

**CE**

**Oplossingen voor  
milieu, economie  
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

## **FLEXSYT geactualiseerd**

Een update van de  
milieuparameters

### **Eindrapport**

Delft, november 2004

Opgesteld door: L.C. (Eelco) den Boer

J.B. (Jens) Nielsen

J.P.L (Joost) Vermeulen

Met medewerking van: T.C. (TjongCho) Wang (Goudappel Coffeng)



# Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

L.C. (Eelco) den Boer, J.B. (Jens) Nielsen, J.P.L. (Joost) Vermeulen  
FLEXSYT geactualiseerd  
Een update van de milieuparameters  
Delft, CE, 2004

Verkeer / Vervoer / Motorvoertuigen / Meetmethoden / Milieu / Effecten /  
Emissies / Brandstoffen / Consumptie /

Publicatienummer: 04.4824.38

Alle CE-publicaties zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Opdrachtgever: Adviesdienst Verkeer en Verkeer.  
Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij Eelco den Boer.

## **CE**

### **Oplossingen voor milieu, economie en technologie**

CE is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

## **CE-Transform**

### **Visies voor duurzame verandering**

CE-Transform, een business unit van CE, adviseert en begeleidt bedrijven en overheden bij veranderingen gericht op duurzame ontwikkeling.

De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Dit rapport is gedrukt op 100% kringlooppapier.

# Inhoud

Samenvatting	1
1 Aanleiding en doelstelling	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doelstelling en achtergrond	3
1.3 Opbouw rapport	3
2 Aanpak	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Actualisatie FLEXSYT	5
2.3 Emissieparameters: personenauto's en bestelauto's	6
2.4 Emissieparameters: vrachtauto en bus	6
3 Update van de algemene parameters	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Personenauto's en bestelauto's	7
3.2.1 Aandeel van verschillende voertuigtypen in de kilometrage	7
3.2.2 De gemiddelde massa	8
3.2.3 Motorinhoud, luchtweerstandcoëfficiënt en stationair brandstofgebruik	8
3.2.4 Emissiecoëfficiënten zwavel	8
3.3 Vrachtauto's en bussen	9
3.4 Trams	9
3.4.1 Emissieparameters elektriciteitsvoorziening	10
3.5 Samenvattend	11
4 Update van de emissieparameters	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Testopzet personenauto's en bestelauto's	13
4.2.1 Gemiddelde emissies per brandstoftype over typegoedkeuringscyclus	13
4.2.2 Test A: de oorspronkelijke FLEXSYT waarden	14
4.2.3 Test B: nieuwe voertuig-, emissie- en brandstofparameters	15
4.2.4 Test C: verder verfijnde emissieparameters	17
4.3 Test vrachtauto's en bussen	17
4.4 Samenvattend	19
5 Conclusies	21
5.1 Beschrijvend vermogen FLEXSYT	21
5.2 Geactualiseerde parameters	21
5.3 Discussie modelopzet en algemene aanbevelingen voor verbeteringen	22
Literatuur	23
Symbolenlijst	25

A	De oorspronkelijke milieumodule in FLEXSYT	29
B	Europese emissienormen	35

# Samenvatting

## Inleiding

AVV gebruikt het microscopisch rekenmodel FLEXSYT om op voertuigniveau de effecten van verkeersmaatregelen op de verkeersafwikkeling te kunnen beoordelen. Het model bevat een module waarmee verschillende milieueffecten, zoals het brandstofverbruik en emissies van luchtverontreinigende stoffen, berekend kunnen worden. De milieumodule stamt uit het begin van de jaren negentig. Een aantal ontwikkelingen hebben ervoor gezorgd dat de milieueffecten van verkeer veranderd zijn, door met name een verbeterde brandstofkwaliteit en de strenger geworden emissienormen. Ook is de populariteit van de dieselauto sterk toegenomen. Bovenstaande noties zijn voor AVV een aanleiding om de milieumodule in FLEXSYT te actualiseren. AVV heeft CE gevraagd dit uit te voeren.

## Twee parallele trajecten

De milieumodule in FLEXSYT bestaat uit formules afkomstig van een aantal empirische modellen, die het emissiegedrag van voertuigen bepalen. Deze formules bevatten enerzijds empirische modelparameters en anderzijds algemene kenmerken van voertuigen en brandstoffen. De algemene kenmerken zijn geactualiseerd door recente data te verzamelen ten aanzien van onder andere voertuigmassa's, zwavelgehalten in brandstoffen en aandelen van de verschillende voertuigtypen in de kilometrage.

De parameters uit het empirische model zijn voor lichte voertuigen<sup>1</sup> geactualiseerd door de uitkomsten van modelruns te vergelijken met bekende testdata. De typegoedkeuringsdata van een groot aantal personenauto's is vergeleken met de uitkomsten van een door Goudappel Coffeng ontwikkeld rekenprogramma, waarin emissies over de ritcyclus voor de Europese typegoedkeuring berekend worden met de FLEXSYT-formules. Voor zware voertuigen is de bovenstaande aanpak niet mogelijk, omdat geen testdata over een ritcyclus voorhanden is. Daarom hebben we de FLEXSYT-data vergeleken met bekende praktijkdata.

## Een groot aantal parameters aangepast

Uit de testen is gebleken dat het beschrijvend vermogen van FLEXSYT voldoende is. Een test met 'oude waarden' levert een beeld op dat verwacht mag worden voor voertuigen uit het begin van de jaren negentig. Een groot aantal parameters is aangepast op basis van nieuwe statistische informatie of aanpassingen voortkomend uit de vergelijkende testen.

## Emissies beter voorspeld voor huidig wagenpark

Het beschrijvend vermogen van FLEXSYT is voldoende om vrij eenvoudige netwerken met weinig dynamiek te modeleren. Wanneer echter ritten worden geprogrammeerd met een dynamischer karakter, zoals file-rijden, voldoet FLEXSYT waarschijnlijk niet, omdat tegenwoordig vertragingen in katalysatorregelingen een

---

<sup>1</sup> Met lichte voertuigen bedoelen we personenauto's en bestelauto's.

rol spelen die in het verleden nog niet bestonden. Dit geldt met name voor benzineauto's met katalysator.

De formules voor lichte voertuigen zijn verfijnder dan die voor vrachtauto's. Voor deze laatste categorie worden emissies berekend op basis van een aantal simpele lineair veronderstelde relaties.

Ondanks de bovengenoemde beperkingen beschrijft FLEXYT de emissieniveaus van de verschillende voertuigtypen met aangepaste parameters veel beter dan voorheen voor de gemiddelde auto's van vandaag.

# 1 Aanleiding en doelstelling

## 1.1 Aanleiding

AVV gebruikt het microscopisch rekenmodel FLEXYT om op voertuigniveau de effecten van verkeersmaatregelen op de verkeersafwikkeling te kunnen beoordelen. Met behulp van het model kan onderzoek verricht worden naar de effecten op de verkeersafwikkeling van de structuur van een netwerk, zoals de geometrie van de kruispunten, de lengte van de opstelstroken, het aantal rijstroken, en naar het effect van benuttingsmaatregelen, zoals verkeerslichtenregelingen en toeritdoserings.

Het model bevat een module waarmee verschillende milieueffecten, zoals het brandstofverbruik en emissies van luchtverontreinigende stoffen berekend kan worden. De parameters in deze module zijn aan herziening toe. De milieuparameters dateren uit het begin van de jaren negentig. Sindsdien hebben zich een groot aantal ontwikkelingen voorgedaan. De belangrijkste ontwikkelingen zijn Europese wetgeving ten aanzien van brandstofkwaliteit (zwavel, lood) en de strenger geworden emissienormen. Daarnaast is ook de stijgende populariteit van de dieselauto een belangrijke ontwikkeling die ervoor zorgt dat de huidige samenstelling van het wagenpark anders is dan bij de introductie van FLEXYT. Om deze redenen heeft AVV aan CE gevraagd de rekenparameters ten aanzien van het milieu weer up-to-date te maken.

## 1.2 Doelstelling en achtergrond

Het doel van het project is de verouderde milieuparameters te herzien. Een door AVV aangegeven randvoorwaarde daarbij zoveel mogelijk de oorspronkelijke formules te behouden.

Een aantal algemene parameters kan aangepast worden, zonder dat een test met het model nodig is. Daarbij valt te denken aan de massa van een voertuig, het zwavelgehalte van de brandstof en de emissies van een elektriciteitscentrale. Een ander deel van de parameters, de zogenaamde emissiecoëfficiënten, kunnen niet zonder meer worden aangepast, omdat ze onderdeel uitmaken van een set aan empirische formules. Deze worden aan de hand van een test over het ritprofiel van de Europese typegoedkeuringscyclus, waarvoor testdata beschikbaar is, en bekende praktijkdata bijgesteld.

## 1.3 Opbouw rapport

De update van de algemene parameters en de emissiecoëfficiënten behandelen we los van elkaar, in afzonderlijke hoofdstukken. In hoofdstuk 2 beginnen we met een overzicht van de aanpak van het actualisatieproces. Vervolgens beschrijven we in hoofdstuk 3 de nieuwe waarden voor de algemene parameters. In hoofdstuk 4 gaan we in op de resultaten van een aantal testen waarmee we de emissiecoëfficiënten actualiseren. We sluiten het rapport af met een aantal conclusies

over onder andere de bruikbaarheid van FLEXYT. Daarnaast geven we een aantal aanbevelingen.

Voor een goed begrip van de emissiemodule, beschrijven we de formules die deel uitmaken van de emissiemodule in bijlage A.

Dit rapport kan in principe los gelezen worden van het rapport 'voorstudie milieuformules FLEXYT' dat in 1993 door Goudappel Coffeng geschreven is. Echter, het rapport uit 1993 geeft een meer compleet overzicht van de formules en bijbehorende overwegingen. We beschouwen dit dan ook als een basiswerk voor FLEXYT.





## 2 Aanpak

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk lichten we de gekozen aanpak toe. We onderscheiden twee verschillende parallele processen die we vervolgens verder uitwerken.

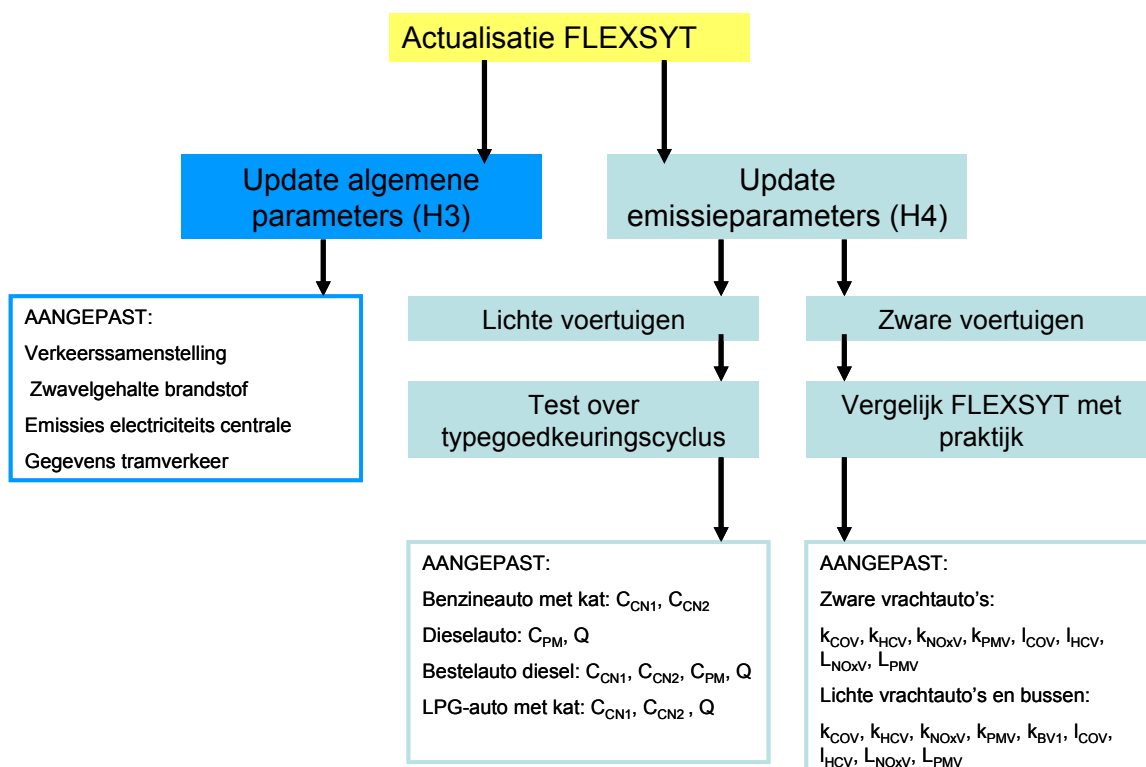
### 2.2 Actualisatie FLEXYT

De formules in FLEXYT zijn afkomstig uit een aantal empirische modellen, welke in de jaren negentig veelvuldig gebruikt zijn. In bijlage A zijn deze formules opgenomen. De parameters in de formules van FLEXYT zijn te onderscheiden in twee categorieën:

- algemene parameters (verkeerssamenstelling, zwavelgehalte);
- emissieparameters.

In figuur 1 onderscheiden we de actualisatie van beide categorieën parameters in twee parallele processen. De eerstgenoemde algemene parameters kunnen geactualiseerd worden door praktijkdata te verzamelen. De laatstgenoemde zijn empirische parameters in het model. Voor een actualisatie van deze parameters dienen er een aantal testen te worden uitgevoerd, waarin de modeloutput (emissies in g/km) wordt geverifieerd met praktijkdata over eenzelfde ritpatroon.

figuur 1 Schematische weergave van de aanpak actualisering FLEXYT



### **2.3 Emissieparameters: personenauto's en bestelauto's**

Voor lichte voertuigen kan FLEXSYT worden geactualiseerd door de bekende typegoedkeuringsdata te vergelijken met de FLEXSYT-output over dezelfde Europese typegoedkeuringscyclus. Door Goudappel Coffeng is een rekenprogramma geprogrammeerd dat een voertuig over de Europese typegoedkeuringscyclus laat rijden, waarbij energiegebruik en emissies worden berekend met de FLEXSYT-formules. In een aantal iteratiestappen kunnen de emissiecoëfficiënten uit de empirische formules zo aangepast worden dat de FLEXSYT-emissies overeenkomen met het parkgemiddelde van de typegoedkeuringsdata. Drie testen worden uitgevoerd:

- een test met alle oude parameters ( beschrijvend vermogen onderzoeken);
- een test met de nieuwe algemene parameters;
- een test met zowel de nieuwe algemene parameters als aangepaste emissiecoëfficiënten.

Deze testen leveren een overzicht van aangepaste emissiecoëfficiënten voor lichte voertuigen op.

### **2.4 Emissieparameters: vrachtauto en bus**

Voor vrachtauto's en bussen is het niet mogelijk om soortelijke testen als voor personenauto's uit te voeren. Bij de typegoedkeuring van zware voertuigen worden emissies gemeten per hoeveelheid afgegeven vermogen (gram per kWh), niet per kilometer. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de parameters voor zware voertuigen vergelijken we de emissies van de vrachtauto's en bussen met de praktijkgegevens uit de nationale emissieregistratie, die TNO en RIVM onder andere opstellen.

### 3 Update van de algemene parameters

#### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zoeken we naar nieuwe waarden voor de algemene modelparameters. Achtereenvolgens behandelen we deze parameters voor personenauto's en bestelauto's, zware voertuigen en trams.

#### 3.2 Personenauto's en bestelauto's

##### 3.2.1 Aandeel van verschillende voertuigtypen in de kilometrage

De verkeerssamenstelling van lichte voertuigen is een milieuparameter in FLEXYT die door de gebruiker aangepast kan worden. FLEXYT bevat een set defaultwaarden. De parksamenstelling is het laatste decennia aanzienlijk veranderd, vanwege de flinke toename van de verkeersprestatie en de toename in populariteit van de dieselauto. Voor beide voertuigcategorieën is het aandeel diesel flink toegenomen. Bestelauto's rijden tegenwoordig zelfs nagenoeg alleen nog maar op diesel. In tabel 1 presenteren we de verkeersprestatie voor verschillende voertuigcategorieën.

tabel 1 Personenauto's en bestelauto's (mln vkm in 2002 en aandeel gewogen naar verkeersprestatie)

	<b>Benzine mk</b>	<b>Benzine zk</b>	<b>Diesel</b>	<b>LPG</b>
<b>Personenauto</b>	57.412	9.810	26.712	7.077
<b>Aandeel totaal lichte voertuigen (%)</b>	48	8	22	6
<b>Bestelauto</b>	418	371	16.998	489
<b>Aandeel totaal lichte voertuigen (%)</b>	~0	~0	16	~0

Bron: Taakgroep Verkeer, 2004b

De verhouding tussen LPG voertuigen met en zonder katalysator schatten we in als gelijk aan de verhouding voor benzine, 17% zonder katalysator en 83% met katalysator.

We adviseren de optie 'carpoolvoertuig' niet meer te gebruiken in het model, omdat dit tegenwoordig niet meer actueel is. Bovendien zijn de milieueffecten van een carpoolvoertuig nauwelijks verschillend van een gewoon voertuig. Gezien het hoge aandeel diesel voor bestelauto's en de ontwikkelingen die de laatste jaren op de markt hebben plaats gevonden, zullen we voor bestelauto's op benzine en LPG buiten beschouwing laten. De laatste jaren is de verkoop van voertuigen met grijs kenteken op benzine en LPG vrijwel nihil. De verwachting is dat dit nog verder af zal nemen.

### 3.2.2 De gemiddelde massa

Door de jaren heen is de massa van auto's toegenomen. Dit heeft te maken met de toegenomen motorvermogen, meer veiligheidsvoorzieningen als airbags en stalen balken in portieren en allerhande voorzieningen als airconditioners en stuurbevestiging.

De gemiddelde massa van een benzineauto is het kleinste, de gemiddelde LPG-auto is zwaarder en de dieselauto is het zwaarst. Dit heeft enerzijds te maken met de motortechniek; een LPG-auto heeft een extra stalen gastank en een dieselmotor is zwaarder vanwege de zwaardere motorconstructie. Anderzijds zijn, vanwege de accijnsstelling, diesel en LPG sterker vertegenwoordigd onder de veelrijders, die gemiddeld genomen in grotere en zwaardere auto's rijden. Voor de inzittenden hebben we aangenomen dat er zich gemiddeld 1.6 personen in een auto zitten, maar deze waarde varieert natuurlijk gedurende de dag en per reisdoel. Een overzicht van de massa van auto's is weergegeven in tabel 2.

tabel 2 Gemiddelde massa van personenauto en bestelauto (kg)

		<b>Benzine</b>	<b>Diesel</b>	<b>LPG</b>
<b>Personenauto</b>	massa leeg	1.000	1.200	1.150
	inzittenden + bagage	120	120	120
	totaal	1.120	1.320	1.270
<b>Bestelauto</b>	massa leeg		1.700	
	inzittenden + bagage		400	
	totaal		2.100	

Bron: gebaseerd op [CBS, 2004]

### 3.2.3 Motorinhoud, luchtweerstandcoëfficiënt en stationair brandstofgebruik

De voertuigmassa (tabel 2) wordt gebruikt om motorinhoud en de luchtweerstandcoëfficiënt van de voertuigen te berekenen. De formule voor de motorinhoud van personenauto lijkt de werkelijkheid nog goed te beschrijven. Volgens de bestaande formules in FLEXYT is de motorinhoud van een benzineauto toegenomen tot 1,7 liter gemiddeld, tot 1,9 liter voor een LPG-auto en tot 2,0 liter gemiddeld voor een dieselauto. De motorinhoud wordt vervolgens gebruikt om het stationaire brandstofgebruik te berekenen. De formules voor de berekening van deze parameters zijn weergegeven in tabel 17 (bijlage A). We zien geen aanleiding om de formules of de parameters in de formules aan te passen.

### 3.2.4 Emissiecoëfficiënten zwavel

De emissies van zwavel uit voertuigen hangen af van het brandstofverbruik en de zwavelgehalten van de brandstoffen. De zwavelgehalten zijn de laatste 10 jaar flink gedaald, onder druk van Europese regelgeving. In tabel 3 geven we de zwavelgehalten voor benzine en diesel weer.

tabel 3 Zwavelgehaltenes (Ds) wegbrandstoffen (2002)

	Zwavelgehalte (mg/kg)
<b>Benzine</b>	70
<b>Diesel</b>	48

Bron: Taakgroep Verkeer, 2004

Vergeleken met de oude zwavelgehaltenes (150 en 2.000 mg/kg voor respectievelijk benzine en diesel) zijn de nieuwe getallen veel lager.

### 3.3 Vrachtauto's en bussen

De formules in FLEXSYT voor de berekening van brandstofgebruik en emissies zijn vrij eenvoudig en bevatten veel constanten. Zo is bijvoorbeeld de massa van een vrachtauto geen variabele. Het brandstofgebruik is per tijdseenheid constant voor een aantal voertuigstatussen. Het aanpassen van de logistieke gegevens heeft daarom geen effect op de berekeningen in FLEXSYT. Echter, voor de volledigheid geven we gemiddelde massa inclusief lading voor de verschillende zware voertuigen weer in tabel 4.

tabel 4 Gegevens vrachtauto's en bussen

	Lichte vrachtauto	Zware vrachtauto	Bus
<b>Totale voertuigmassa (ton)</b>	11	28	13

Bron: CE, 2004a

### 3.4 Trams

De laatste 10 jaar is het park aan trams met name in Amsterdam (Siemens Combino) en Rotterdam (Alstom Citadis) flink veranderd. In deze steden zijn grote aantallen nieuwe trams gekocht, die gaandeweg het stadsbeeld gaan bepalen. De nieuwe trams zijn iets zwaarder dan de oudere types, met name vanwege het grotere oppervlak aan glas in deze trams. In tabel 5 geven we enkele gegevens over deze trams weer.

tabel 5 Achtergrondgegevens trams

	Type tram	Instromend aantal	Massa leeg (kg)
<b>Amsterdam</b>	Combino	155	33.455
<b>Rotterdam</b>	Citadis	60	36.757

Deze nieuwe trams worden bovengemiddeld ingezet, omdat ze efficiënter en comfortabeler zijn dan de oude trams. De verwachting is dat deze trams een steeds groter deel van de vervoersprestatie zullen verzorgen. Het aandeel van de trams dat in staat is energie terug te leveren aan de bovenleiding is weliswaar toegenomen, maar dat wil niet zeggen dat de energie altijd nuttig kan worden gebruikt. De remenergie kan alleen nuttig worden gebruikt wanneer er een op-

trekkende tram in het zelfde compartiment rijdt of als er vraag naar warmte in de tram is<sup>2</sup>. Het aandeel nuttig aan te wenden remenergie is dan ook niet eenvoudig in te schatten [CE, 2004b].

We stellen voor om de netto massa van een tram te verhogen naar gemiddeld 35 ton en met een bezettingsgraad van 25% te rekenen [CE, 2003]. We adviseren het aandeel trams waarbij gebruik van teruggewonnen remenergie mogelijk (45 %) is en het recuperatierendement (65%) ongewijzigd te laten. In de onderstaande tabel vatten we de relevante gegevens voor FLEXYT nog eens samen.

tabel 6 Modelparameters tram

Netto massa (ton)	35
Bezittingsgraad (%)	25
Massa inzittenden (ton)	1
Massa totaal (ton)	36
Recuperatierendement ( $r_R$ , %)	65
Aandeel remenergie nuttig gebruikt (%)	45

### 3.4.1 Emissieparameters elektriciteitsvoorziening

De emissiecijfers van elektriciteitsvoorziening zijn de afgelopen tien jaar gedaald, met name vanwege schonere verbrandingstechnieken. Onder andere de opkomst van WKK-generatoren en low-NO<sub>x</sub> verbranders. In tabel 7 geven we de gemiddelde emissiecijfers weer voor de Nederlandse elektriciteitsproductie van dit moment.

tabel 7 Emissiefactoren Nederlandse elektriciteitsproductie

	kg/GJ elektriciteit
CO <sub>2</sub>	158
PM <sub>10</sub>	0,0031
NO <sub>x</sub>	0,06
SO <sub>2</sub>	0,047

Bron: diverse jaarverslagen elektriciteitsproducenten

Cijfers voor koolwaterstoffen (HC) en koolmonoxide (CO) zijn niet uit jaarverslagen te achterhalen omdat deze niet gerapporteerd worden. Overigens zijn de emissiefactoren voor deze stoffen in elektriciteitscentrales heel laag, aangezien ze een indicator zijn voor onvolledige verbranding. We adviseren de bovenstaande waarden in FLEXYT over te nemen en bestaande waarden voor CO en HC te handhaven.

<sup>2</sup> Om al te grote spanningsverliezen te voorkomen is het netwerk opgedeeld in compartimenten van een aantal honderden meters lang.

### 3.5 Samenvattend

Een aantal algemene parameters in FLEXSYT kan geactualiseerd worden met de in dit hoofdstuk gepresenteerde parameters. Er is geactualiseerde informatie gepresenteerd voor:

- voertuigmassa lichte voertuigen;
- verkeerssamenstelling;
- zwavelgehalte brandstoffen;
- modelparameters tram;
- emissies elektriciteitscentrales.

Omdat carpoolvoertuigen tegenwoordig niet meer (beleidsmatig) relevant zijn, is het niet meer noodzakelijk om deze voertuigen apart te onderscheiden. We adviseren dan ook deze voertuigen uit FLEXSYT te verwijderen. Ditzelfde geldt voor bestelauto's op benzine en LPG. Het aandeel van deze voertuigen in de verkeersstroom van lichte voertuigen is kleiner dan 1% en daalt nog. We adviseren ook deze voertuigcategorieën los te laten. Dit betekent dat FLEXSYT slechts nog met bestelauto's op diesel rekent.

Op voorhand is het niet zeggen of de emissiecoëfficiënten aangepast dienen te worden en in welke mate. Daartoe zijn een aantal testen uitgevoerd, welke we in het volgende hoofdstuk beschrijven.





## 4 Update van de emissieparameters

### 4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we de algemene parameters behandeld. In dit hoofdstuk bekijken we de met de FLEXSYT-formules gegenereerde emissies van voertuigen die over de Europese typegoedkeuringscyclus rijden. Vervolgens vergelijken we deze met de emissies die worden gemeten tijdens de typegoedkeuringstest voor een groot aantal voertuigen uit het park, om zodoende de *emissiecoëfficiënten* die in FLEXSYT worden gebruikt te kunnen aan te passen waar dit noodzakelijk is.

Voor zware voertuigen bestaat een dergelijke test niet. Daarom zijn we genoodzaakt de met de FLEXSYT-formules gegenereerde cijfers te interpreteren en te vergelijken met enkele beschikbare praktijkmetingen.

### 4.2 Testopzet personenauto's en bestelauto's

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 kan het beschrijvend vermogen van FLEXSYT en de juistheid van de ingestelde parameters testen aan de hand van een bekend ritprofiel. Gegevens over brandstofgebruik en emissies kunnen vergeleken worden met de uitkomsten van FLEXSYT. In dit hoofdstuk behandelen we drie testen:

- a Met de oorspronkelijke FLEXSYT-waarden.
- b Met nieuwe waarden voor de algemene parameters.
- c Met nieuwe waarden voor de algemene parameters en verder verfijnde emissieparameters (iteratie).

Voor de test gebruiken we het zogenaamde ECE-15+EUDC ritprofiel dat gebruikt wordt voor de typegoedkeuring van lichte voertuigen in Europa. Hiervan is het ritprofiel weergegeven in bijlage B.

#### 4.2.1 Gemiddelde emissies per brandstoftype over typegoedkeuringscyclus

Voor een duizendtal personenauto's op diesel en benzine zijn de emissiecijfers uit de typegoedkeuringstest (Euro-2/3) bekend. Hieruit kan een schatting voor het parkgemiddelde worden afgeleid over de ritcyclus uit typegoedkeuringstest. In tabel 8 geven we de gemiddelde emissies over de typegoedkeuringstest weer voor benzine- en dieselvoertuigen, per Euroklasse en een gemiddelde voor het voertuigpark. De cijfers voor het parkgemiddelde betreffen voor benzinevoertuigen de voertuigen uitgevoerd met katalysator (Euro-1/2/3) en voor diesel alle voertuigen. Er wordt voor benzineauto's immers onderscheid gemaakt naar voertuigen zonder en met katalysator in FLEXSYT.

tabel 8 Emissiecijfers uit de typegoedkeuringstest en parkgemiddelde over ECE15-EUDC cyclus

	Benzine met kat.				Diesel		
	NO <sub>x</sub>	HC	PM <sub>10</sub>	CO	HC + NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO
<b>Euro-2</b>	0,21		0	0,65	0,71	0,088	0,48
<b>Euro-3</b>	0,05	0,09	0	0,64	0,46	0,037	0,46
<b>Schatting van park-gemiddelde</b>	0,08	0,11	0	0,65	0,71	0,09	0,48

Het parkgemiddelde voor benzinevoertuigen betreft voertuigen met katalysator. Koude-start emissies spelen een rol in deze cyclus, omdat de voertuigen aan het begin van de test nog niet of nauwelijks opgewarmd zijn. Het effect hiervan is beperkt, en geeft een afwijking van veel minder dan 10% [Inrets, 1999].

Bron: UK Vehicle Certification Authority

Voor LPG-voertuigen kan geen parkgemiddelde emissie over de typegoedkeuringstest geschat worden, omdat het overgrote deel van LPG-installaties achteraf wordt ingebouwd en de voertuigen vervolgens niet aan de typegoedkeuringstest wordt onderworpen en voldoen.

#### 4.2.2 Test A: de oorspronkelijke FLEXSYT-waarden

De test van FLEXSYT met de oorspronkelijke parameters dient als uitgangspunt voor de update van de waarden. Wanneer de FLEXSYT-waarden overeenkomen met wat op grond van typegoedkeuringsdata uit begin van de jaren '90 verwacht mag worden, kunnen de parameters verder verfijnd worden. Het model is dan in staat om representatieve emissies te berekenen over het ritprofiel van de typegoedkeuringscyclus. In tabel 9 geven we een overzicht van een uitdraai van de emissies.

tabel 9 Resultaten uit het rekenprogramma met FLEXSYT-formules met de 'oude waarden' (g/km)

	(km/liter)	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
<b>Benzine zk</b>	15,21	8,88	2,20	1,55	0,00	134	0,01
<b>Benzine mk</b>	15,21	0,61	0,11	0,27	0,00	153	0,01
<b>Diesel</b>	19,91	0,40	0,11	0,52	0,11	130	0,16
<b>LPG zk</b>	12,28	2,67	1,55	1,13	0,00	125	0,00
<b>LPG mk</b>	12,28	0,66	0,11	0,28	0,00	132	0,00
<b>Bestelauto diesel</b>	11,23	0,62	0,20	1,12	0,30	232	0,28

Op basis van de gepresenteerde data concluderen we dat de emissies in grote lijnen overeenkomen met wat op grond van oude Euronormen en typegoedkeuringsdata verwacht mag worden. Dit betekent dat FLEXSYT in staat is realistische emissies te genereren over de typegoedkeuringscyclus, en dat we de emissiecoëfficiënten kunnen aanpassen aan de huidige parkgemiddelde emissies over de typegoedkeuringscyclus.



### 4.2.3 Test B: nieuwe voertuig-, emissie- en brandstofparameters

Test B is gedraaid met een aantal aangepaste algemene parameters, waarvan het op voorhand duidelijk is dat ze aan vernieuwing toe zijn: de *voertuigmassa (M)* en het *zwavelgehalte (Ds)*. De 'oude' data zijn vervangen door de nieuwe waarden zoals die gepresenteerd zijn in tabel 2 en tabel 3. In tabel 10 presenteren we de uitdraai van het programma.

tabel 10 Resultaten uit rekenprogramma met aangepaste FLEXSYT-parameters (g/km)

	(km/liter)	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
<b>Benzine zk</b>	14,20	9,27	2,25	1,68	0,00	144	0,008
<b>Benzine mk</b>	14,20	0,64	0,11	0,29	0,00	165	0,008
<b>Diesel</b>	17,35	0,44	0,13	0,60	0,15	150	0,023
<b>LPG zk</b>	10,71	2,82	1,70	1,28	0,00	144	0,001
<b>LPG mk</b>	10,71	0,71	0,12	0,33	0,00	153	0,001
<b>Bestelauto diesel</b>	10,71	0,63	0,21	1,20	0,38	243	0,033

In sommige gevallen zijn de emissies van de verschillende voertuigtypen aan de hoge kant, wanneer ze vergeleken worden met de data over de parkgemiddelden (tabel 8). Andere data komt overeen met de huidige gemiddelden. Dit heeft ten eerste te maken met het verschil in reductie van de emissienormen voor de verschillende luchtvervuilende emissies na het begin van de jaren '90. Ten tweede heeft dit te maken met het feit dat de parameterwaarden in FLEXSYT in het begin van de jaren '90 zijn gebaseerd op nieuwe voertuigen, welke nu niet altijd ver van het parkgemiddelde afliggen<sup>3</sup>.

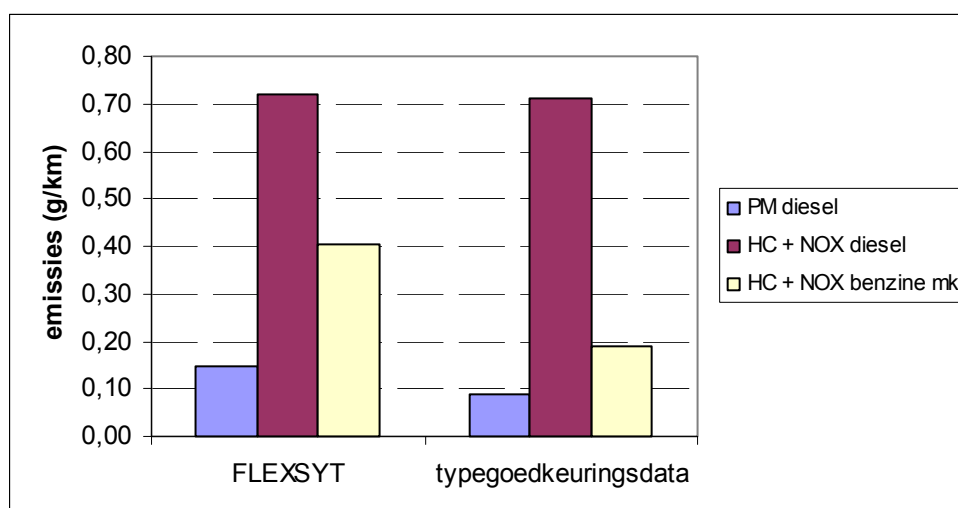
Het door FLEXSYT berekende energieverbruik (brandstofverbruik en CO<sub>2</sub>-emissie) is ons inziens realistisch, gezien met wat op dit moment op de markt wordt gebracht<sup>4</sup>. We adviseren dan ook de CFLAB-factor, waarmee de efficiëntie van voertuigen kan worden aangepast, onveranderd (waarde = 1) te laten.

In figuur 2 vergelijken we de parkgemiddelde emissies over de typegoedkeuringscyclus van de belangrijkste voertuigcategorieën, benzine met katalysator en diesel, met het FLEXSYT-emissies.

<sup>3</sup> In de eerste jaren dat FLEXSYT gebruikt is, zijn de emissies daarom onderschat, terwijl ze nu in sommige gevallen overschat worden.

<sup>4</sup> Onder het ACEA convenant worden de CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's gemonitord en getest over dezelfde typegoedkeuringscyclus.

figuur 2 FLEXSYT-emissies en typegoedkeuringsdata voor de belangrijkste emissies van personenauto's



De emissies van een dieselauto komen, op de  $PM_{10}$ -emissie na, goed overeen met parkgemiddelden. De  $NO_x$ -emissie voor deze benzineauto's is redelijk hoog. Wanneer we de waarden uit tabel 10 vergelijken met de parkgemiddelden uit tabel 8, zien we dat de emissies van CO en HC voor benzineauto's met katalysator goed overeenkomen met de parkgemiddelden.

Testdata voor LPG-voertuigen, benzinevoertuigen zonder katalysator en bestelauto's is niet voorhanden. Echter op basis van de emissienormen (bijlage A) en andersoortige data (praktijkwaarden) kunnen we toch de FLEXSYT-emissies van deze voertuigcategorieën interpreteren. Over deze voertuigen is onze indruk de volgende:

- Op basis van de ons bekende emissiefactoren en -normen schatten we de  $NO_x$  en  $PM_{10}$ -emissie van bestelauto's als te hoog in. In test C stellen we de parameters  $C_{CN1}$ ,  $C_{CN2}$  en  $C_{PM}$  daarom naar beneden bij.
- De verschillen tussen de emissies van voertuigen met en zonder katalysator komen overeen met wat op grond van de gegevens over de praktijkemissies van de Taakgroep Verkeer en Vervoer verwacht mag worden. Bovendien is de noodzaak voor aanpassen van de coëfficiënten voor deze voertuigen klein, omdat de techniek (emissies) voor deze voertuigen niet veranderd is de laatste 15 jaar.
- De  $NO_x$ -emissies van LPG-voertuigen met katalysator zijn in de praktijk weliswaar hoger dan van een benzinevoertuig omdat de LPG-installaties niet voor (en in) specifieke voertuigen geoptimaliseerd zijn, maar de emissies die FLEXSYT geeft zijn aan de hoge kant. Daarom verlagen we de coëfficiënten voor  $NO_x$ -emissies van LPG-voertuigen met katalysator.

#### 4.2.4 Test C: verder verfijnde emissieparameters

Op basis van test B zijn een aantal parameters aangepast. Met behulp van iteratie zijn een aantal waarden vervolgens aangepast. Een overzicht van de aangepaste coëfficiënten is weergegeven in tabel 11.

tabel 11 Een update van een aantal coëfficiënten

	Coëfficiënt	Oude waarde	Nieuwe waarde	Reden voor aanpassing
<b>Benzineauto met kat</b>	C <sub>CN1</sub>	0,0145	0,004	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
	C <sub>CN2</sub>	1,65 * 10 <sup>-5</sup>	6 * 10 <sup>-6</sup>	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
<b>Dieselauto</b>	C <sub>PM</sub>	1,65 * 10 <sup>-3</sup>	1,2 * 10 <sup>-3</sup>	PM-emissie te hoog
	Q	0,32	0,36	'Oud' rendement klopt niet
<b>Bestelauto diesel</b>	C <sub>CN1</sub>	0,053	0,04	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
	C <sub>CN2</sub>	5,3 * 10 <sup>-6</sup>	4 * 10 <sup>-6</sup>	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
	C <sub>PM</sub>	1,75 * 10 <sup>-3</sup>	0,0007	PM-emissie te hoog
	Q	0,32	0,36	'Oud' rendement klopt niet
<b>LPG-auto met kat</b>	C <sub>CN1</sub>	0,016	0,006	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
	C <sub>CN2</sub>	1,7 * 10 <sup>-5</sup>	1 * 10 <sup>-5</sup>	NO <sub>x</sub> -emissie te hoog
	Q	0,36	0,32	'Oud' rendement klopt niet

Het rendement van benzineauto's en LPG-auto's is 0,32, van dieselauto's 0,36. Ter aanvulling vermelden we hier ook dat de massa (M) en het zwavelgehalte (Ds) van de brandstoffen dienen te worden aangepast, zie tabel 2 en tabel 3.

Aanpassing van de coëfficiënten voor de NO<sub>x</sub>-emissies is lastig, omdat het niet bekend is in welke verhouding de beide coëfficiënten (C<sub>CN1</sub> en C<sub>CN2</sub>) dienen te worden aangepast.

Aanpassing van de bovenstaande waarden resulteert in onderstaande emissiecijfers. Deze komen goed met de parkgemiddelde emissies over de testcyclus en wat op basis van de normen verwacht mag worden.

tabel 12 Resultaten uit rekenprogramma met verder verfijnde FLEXSYT-parameters (g/km)

	(km/liter)	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
<b>Benzine zk</b>	14,2	9,27	2,25	1,68	0,00	144	0,008
<b>Benzine mk</b>	14,2	0,63	0,11	0,09	0,00	165	0,008
<b>Diesel</b>	18,8	0,40	0,12	0,60	0,10	145	0,023
<b>LPG zk</b>	10,0	2,95	1,79	1,28	0,00	154	0,001
<b>LPG mk</b>	10,0	0,75	0,13	0,17	0,00	163	0,001
<b>Bestelauto diesel</b>	11,7	0,57	0,19	0,90	0,15	223	0,033

#### 4.3 Test vrachtauto's en bussen

Over de emissies van zware voertuigen zijn veel minder gegevens bekend dan voor personenauto's, welke in het verleden beleidsmatig veel meer aandacht kregen. Vanwege deze reden is de benadering van de emissies van vrachtauto's veel grover dan voor personenauto's.

Voor vrachtauto's en bussen is het bovendien niet mogelijk om soortelijke testen als voor personenauto's uit te voeren. Bij de typegoedkeuring van zware voertuigen worden emissies gemeten per hoeveelheid afgegeven vermogen (gram per

kWh), niet per kilometer. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de parameters voor vrachtauto's vergelijken we de emissies van de vrachtauto's en bussen met de praktijkgegevens uit de emissieregistratie.

In tabel 13 vergelijken we de FLEXYT-emissies over een traject van 1 kilometer bij een constante snelheid van 80 km/h met de gegevens over snelwegemissies (lage dynamiek) van de Taakgroep Verkeer en Vervoer over 2002. We kijken naar de belangrijkste emissies van een dieselmotor.

tabel 13 FLEXYT-emissies vergeleken met praktijkemissies (g/km)

	FLEXYT-emissies (80 km/h)			Taakgroep Verkeer (snelweg)			Stop-and-go [TNO, 2001b]		
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
Lichte vrachtauto	414	7,2	0,57	811	9,0	0,23	933	15	0,5
Zware vrachtauto	1041	16,6	1,43						
Bus	414	7,2	0,57						

De emissies van de Taakgroep Verkeer betreffen emissies van alle vrachtauto's, exclusief trekker-opleggercombinaties.

Uit de tabel valt op te maken dat met name de emissies van NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> voor zware vrachtauto's en NO<sub>x</sub>-emissies voor lichte vrachtauto's en bussen aan de hoge kant zijn, daarom stellen we voor een aantal parameters naar beneden bij te stellen.

Met behulp van de formules (paragraaf A.4) hebben we de emissies berekend voor het optrekken van 0 naar 80 km/h, met de verschillende voertuigen. Met de studie Emissies en Files van TNO als referentie [TNO, 2001b], schatten we deze emissies als te hoog in. Daarom stellen we voor de coëfficiënten voor emissies tijdens optrekken naar beneden bij te stellen.

In tabel 14 presenteren we een overzicht van de aangepaste coëfficiënten voor zware voertuigen.

tabel 14 Aangepaste coëfficiënten zware voertuigen

	Lichte vrachtauto en bus		Zware vrachtauto	
	Oude waarde	Nieuwe waarde	Oude waarde	Nieuwe waarde
K <sub>COV</sub>	14 * 10 <sup>-3</sup>	7 * 10 <sup>-3</sup>	10 * 10 <sup>-3</sup>	5 * 10 <sup>-3</sup>
K <sub>HCV</sub>	4 * 10 <sup>-3</sup>	8 * 10 <sup>-4</sup>	8 * 10 <sup>-3</sup>	1,5 * 10 <sup>-3</sup>
K <sub>NOxV</sub>	55 * 10 <sup>-3</sup>	40 * 10 <sup>-3</sup>	50 * 10 <sup>-3</sup>	35 * 10 <sup>-3</sup>
K <sub>PMV</sub>	4,3 * 10 <sup>-3</sup>	1 * 10 <sup>-3</sup>	4,3 * 10 <sup>-3</sup>	1 * 10 <sup>-3</sup>
K <sub>BV1</sub>	0,3 * 10 <sup>-3</sup>	0,4 * 10 <sup>-3</sup>		
L <sub>COV</sub>	28 * 10 <sup>-3</sup>	14 * 10 <sup>-3</sup>	20 * 10 <sup>-3</sup>	10 * 10 <sup>-3</sup>
L <sub>HCV</sub>	12 * 10 <sup>-3</sup>	6 * 10 <sup>-3</sup>	16 * 10 <sup>-3</sup>	5 * 10 <sup>-3</sup>
L <sub>NOxV</sub>	70 * 10 <sup>-3</sup>	35 * 10 <sup>-3</sup>	65 * 10 <sup>-3</sup>	32,5 * 10 <sup>-3</sup>
L <sub>PMV</sub>	4,3 * 10 <sup>-3</sup>	1,5 * 10 <sup>-3</sup>	4,3 * 10 <sup>-3</sup>	1,2 * 10 <sup>-3</sup>

Met naar beneden bijgestelde emissiecoëfficiënten leveren de FLEXSYT-formules (9 t/m 12) lagere emissies op. Dit geven we weer in tabel 15 voor de meest relevante emissies.

tabel 15 Emissies zware voertuigen met bijgestelde parameters (g/km)

	Gebuurkte formule (zie bijlage A.4)	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
Lichte vrachtauto/bus				
<b>80 km/h constant</b>	9,10	504	6,4	0,16
<b>Optrekken 0 tot 80 km/h</b>	11,12	1100	13	0,6
Zware vrachtauto				
<b>80 km/h constant</b>	9,10	816	9,1	0,26
<b>Optrekken 0 tot 80 km/h</b>	11,12	2800	30	1,1

De CO<sub>2</sub> emissies komen overeen met respectievelijk 0.5 en 1.1 liter per kilometer tijdens het optrekken voor een lichte en zware vrachtauto.

Nu vergelijken we de waarden in tabel 15 met 'stop-and-go verkeer' uit tabel 13. De waarden in tabel 15 zijn hoger vergeleken met het 'stop-and-go verkeer', omdat de laatstgenoemde zeer dynamisch fileverkeer omvat, dat lagere luchtvervuilende emissies heeft dan verkeer dat alleen maar optrekt. De waarden voor optrekken hebben we zo gekozen dat ze grofweg tweemaal zo groot zijn van de waarde van het stop-and-go verkeer in tabel 13. Dit is gebaseerd op de aannames dat stop-and-go verkeer ongeveer de helft van de tijd optrekt en dat emissies bijna geheel veroorzaakt worden wanneer de motor zwaar belast wordt.

#### 4.4 Samenvattend

Het beschrijvend vermogen van FLEXSYT voor emissies van lichte voertuigen is voldoende om de emissiecoëfficiënten op basis van het geselecteerde ritpatroon uit de typegoedkeuringstest aan te passen, gezien de resultaten van de test met oorspronkelijke waarden. Deze komen overeen met onze inschatting over wat van oude voertuigen (begin jaren '90) verwacht mag worden. Naar mate de ritpatronen dynamischer worden, verwachten we dat FLEXSYT minder instaat is de emissies te voorspellen, omdat FLEXSYT geen rekening houdt met katalysator-systemen die niet snel genoeg bij kunnen regelen. Als bij gaspedaalbewegingen niet snel genoeg de verhouding tussen lucht en brandstof bijgeregeld wordt, komen korte tijd veel emissies vrij. De katalysator kan slechts werken bij een bepaalde vaste verhouding van lucht en brandstof. In de studie 'Emissies en files – rapportage over fase 1' (appendix G) van TNO is dit goed zichtbaar weergegeven [TNO, 2001].

Om FLEXSYT up-to-date te maken zijn vervolgens een aantal parameters naar beneden bijgesteld, om ze vergelijkbaar te laten zijn met de parkgemiddelde emissies voor de verschillende voertuigtypen over de testcyclus uit de typegoedkeuringstest.

Voor zware voertuigen is de FLEXYT-output vergeleken met praktijktesten. Op basis hiervan is een aantal coëfficiënten bijgesteld, waarvan het merendeel naar beneden.





## 5 Conclusies

### 5.1 Beschrijvend vermogen FLEXYT

#### **Personenauto's en bestelauto's**

Het vermogen van FLEXYT om voertuigemissies te beschrijven lijkt afdoende voor de eenvoudige netwerken waarvoor het model wordt toegepast. Wanneer echter netwerken worden gebouwd waarbij meer dynamiek wordt geprogrammeerd, zoals in de werkelijkheid plaats vindt in o.a. fileverkeer, dan voldoen de huidige emissieformules in FLEXYT waarschijnlijk niet, en met name niet voor de benzineauto met katalysator. Tijdens dynamisch rijgedrag worden namelijk emissiepieken gevonden bij gaspedaalwisselingen.

Kortom, wanneer de geprogrammeerde netwerken niet te dynamisch of ingewikkeld zijn, is het beschrijvend vermogen van FLEXYT voldoende, zoals gebleken is uit de testen.

#### **Vrachtauto's en bussen**

Vergeleken met de formules voor personenauto's en bestelauto's zijn de formules voor vrachtauto's en bussen grover. Dit heeft onder andere te maken met de beperkte informatie over deze voertuigen die in het verleden beschikbaar was. De emissies worden berekend op basis van een lineaire relaties met het brandstofgebruik. Het brandstofgebruik wordt voor stilstand, vertragen en optrekken als constant verondersteld. Het is zeer waarschijnlijk dat ook vrachtauto's zich in dynamisch verkeer anders gedragen dan met de FLEXYT-formules te voorspellen en te modelleren is.

### 5.2 Geactualiseerde parameters

Voor personenauto's en bestelauto's zijn de emissiecoëfficiënten getoetst met behulp van emissieberekeningen met de FLEXYT-formules over de Europese typegoedkeuringscyclus. De berekende emissies zijn vergeleken met bekende typegoedkeuringsdata. Daar waar verschillen optreden, doen we een voorstel voor aanpassing van de coëfficiënten. Een overzicht van de aangepaste parameters voor lichte voertuigen is te vinden in tabel 1, tabel 2, tabel 3 en tabel 11.

Voor zware voertuigen zijn de emissies getoetst aan bekende informatie over praktijkemissies en eigen inzichten. Dit heeft geresulteerd in een aantal suggesties voor verbeteringen, welke in tabel 14 zijn opgenomen.

Voor tramverkeer is een overzicht van nieuwe parameters opgenomen in tabel 6 en tabel 7.

Door de aanpassing van de coëfficiënten beschrijft FLEXYT de emissieniveaus van de verschillende voertuigtypen veel beter dan voorheen voor de gemiddelde auto's van vandaag.

We bevelen aan om bij het vergelijken van verschillende FLEXSYT-scenario's vooral de emissies van CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> in ogenschouw te nemen, omdat deze beleidsmatig en vanuit milieukundig perspectief (klimaatverandering en gezondheid) de meeste aandacht krijgen.

### 5.3 Discussie modelopzet en algemene aanbevelingen voor verbeteringen

Het aandeel van bestelauto's op benzine en LPG is het laatste decennium nagenoeg tot nul gedaald. Ook carpoolvoertuigen staan niet meer in de belangstelling. We adviseren daarom deze voertuigcategorieën uit het FLEXSYT-programma te verwijderen.

FLEXSYT rekent met vaste acceleratiewaarden. In de praktijk komen deze echter nooit voor. De acceleratiewaarde neemt af naarmate de snelheid toe neemt<sup>5</sup>. FLEXSYT zou verbeterd kunnen worden door de acceleratie aan de snelheid te koppelen of boven en onder de 80 km een aparte waarde toe te kennen.

Het energiegebruik voor een tram wordt mogelijk wat gunstig voorgesteld in FLEXSYT, omdat geen rekening wordt gehouden met weerstandsverliezen in de bovenleiding. Deze kunnen oplopen tot 15%. De FLEXSYT-formules zouden vrij gemakkelijk verbeterd kunnen worden door een constante factor (1.15) in de formules in te brengen.

FLEXSYT is op dit moment niet geschikt om onder zeer dynamische omstandigheden (files ect.) uitsluitel te geven over diverse scenario's. Hiervoor zou het model aangevuld moeten worden met meer recente wetenschappelijke inzichten. TNO en de TU Graz (Oostenrijk) ontwikkelen onder andere modellen die de emissies van moderne voertuigen onder dynamische omstandigheden kunnen voorspellen.

---

<sup>5</sup> Acceleratiewaarden zijn onder de 80 km/h grofweg dubbel zo groot als boven de 80 km/h. Boven de 80 km/h is de acceleratiewaarde zo'n 1 m/s<sup>2</sup>, terwijl deze onder de 80 km/h 1.8 m/s<sup>2</sup> is.

## Literatuur

BGC, 1993

*Voorstudie milieuformules FLEXSYT*, Bureau Goudappel Coffeng, 1993

CBS, 2004

*Informatie over voertuigmassaverdeling van het Nederlandse wagenpark*,  
www.cbs.nl/statline

CE, 2004a

*De prijs van een reis – de maatschappelijke kosten van het verkeer*

CE, 2004b

*Wie doet er mee met MJA-OV – een studie naar de mogelijkheden van de uitbreiding van de MJA-NS met het OV en goederenvervoer per spoor*

Taakgroep Verkeer en Vervoer, 2004

*Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland*, februari 2004

Taakgroep Verkeer en Vervoer, 2004b

*Definitieve volume- en emissiegegevens 2004*

Inrets, 1999

*Modelling of cold start emissions for passenger cars*, Robert Joumard  
Eric Sérié, Inrets, 1999

RIVM, 2001

*Nieuwe snelle treinverbindingen tussen de Randstad en Noord Nederland – effecten op emissies en geluidshinder*, juli 2001

TNO, 2001

*Emissies en Files – definitief rapport fase 1*

TNO, 2001b

*Emissies en Files – bepalen van emissiefactoren, eindrapportage fase 2*



## Symbolenlijst

A	Versnelling	(m/s <sup>2</sup> )
Ac	Het aandeel trams dat is uitgerust met choppers	(-)
B	Brandstofverbruik	(g/s)
B <sub>0</sub>	Vast (stationair) verbruik van de motor	(g/s)
C <sub>CO</sub> , C <sub>HC</sub> , C <sub>CN1</sub> , C <sub>CN2</sub> , C <sub>PM</sub> , C <sub>CO2</sub>	Coëfficiënten in emissieformules personenauto's	(-)
CFLAB	Brandstofefficiëntiefactor	(-)
Cx	Luchtweerstandsparemeter	(-)
Ds	Zwavelgehalte van de brandstof	(g/kg)
E	Aandrijfenergie	(g/s)
Etoeg.	De hoeveelheid door het net aan de trams toegevoerde energie	(J)
e <sub>ELCO</sub> , e <sub>ELHC</sub> , e <sub>ELNOx</sub> , e <sub>ELPM</sub> , e <sub>ELCO2</sub> , e <sub>ELSO2</sub>	Emissiecoëfficiënten m.b.t. elektriciteitsproductie	(g/J)
Fr	Rolweerstandsparemeter	(-)
k <sub>BVS</sub>	Stationaire brandstofverbruik vrachtauto's	(g/s)
k <sub>BV1</sub> , k <sub>BV2</sub> , k <sub>BV3</sub>	Coëfficiënten in de brandstofverbruiksformule bij constante snelheid van vrachtauto's	(-)
k <sub>COV</sub> , k <sub>HCV</sub> , k <sub>NOxV</sub> , k <sub>PM</sub> , k <sub>CO2</sub> , k <sub>SO2</sub>	Coëfficiënten die de emissies van vrachtauto's bij constante snelheid en stilstand relateren aan het brandstofverbruik	(-)
k <sub>CO</sub> , k <sub>HC</sub>	Coëfficiënten in CO <sub>2</sub> -emissieformule personenauto's	
l <sub>COV</sub> , l <sub>HCV</sub> , l <sub>NOxV</sub> , l <sub>PM</sub> , l <sub>CO2</sub> , l <sub>SO2</sub>	Coëfficiënten die de emissies van vrachtauto's bij acceleratie relateren aan het brandstofverbruik	(-)
M	Massa van het voertuig (ton)	
P <sub>BAV</sub>	Het brandstofverbruik per tijdseenheid bij acceleratie vrachtauto's	(-)
P <sub>CO</sub> , P <sub>HC</sub>	Coëfficiënten in de emissieformules voor personenauto's	(-)
γ <sub>R</sub>	Recuperatie-rendement bij trams	(-)
Q	Redementsparemeter	(-)
V	(constante) snelheid	(km/h)
V <sub>1</sub>	Snelheid aan het begin van een acceleratie- of deceleratietraject	(km/h)
V <sub>2</sub>	Snelheid aan het einde van een acceleratie- of deceleratietraject	(km/h)
Vs	Slagvolume van de motor	(liters)



**CE**

**Oplossingen voor  
milieu, economie  
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: [ce@ce.nl](mailto:ce@ce.nl)

website: [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

## Bijlagen







# A De oorspronkelijke milieumodule in FLEXYT

## A.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de huidige opzet van de milieumodule in FLEXYT. De korte beschrijving van de formules die voor dit rapport relevant zijn heeft als doel de leesbaarheid van dit rapport te verbeteren; op een aantal plaatsen in de verdere hoofdstukken wordt terugverwezen naar de formules. Voor een uitvoerig overzicht van formules verwijzen we naar het rapport 'Voorstudie milieuformules FLEXYT' van Bureau Goudappel Coffeng uit 1993 [BGC, 1993]<sup>6</sup>.

Als eerste geven we de formules weer, daarna gaan we in op de parameters in de formules.

## A.2 De formules voor personenauto's en bestelauto's

De formules in FLEXYT stammen uit het begin van de jaren '90. In die tijd zijn formules uit het empirische TNO model VERSIT afgeleid en in FLEXYT ingebouwd.

Binnen FLEXYT wordt onderscheid gemaakt naar 4 voertuigstatussen:

- 1 Stilstand.
- 2 Constante snelheid.
- 3 Eenparige acceleratie (versnelling).
- 4 Eenparige deceleratie (vertraging).

In de volgende paragrafen werken we deze verschillende voertuigstatussen uit. De symbolen die in de formules gebruikt worden, geven we weer in de symbolenlijst.

### A.2.1 Stilstand (stationaire motor) en eenparige deceleratie

Voor een personenauto of bestelauto met stationaire draaiende motor geldt de volgende formule voor het brandstofverbruik:

$$B = CFLAB * Bo \quad (1)$$

Het brandstofgebruik en emissies tijdens decelereren zijn vrij klein. Daarom wordt aangenomen dat de emissies en brandstofgebruik worden benaderd door de waarden die voor stationaire toestand gelden.

---

<sup>6</sup> Let op! Er is een addendum aan dit rapport toegevoegd met enkele wijzigingen, die in dit rapport zijn overgenomen.

## Emissies voor stilstand en deceleratie

tabel 16 Stationaire emissies van verschillende personenauto's

	benzine		Diesel	LPG	
	Zonder kat.	Met kat.		Zonder kat.	Met kat.
CO	0.05	0.0025	0	0.025	0.0025
HC	0.025	0.001	0	0.015	0.001
NO <sub>x</sub>	0	0	0	0	0
PM	0	0	$1.5 * V_s * B_0 * 10^{-3}$	0	0
CO <sub>2</sub>	$C_{CO2} * B_0 - k_{CO} * CO - k_{HC} * HC$				
SO <sub>2</sub>	$1.9 * D_s * B_0 * 10^{-3}$				

De stationaire emissies van bestelauto's zijn gelijk voor de stoffen NO<sub>x</sub>, PM, CO<sub>2</sub> en SO<sub>2</sub>. De emissies van CO en HC zijn 1,25 keer hoger dan de waarden voor personenauto's.

### A.2.2 Constante snelheid

Bij snelheden lager dan 80 km/h geldt de volgende formule om de aandrijfenergie te bepalen:

$$E = (M * Fr * V + 7840 * C_x * V^2) / 3600 \quad (2)$$

Voor snelheden boven de 80 km/h (snelwegen) geldt de volgende formule:

$$E = (M * Fr * V + 98 * C_x * V^3) / 3600 \quad (3)$$

Het brandstofgebruik kan vervolgens berekend worden met de formule:

$$B = CFLAB * \{B_0 + E / Q\} \quad (4)$$

#### Emissies bij constante snelheid

De emissies van de luchtverontreinigende stoffen en CO<sub>2</sub> worden berekend met de volgende formules:

$$CO = c_{CO} * (E * 3600)^{P_{co}} * B \quad (5a)$$

$$HC = c_{HC} * (E * 3600)^{P_{hc}} * B \quad (5b)$$

$$NO_x = c_{CN1} * E + c_{CN2} * E^2 * 3600 \quad (5c)$$

$$PM = c_{PM} * V_s * B \quad (5d)$$

$$CO_2 = c_{CO2} * B - k_{CO} * CO - k_{HC} * HC \quad (5e)$$

$$SO_2 = 0,95 * 2 * D_s * B * 10^{-3} \quad (5f)$$

Voor de emissies van CO, HC en NO<sub>x</sub> is de aandrijfenergie de belangrijkste term, terwijl voor PM, CO<sub>2</sub> en SO<sub>2</sub> het brandstofgebruik bepalend is.

### A.2.3 Eenparige acceleratie

Voor het snelheidsgebied met snelheden onder de 80 km/h geldt:

$$E = \{0,5 * M * Fr * (V_2 + V_1) + 2613 * Cx * (V_2^3 - V_1^3) / (V_2 - V_1) + 3,8 * M * A * (V_2 + V_1)\} / 3600 \quad (6)$$

Wanneer de snelheid groter dan 80 km/h is, wordt de aandrijfenergie beschreven door:

$$E = \{0,5 * M * Fr * (V_2 + V_1) + 24,5 * Cx * (V_2^4 - V_1^4) / (V_2 - V_1) + 3,8 * M * A * (V_2 + V_1)\} / 3600 \quad (7)$$

De formules voor het bepalen van het brandstofgebruik en de emissies per tijds-eenheid zijn gelijk aan de formules die gelden bij constante snelheid (4/5).

### A.3 De parameterwaarden voor personenauto's en bestelauto's

In deze paragraaf behandelen we de parameters waarmee de emissies en het brandstofgebruik van personenauto's en bestelauto's berekend worden.

tabel 17 Parameterwaarden ter berekening van het energiegebruik en de emissies van personenauto's

	Benzine		Diesel	LPG		Bestelauto (diesel)	Eenheid
	Zonder kat.	Met kat.		Zonder kat.	Met kat.		
<b>Fr</b>	3.5		3.5	3.5		3.8	-
<b>Vs</b>	M <sub>0</sub> -0.245*2.20		(M <sub>0</sub> /1.075-0.09)*1.95	(M <sub>0</sub> /1.05-0.245)*2.2		(M <sub>0</sub> /1.075-0.09)*1.95	Liters
<b>Cx</b>	(7.1+1.65*M <sub>0</sub> )*10 <sup>-6</sup>		(7.1+1.65*M <sub>0</sub> /1.075)*10 <sup>-6</sup>	(7.1+1.65*M <sub>0</sub> /1.05)*10 <sup>-6</sup>		18*10 <sup>-6</sup>	-
<b>B<sub>0</sub></b>	(190+350Vs)/3600		(100+210*Vs)/3600	(175+325*Vs)/3600		605/3600	g/s
<b>Q</b>	0.32		0.32	0.36		0.32	-
	Zonder kat.	Met kat.		Zonder kat.	Met kat.		
<b>c<sub>CO</sub></b>	0.80	0.20	0.25	0.95	0.24	0.30	-
<b>p<sub>CO</sub></b>	-0.25	-0.45	-0.5	-0.5	-0.45	-0.5	-
<b>c<sub>HC</sub></b>	0.45	0.008	0.025	0.011	0.009	0.025	-
<b>p<sub>HC</sub></b>	-0.45	-0.25	-0.30	0.13	-0.25	-0.30	-
<b>c<sub>CN1</sub></b>	0.115	0.0145	0.053	0.095	0.015	0.053	-
<b>c<sub>CN2</sub></b>	6.5*10 <sup>-5</sup>	1.65*10 <sup>-5</sup>	5.3*10 <sup>-6</sup>	3.15*10 <sup>-5</sup>	1.65*10 <sup>-5</sup>	5.3*10 <sup>-6</sup>	-
<b>c<sub>PM</sub></b>	0	0	1.65*10 <sup>-3</sup>	0	0	1.75*10 <sup>-3</sup>	-
<b>c<sub>CO2</sub></b>	3.2	3.2	3.2	3.025	3.025	3.2	-
<b>k<sub>CO</sub></b>	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	-
<b>k<sub>HC</sub></b>	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	-
<b>Ds</b>	0.15	0.15	2	0.01	0.01	2	g/kg
<b>CLFAB</b>	1	1	1	1	1	1	-

Opm. De CLFAB is een rendementsfactor voor het brandstofgebruik die gedurende door de tijd aangepast kan worden om het zuinig worden van auto's te representeren. In een standaard situatie staat deze ingesteld op 1.

## A.4 De formules voor vrachtauto's en bussen

De formules voor zware voertuigen zijn gebaseerd op de modellen CORINAIR en ATTACK. FLEXYT onderscheidt drie zware voertuigen met dieselmotoren: lichte vrachtauto's, zware vrachtauto's en bussen, waarvan het brandstofgebruik en de emissies met dezelfde formules kunnen worden berekend. Vergeleken met de formules voor personenauto's zijn de formules voor zware voertuigen relatief grof en gebaseerd op oude onderzoeken. De betrouwbaarheid is dan ook wat lager dan voor personenauto's.

### A.4.1 Stilstand en eenparige deceleratie

Het brandstofverbruik tijdens stilstand (stationaire motor) en deceleratie is constant:

$$B = k_{BV} \quad (8)$$

*Emissie voor stilstand en eenparige deceleratie*

De emissies zijn lineair afhankelijk van het brandstofgebruik:

$$CO = k_{COV} * B \quad (9a)$$

$$HC = k_{HCV} * B \quad (9b)$$

$$NOx = k_{NOxV} * B \quad (9c)$$

$$PM = k_{PMV} * B \quad (9d)$$

$$CO_2 = k_{CO2V} * B \quad (9e)$$

$$SO_2 = k_{SO2V} * B \quad (9f)$$

### A.4.2 Constante snelheid

Het brandstofgebruik van vrachtauto's en bussen wordt beschreven door:

$$B = k_{BV1} * V^2 + k_{BV2} * V + k_{BV3} \quad (10)$$

De emissies worden berekend met behulp van de relaties tussen emissie en snelheid die voor stilstand en deceleratie gelden (9).

### A.4.3 Eenparige acceleratie

Het brandstofgebruik tijdens acceleratie is afhankelijk van de acceleratietijd. Deze wordt bepaald door de acceleratiewaarden die in het programma worden ingevoerd. Per tijdseenheid (seconden) is het brandstofgebruik constant.

$$B = P_{BAV} \quad (11)$$

### Emissies voor eenparige acceleratie

Net als bij stilstand en deceleratie kunnen de emissies geschat worden op basis van de gebruikte hoeveelheid brandstof.

$$CO = I_{COV} * B \quad (12a)$$

$$HC = I_{HVC} * B \quad (12b)$$

$$NOx = I_{NOxV} * B \quad (12c)$$

$$PM = I_{PMV} * B \quad (12d)$$

$$CO_2 = I_{CO2V} * B \quad (12e)$$

$$SO_2 = I_{SO2V} * B \quad (12f)$$

## A.5 De parameterwaarden voor zware voertuigen

In de onderstaande tabel zijn de parameterwaarden voor de brandstof- en emissieformules opgenomen.

tabel 18 Parameterwaarden voor brandstof- en emissieformules vrachtauto's en bussen

	Lichte vrachtauto	Zware vrachtauto	Bus	Eenheid
$K_{BV}$	0.10	0.25	0.10	g/s
$K_{BV1}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	g/s
$K_{BV2}$	0.009	0.023	0.009	g/s
$K_{BV3}$	0.3	0.75	0.3	g/s
$P_{BAV}$	4.05	10.13	4.05	g/s
$K_{COV}$	$14 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	g/g
$K_{HCV}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	g/g
$K_{NOxV}$	$55 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$	$55 \cdot 10^{-3}$	g/g
$K_{PMV}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	g/g
$K_{CO2V}$	3.13	3.13	3.13	g/g
$K_{SO2V}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	g/g
$I_{COV}$	$28 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$	g/g
$I_{HCV}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	g/g
$L_{NOxV}$	$70 \cdot 10^{-3}$	$65 \cdot 10^{-3}$	$70 \cdot 10^{-3}$	g/g
$L_{PMV}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	g/g
$I_{CO2V}$	$3.13 \cdot 10^{-3}$	3.13	$3.13 \cdot 10^{-3}$	g/g
$I_{SO2V}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	$Ds \cdot 2.0 \cdot 10^{-3}$	g/g

## A.6 Trams

### A.6.1 Stilstand en constante snelheid

Het energie verbruik van een tram in stilstand kan op nul worden gesteld. De kleine hoeveelheid elektriciteit die dan benodigd is, is dermate gering, dat die verwaarloosd kan worden.

Voor het energiegebruik bij constante snelheid wordt aangenomen dat in principe hetzelfde geldt als voor stilstand. De rolweerstand van spoorgebonden voertuigen is zeer klein en de luchtweerstand is laag bij lage snelheden. De aanname dat het energieverbruik nul is tijdens constante snelheden levert geen grote fout op.

### A.6.2 Eenparige acceleratie

Het energiegebruik van een tram bij acceleratie is bij benadering gelijk aan de toename van de kinetische energie<sup>7</sup>. De aandrijfenergie wordt beschreven door:

$$E_{toeg.} = 0,5 * M * 1000 * (V_2^2 - V_1^2) / 3,6^2 \quad (13)$$

De formules voor de aan de tram toe te rekenen emissies zijn:

$$CO = e_{ELCO} * E_{toeg} \quad (14a)$$

$$HC = e_{ELHC} * E_{toeg} \quad (14b)$$

$$NOx = e_{ELNOx} * E_{toeg} \quad (14c)$$

$$PM = e_{ELPM} * E_{toeg} \quad (14d)$$

$$CO_2 = e_{ELCO2} * E_{toeg} \quad (14e)$$

$$SO_2 = e_{ELSO2} * E_{toeg}$$

### A.6.3 Eenparige deceleratie

Een deel van de trams in Nederland kan remenergie omzetten in elektriciteit en dit terugleveren aan de bovenleiding. Met name nieuwe trams (Rotterdam: Citadis, Amsterdam: Combino) zijn in staat om energie terug te leveren aan de bovenleiding, omdat ze voorzien zijn van een zogenaamde chopper.

De energie die teruggeleverd kan worden is een deel van de opgewekte kinetische energie:

$$E_{toeg.} = ac * r_R * 0,5 * 1000 * M * (V_2^2 - V_1^2) / 3,6^2 \quad (15)$$

<sup>7</sup> Dit klopt niet helemaal, want het rendement van een tram is geen 100% en in de bovenleiding gaat op het spoor tot 15 % van de energie verloren. Voor trams zal dit een vergelijkbaar percentage zijn (RIVM, 2001).

## B Europese emissienormen

### B.1 Europese emissienormen

Voertuigen die binnen de Europese Unie worden verkocht, moeten aan steeds strenger wordende emissienormen voldoen, zoals blijkt uit het onderstaande overzicht. Op deze manier worden alle schadelijke emissies (uitgezonderd CO<sub>2</sub>) steeds verder teruggebracht.

Om het de autofabrikanten mogelijk te maken aan deze normen te voldoen, zijn ook de brandstofeisen aangescherpt. Met name het zwavelgehalte van benzine en diesel is voor de voertuigen van belang, omdat zwavel in de brandstof de effectiviteit van de modernere katalysatoren sterk vermindert. Het zwavelgehalte van brandstoffen wordt via een maximum van 50 ppm per 1-1-2005 teruggebracht naar maximaal 10 ppm in 2010.

	Norm	Jaar	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<i>EU emissienormen voor passagiersauto's, g/km</i>							
<b>Diesel personenauto's</b>							
	Euro 1	1.1.1993	2.72	-	0.97	-	0.14
	Euro 2, IDI	1.1.1997	1	-	0.7	-	0.08
	Euro 2, DI	1.1.1997	1	-	0.9	-	0.1
	Euro 3	1.1.2001	0.64	-	0.56	0.5	0.05
	Euro 4	1.1.2006	0.5	-	0.3	0.25	0.025
<b>Benzine personenauto's</b>							
	Euro 1	1.1.1993	2.72	-	0.97	-	-
	Euro 2	1.1.1997	2.2	-	0.5	-	-
	Euro 3	1.1.2001	2.3	0.2	-	0.15	-
	Euro 4	1.1.2006	1	0.1	-	0.08	-
<i>EU emissienormen voor licht bedrijfsvoertuigen, g/km</i>							
<b>Bedrijfsvoertuigen (diesel)</b>							
< 1 305 kg	Euro 1	1.1.1993	2.72	-	0.97	-	0.14
	Euro 2	1.1.1997	1	-	0.6	-	0.1
	Euro 3	1.1.2002	0.64	-	0.56	0.5	0.05
	Euro 4	1.1.2007	0.5	-	0.3	0.25	0.025
1 305-1 760 kg	Euro 1	1.1.1993	5.17	-	1.4	-	0.19
	Euro 2	1.1.1997	1.2	-	1.1	-	0.15
	Euro 3	1.1.2002	0.8	-	0.72	0.65	0.07
	Euro 4	1.1.2007	0.63	-	0.39	0.33	0.04
> 1 760 kg	Euro 1	1.1.1993	6.9	-	1.7	-	0.25
	Euro 2	1.1.1997	1.35	-	1.3	-	0.2
	Euro 3	1.1.2002	0.95	-	0.86	0.78	0.1
	Euro 4	1.1.2007	0.74	-	0.46	0.39	0.06

## B.2 De Europese typegoedkeuringscyclus

Voordat auto's in de EU op de markt mogen worden gebracht dienen ze een emissiecertificaat te hebben. De typegoedkeuringstest voor lichte voertuigen (personenauto's en bestelauto's) bestaat uit 4 segmenten van het ECE-type (stadsrit), gevolgd door een EUDC-segment (buitenweg en snelweg). In figuur 3 is de totale cyclus weergegeven.

figuur 3 De Europese typegoedkeuringscyclus (ECE-15/EUDC)

