooral opgenomen worden door rapporterende landen voor de compleetheit van de emissie-inventarisaties, en gescheiden gehouden moeten worden van nationale emissies. De aan internationale bunkerbrandstoffen gerelateerde emissies vallen nadrukkelijk buiten het Kyoto Protocol. Het is daarom voor de overzichtelijkheid en transparantie gewenst dat landen voor deze internationale categorie geen afwijkende emissiefactoren introduceren, tenzij daar een goede onderbouwing voor is. Deze onderbouwing is voor de N<sub>2</sub>O emissiefactor nog niet voor handen, hoewel het werk van Heland en Schafer (1998) suggereert dat de huidige N<sub>2</sub>O emissiefactor een onderschatting is en niet op alle vliegtuigtypen van toepassing is. Conform de richtlijnen van IPCC zouden, indien er betere gegevens beschikbaar zijn, de IPCC emissiefactoren herzien moeten worden en zouden alle aan de UNFCCC rapporterende landen deze moeten overnemen.

Voor CH<sub>4</sub> wordt een andere emissiefactor dan de IPCC default waarde geadviseerd. De door IPCC gedefinieerde “gemiddelde” vloot (zie voetnoot bij Tabel 3) wijkt sterk af van de vloot op Nederlandse luchthavens (Bijlage 2) en tevens zijn de “gemiddelde” taxi-tijden die IPCC hanteert aanzienlijk langer dan het gemiddelde op Schiphol. Mede als gevolg hiervan is het brandstofverbruik per LTO op Schiphol veel lager dan IPCC als “gemiddeld” veronderstelt; op basis van de gegevens in Bijlage 2 kan berekend worden dat op Schiphol het gemiddeld brandstofverbruik 785 kg / LTO is, terwijl IPCC 2500 kg / LTO hanteert (Tabel 3). Zowel de verschillen in brandstofverbruik per LTO als de afwijkende vlootsamenstelling hebben aanzienlijke gevolgen voor de CH<sub>4</sub> emissie per LTO. Op basis van de vliegtuigtypen en het aantal LTO's per vliegtuigtype in Nederland (Klein et al., 2002), het motortype, brandstofverbruik en de VOC emissie-index per vliegtuigtype (ICAO, 1995) en het aandeel van CH<sub>4</sub> in totaal VOC (Shareef, 1988) is de CH<sub>4</sub> emissie per vliegtuig type berekend (Bijlage 2). De totale CH<sub>4</sub> emissie tijdens de 206994 LTO's in 2000 bedroeg 47.9 ton CH<sub>4</sub> bij een brandstofverbruik van 162384 ton. Hieruit volgt een CH<sub>4</sub> emissiefactor van 0.23 kg CH<sub>4</sub> / LTO of 0.3 g/kg brandstof. De waarde van 0.23 kg CH<sub>4</sub> / LTO is aanzienlijk lager dan de IPCC waarde van 1.5 kg CH<sub>4</sub> / LTO.

IPCC (1997) presenteert geen emissiefactoren voor cruise en LTO tezamen, maar uit bovenstaande gegevens kunnen dezen wel afgeleid worden. Voor N<sub>2</sub>O is dit éénvoudig daar de emissiefactor voor de LTO cyclus berekend is met de IPCC tier 1 methode, welke gebruik maakt van de algemene emissiefactor van 0.1 g/kg brandstof die eveneens tijdens kruisvlucht gehanteerd wordt. De N<sub>2</sub>O emissiefactor voor cruise en LTO tezamen blijft dus 0.1 g/kg brandstof. Voor CH<sub>4</sub> is berekend dat voor de Nederlandse situatie de CH<sub>4</sub> emissie tijdens LTO 0.3 g/kg brandstof is

terwijl tijdens kruisvlucht de CH<sub>4</sub> emissies nul is (Wiesen et al., 1994), dan wel minder dan de omgevingsluchtconcentratie is (zie Tabel 6 bij een stuwdruk van 30% of hoger). Uit een recente RIVM-studie (Jansen, 2002) kan afgeleid worden dat het aandeel van de LTO in het energiegebruik van vluchten vanaf Schiphol naar hun eindbestemming en terug circa 5% bedraagt. De emissiefactoren tijdens LTO en kruisvlucht kunnen nu gewogen worden naar hun aandeel in de het brandstofverbruik, respectievelijk 5 en 95%. Dit leidt tot een overall CH<sub>4</sub> emissiefactor van 0.015 g/kg brandstof (Tabel 8). NASA (1993, opgenomen in Olivier, 1995) stelt dat het brandstofgebruik tijdens LTO 11.3% van het totale brandstofverbruik is. In dit rapport is de op Schiphol gebaseerde waarde gebruikt. Het verschil met de hogere NASA aanname van 11.3% komt waarschijnlijk voort uit een groter aandeel lokale of nationale vluchten op Amerikaanse luchthavens waardoor het relatieve aandeel van LTO's in het totale brandstofverbruik toeneemt. Dit is consistent met het hogere brandstof verbruik per LTO uit de IPCC guidelines (Tabel 3) t.o.v. het werkelijke gebruik per LTO op Schiphol.

De geadviseerde emissiefactoren zijn samengevat in Tabel 8. Een uitgebreidere tabel met emissie per LTO “algemeen internationaal” en specifiek voor Nederland is gegeven in respectievelijk bijlage 1 en bijlage 2. Het voornaamste verschil is dat in Bijlage 1 en 2 niet een “gemiddelde” vloot verondersteld is (zie de noot bij Tabel 3) maar het karakteristieke brandstofverbruik per type vliegtuig per LTO gebruikt is om een vliegtuigspecifieke N<sub>2</sub>O emissie te krijgen en dat de CH<sub>4</sub> emissie per vliegtuig is afgeleid uit de totale koolwaterstofemissie onder de veronderstelling dat 10% hiervan CH<sub>4</sub> is.

De global warming potential van de uitlaatgasemissies in de luchtvaart wordt sterk gedomineerd door de CO<sub>2</sub> emissies (Tabel 9). De directe CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissies van vliegtuigmotoren leveren een geringe bijdrage aan de mondiale budgetten van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>.

Tabel 8 *Geadviseerde emissiefactoren voor verbranding van internationale bunkerbrandstoffen in de Luchtvaart.*

Luchtvaart vliegbeweging	Eenheid	CH <sub>4</sub> Emissiefactor <sup>a)</sup>		N <sub>2</sub> O Emissiefactor <sup>b)</sup>	
		IPCC (1997)	Advies	IPCC (1997)	Advies
LTO <sup>c)</sup> gemiddelde vloot	Kg/LTO <sup>c)</sup>	1.5	-	0.2	-
LTO oude vloot	Kg/LTO	7	7	0.2	0.2
LTO Nederland <sup>d)</sup>	Kg/LTO		0.23		0.08
Cruise	g/kg brandstof	0	0	0.1	0.1 <sup>e)</sup>
Over all (cruise + LTO) <sup>f)</sup>	g/kg brandstof	-	0.015	-	0.1

- a) Voor CH<sub>4</sub> en NMVOC is aangenomen dat de emissiefactoren voor LTO cycli respectievelijk overeenkomen met 10% and 90% van het totaal VOC. (Olivier, 1991). Gedurende cruise wordt geen CH<sub>4</sub> wordt geëmitteerd (Wiesen et al., 1994).
- b) Schattingen gebaseerd op Tier 1 default waarden (IPCC, 1997), de advieswaarde van 0.08 kg/LTO is eveneens berekend met de IPCC tier 1 methode maar gebruikmakend van de werkelijke Nederlandse vliegtuig en LTO gegevens (zie Bijlage 2).
- c) LTO = Landing en Take-Off cyclus
- d) Gemiddelde voor alle vliegtuigen met herkomst of bestemming Nederland.
- e) Onzekere factor. De range is 0.1-1.3 g/kg brandstof maar het aantal waarnemingen is te gering om af te wijken van de IPCC emissiefactor.
- f) Op basis van een recente RIVM-studie (Jansen, 2002) is afgeleid dat het aandeel van de LTO in het energiegebruik van vluchten vanaf Schiphol naar hun eindbestemming en terug circa 5% bedraagt. IPCC (1997) geeft geen over all emissiefactor voor de verbranding van bunkerbrandstoffen.

Tabel 9 *Emissies van CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O bij verbranding van internationale bunkerbrandstoffen in de internationale luchtvaart uitgedrukt in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton brandstof.*

Luchtvaart	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>a)</sup>		N <sub>2</sub> O <sup>a)</sup>	
		IPCC	Advies	IPCC	Advies
		<b>Kg CO<sub>2</sub> eq/ton brandstof</b>			
Over all (cruise + LTO) <sup>b)</sup>	3156	- <sup>c)</sup>	0.3	- <sup>c)</sup>	31

- a) De GWP (100 jr tijdshorizon) van CH<sub>4</sub> is 21 en van N<sub>2</sub>O is 310.
- b) Emissiefactoren afkomstig uit Tabel 8.
- c) IPCC geeft geen emissiefactor voor kruisvlucht en LTO tezamen.

### 3. Scheepvaart

De verbrandingsemissies van varende zeeschepen zijn een gevolg van de verbranding van scheepsbrandstof (de zogenaamde bunkerbrandstof of bunkerolie) in de scheepsmotor(en). De aard en de omvang van de verbrandingsemissies is afhankelijk van de soort en samenstelling van de brandstof en het motortype.

#### 3.1 Scheepsbrandstoffen

Bij het olieraffinage proces wordt de ruwe olie met behulp van een destillatie kolom gescheiden in een aantal fracties op basis van vluchtigheid. De zwaardere fracties hebben een hogere dichtheid en bevatten meer onzuiverheden dan de lichtere fracties. In de zeescheepvaart wordt hoofdzakelijk gebruik gemaakt van zware stookolie (residu brandstof) en voor een kleiner deel van scheepsgasolie/dieselolie (gedestilleerde brandstof).

##### *Zware stookolie*

Stookolie behoort tot een van de laatste fracties van het destillatieproces en wordt derhalve ook wel residuale brandstof of in het engels Heavy Fuel Oil (HFO) genoemd. De samenstelling van de residu olie is mede afhankelijk van de wijze waarop het olieraffinage proces heeft plaatsgevonden. De kwaliteit van zware stookolie neemt af in verband met het streven van olie raffinaderijen om zoveel mogelijk producten met een zo hoog mogelijke toegevoegde waarde te produceren. Deze trend is begonnen naar aanleiding van de oliecrisis begin zeventiger jaren en zorgt er voor dat de relatieve hoeveelheid residuale olie per eenheid ruwe olie verder terugloopt en dat in die kleiner wordende hoeveelheid steeds meer onzuiverheden als (zware) metalen en zwavel geconcentreerd worden (Jaspers et al., 1989). In 1995 is door de DCMR Milieudienst Rijnmond en het ministerie van VROM een onderzoek gestart naar de kwaliteit van bunkerolie in Nederland. Hieruit bleek dat als gevolg van de huidige manier van verwerken in de bunkerwereld veel onderzochte monsters af bleken te wijken van de referentie bunkeroliën en de (chemische) samenstelling dus aanzienlijk varieert (Veldman et al., 1997).

##### *Scheepsgasolie (of dieselolie)*

Scheepsgasolie is één van de gedestilleerde brandstoffen die vrijkomt bij het olieraffinage proces, in het engels Marine Diesel Oil (MDO), distillate oil of fuel. MDO is een lichtere fractie dan de HFO, maar zwaarder dan de gasolie of dieselolie zoals deze wordt toegepast in landdieselmotoren. De samenstelling van MDO is éénduidiger en minder variabel dan de samenstelling van HFO.

### 3.2 Scheepsmotoren

Het overgrote deel van de zeeschepen wordt aangedreven met behulp van een speciale scheepsdieselmotor. Binnen de groep zeeschepen wordt verder onderscheid gemaakt naar de zogenaamde “slow-speed” en “medium-speed” motoren. (high speed motoren worden met name toegepast in de binnenvaart en niet tot nauwelijks in de zee- en kustvaart). De overige zeeschepen worden aangedreven met behulp van een gas- of stoomturbine. (Tabel 11) Daarnaast is er een nog kleiner deel van de zeeschepen dat wordt aangedreven met behulp van stoomzuiger motoren of alternatieve energiebronnen als windenergie (Corbett et al, 1999). Dit soort schepen wordt voor de commerciële zeescheepvaart niet (meer) toegepast en wordt in het kader van dit rapport derhalve niet verder behandeld. Voor een uitgebreidere beschrijving van deze typen motoren alsmede combinaties brandstof - motortype wordt verwezen naar Hulskotte en Koch (2000).

*Tabel 11 Overzicht van de scheepsmotoren gebruikt in de commerciële zeevloot op de Noordzee, inclusief onderverdeling in %.(Lloyds, 1996).*

Motor type	Percentage [%]
Slow-speed diesel (SP):	66
Medium speed diesel (MS):	32
Gasturbine en Stoomturbine	2

Slow-speed dieselmotoren zijn groot, zwaar en zuinig, en worden in bijna 100% van de gevallen gestookt met zware stookolie (HFO) als brandstof maar kan ook scheepsgas/dieselolie (MDO) verbranden als brandstof. De voornaamste reden voor het gebruik van HFO heeft economische gronden. Medium-speed dieselmotoren zijn in staat om: MDO en HFO te verbranden. De zware stookolie (HFO) is in de aanschaf een stuk goedkoper dan de MDO en aangezien het brandstofverbruik van zeeschepen ongeveer de grootste kostenpost is, verdient de goedkopere brandstof, HFO, de voorkeur boven de duurere MDO (Corbett et al. 1999).

### 3.3 IPCC emissiefactoren

De belangrijkste brandstof voor internationale scheepvaart is zware stookolie. Het aandeel van dieselolie is langzaam gestegen van 11% in 1970 tot 20% in 1990. IPCC presenteert default emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O afkomstig uit de scheepvaart (Tabel 12) De belangrijkste onderliggende data voor de emissie factoren zijn afkomstig van het Marine Exhaust Emissions Research Programme (Lloyd's Register, 1995), waarin de emissies van 60 motoren van 50 verschillende schepen gemeten zijn. Dit programma wordt door IPCC (2001) beschouwd als de meest complete studie voor de medium- en langzame-snelheid dieselmotoren die de voornaamste aandrijfbron vormen voor zee- en oceaانvrachtschepen. De in Tabel 12 gerapporteerde emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en NMVOC zijn door IPCC (1997) afgeleid van de koolwaterstof emissie data (Lloyd's Register, 1995) volgens



$$CH_4 = 0.12 \times VOC \quad \text{en} \quad NMVOC = VOC - CH_4.$$

De IPCC default emissiefactoren zijn uitgedrukt in g/Mj. In Tabel 12 zijn deze emissiefactoren voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O ook omgerekend naar g/kg brandstof ter vergelijking met emissiefactoren uit andere bronnen. Een referentie of onderbouwing van de gehanteerde verdeling van VOC naar CH<sub>4</sub> (12%) en NMVOC (88%) wordt door IPCC (1997) niet gegeven.

Tabel 12 Default emissiefactoren van Oceaanvaarders met diesel motoren overwegend gestookt op zware stookolie (HFO) (IPCC, 1997).

eenheid	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NMVOC
(g/Mj)	0.007	0.002	0.052
g/kg brandstof <sup>a)</sup>	0.28	0.08	

<sup>a)</sup> Omgerekend met de stookwaarde van HFO = 40.19 MJ/kg (OECD/IEA, Paris, 1996).

### 3.4 Overige emissiefactoren

Ter vergelijking met de emissiefactoren volgens de IPCC (2001) good guidelines zijn ook andere emissiefactoren geïnventariseerd.

#### 3.4.1 Amerikaanse emissiefactoren

De huidige Amerikaanse N<sub>2</sub>O en NMVOC emissiefactoren voor de zeescheepvaart komen overeen met de IPCC emissiefactoren. De Amerikaanse CH<sub>4</sub> emissiefactor van 0.23 g/kg brandstof (EPA, 2001) is echter iets lager dan de IPCC emissiefactor (Tabel 12).

#### 3.4.2 EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook

Het Emission Inventory Guidebook (EMEP/CORINAIR, 2001) presenteert ook emissiefactoren voor de internationale scheepvaart (Tabel 13). EMEP/CORINAIR (2001) hanteert, overeenkomstig met IPCC (1997), een default waarde van 12% CH<sub>4</sub> in totaal VOC. In een vorige versie van het EMEP/CORINAIR Emissions Inventory Guidebook (1999) werd enkel een emissiefactor voor CH<sub>4</sub> uit scheepvaart op binnenwateren gepresenteerd, in de nieuwere versie zijn de IPCC methodologie en de emissiefactoren voor internationale scheepvaart overgenomen.

Tabel 13 Emissiefactoren voor de internationale scheepvaart (EMEP/CORINAIR, 2001).

Type motor	CH <sub>4</sub>	NM VOC	VOC	N <sub>2</sub> O
	g/kg brandstof			
Diesel engines	0.3 <sup>a)</sup>	2.4 <sup>a)</sup>	2.7 <sup>b)</sup>	0.08
Stoomturbine_scheepsgasolie (MDO) <sup>c)</sup>			0.5	
Stoomturbine_zware stookolie (HFO) <sup>c)</sup>			0.1	
Gasturbine <sup>c)</sup>			0.2	

a) berekend met aanname dat totaal VOC 12% CH<sub>4</sub> bevat, conform IPCC (1997).

b) Lloyd's register (1995).

b) Samengestelde factor voor slow-speed en medium-speed diesel motoren.

c) EPA (1985).

### 3.4.3 Taakgroep Verkeer en Vervoer

De Taakgroep Verkeer en Vervoer, bestaande uit experts van het CBS, RIVM, RIZA en TNO, heeft voor de Commissie Coördinatie Doelgroep Monitoring van de Inspectie Milieuhygiëne een rapport opgesteld "Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland" (Klein et al., 2002). In haar rapport adviseert de taakgroep voor niet-wegverkeer op diesel brandstof een N<sub>2</sub>O emissiefactor van 0.08 g/kg brandstof, en een CH<sub>4</sub> emissiefactor van 0.1 g/kg brandstof (berekend als overeenkomend met 4% van totaal VOC emissie) (Klein et al. 2002).

### 3.4.4 Emissiefactoren zeeschepen TNO-MEP

In 2000 heeft TNO-MEP in opdracht van MARIN/MSCW emissiefactoren voor schepen varende op de Noordzee afgeleid op basis van recente literatuur met een onderverdeling naar de voorkomende typen hoofdaandrijvingsmotoren en brandstoffen. De voor CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O relevante gegevens zijn samengevoegd in Tabel 14. De N<sub>2</sub>O emissiefactoren in Tabel 14 zijn afgeleid van emissiefactoren van wegverkeer met zware dieselmotoren in g/km en omgerekend naar g/kg brandstof. Deze omrekening blijkt een forse overschatting op te leveren en de N<sub>2</sub>O emissiefactoren in Tabel 14 dienen niet gebruikt te worden.

Tabel 14  $CH_4$  en  $N_2O$  Emissiefactoren voor zeeschepen naar type motor en brandstof (Hulskotte en Koch, 2000).

Type motor	$CH_4$ <sup>2)</sup>	$N_2O$
	g/kg brandstof	
Medium-speed Diesel motoren <sup>1)</sup>	0.11	0.68
Slow-speed Diesel motoren <sup>1)</sup>	0.11	0.68
Stoom turbine – zware stookolie (HFO)	0.004	0
Stoom turbine - scheepsgasolie (MDO)	0.02	0
Gas turbine - scheepsgasolie (MDO)	0.01	0.68

<sup>1)</sup> Zowel bij gebruik van zware stookolie (HFO) als scheepsgasolie (MDO).

<sup>2)</sup>  $CH_4$  is berekend als overeenkomend met 4% van de VOC emissie.

### 3.4.5 Overige literatuur

Cooper (2001) heeft uitlaatgas emissiemetingen gedaan aan boord van 3 passagiersveerboten gedurende hun normale route (Tabel 15). Hoewel deze studie enkel betrekking heeft op  $CH_4$  en  $N_2O$  zijn uit het werk van Cooper (2001) eveneens de NMVOC emissies overgenomen (Tabel 15). De NMVOC emissiemetingen maken het mogelijk op de bijdrage van  $CH_4$  aan totaal VOC te berekenen. Dit is relevant omdat in de meeste studies geen  $CH_4$  metingen gedaan zijn maar  $CH_4$  wordt afgeleid uit VOC metingen volgens een vast percentage. Uit Tabel 15 blijkt dat voor gasturbine motoren  $CH_4$  een aanzienlijk hoger percentage van totaal VOC is (9.4%) dan voor de medium-speed diesel motoren (2.4 en 6.4 %)

Tabel 15 Emissiefactoren voor 3 passagiersveerboten berekend op basis van jaarlijkse emissies en brandstofverbruik zoals gemeten door Cooper (2001).

Schip <sup>a)</sup> Motor type	A	B	C
	Conventioneel Medium-speed Diesel	Gas turbine motoren	Conventioneel Medium-speed Diesel met SCR <sup>b)</sup>
	g/kg brandstof		
$CH_4$	0.030	0.032	0.016
NMVOC	1.191	0.307	0.243
$N_2O$	0.153	0.291	0.070
% $CH_4$ van VOC	2.4%	9.4%	6.4%

<sup>a)</sup> Specificaties van de schepen zijn gegeven in Cooper (2001).

<sup>b)</sup> SCR, Selective Catalytic Reduction systeem voor  $NO_x$  reductie.

## 3.5 Discussie

### 3.5.1 CH<sub>4</sub> emissiefactoren voor de scheepvaart

Alle auteurs die CH<sub>4</sub> emissiefactoren presenteren die niet gebaseerd zijn op directe CH<sub>4</sub> emissie metingen, leiden deze emissiefactoren af van koolwaterstofemissies (HC of VOC) en citeren Lloyd's Register (1995) als originele bron voor de VOC data. Echter het veronderstelde aandeel CH<sub>4</sub> in de VOC emissies verschilt: IPCC (1997) en EMEP/Corinair (2001) berekenen CH<sub>4</sub> als 12% van gemeten VOC emissies, Hulskotte en Koch (2000) en Klein et al. (2002) berekenen CH<sub>4</sub> als 4% van de VOC emissies. Het werkelijke punt van discussie is dus wat het percentage CH<sub>4</sub> in het VOC profiel is.

De metingen van Cooper (2001) bevatten zowel CH<sub>4</sub> als NMVOC. Hieruit valt op te maken dat (1) de CH<sub>4</sub> emissiefactor aanzienlijke lager kan zijn dan de IPCC default waarde (~ factor 10 kleiner) en (2) dat voor de medium-speed diesel het percentage CH<sub>4</sub> van totaal 2-6% VOC is (Tabel 15). De metingen van Cooper (2001) zijn, hoewel zeer bruikbaar, slechts gebaseerd op 3 schepen en vormen daarmee een te kleine basis voor algemene conclusies met betrekking tot de internationale vloot. Echter de metingen van Cooper (2001) komen goed overeen met de 4% van Hulskotte en Koch (2000) en Klein et al. (2002). Twee andere profielen om CH<sub>4</sub> uit totaal VOC af te leiden bij verbranding in dieselmotoren zijn gegeven in de vorige editie van het EMEP/CORINAIR Emissions Inventory Guidebook (1999), respectievelijk 4% CH<sub>4</sub> (Tabel 11.1 p. B710-62) en 3.7% CH<sub>4</sub> van totaal VOC (Tabel 11.2 p. B710-63). Deze profielen en de meetdata van Cooper (2001) leiden tot de conclusie dat de IPCC default CH<sub>4</sub> emissiefactor van zeeschepen als gevolg van verbranding van bunkerbrandstoffen een overschatting met een factor 3 is door een te hoog % CH<sub>4</sub> in totaal VOC aan te nemen.

### 3.5.2 N<sub>2</sub>O emissiefactoren voor de scheepvaart

De metingen van Cooper (2001) rapporteert gemiddeld 0.11 g N<sub>2</sub>O /kg voor dieselmotoren, iets hoger dan IPCC & Corinair, EPA (0.08 g/kg). De emissiefactor van Hulskotte en Koch (2000) is met 0.68 g/kg aanzienlijk hoger dan de voorgaande emissiefactoren. Deze hoge emissiefactor is afgeleid van CBS (1995) en Baas (1991). Het gaat hierbij om emissiefactoren van dieselmotoren voor wegverkeer uitgedrukt in g/km die, middels een aanname van het brandstofverbruik, omgerekend zijn naar g/kg brandstof, wat tot aanzienlijke overschatting heeft geleid. De directe meting van Cooper (2001) wordt als de meest betrouwbare en transparante emissiefactor beschouwt. De emissiefactor van Cooper (2001) wijkt echter weinig van IPCC (1997) af (0.11 t.o.v. 0.08 g/kg), daarom wordt uit oogpunt van consistentie met de internationale rapportages aanbevolen vooralsnog de IPCC default emissiefactor aan te houden.

### 3.6 Toekomstige N<sub>2</sub>O emissies van schepen

Emissies van zeeschepen naar de atmosfeer staan de afgelopen 10 jaar nadrukkelijk in de belangstelling. Meetstudies van overwegend dieselmotoren van zeevarende schepen en de hierop volgende regionale- en mondiale emissie-inventarisaties hebben de scheepvaart aangewezen als een significante emissiebron van met name SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>. (Corbett et al. 1999), Het gevolg is dat er internationale druk en regelgeving in de maak is om scheepvaartemissies terug te dringen. Dit leidt tot de ontwikkeling en implementatie van nieuwe technologie gericht op NO<sub>x</sub> emissiereductie zoals SCR (Selective Catalytic Reduction) en directe waterinjectie (DWI). Verandering van NO<sub>x</sub> emissies zou gevolgen kunnen hebben voor de N<sub>2</sub>O emissies. Afgezien van enkele demonstratieprojecten worden er momenteel nog geen nageschakelde technieken zoals SCR toegepast in de scheepvaart. Vooralsnog zal men eerst andere technieken gebruiken zoals EGR (exhaust gas recirculation) en waterinjectie maar op langere termijn wellicht ook SCR. Bij alle technieken zijn geen additionele N<sub>2</sub>O-emissies te verwachten (H. Oonk, TNO-MEP, pers. mededeling). Dit is in overeenstemming met de metingen van Cooper (2001) die emissiemetingen heeft gedaan van boten aangedreven door een medium-speed diesel motor met en zonder SCR (respectievelijk boot C en A, Tabel 15).

### 3.7 Geadviseerde CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissiefactoren voor de scheepvaart

De voorgestelde emissiefactoren voor zeeschepen met dieselmotoren staan in Tabel 16. Uitgangspunt bij de CH<sub>4</sub> emissiefactor is dat deze afgeleid kan worden uit Lloyd's Register (1995) met de aanname dat de emissie van CH<sub>4</sub> overeenkomt met 4% van het totaal VOC. Het betreft hier een afwijking van de IPCC default waarde (zie sectie 3.5). Op basis van het literatuuronderzoek bleek er voor de N<sub>2</sub>O emissiefactor geen aanleiding te zijn om af te wijken van de IPCC default waarde.

Tabel 16 Voorgestelde emissiefactoren voor zeeschepen met diesel motoren overwegend gestookt op zware stookolie

	Eenheid	CH <sub>4</sub> Emissiefactor		N <sub>2</sub> O Emissiefactor	
		IPCC (1997)	Advies	IPCC (1997)	Advies
Zeeschepen met dieselmotoren <sup>d)</sup>	g/kg brandstof	0.3	0.1	0.08	0.08

Tabel 17 Emissies van CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O bij verbranding van internationale bunkerbrandstoffen in de internationale scheepvaart uitgedrukt in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton brandstof.

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>a)</sup>		N <sub>2</sub> O <sup>a)</sup>	
		IPCC	Advies	IPCC	Advies
	kg CO <sub>2</sub> eq/ton brandstof				
Zeeschepen met dieselmotoren <sup>b)</sup>	3160	6.3	2.1	25	25

<sup>a)</sup> De GWP (100 jr tijdshorizon) van CH<sub>4</sub> is 21 en van N<sub>2</sub>O is 310.

<sup>b)</sup> Emissiefactoren afkomstig uit Tabel 16.

Naast CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O zijn eveneens de CO<sub>2</sub> emissies gemeten van de schepen in Tabel 15. Op basis van de geschatte jaarlijkse emissies kan de global warming potential van de uitlaatgasemissies van de schepen berekend worden. Deze wordt gedomineerd door CO<sub>2</sub> terwijl emissies van N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> slechts 1-3% bijdragen (Cooper, 2001). De bijdrage van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O emissies vrijkomend bij de verbranding van bunkerbrandstoffen in de zeescheepvaart aan de klimaatforcering is dus zeer gering (Tabel 17). De verhouding van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O t.o.v. CO<sub>2</sub> zoals gevonden bij scheepsmotoren komt goed overeen met de verhouding voor motoren van landvoertuigen. Becker et al. (1999) rapporteren dat de global warming impact van N<sub>2</sub>O emissies van voertuigen 1-3% van hun CO<sub>2</sub> emissies bedraagt.

## 4. Adviezen voor toekomstig onderzoek

De hieronder gepresenteerde adviezen voor verder onderzoek zijn gebaseerd op de huidige studie en de geconstateerde kennisleemtes met betrekking tot  $N_2O$  en  $CH_4$  emissiefactoren voor de verbranding van bunkerbrandstoffen. Er vindt dus nadrukkelijk geen afweging plaats ten op zichte van noodzakelijk onderzoek aan andere bronnen dan wel andere emissies voortkomend uit de verbranding van bunkerbrandstoffen zoals bijv. fluctuaties van de  $CO_2$  emissies t.g.v. variërend koolstofgehalte van bunkerbrandstoffen.

### 4.1 luchtvaart

De  $N_2O$  emissiefactor tijdens cruisecondities is dermate onzeker en slecht onderbouwd dat meting van  $N_2O$  emissies uit enkele representatieve motortypes noodzakelijk is om een betrouwbare emissiefactor te verkrijgen. Op basis van de huidige literatuurstudie kan een “best guess” gemaakt worden van de  $N_2O$  emissiefactor, deze ligt een factor 3 tot 5 boven de huidige IPCC default waarde. De verwachting is dat aanvullend onderzoek tot vaststelling van een andere (hogere) emissiefactor zal leiden. De presentatie van Wey and Lee (2002) suggereert dat er in de nabije toekomst nieuwe  $N_2O$  metingen gepubliceerd zullen worden. In het *European Scientific Assessment of the Atmospheric effects of Aircraft Emissions* (Brasseur et al., 1998) wordt geconcludeerd dat directe  $CH_4$  en  $N_2O$  emissies van vliegtuigmotoren momenteel niet significant bijdragen aan de mondiale budgetten van  $N_2O$  en  $CH_4$ . Dit inzicht is in de afgelopen 4 jaar niet wezenlijk veranderd en wordt ook in de huidige literatuurstudie bevestigd. In die zin vormen  $CH_4$  en  $N_2O$  emissies van de luchtvaart geen cruciale onzekerheden.

### 4.2 scheepvaart

De koolwaterstoffen (VOC of HC) emissiedata voor schepen zoals beschikbaar door Lloyd's Register (1995) zijn een goede en bruikbare set. De afleiding van  $CH_4$  emissies uit deze set is echter slecht onderbouwd. Op basis van de geraadpleegde literatuur wordt geconcludeerd dat het aannemelijk is dat IPCC (1997) en EMEP/CORINAIR (2001) met 12% een te hoge fractie  $CH_4$  in het totaal VOC veronderstellen (zie sectie 3.5). Eerder gepubliceerde VOC profielen in EMEP/CORINAIR (1999) en de emissiemetingen van Cooper (2001) wijzen op een fractie van 2-6%  $CH_4$  in het totaal VOC, dit komt goed overeen met zware dieselmotoren in het wegverkeer waarbij doorgaans een fractie van ~4%  $CH_4$  in het totaal VOC wordt aangenomen. Er wordt in de huidige studie dan ook geadviseerd voor de  $CH_4$  emissiefactor van IPCC af te wijken. De bijdrage van  $N_2O$  en  $CH_4$  aan de global warming potential van de uitlaatgasemissies van de schepen is gering (zie sectie 3.7), dit is een legitieme reden om de onzekerheden in  $CH_4$  en  $N_2O$

emissies van schepen weinig prioriteit te geven in het onderzoek. Aan de andere kant is met simpele emissiemetingen van  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  en VOC in de uitlaatgassen van enkele representatieve scheepsdieselmotoren direct bruikbare informatie te krijgen die de onzekerheden in de emissiefactoren sterk zal reduceren. Dergelijke informatie zou, mits correct gepubliceerd, in alle emissie-inventarisaties gebruikt worden daar er momenteel slechts één studie (Cooper, 2001) is die dergelijke informatie presenteert. Gezien het belang van de afzet van bunkerbrandstoffen voor de scheepvaart in Nederland is het zeker te overwegen dit betrekkelijk kleine onderzoek in Nederland uit te voeren, hoewel mondiaal gezien de onzekerheid rondom de  $\text{N}_2\text{O}$  emissiefactor van vliegtuigen gedurende kruisvlucht belangrijker is.



## 5. Geraadpleegde literatuur

- [1] Baas, J., Literatuuronderzoek naar de lachgasemissie door het wegverkeer, IMW-TNO R 91/322, 1991.
- [2] Baughcum, S.L., S.C. Henderson, T.G. Tritz, and D.C. Pickett, Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis. NASA-CR-4700, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 196 pp., 1996.
- [3] Becker, K., J.C. Lörzer, R. Kurtenbach, P. Wiesen, T.E. Jensen and T.J. Wallington, Nitrous oxide emissions from vehicles, *Env. Sci & Tech.* 33 pp 4134-4139, 1999.
- [4] Brasseur, G.P., R.A. Cox, D. Hauglustaine, I. Isaksen, J. Lelieveld, D.H. Lister, R. Sausen, U. Schumann, A. Wahner, and P. Wiesen,: European scientific assessment of the atmospheric effects of air craft emissions. *Atmospheric Environment*, **32**, 2329-2418. 1998.
- [5] CBS, Emissies Mobiele Bronnen 1995, 1996 en Tijdsreeks, CD-ROM t.b.v. Emissiejaarrapport en Milieubalans, maart 1998.
- [6] Cooper, D.A., Exhaust emissions from high speed passenger ferries, *Atmospheric Environment* 35, 4189-4200, 2001.
- [7] Corbett J.J.; P. Fischbeck Emissions From Ships, *Science*, vol. 278, pag. 823-824, (1997).
- [8] Corbet, J.J.', P.S. Fischbeck, S.N. Pandis, Global nitrogen and sulphur emissions inventories for oceangoing ships, *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 3457-3470, (1999).
- [9] EMEP/CORINAIR, Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Third Edition. Copenhagen: European Environment Agency, 2001.
- [10] EMEP/CORINAIR, Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Second Edition. Copenhagen: European Environment Agency, 1999.
- [11] EPA, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990 – 1999, Annex D. (April 2001) EPA 236-R-01-001.

- [12] EPA (Environmental Protection Agency), *Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Volume II: Mobile Sources – Vessels, AP-42*, fourth edition, 1985.
- [13] Fahey, D.W., E.R. Keim; E.L. Woodbridge; R.S. Gao; K.A. Boering; B.C. Daube; S.C. Wofsy; R.P. Lohmann; E.J. Hints, *In situ observations in aircraft exhaust plumes in the lower stratosphere at midlatitudes*, *Journal of geophysical research*, vol. 100 pag. 3065-3074 (1995).
- [14] Heland, J. and K. Schäfer, *Determination of major combustion products in aircraft exhausts by FTIR emission spectroscopy*, *Atmospheric environment*, 32, pag. 3067-3072, 1998.
- [15] Hulskotte, J.H.J., en W.W.R. Koch, *Emissiefactoren zeeschepen*, TNO-Rapport, TNO-MEP – R2000/221, Apeldoorn, 32 p., 2000.
- [16] Hulskotte, J.H.J., *Onderzoek naar emissie-indices van de luchthaven Schiphol in 2001*, TNO-Rapport, TNO-MEP – R2002/219, Apeldoorn, 17 p., 2002.
- [17] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1997.
- [18] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Aviation and the Global Atmosphere*, Edited by: J. E. Penner, D. H. Lister, D.J. Griggs, D. J. Dokken, M. McFarland,, *IPCC Special Reports on Climate Change*, available at <http://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/index.htm>, 1999.
- [19] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 2001a.
- [20] ICAO (International Civil Aviation Organization): *ICAO Engine Exhaust Emissions Databank, 1st Edition--1995*. ICAO-9646-AN/943, International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec, Canada, 173 pp. , 1995.
- [21] Jansen, W.K., *Berekening van luchtvaartemissies voor verschillende allocatiemethoden*, RIVM rapportnr. 773002 023, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, 2002.
- [22] Jaspers, B.W., W. de Joode, H.W.J. op den Akker; *Residuale olie*; CMO-projectcode 89 C.1.16.1; TNO-IWECO, 1989.

- [23] Katzman, H., and W.F. Libby, 1975: Hydrocarbon emissions from jet engines operated at simulated high-altitude supersonic flight conditions. *Atmospheric Environment*, 9, 839–842.
- [24] Klein, J. et al, methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland, Rapportagereeks Milieumonitor Nr. 4, CCDM, 2002.
- [25] KLM, Milieujaarsverslag 2001/2002, 40 p., Koninklijke Luchtvaart Maatschappij nv, Amstelveen, 2002.
- [26] Lloyd's Register (1995), Marine Exhaust Emissions Research Programme, Lloyd's Register house, Croydon, England.
- [27] Lloyds Maritime Information Services (LMIS); Dataset of ships 100 GRT or greater; Stamford; Conn.; 1996.
- [28] Lohmann; E.J. Hintsa, In situ observations in aircraft exhaust plumes in the lower stratosphere at midlatitudes, *Journal of geophysical research*, 100 (D 2), pag. 3065-3074(1995)
- [29] OECD/IEA, *Energy Balances of OECD Countries, 1993-1994*. International Energy Agency, OECD, Paris, France, (1996).
- [30] Olivier, J.G.J., Inventory of aircraft emissions: a review of recent literature, 131 p. , RIVM-Rapport; 736301008, 1991.
- [31] Olivier, J.G.J, *Scenarios for Global Emissions from Air Traffic*, National Institute of Public Health and Environment (RIVM), Report No. 773 002 003, Bilthoven, the Netherlands. (1995).
- [32] Schmitt, A. and B. Brunner, Emissions from aviation and their development over time. In: *Final Report on the BMBF Verbundprogramm, Schadstoffe in der Luftfahrt* [Schumann, U., A. Chlond, A. Ebel, B. Kärcher, H. Pak, H. Schlager, A. Schmitt, and P. Wendling (eds.)]. DLR-Mitteilung 97-04, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen and Cologne, Germany, pp. 37-52, 1997.
- [33] Shareef, G.S., W.A. Butler, L.A. Bravo, M.B. Stockton, Air emissions species manual. Vol I: Volatile organic compound (VOC) species profiles, Radian corp. 1988., EPA report 450/2-88-003a.
- [34] Soete, G.G. De (1993), "Nitrous oxide from combustion and industry: Chemistry, emissions and control". In A.R. van Amstel, (ed.), *Proceedings of an International IPCC Workshop on Methane and Nitrous Oxide*:

*Methods in National Emissions Inventories and Options for Control*. RIVM Report No. 481507003, Bilthoven, The Netherlands.

- [35] Spicer, C.W., M.W. Holdren, D.L. Smith, D.P. Hughes, and M.D. Smith, 1992: Chemical composition of exhaust from aircraft turbine engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 114, 111–117.
- [36] Spicer, C.W., M.W. Holdren, R.M. Riggan, and T.F. Lyon, 1994: Chemical composition and photochemical reactivity of exhaust from aircraft turbine engines. *Annales Geophysicae*, 12, 944–955.
- [37] Vay, S.A.; B.E. Anderson; G.W. Sachse; J.E. Collins Jr; J.R. Podolske; C.H. Twohy; B. Gandrud; K.R. Chan; S.L. Baughcum, DC-8-based observations of aircraft CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and H<sub>2</sub>O(g) emission indices during SUCCESS, *Geophysical research letters*, vol. 25, pag. 1717-1720(1998).
- [38] Veldman W., A. Ligthart, C. Smit; Toezichtsactie “olievlek” Een beoordeling van de bunkeroliemarkt vanuit het perspectief van de handhaving. 1997; DCMR Rijnmond en Ministerie van VROM, werkdocument 1997/333. Nederland.
- [39] Veldt, C. en Most, P.F.J. van der, Emissiefactoren : Vluchtige organische stoffen uit verbrandingsmotoren. Hoofdinspectie Milieuhygiëne, Publicatiereeks Emissieregistratie; nr. 10, Den Haag, 1993.
- [40] Wey, C.-L. and C.-M. Lee, Nitrous Oxide and Methane Emissions from Combustors ICAO/CAEP Working Group 3 Third Meeting, May 14 – 15, 2002, Dallas, USA, 2002.
- [41] Weyrauther, G., J. Brosthaus, I. Hone and G. Schulz, Ermittlung der Abgasemissionen aus dem Flugverkehr über der Bundesrepublik Deutschland, TUV Rheinland, Köln, 1988.
- [42] Wiessen, P.; J. Kleffmann; R. Kurtenbach; C. Wahl and M. Kapernaum, Measurement of trace species in the exhaust of a reverse flow combustor., *Proceedings of the International Colloquium on Impact of Aircraft emissions upon the Atmosphere*, Paris, 15-18 October 1996, ONERA(1996).
- [43] Wiessen, P.; J. Kleffmann; R. Kurtenbach; K.H. Becker, Nitrous oxide and methane emissions from aero engines, *Geophysical research letters*, 21, pag. 2027-2030 (1994).

## 6. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Nederlandse onderneming voor energie en milieu (NOVEM)  
Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Dr.ir. H.A.C. Denier van der Gon	projectleider
Ir. J.H.J. Hulskotte	onderzoeker

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

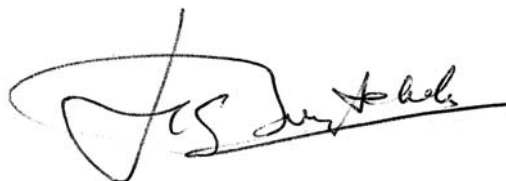
februari – mei 2002

Ondertekening:



Dr.ir. H.A.C. Denier van der Gon  
projectleider

Goedgekeurd door:



Ir. H.S. Buijtenhek  
afdelingshoofd

## Bijlage 1 Voorbeelden van vliegtuigtypen en emissiefactoren per LTO cyclus (Table 1-50; IPCC, 1997)

Aircraft type <sup>(a)</sup>	Emission factors (kg/LTO)							Fuel consumption (kg/LTO)
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>(b)</sup>	N <sub>2</sub> O <sup>(c)</sup>	NO <sub>x</sub>	CO	NM VOC <sup>(b)</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>(d)</sup>	
A300	5470	1	0.2	27.21	34.4	9.3	1.7	1730
A310	4900	0.4	0.2	22.7	19.6	3.4	1.5	1550
A320	2560	0.04	0.1	11	5.3	0.4	0.8	810
BAC1-11	2150	6.8	0.1	4.9	67.8	61.6	0.7	680
Bae 146	1800	0.16	0.1	4.2	11.2	1.2	0.6	570
B707*	5880	9.8	0.2	10.8	92.4	87.8	1.9	1860
B727	4455	0.3	0.1	12.6	9.1	3	1.4	1410
B727*	3980	0.7	0.1	9.2	24.5	6.3	1.3	1260
B737-200	2905	0.2	0.1	8	6.2	2	0.9	920
B737*	2750	0.5	0.1	6.7	16	4	0.9	870
B737-400	2625	0.08	0.1	8.2	12.2	0.6	0.8	830
B747-200	10680	3.6	0.3	53.2	91	32	3.4	3380
B747*	10145	4.8	0.3	49.2	115	43.6	3.2	3210
B747-400	10710	1.2	0.3	56.5	45	10.8	3.4	3390
B757	4110	0.1	0.1	21.6	10.6	0.8	1.3	1300
B767	5405	0.4	0.2	26.7	20.3	3.2	1.7	1710
Caravelle*	2655	0.5	0.1	3.2	16.3	4.1	0.8	840
DC8	5890	5.8	0.2	14.8	65.2	52.2	1.9	1860
DC9	2780	0.8	0.1	7.2	7.3	7.4	0.9	880
DC10	7460	2.1	0.2	41	59.3	19.2	2.4	2360
F28	2115	5.5	0.1	5.3	54.8	49.3	0.7	670
F100	2340	0.2	0.1	5.7	13	1.2	0.7	740
L1011*	8025	7.3	0.3	29.7	112	65.4	2.5	2540
SAAB 340	945	1.4(E)	0.03(E)	0.3(E)	22.1(E)	12.7(E)	0.3(E)	300(E)
Tupolev 154	6920	8.3	0.2	14	116.81	75.9	2.2	2190
Concorde	20290	10.7	0.6	35.2	385	96	6.4	6420
GAjet	2150	0.1	0.1	5.6	8.5	1.2	0.7	680

Source: ICAO (1995).

(a) Except where indicated, values are for world fleet weighted LTO fuel and emissions performance.

The average age of aircraft in service is 10-20 years old. Values for aircraft types marked with a \* are specific to older types with poorer emissions performance. Aircraft can be equipped with different engines.

(b) Assuming 10% of total VOC emissions in LTO cycles are methane emission (Olivier, 1991).

(c) Estimates based on Tier 1 default values.

(d) The sulphur content of the fuel is assumed to be 0.05%.

(E) Indicates that the figure is based on estimations.

## Bijlage 2    Aantal LTO's, emissiefactoren, emissie van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O en brandstofverbruik op Schiphol per vliegtuigtype in 2000

Vliegtuigtype <sup>a)</sup>	aantal LTOs <sup>a)</sup>	Motortype <sup>a)</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>b)</sup>	VOC <sup>b)</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>c)</sup>	N <sub>2</sub> O <sup>d)</sup>	CH <sub>4</sub> emis-	N <sub>2</sub> O emis-	Brandstof verbruik
							sie	sie	LTO's
			Ton/LTO	Kg/LTO		Kg/jr		Ton/jr	
Antonov 124/22/218/225	1	JT9D-20J	14.41	36.21	3.62	0.46	3.62	0.46	5
Boeing 747-100/SP/F	152	JT9D-7	8.66	32.01	3.20	0.28	486.57	41.81	418
Boeing 747-200	3396	CF6-50E2	9.49	20.66	2.07	0.30	7016.36	1022.74	10227
Boeing 747-300 pax	3375	CF6-50E2	9.49	20.66	2.07	0.30	6972.98	1016.41	10164
Boeing 747-400 pax	7521	CF6-80C2B1F	9.09	8.30	0.83	0.29	6244.55	2169.31	21693
Boeing 777-200	857	GE90-85B	6.23	0.33	0.03	0.20	28.65	169.39	1694
DC-10-30/40	2916	CF6-50C2	7.11	15.50	1.55	0.23	4518.49	658.63	6586
Airbus A330-200	118	CF6-80E1A1	5.14	4.54	0.45	0.16	53.58	19.26	193
Airbus A340 300	213	CFM56-5C3	5.34	2.65	0.26	0.17	56.36	36.08	361
Boeing 767-200/300	236	PW4056 Red. smoke	4.04	0.87	0.09	0.13	20.42	30.29	303
Boeing 767-300ER	9153	CF6-80C2B6F	4.04	3.98	0.40	0.13	3646.86	1175.11	11751
Ilyushin 86	2	NK-86	8.76	4.34	0.43	0.28	0.87	0.56	6
Lockheed Tristar L-1011-100	57	RB211-22B	6.17	48.59	4.86	0.20	276.97	11.16	112
Lockheed Tristar L-1011-200/500	25	RB211-524B series Package 1	7.64	44.88	4.49	0.24	112.20	6.06	61
MD-11	4384	CF6-80C2D1F	7.09	5.57	0.56	0.22	2443.59	986.13	9861
MD-11Fullfreighter	201	PW4X62 PHASE 3	7.67	2.39	0.24	0.24	48.03	48.91	489
Z Long-range P-Cat 6 (2 engines)	98	CF6-80C2A2	3.64	4.25	0.42	0.12	41.64	11.32	113
Airbus A300	1693	CF6-50C2	4.15	10.21	1.02	0.13	1728.45	223.03	2230
Airbus A310 100/200	316	CF6-80A3	3.60	2.24	0.22	0.11	70.66	36.10	361
Airbus A320	5336	CFM56-5-A1	1.85	0.40	0.04	0.06	213.06	314.17	3142
Airbus A321	6126	CFM56-5B2	2.36	0.79	0.08	0.08	483.27	459.83	4598
Boeing 737-400	17333	CFM56-3B-2	2.02	0.44	0.04	0.06	770.60	1108.79	11088
Boeing 757-200	7373	RB211-535E4	3.43	1.83	0.18	0.11	1352.42	802.02	8020
DC-8-50/60	1	JT3D-3B	4.45	64.10	6.41	0.14	6.41	0.14	1
DC-8-70	3	CFM56-2-C5	4.03	1.00	0.10	0.13	0.30	0.38	4
Airbus A310 300	1044	CF6-80C2A2	3.64	4.25	0.42	0.12	443.57	120.58	1206

Vliegtuigtype <sup>a)</sup>	aantal LTOs <sup>a)</sup>	Motortype <sup>a)</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>b)</sup>	VOC <sup>b)</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>c)</sup>	N <sub>2</sub> O <sup>d)</sup>	CH <sub>4</sub> emis- sie	N <sub>2</sub> O emis- sie	Brandstof verbruik LTO's
			Ton/LTO	Kg/LTO	Kg/jr	Ton/jr			
Airbus A319	1851	CFM56-5B4	2.03	0.89	0.09	0.06	164.39	119.42	1194
Belfast-Shorts	5	TYNE	2.10	4.00	0.40	0.07	2.00	0.33	3
Boeing 707	166	JT3D-3B	4.45	64.10	6.41	0.14	1064.06	23.45	235
Boeing 727-200	2	JT8D-15	3.46	5.45	0.55	0.11	1.09	0.22	2
Boeing 737-100/200	120	JT8D-15	2.31	3.63	0.36	0.07	43.62	8.79	88
Boeing 737-300	24901	CFM56-3-B1	1.87	0.55	0.05	0.06	1367.73	1477.50	14775
Boeing 737-500	6679	CFM56-3C-1	2.15	0.38	0.04	0.07	252.95	455.69	4557
Boeing 737-600	658	CFM56-7B20	1.73	0.66	0.07	0.05	43.68	36.11	361
Boeing 737-700	1374	CFM56-7B24	1.98	0.57	0.06	0.06	78.58	86.56	866
Boeing 737-800	10387	CFM56-7B26	2.12	0.48	0.05	0.07	498.94	700.56	7006
DC-9-40	1258	JT8D-11	2.25	3.29	0.33	0.07	413.98	89.89	899
DC-9-50	5	JT8D-17	2.37	3.59	0.36	0.08	1.80	0.38	4
L. Hercules C-130	1	T56-A7	1.89	6.00	0.60	0.06	0.60	0.06	1
Lockheed L100-10	1	AN 501 D22A	2.11	5.95	0.60	0.07	0.60	0.07	1
MD 80/82/87/88	3274	JT8D-217C	2.42	1.34	0.13	0.08	438.61	251.40	2514
MD 83/90/90-30	418	V2525-D5	2.08	0.05	0.00	0.07	1.96	27.61	276
Tupolev 154	107	D-30KU-154	4.43	8.80	0.88	0.14	94.19	15.06	151
AVRO RJ 85/70/100/115	46	LF507-1F,-1H	1.43	0.88	0.09	0.05	4.06	2.09	21
BAE 1-11 300/500	1	SPEY MK511	1.83	14.92	1.49	0.06	1.49	0.06	1
BAE 146 200/300	6296	ALF 502R-5	1.36	0.92	0.09	0.04	581.48	271.87	2719
Boeing 717-200	75	BR700-715B1-30	1.68	0.04	0.00	0.05	0.26	4.00	40
DC-9-10/20/30	418	JT8D-7B	1.98	3.11	0.31	0.06	129.82	26.29	263
Fokker 70	13400	TAY MK 620-15	1.61	0.94	0.09	0.05	1256.55	685.25	6852
Fokker F100	15174	TAY MK 650-15	1.78	0.98	0.10	0.06	1491.11	858.73	8587
Tupolev 134	37	D-30 (IL SERIES)	2.21	11.79	1.18	0.07	43.64	2.60	26
YAK 42	7	D-36	2.43	2.40	0.24	0.08	1.68	0.54	5
ATR 42	11811	PW120(calc)	0.29	0.43	0.04	0.01	511.85	109.76	1098
ATR 72	4769	PW127(calc)	0.40	0.60	0.06	0.01	284.07	60.92	609
BAE 146 100	1812	ALF 502L-2	1.54	1.31	0.13	0.05	237.83	88.79	888
BAE ATP	22	PW124(calc)	0.35	0.52	0.05	0.01	1.14	0.25	2
Canadair 100/200 ER	1289	PW124(calc)	0.35	0.52	0.05	0.01	67.03	14.37	144
Canadair CL 600/604	151	CF34-3A1 LECII	0.79	0.41	0.04	0.03	6.20	3.81	38
DHC Dash 8-100/300	12	PW124(calc)	0.35	0.52	0.05	0.01	0.62	0.13	1



Vliegtuigtype <sup>a)</sup>	aantal LTOs <sup>a)</sup>	Motortype <sup>a)</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>b)</sup>	VOC <sup>b)</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>c)</sup>	N <sub>2</sub> O <sup>d)</sup>	CH <sub>4</sub> emis- sie	N <sub>2</sub> O emis- sie	Brandstof verbruik LTO's
			Ton/LTO	Kg/LTO			Kg/jr		Ton/jr
			Embraer RJ 145	1523	CF34-3A LECII	0.79	0.41	0.04	0.03
Fokker F27	23	DART RDA7	0.65	6.77	0.68	0.02	15.57	0.48	5
Fokker F50	17498	PW124(calc)	0.35	0.52	0.05	0.01	909.96	195.14	1951
Saab 2000	1424	AE 2100A(calc)	0.71	2.25	0.23	0.02	320.64	32.00	320
Beechcraft 1900	10	PT6A-41	0.25	4.28	0.43	0.01	4.28	0.08	1
Beechcraft 200/300	1	PT6A-41	0.25	4.28	0.43	0.01	0.43	0.01	0
Beechcraft 90/100	1	PT6A-27	0.20	1.51	0.15	0.01	0.15	0.01	0
Br. Norman/Pilatus BN-2A	3	TIO-540-J2B2	0.07	0.60	0.06	0.00	0.18	0.01	0
Cessna 406/414/421	1	GA TPE 331-2	0.19	2.49	0.25	0.01	0.25	0.01	0
Cessna 550/650	2	TFE731-3	0.24	0.39	0.04	0.01	0.08	0.02	0
Dornier 328-100	5982	PW124(calc)	0.31	0.52	0.05	0.01	308.87	58.37	584
Dornier 328-Jet	469	PW 306B(calc)	0.57	0.69	0.07	0.02	32.28	8.53	85
Embraer 110	2	PT6A-27	0.20	1.51	0.15	0.01	0.30	0.01	0
Embraer 120/121	817	PW120(calc)	0.29	0.43	0.04	0.01	35.41	7.59	76
Metro/Merlin	79	GA TPE 331-2	0.19	2.49	0.25	0.01	19.71	0.47	5
Saab SF340	506	CT7-5(calc)	0.28	0.19	0.02	0.01	9.74	4.50	45
Short 330/360	195	PT6A-41	0.25	4.28	0.43	0.01	83.49	1.52	15
Z Business-prop (1 engine)	1	Allison 250-C20	0.07	0.46	0.05	0.00	0.05	0.00	0
<b>Totaal</b>	<b>206994</b>						<b>47932</b>	<b>16238</b>	<b>162384</b>

a): Klein et al. (2002)

b): ICAO (1995)

c): afgeleid van totaal VOC met VOC profiel van Shareef (1988)

d): IPCC (1997) tier1 methodiek