

RIVM rapport 773002023/2002

**Berekening van luchtvaartemissies voor
verschillende allocatiemethoden**

W.K. Jansen

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van MAP-Milieu, in het kader van project 773002, doelgroepproject Verkeer en Vervoer, mijlpaal 773002/01/CC.

Abstract

Occasion

Currently, only a small proportion of the emissions from aviation is allocated to countries. A discussion about whether to change this is currently being carried on in the international framework. Once an agreement on the allocation of the emissions from international aviation is reached, the willingness of countries to reduce these emissions will probably increase. Several allocation methods have already been proposed. The study documented here is an attempt to answer the questions on what the consequences of the proposed allocation methods for the emissions allocated to the Netherlands are. The importance of the chosen allocation method will even increase in the future, considering the anticipated strong growth in aviation.

Aims

- To gain insight into the consequences of the proposed allocation methods for the emissions from international aviation allocated to the Netherlands;
- To develop a model, which will also be capable of calculating emissions for other allocation methods.

To broaden the scope of the discussion, answers will be sought to the following questions:

- What substances are emitted by aviation?
- What are the consequences of the aviation emissions?
- How have the allocation methods scored on the basis of several common criteria?
- What are the possibilities available to reduce the emissions: technical, operational and economic?
- What is the influence of these possibilities on the emissions allocated to the Netherlands?

Emissions and their consequences

The substances emitted by the combustion of fuel include carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), sulphur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO). Emissions from aviation lead to various environmental impacts, like the greenhouse effect, the breakdown of the ozone layer, acidification and local air pollution.

Alternatives for allocation

Because international aviation, by definition, crosses borders, an (international) discussion has been launched on the question of how to divide the related emissions between countries. During the conference of the United Nations in Kyoto in 1998, it was decided to allocate emissions in the future; however, an agreement about how to distribute them could not be reached. As a result of this decision, several allocation methods were listed by the United Nations.

In the current situation, only the emissions of greenhouse gasses (CO₂) from domestic aviation are allocated. Non-greenhouse gases, i.e. those from the landing-and-take-off-emissions (during the part of the flight occurring below 3000 feet), from international and domestic aviation are allocated. Choosing one of the allocation methods will mean a per definition increase in the amount of emissions allocated to the Netherlands. Eight proposed methods are:

1. Allocation of LTO emissions;
2. Allocation of global bunker fuel sales and associated emissions to countries in proportion to their national emissions;
3. Allocation to countries according to the country where the bunker fuel is sold;
4. Allocation to countries according to the nationality of the airline;
5. Allocation to countries according to the country of destination and departure of aircraft;
6. Allocation to countries according to the country of destination and departure of passengers or cargo;
7. Allocation to countries according to the country of origin of passengers or owner of cargo;
8. Allocation to the country of all emissions generated in its national airspace.

Methodology

The Model for the calculation of aviation emissions, MOBLEM, was developed to calculate the consequences of allocation methods. It is based on the Corinair method and has been developed by the European Environment Agency in corporation with the European Topic Centre on Air Emissions. With the use of this methodology, the most frequently used 19 aircraft types in European and American aviation, are chosen to represent all aircraft types participating in international aviation. The fuel use and the emissions during the whole flight can be calculated through the Corinair method. Small aircraft are not included in the Corinair database, but they do call in at Schiphol, so three extra aircraft types are added to compensate this in MOBLEM. Each actually used aircraft type is coupled with one of the representative aircraft types. Of these representative types, the emissions of the LTO cycle, and the emissions for the cruise (part of the flight above 3000 feet) are known.

Results

The following table shows the emissions allocated to the Netherlands for the eight allocation methods calculated with MOBLEM.

Allocation methods	Fuel	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
		<i>10⁹ kg</i>		<i>10⁶ kg</i>			
Present situation	-	0.4	-	0.2	2.9	1.0	5.8
1. Allocation of LTO emissions	0.1	0.5	0.2	0.1	2.0	0.4	1.8
2. Proportional allocation	1.1	3.5	1.4	0.1	7.7	0.9	1.3
3. Bunker fuel	3.0	9.6	3.8	3.0	36.8	8.8	27.4
4. Nationality airline	3.2	10.2	4.0	3.2	51.0	1.7	5.0
5. Departure and destination aircraft	2.7	8.6	3.4	2.7	41.7	1.4	4.5
6. Departure and destination passengers	2.2	7.0	2.8	2.2	33.3	1.2	4.0
7. Nationality passengers	1.4	4.6	1.8	1.4	21.2	0.7	2.7
8. National airspace	0.7	2.2	0.9	0.7	10.1	1.0	4.6
Total traffic and transport emissions	-	33.8	-	23	282	125	484

The table shows large differences to occur between the allocation methods. This is partly caused by the definition of the allocation methods and partly by differences in emission factors. The definition of the method is of interest for the relative differences between the methods in the emissions of CO₂, H₂O and SO₂, while for the other components the differences in emission factors also count. Especially the HC and CO emissions depend on the aircraft type and distance flown, since this determines the share of the LTO emissions within the total emissions.

The CO₂ emissions from aviation which the Netherlands report each year, rises from 0.4*10⁹ kg to a maximum of 10.6*10⁹ kg (sum of 10.2 and 0.4), a factor of 27 increase. In the present situation, aviation emissions represent 1% of the total emissions from the traffic and transport sector. When the emissions from international aviation are also allocated, this share will increase up to a maximum of 30%, i.e. to 44.0*10⁹ kg. The allocated emissions of the other components amount to a maximum of 6% to 18% from the current total traffic and transport emissions.

MOBLEM applications

MOBLEM was found well applicable to the calculation of the emissions for several allocation methods. Two important uncertainties can be found in the model.

1. Uncertainties on the assumptions made in MOBLEM

Although many assumptions had to be made, a sensitivity analysis proves these kinds of uncertainties to have only slight influence on the allocated emissions of CO₂, H₂O, SO₂ and NO_x (less than 10%). The results for HC and CO are, on the other hand, more sensitive to uncertainties.

2. Uncertainties on the data used in MOBLEM

This largest uncertainty in the model is the result of two factors. In the first place, the aircraft types that called in at Schiphol differ from the types in the Corinair database. The differences are caused by dissimilarities in aircraft type and in the engines used. Adapting the Corinair database for the Dutch situation could improve the results of MOBLEM. In the second place, the emission factors for cruise contain a relative large uncertainty (15% to 40%). This is probably caused by the fact that emissions during cruise are not being reported yet. Therefore, no general acknowledged measurement procedure has been developed and only a few measurements are carried out. Further research on the emission factors during cruise, especially for HC and CO, can reduce the uncertainties.

Voorwoord

Omdat internationale luchtvaart grensoverschrijdend is, is de milieubelasting door de internationale luchtvaart niet eenvoudig aan landen toe te rekenen. Internationale samenwerking moet een oplossing bieden. Er is een internationale discussie gaande over de vraag hoe de emissies verdeeld kunnen worden, waarbij diverse voorstellen voor allocatiemethoden zijn gemaakt. Dit rapport berekent de emissies door de internationale luchtvaart die op basis van diverse allocatiemethoden aan Nederland zouden worden toebedeeld.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeerproject van de studie Natuurwetenschappen en Bedrijf & Bestuur aan de Universiteit Utrecht. Tijdens de afstudeerperiode ben ik begeleid door ir. Robert van den Brink (RIVM) en prof. dr. Bert van Wee (Universiteit Utrecht / RIVM).

Ik wil de volgende personen bedanken voor hun medewerking: Robert van den Brink en Bert van Wee voor de begeleiding, Jos Olivier (RIVM) voor de verkregen data, de Schiphol Group en in het bijzonder Rien Kreek en Hans Martens (Schiphol Group) voor alle Schiphol-gegevens, Kristin Rypdal (van de werkgroep van Corinair) voor het beantwoorden van vragen met betrekking tot de Corinair methode via e-mail en tenslotte Ron Wit (CE, Delft), Hans Pulles (V&W, DGL) en Wieger Dijkstra (VROM, DGM) voor het becommentariëren van het concept rapport.

Wenda Jansen
Bilthoven, juni 2002

Inhoud

1	INLEIDING	17
1.1	AANLEIDING.....	17
1.2	DOELSTELLING EN VRAAGSTELLING.....	18
1.3	AFBAKENING	18
1.4	ONDERZOEKSOPZET	19
1.5	INHOUD	20
2	THEORETISCH KADER	21
2.1	INLEIDING.....	21
2.2	CONCEPTUEEL MODEL	21
2.3	BESCHRIJVING VAN DE LUCHTVAARTSECTOR.....	23
2.3.1	<i>Indeling van de Nederlandse luchtvaart</i>	23
2.3.2	<i>De volumefactoren van het conceptueel model</i>	24
2.3.3	<i>De technische factoren van het conceptueel model</i>	24
2.4	ENERGIEGEBRUIK	27
2.5	EMISSIES	29
2.6	MILIEUEFFECTEN.....	30
2.6.1	<i>Klimaatverandering</i>	31
2.6.2	<i>Afbraak ozonlaag</i>	31
2.6.3	<i>Verzuring</i>	32
2.6.4	<i>Verstoring</i>	32
2.6.5	<i>Immissies</i>	32
3	BEREKENING EN VERDELING VAN EMISSIES	33
3.1	HET INTERNATIONALE KARAKTER VAN LUCHTVAARTEMISSIES.....	33
3.2	EMISSIEBEREKENING	35
3.2.1	<i>Definitie internationale vlucht</i>	35
3.2.2	<i>Emissiestandaarden</i>	35
3.2.3	<i>Huidige emissieberekening</i>	36
3.2.4	<i>Toekomstige emissieberekening</i>	36
3.3	OVERZICHT VAN DE ALLOCATIEMETHODEN	37
3.4	ALLOCATIE LTO-EMISSIES	39
3.5	PROPORTIONELE ALLOCATIE	41
3.6	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN DE HOEVEELHEID GEBUNKERDE BRANDSTOF	42
3.7	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN DE NATIONALITEIT VAN DE VERVOERSMAATSCHAPPIJ	44
3.8	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN HET VERTREK- EN AANKOMSTLAND VAN HET VLIEGTUIG	45
3.9	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN HET VERTREK- EN AANKOMSTLAND VAN PASSAGIERS	46

3.10	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN DE NATIONALITEIT VAN PASSAGIERS	47
3.11	ALLOCATIE AAN DE HAND VAN DE LANDSGRENZEN	48
3.12	VERGELIJKING VAN DE ALLOCATIEMETHODEN	49
3.13	CONCLUSIE	52
4	DE ONTWIKKELING VAN HET MODEL MOBLEM.....	55
4.1	INLEIDING.....	55
4.2	ALGEMENE OMSCHRIJVING VAN DE CORINAIR-METHODE	55
4.2.1	<i>Oorsprong van de rekenmethode</i>	<i>55</i>
4.2.2	<i>De drie rekenmethoden: een overzicht.....</i>	<i>55</i>
4.2.3	<i>Omschrijving gedetailleerde Corinair-methode.....</i>	<i>57</i>
4.3	ALGEMENE OMSCHRIJVING VAN MOBLEM.....	58
4.4	DE BEREKENING IN MOBLEM.....	59
4.4.1	<i>Rekenmodule LTO.....</i>	<i>59</i>
4.4.2	<i>Rekenmodule Cruise.....</i>	<i>60</i>
4.5	BASISGEGEVENS IN MOBLEM	61
4.5.1	<i>Inleiding.....</i>	<i>61</i>
4.5.2	<i>De vluchten</i>	<i>61</i>
4.5.3	<i>De bestemmingen</i>	<i>62</i>
4.5.4	<i>Het vliegtuigtype per land van bestemming</i>	<i>63</i>
4.5.5	<i>De vliegafstand</i>	<i>70</i>
5	DE TOEPASSING VAN HET MODEL MOBLEM.....	73
5.1	INLEIDING.....	73
5.2	INVOER VAN DE ALLOCATIEMETHODEN IN MOBLEM	73
5.2.1	<i>Inleiding.....</i>	<i>73</i>
5.2.2	<i>Huidige situatie.....</i>	<i>74</i>
5.2.3	<i>Allocatiemethode 1.....</i>	<i>74</i>
5.2.4	<i>Allocatiemethode 2.....</i>	<i>75</i>
5.2.5	<i>Allocatiemethode 3.....</i>	<i>75</i>
5.2.6	<i>Allocatiemethode 4.....</i>	<i>76</i>
5.2.7	<i>Allocatiemethode 5.....</i>	<i>76</i>
5.2.8	<i>Allocatiemethoden 6 en 7</i>	<i>76</i>
5.2.9	<i>Allocatiemethode 8.....</i>	<i>78</i>
5.3	RESULTATEN	80
5.3.1	<i>Inleiding.....</i>	<i>80</i>
5.3.2	<i>Algemene vergelijking van de resultaten.....</i>	<i>80</i>
5.3.3	<i>Koolstofdioxide</i>	<i>82</i>
5.3.4	<i>Overige componenten.....</i>	<i>83</i>
5.3.5	<i>Conclusies.....</i>	<i>88</i>
5.4	VERGELIJKING MET ANDERE ONDERZOEKEN	88
5.4.1	<i>Inleiding.....</i>	<i>88</i>
5.4.2	<i>EAj-rapport</i>	<i>88</i>
5.4.3	<i>Milieujaarsverslag van KLM.....</i>	<i>90</i>

5.4.4	<i>Rapportage Resource Analysis en CE</i>	91
5.4.5	<i>Tussenconclusie</i>	92
5.5	GEVOELIGHEIDSANALYSE	93
5.5.1	<i>Opzet gevoeligheidsanalyse</i>	93
5.5.2	<i>Variatie in de verdeling van vliegtuigtypen per bestemming</i>	94
5.5.3	<i>Variatie in de bezettingsgraad</i>	97
5.5.4	<i>Onzekerheden in de emissiefactoren</i>	98
5.6	ALGEMEEN BEELD VAN DE ONZEKERHEDEN	99
5.7	CONCLUSIE.....	100
6	CONCLUSIES EN DISCUSSIE	103
6.1	CONCLUSIES	103
6.2	DISCUSSIE	105
6.3	AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	106
	REFERENTIES	107
	BIJLAGEN	117

Samenvatting

Aanleiding

Momenteel worden de emissies van de luchtvaart slechts voor een klein deel toegerekend aan landen. Anno 2002 wordt in diverse internationale kaders (IPCC, V.N.) gediscussieerd over de vraag of dit moet veranderen. Wanneer afspraken gemaakt worden over de allocatie van emissies door de internationale luchtvaart, zal waarschijnlijk de bereidheid om deze emissies te verminderen toenemen. Daarom zijn reeds diverse allocatiemethoden voorgesteld. Het onderhavige onderzoek richt zich op de vraag wat de implicaties van de diverse voorgestelde allocatiemethoden zijn voor de aan Nederland toe te rekenen emissies. Het belang van de te kiezen allocatiemethode zal in de toekomst steeds meer toenemen, vanwege de sterke groei die de luchtvaart naar verwachting zal kennen.

Doelstelling

Aan het onderzoek liggen de volgende hoofddoelen ten grondslag.

- Het bieden van inzicht in de consequenties van reeds voorgestelde allocatiemethoden voor de aan Nederland toe te delen emissies van de internationale luchtvaart;
- De ontwikkeling van een model waarmee ook andere allocatiemethoden doorgerekend kunnen worden.

Met als doel een breder kader te schetsen geeft het onderzoek eveneens antwoord op de volgende vragen:

- Welke stoffen worden door de luchtvaart uitgestoten?
- Wat zijn de milieueffecten van de luchtvaartemissies?
- Hoe scoren de voorgestelde allocatiemethoden op daarvoor gangbare criteria?
- Welke mogelijkheden bestaan er om de emissies te verminderen, zowel op technisch, op operationeel als op economisch gebied en wat zijn de effecten hiervan op het Nederlandse emissieniveau?

Emissies en de milieueffecten

De stoffen die geëmitteerd worden door verbranding van kerosine, zijn onder andere koolstofdioxide (CO₂), waterdamp (H₂O), zwaveldioxide (SO₂), stikstofoxiden (NO_x), koolwaterstoffen (HC) en koolstofmonoxide (CO). Deze emissies leiden tot diverse milieueffecten, namelijk (versterkt) broeikas effect, de afbraak van de ozonlaag, verzuring en lokale luchtverontreiniging.

Alternatieven voor allocatie

Omdat de internationale luchtvaart per definitie grensoverschrijdend is, ontstaat een (internationale) discussie over de vraag hoe de emissies ervan over landen moeten worden verdeeld. Tijdens de conferentie van de Verenigde Naties in Kyoto in 1998 kon geen

overeenstemming bereikt worden over de verdeling van de emissies. Wel is besloten dat in de toekomst de emissies door internationale luchtvaart aan landen toegerekend moeten worden. Naar aanleiding van deze beslissing zijn diverse allocatiemethoden geagendeerd door de Verenigde Naties.

In de huidige situatie worden jaarlijks van de broeikasgassen (CO₂ in dit geval) alleen de emissies van de binnenlandse luchtvaart gerapporteerd. Van niet-broeikasgassen worden de Landing-and-Take-off (LTO, deel van de vlucht onder de 3000 voet)-emissies gegeven van zowel de binnenlandse als de internationale luchtvaart. Als er een allocatiemethode wordt gekozen, zullen meer emissies aan Nederland worden toegerekend. De voorgestelde acht methoden zijn:

1. Allocatie van LTO-emissies;
2. Allocatie naar landen op basis van de mondiale emissies van gebunkerde brandstoffen in verhouding tot de nationale emissies;
3. Allocatie naar landen op basis van het land waar de gebunkerde brandstof gekocht is;
4. Allocatie naar landen op basis van de nationaliteit van de vervoersmaatschappij, het land waar het vliegtuig geregistreerd staat of het land van de uitvoerende luchtvaartmaatschappij (operator);
5. Allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van het vliegtuig, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het aankomst- en vertrekland;
6. Allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van de passagiers of vracht, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het vertrek- en bestemmingsland;
7. Allocatie naar landen op basis van het land van herkomst van de passagiers of van de eigenaar van de vracht;
8. Allocatie naar landen op basis van de landsgrenzen, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld aan de hand van de nationale luchtruimen.

Methodiek

Om de consequenties van de allocatiemethoden te kunnen inschatten, is het model MOBLEM ontwikkeld. MOBLEM staat voor Model voor de Berekening van LuchtvaartEmissies en is gebaseerd op de zogenoemde Corinair rekenmethode. Deze methode is ontwikkeld door het European Environment Agency in samenwerking met het European Topic Centre on Air Emissions. De methode gaat uit van een groep van 19 vliegtuigen, die binnen de Europese en Amerikaanse luchtvaart het meest gebruikt worden en die in de rekenmethode representatief zijn voor de gebruikte vloot. Op basis van deze methode kunnen het brandstofverbruik en de emissies worden berekend. Lichtere vliegtuigtypen komen niet voor in de Corinair-database, maar doen Schiphol wel aan. Daarom zijn in MOBLEM drie extra vliegtuigtypen toegevoegd. Elk daadwerkelijk gebruikt vliegtuigtype wordt gekoppeld aan een van de representatieve vliegtuigtypen. Van deze representatieve vliegtuigtypen zijn zowel de emissies van de LTO-cyclus als voor de kruisvlucht (deel van de vlucht boven de 3000 voet)

bekend. Alle internationale vluchten van en naar Schiphol worden meegenomen in de berekening, waarbij de gekozen allocatiemethode de verdeling van emissies bepaalt.

Resultaten per allocatiemethode

Onderstaande tabel geeft de aan Nederland toe te rekenen emissies voor de acht allocatiemethoden, zoals berekend met MOBLEM.

Allocatiemethoden	Brandstof	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	10 ⁹ kg			10 ⁶ kg			
Huidige situatie	-	0,4	-	0,2	2,9	1,0	5,8
1. Allocatie LTO-emissies	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	0,4	1,8
2. Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3. Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4. Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,2	10,2	4,0	3,2	51,0	1,7	5,0
5. Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,7	8,6	3,4	2,7	41,7	1,4	4,5
6. Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
7. Nationaliteit passagiers	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
8. Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,1	1,0	4,6
Totale emissies sector verkeer en vervoer	-	33,8	-	23	282	125	484

Uit de tabel blijkt dat tussen de allocatiemethoden relatief grote verschillen optreden. Dit wordt zowel veroorzaakt door de afbakening van wat onder een allocatiemethode valt als door de verschillen in de emissiefactoren. Voor de relatieve verschillen in de emissies van CO₂, H₂O en SO₂ is alleen de afbakening van belang, terwijl voor de andere drie componenten ook de emissiefactoren van belang zijn. Vooral de HC- en CO-emissies zijn sterk afhankelijk van zowel het gebruikte vliegtuigtype en de gevlogen afstand omdat dit het aandeel van de LTO-emissies in de totale emissies bepaalt.

De omvang van de CO₂-luchtvaartemissies die Nederland jaarlijks rapporteert, neemt toe van 0,4*10⁹ kg (alleen binnenlandse emissies) naar maximaal 10,6*10⁹ kg, een stijging met factor 27.

Luchtvaartemissies vormen in de huidige situatie 1% van de totale emissies in de sector verkeer en vervoer. Door het toedelen van de emissies door de internationale luchtvaart neemt dit aandeel toe tot maximaal met 30% (methode 4: 44,0*10⁹ kg). De toebedeelde emissies van de overige componenten vormen maximaal 6% tot 18% van de totale huidige verkeer en vervoer emissies.

Toepasbaarheid van MOBLEM

MOBLEM is goed toepasbaar gebleken voor de berekening van de emissies voor de allocatiemethoden. In het model worden twee belangrijke onzekerheden gevonden.

1. Onzekerheden met betrekking tot gemaakte aannames in MOBLEM

Hoewel bij gebrek aan gegevens met diverse veronderstellingen moest worden gewerkt, blijkt uit een gevoeligheidsanalyse dat onzekerheden daarin een slechts beperkte invloed op de toebedeelde emissies van CO₂, H₂O, SO₂ en NO_x (kleiner dan 10%) op de resultaten hebben. HC en CO-emissies daarentegen zijn veel gevoeliger voor onzekerheden.

2. Onzekerheden met betrekking tot de invoergegevens in MOBLEM

Deze grootste onzekerheid in het model vloeit voort uit twee factoren. Ten eerste wijken de vliegtuigtypen die Schiphol aandoen af van de vliegtuigtypen uit de Corinair-database. De verschillen zijn zowel het gevolg van verschillen in vliegtuigtypen als in motoren. Een aanpassing van de Corinair database voor de Nederlandse situatie zou de uitkomsten van MOBLEM mogelijk kunnen verbeteren. Ten tweede kennen de emissiefactoren op kruisvluchthoogte een relatief grote onzekerheid (15% tot 40%). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat kruisvluchtemissies (nog) niet gerapporteerd hoeven te worden. Als gevolg hiervan is er nog geen algemeen erkende meetmethode en zijn er nog maar weinig metingen uitgevoerd. Nader onderzoek naar de kruisvluchtemissiefactoren, met name voor HC en CO, kan deze onzekerheid doen verminderen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederland kent een lange historie als distributieland. Handel en vervoer zijn een van de belangrijkste pijlers voor de nationale economie, zowel over land, over zee als door de lucht. Transport door de lucht heeft een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Steeds meer mensen maken gebruik van het vliegtuig, zowel voor eigen vervoer als voor het vervoeren van vracht. Ons land beschikt dan ook over een adequaat luchtvervoerssysteem, dat aansluit bij de wensen en behoeften van bedrijven en burgers. De Nederlandse luchtvloot is een van de modernste ter wereld en luchthaven Schiphol behoort tot de grootste vijf luchthavens van Europa. (RLD, 2000)

De top is nog niet bereikt; de luchtvaart blijft jaarlijks een sterk groeiende sector. De laatste twintig jaar steeg het aantal passagiers van en naar Schiphol elk jaar gemiddeld met ruim 8,5 procent (CBS, 2000). De prognose is dat dit de komende jaren niet zal verminderen (Tweede Kamer, 1995). Mensen hebben een voortdurend groeiende drang om verre reizen te maken en de wereld te verkennen. Het is mogelijk binnen 24 uur aan de andere kant van de wereldbol te staan. Goederen worden met behulp van internet over de hele wereld besteld, terwijl de levertijd slechts enkele dagen bedraagt. Dit is mogelijk omdat luchtvaartmaatschappijen hun passagiers en vracht steeds sneller op de plaats van bestemming kunnen brengen door een voortdurend uitbreidend netwerk van luchthavens en vliegroutes.

Naast de vele voordelen van reizen per vliegtuig zijn er ook nadelen aan verbonden. Vooral klimaatverandering en afbraak van de ozonlaag zijn belangrijke milieueffecten van luchtvaart. Vliegtuigen stoten namelijk tijdens hun vlucht stoffen uit door de verbranding van brandstof. Deze emissiecomponenten beïnvloeden zowel de atmosfeer als de menselijke leefomgeving. Momenteel zijn CO₂-emissies die door de luchtvaart veroorzaakt zijn 2 tot 3% van de totale mondiale emissies, maar naar verwachting zal dit percentage in de toekomst toenemen (Tweede Kamer, 1995).

Internationale luchtvaart is grensoverschrijdend, waardoor de emissies niet eenvoudig tussen landen verdeeld kunnen worden. Wanneer er afspraken gemaakt worden over de allocatie van emissies, zal de bereidheid tot het nemen van emissiereducerende maatregelen waarschijnlijk toenemen. Voorwaarde is wel dat er internationaal overeenstemming wordt bereikt over het te voeren internationale luchtvaartbeleid. Dat lijkt moeilijk te realiseren. Het is ook mogelijk om internationale afspraken te maken hoe de emissies aan elk land afzonderlijk toegewezen kunnen worden. Welke allocatiemethode hiervoor het meest geschikt is, wordt in dit rapport onderzocht.

Deze en meer onderwerpen komen in dit rapport naar voren. Dit eerste hoofdstuk gaat nu verder met het onderzoeksdoel en -vraag. Hiermee wordt de basis van het rapport vastgelegd. Vervolgens worden de grenzen van het onderzoek bepaald. Welke onderzoeksopzet is gebruikt wordt in de vierde paragraaf verteld. Als laatste wordt een overzicht gegeven van de hoofdstukken die in het rapport aan bod zullen komen.

1.2 Doelstelling en vraagstelling

Aan het onderzoek liggen de volgende hoofddoelen ten grondslag.

- Het bieden van inzicht in de consequenties van reeds voorgestelde allocatiemethoden voor de aan Nederland toe te delen emissies van de internationale luchtvaart;
- De ontwikkeling van een model waarmee ook andere allocatiemethoden doorgerekend kunnen worden.

Met als doel een breder kader te schetsen geeft het onderzoek eveneens antwoord op de volgende vragen:

- Welke stoffen worden door de luchtvaart uitgestoten?
- Wat zijn de milieueffecten van de luchtvaartemissies?
- Hoe scoren de voorgestelde allocatiemethoden op daarvoor gangbare criteria?

1.3 Afbakening

Aan dit onderzoek zijn grenzen gesteld, om het overzichtelijk en uitvoerbaar te houden. De eerste afbakening is de luchtvaart. De vervoerssector bestaat uit meerdere modaliteiten. Er is in dit rapport gekozen voor het luchtverkeer, en daarbinnen voor de civiele, grote¹ luchtvaart (zowel passagiers- als vrachtvervoer). In dit rapport wordt ingegaan op het energiegebruik en de emissies door de luchtvaart. Andere onderwerpen zoals geluidsoverlast en geurhinder vallen niet binnen de grenzen van dit onderzoek.

Er bestaan twee soorten energiegebruik: direct en indirect. Onder direct energiegebruik wordt verstaan de energie die noodzakelijk is voor het voortbewegen van het vervoermiddel. Indirect energiegebruik is de energie die onder meer nodig is voor de productie en het onderhoud van de vliegtuigen en de benodigde infrastructuur (Hoogenstrijd, 1993). In dit rapport wordt alleen rekening gehouden met de directe energie.

¹ De grote luchtvaart bestaat uit vliegtuigen die zwaarder zijn dan 6000 kilogram en beroepsmatig passagiers en vracht vervoeren. In hoofdstuk 2 wordt dieper op de indeling van de luchtvaartsector ingegaan.

Voor de modellering is eveneens een afbakening nodig. Het model dat ontwikkeld is, is bedoeld voor de Nederlandse situatie². Het jaar waarover het energiegebruik en de emissies berekend zijn, is 1998. Dit jaar is het meest recente jaar waarover de benodigde data beschikbaar zijn. Het model berekent de emissies door internationale vluchten vanaf en naar Schiphol en laat zowel de binnenlandse vluchten van en naar Schiphol als vluchten van andere Nederlandse luchthavens buiten beschouwing. Deze keuze is gemaakt, omdat de politieke discussie gaat over de toedeling van internationale luchtvaartemissies en de internationale luchtvaart zich voornamelijk concentreert op Schiphol. Verder worden alleen de consequenties van allocatie aan landen meegenomen in de berekening.

De emissiecomponenten die in het model zijn meegenomen, zijn koolstofdioxide (CO₂), water (H₂O), zwaveldioxide (SO₂), stikstofoxiden (NO_x), koolwaterstoffen (HC) en koolstofmonoxide (CO). Daarnaast is onderscheid gemaakt tussen de emissies veroorzaakt door binnenlandse vluchten (binnenlandse emissies) en emissies veroorzaakt door internationale vluchten (internationale emissies). Door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zijn regels opgesteld die bepalen wanneer een vlucht binnenlands dan wel internationaal is (Rypdal *et al.*, 2000). Binnenlandse emissies van broeikasgassen zijn in de huidige situatie al onderdeel van de nationale emissies, internationale emissies van broeikasgassen worden echter nog niet aan landen toegerekend. Van niet-broeikasgassen worden alleen de emissies tijdens start en landing meegenomen. (Annema en Van den Brink, 2000; Olivier *et al.*, 2001b; RIVM, 1998; Tweede Kamer, 1995)

In het model worden de emissies veroorzaakt door de internationale vluchten berekend, zowel de landing-and-take-off-cyclus als de kruisvlucht.

1.4 Onderzoeksopzet

In het onderzoek worden twee verschillende onderzoeksmethoden gebruikt: de ontwikkeling van een theoretisch kader (hoofdstuk 2 tot en met 4) en de modellering (hoofdstuk 5 en 6). In het theoretisch kader wordt achtergrondinformatie over de luchtvaartsector en bijbehorende emissies gegeven. Ook de mogelijkheden voor allocatie en de beoordeling daarvan worden besproken. Voor het vinden van de juiste informatie is gebruik gemaakt van literatuur over de diverse onderwerpen, in de vorm van boeken, artikelen en rapporten. Ook internet is gebruikt om bruikbare informatie te vinden.

Het tweede gedeelte van dit rapport is de modellering. Een model is ontwikkeld om allocatiemethoden te kunnen doorrekenen. Door de toepassing van acht allocatiemethoden in het model kan het effect op het Nederlandse emissieniveau berekend worden. De uitkomsten

² Door het invoeren van de juiste data kan het model echter voor elk willekeurig land geschikt gemaakt worden.

van het ontwikkelde model worden vergeleken met eerder gemaakte berekeningen. Ook de gevoeligheid van het model wordt geanalyseerd.

1.5 Inhoud

In deze laatste paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de opbouw van het rapport. Het tweede hoofdstuk behandelt een aantal basisbegrippen uit de luchtvaart en geeft met behulp van een conceptueel model een overzicht van de betrokken variabelen. Ook worden de termen energiegebruik en emissies uitgelegd. Als laatste wordt een overzicht gegeven van de milieueffecten door de luchtvaartemissies.

Het derde hoofdstuk gaat in op de allocatiemethoden, op basis waarvan luchtvaartemissies aan landen toegedeeld kunnen worden. Er wordt tevens een beoordeling van de methoden gegeven aan de hand van de criteria uitvoerbaarheid, efficiëntie en rechtvaardigheid.

In hoofdstuk 4 begint de modellering met een omschrijving van het ontwikkelde model. Ook worden de gemaakte berekeningen en aannames beschreven.

Het vijfde hoofdstuk is de toepassing van het model. De resultaten van de modellering worden behandeld. Ook worden de resultaten vergeleken met andere onderzoeken en wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Het laatste hoofdstuk behandelt de conclusies en bediscussieert het model en de uitkomsten. Bovendien worden aanbevelingen voor verder onderzoek gegeven.

Bijlage 11 gaat verder nog in op mogelijke oplossingen om emissies te reduceren. Als een van de allocatiemethoden gekozen wordt, zal de hoeveelheid emissies aan Nederland toebedeeld stijgen. Het is dan van belang om de toebedeelde emissies te kunnen verminderen.

2 Theoretisch kader

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een theoretische kader van de luchtvaartsector geschetst. Eerst wordt het conceptueel model beschreven, waarin de relaties tussen verschillende factoren afgebeeld zijn. Vervolgens wordt dit theoretisch model in kleinere delen opgesplitst, die per paragraaf worden besproken. De derde paragraaf geeft een algemene beschrijving van de luchtvaartsector, zowel de volume-ontwikkeling als technische en operationele factoren. Paragraaf vier gaat in op het energiegebruik, waarna in paragraaf 4 de emissies worden behandeld. Als laatste worden milieueffecten van luchtvaartemissies behandeld.

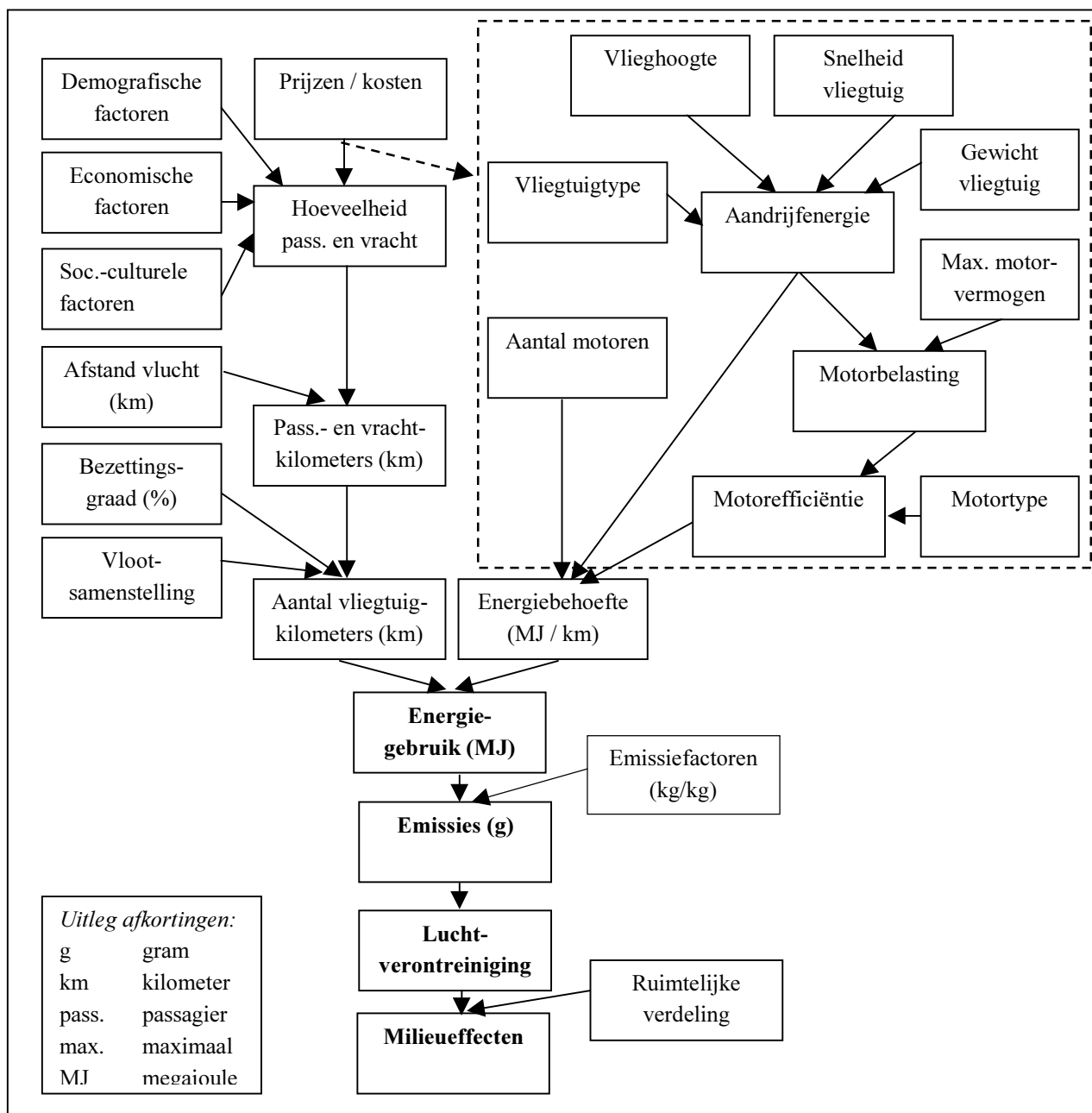
2.2 Conceptueel model

Om een overzicht te geven van de factoren die het energiegebruik en de emissies kunnen beïnvloeden, is een conceptueel model (zie figuur 2.1) opgesteld. In dit figuur staan de variabelen en hun onderlinge relatie afgebeeld. Elke rechthoek is een variabele (tussen haakjes staat soms de eenheid vermeld), terwijl een pijl de relatie aangeeft. De richting van de pijl geeft aan op welke variabele invloed wordt uitgeoefend.

In het model zijn twee kanten belicht. De linkerbovenkant van het model verwijst naar het zogenaamde ‘volumegedeelte’ van de luchtvaartsector. Deze kant geeft het volume ofwel het aantal passagiers en tonnen vracht aan. Deze hoeveelheid wordt onder andere beïnvloed door de prijzen / kosten van de vlucht³, de economische situatie in diverse landen en demografische factoren. (Geurs en Van Wee, 1997; Henderson en Wickrama, 1999; Hoogenstrijd, 1993). De hoeveelheid passagiers en vracht bepalen samen met de afstand van de vlucht (ofwel de bestemming) de passagiers- en vrachtkilometers. Door rekening te houden met de bezettingsgraad en de vlootsamenstelling kan vervolgens het aantal vliegtuigkilometers worden berekend.

De rechterkant van het diagram is het zogeheten ‘technische gedeelte’. Aan deze zijde wordt bepaald wat de aandrijfenergie of energiebehoefte van het vliegtuig is. De factoren die de aandrijfenergie bepalen, kunnen worden opgesplitst in technische en operationele factoren. De technische factoren zijn het vliegtuigtype, het aantal motoren, het motortype en het maximale motorvermogen. Operationele omstandigheden zijn de snelheid, de hoogte en het

³ Deze variabele heeft ook invloed op de technische en operationele factoren (rechterkant diagram). In figuur 2.1 is dit aangegeven met de pijl, die aangrijpt op het vierkant dat het gehele technische gedeelte (met een stippellijn) omvat.



Figuur 2.1: Conceptueel model van factoren die de hoeveelheid luchtvaartemissies kunnen beïnvloeden

laadgewicht van een vliegtuig. Samen met de motorefficiëntie bepalen deze factoren de hoeveelheid energie die nodig is om een vliegtuig naar de plaats van bestemming te vliegen. (Hoogenstrijd, 1993; Moorman en Dings, 1996; Vijgh, 1993).

Door de twee zijden van het model samen te voegen, dus door het aantal vliegtuigkilometers te vermenigvuldigen met de energiebehoefte per vliegtuigkilometer, kan het energiegebruik

uitgerekend worden. Vervolgens kunnen met behulp van emissiefactoren⁴ de emissies berekend worden (Hoogenstrijd, 1993). Deze factoren zijn afhankelijk van technische factoren, zoals het gebruikte vliegtuigtypen en de motorbelasting.

De emissies zorgen op leefniveau voor een afname van de luchtkwaliteit, vooral in de buurt van vliegvelden. Op grotere hoogten zorgen emissies voor de afbraak van de ozonlaag. Afhankelijk van de ruimtelijke verdeling van de emissies en 'ontvangers' wordt het milieu beïnvloed door de verontreiniging.

2.3 Beschrijving van de luchtvaartsector

De tweede paragraaf begint met een algemene beschrijving van de luchtvaartsector, waarna eerst termen uit het volumegedeelte (linkerbovenhoek) worden behandeld, gevolgd door termen uit de technische zijde (rechterbovenhoek).

2.3.1 Indeling van de Nederlandse luchtvaart

De Nederlandse luchtvaart kan in civiele en militaire luchtvaart worden gesplitst. De civiele luchtvaart bestaat uit de kleine en grote luchtvaart. Onder de kleine luchtvaart vallen vliegtuigen met een maximaal startgewicht tot maximaal 6000 kilogram. Deze vliegtuigen worden gebruikt voor uiteenlopende doeleinden: voor privé-gebruik, recreatie, reclaimedoeleinden of voor zakenvluchten. Ook een deel van de helikopters valt onder deze groep.

De grote of commerciële luchtvaart vervoert beroepsmatig passagiers en vracht. Deze groep bestaat hoofdzakelijk uit subsonische (langzamer dan de snelheid van het geluid) en enkele supersonische (sneller dan de snelheid van het geluid ofwel groter dan Mach 1) vliegtuigen.

De tweede groep, de militaire luchtvaart, maakt onderdeel uit van de krijgsmacht. De vliegtuigen in deze groep zijn zowel sub- als supersonisch. De supersonische groep bestaat voornamelijk uit gevechtsvliegtuigen, de subsonische groep uit zowel vliegtuigen (bijvoorbeeld voor transport of training) als helikopters.

De civiele luchtvaart is verreweg de grootste sector. Van het totale brandstofverbruik door de luchtvaart in het Nederlands luchtruim heeft het civiele luchtverkeer in Nederland een aandeel van 84% en de militaire luchtvaart 16%. (Van Drimmelen, 1995; Hoogenstrijd, 1993; Tweede Kamer, 1995)

⁴ Hoeveelheid geëmitteerde chemische component die vrijkomt per kilogram verbrande brandstof in een bepaald vluchtstadium (Hoogenstrijd, 1993) (zie ook §2.4).

2.3.2 De volumefactoren van het conceptueel model

In 1998 telde Schiphol 33 miljoen passagiers. Dit leidde tot bijna 400.000 vluchten, wat inhoudt dat elke dag gemiddeld circa 1100 vliegtuigen landden of vertrokken vanaf Nederlands grootste luchthaven. Binnen Europa vlogen de meeste mensen naar Londen, terwijl Detroit de belangrijkste intercontinentale bestemming was. Naast al deze passagiers werd ook meer dan een miljoen ton vracht vervoerd. Londen en Tel Aviv waren de (Europese en intercontinentale) bestemmingen waar de meeste vracht naar vervoerd werd in 1998. (Schiphol, 1999)

2.3.3 De technische factoren van het conceptueel model

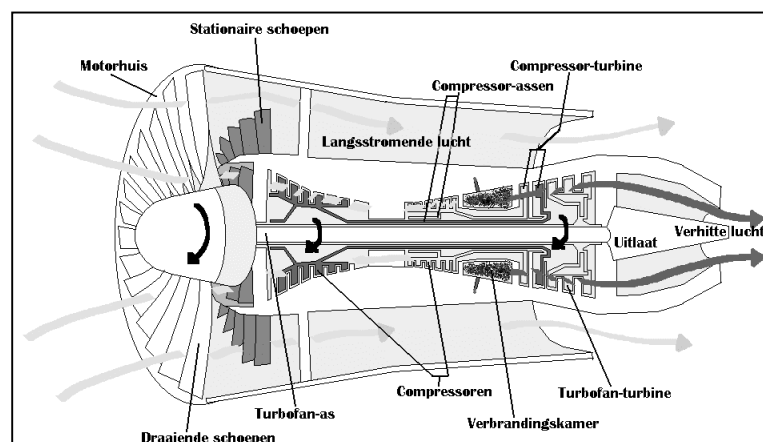
Vliegtuigmotoren

Op (niet-militaire) vliegtuigen komen zowel zuigermotoren als straalmotoren voor. Het merendeel van de vliegtuigmotoren wordt geproduceerd door Pratt & Whitney (V.S), General Electric (V.S.) en Rolls Royce (Europa) (Moorman en Dings, 1996; NIVR, 2000).

De *zuigermotor* wordt alleen gebruikt op kleinere vliegtuigen. Lucht wordt in de motor gezogen waar het, gemengd met brandstof, omgezet wordt in energie voor de aandrijving van een propeller. Vliegtuigen met dit type motor kunnen slechts tot een beperkte hoogte vliegen. Als de vlieghoogte toeneemt, daalt de luchtdichtheid zodat het vermogen afneemt.

De *straalmotor* of gasturbine wordt op grote schaal toegepast in de grote civiele luchtvaart. In een straalmotor wordt lucht met behulp van een compressor onder hoge druk gebracht en vervolgens vermengd met brandstof. Dit mengsel wordt als een fijne nevel in de verbrandingskamer gespoten en tot ontbranding gebracht. De zo ontstane verbrandingsgassen bevatten veel energie, die wordt gebruikt om een turbine aan te drijven, die op zijn beurt de compressor weer aandrijft. Na de turbine bevat de gasstroom nog steeds een grote hoeveelheid energie, die op twee manieren kan worden gebruikt voor de voortbeweging van een vliegtuig.

In de eerste plaats kan de energie worden omgezet in een snelheidsverhoging van de uitstromende gassen, waarbij de impuls van deze gassen stuwkracht oplevert om het vliegtuig voort te bewegen. Dit wordt in straalmotoren toegepast zoals de *turbofan* (zie figuur 2.2). Dit type motor is geëvolueerd uit de turbojet. Het verschil is echter dat bij de



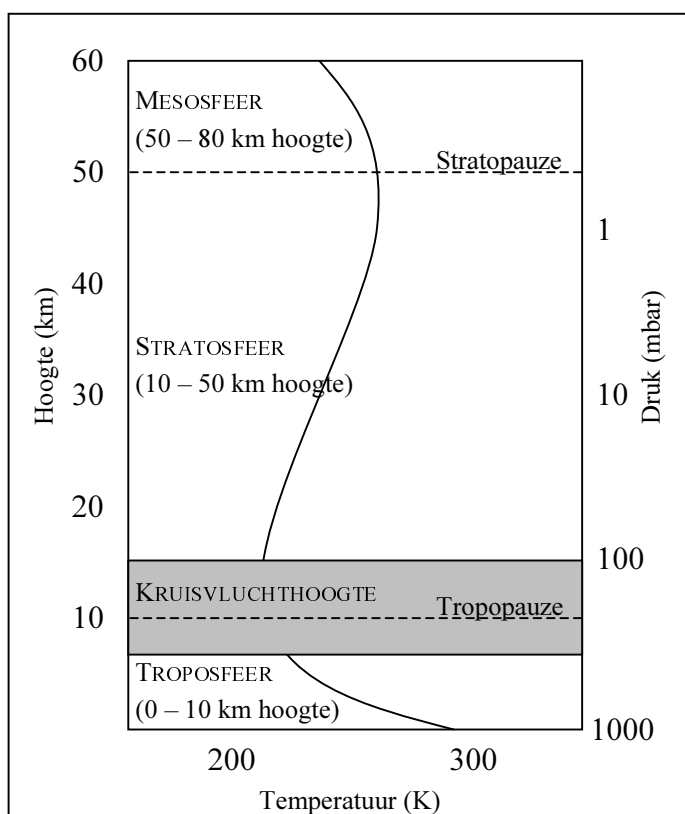
Figuur 2.2: Schematisch overzicht van een turbofan (Springer, 2001)

turbofan niet alle instromende lucht de verbrandingskamer ingaat, maar erlangs wordt geleid. Hierdoor wordt de omloopverhouding vergroot oftewel verhouding tussen de koude en verhitte luchtstroom. De turbofan heeft een hoger rendement en een lagere geluidsproductie door de lagere snelheid van de uitstromende gassen. De turbofan wordt toegepast op subsonische straalverkeersvliegtuigen voor de lange en middellange afstand. De kruissnelheid van deze vliegtuigen ligt rond de 900 km/uur. (BOV, 1997; Moorman en Dings, 1996)

Bij de tweede manier om het vliegtuig voort te bewegen wordt de energie van de verbrandingsgassen gebruikt voor de aandrijving van een propeller, zoals het geval is bij de *turboprop*. Dit type motor heeft een turbine waarin bijna alle energie van de gasstroom omgezet wordt in asvermogen voor de turbine. Deze turbine is op één as geplaatst met een propeller, die door het asvermogen wordt aangedreven. Deze motor wordt op grote schaal toegepast in vliegtuigen voor de korte afstand. Deze vliegtuigen zijn relatief klein en vliegen met snelheden tot circa 700 km/uur. (BOV, 1997; Moorman en Dings, 1996)

Vlieghoogten

Voor de commerciële luchtvaart is het luchtruim opgedeeld in verschillende (kruis)hoogten. Zo wordt een minimale afstand tussen elkaar kruisende en passerende vliegtuigen gegarandeerd. De hoogten bevinden zich tussen 8 en 14 kilometer hoogte, ofwel deels in de troposfeer en deels in de stratosfeer (zie figuur 2.3). Supersonische commerciële vliegtuigen vliegen op een kruisvluchthoogte van ongeveer 17 kilometer, terwijl vliegtuigen met turbopropmotoren een hoogtelimiet van 6 kilometer hebben (Hoogenstrijd, 1993). De kleine luchtvaart wordt door de motoren beperkt tot circa 2 tot 3 kilometer hoogte. Daarnaast bezit deze groep vliegtuigen geen drukcabine, waardoor op grotere hoogte gebrek aan zuurstof ontstaat. Militaire luchtvaart vindt in principe op alle hoogten plaats, tot circa 35 kilometer. (Hoogenstrijd, 1993; Tweede Kamer, 1995)



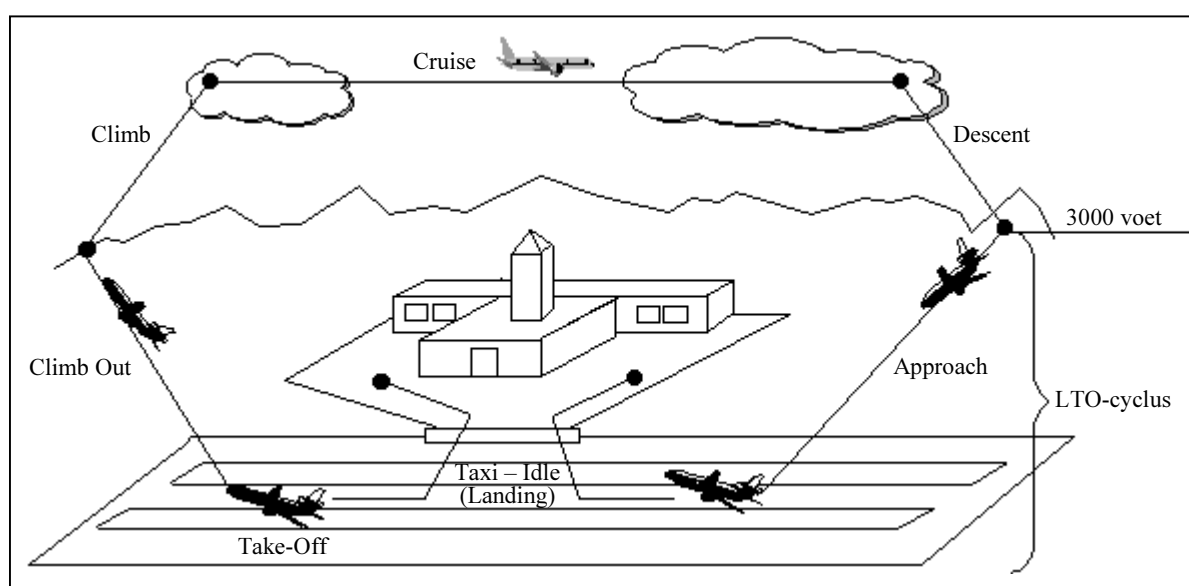
Figuur 2.3: de opbouw van de atmosfeer

De atmosfeer is opgebouwd uit verschillende lagen. De onderste laag is de troposfeer, met daarboven de stratosfeer. De lagen worden gescheiden door de tropopauze. De hoogte van deze afscheiding is afhankelijk van de breedtegraad en het seizoen. Doorgaans bevindt deze laag zich op ongeveer 10 kilometer hoogte. (Beck, 1991; Van Drimmelen, 1995)

Niet elk commercieel vliegtuig vliegt op dezelfde hoogte, want de maximale hoogte die een vliegtuig kan bereiken is afhankelijk van het motor- en draagvermogen. Dit laatste wordt bepaald door het vleugeloppervlak, snelheid en vorm van het vliegtuig. Daarnaast bepalen ook factoren als veiligheid, internationale grenzen, militaire zones en beperkingen ten aanzien van geluid waar en wanneer vliegtuigen mogen vliegen. (Hoogenstrijd, 1993; Moorman en Dings, 1996)

De vliegbeweging

Elke vliegbeweging bestaat zeven fasen, die elk een specifieke tijdsduur of Time-In-Mode (TIM), motorbelasting, brandstofverbruik en emissieniveaus hebben (Moorman en Dings, 1996). De cyclus is door International Civil Aviation Organisation (ICAO) gestandaardiseerd. De fasen staan in figuur 2.4 afgebeeld.



Figuur 2.4: de zeven fasen van een vliegbeweging (TFEI, 2000)

De zeven fasen van de landing-and-take-off-cyclus zijn:

1. *Taxi-Idle* (incl. landing); opstarten motor, stationair draaien motor, check out en taxiën naar de startbaan / landen, uitrollen, binnentaxiën, stationair draaien motor en afzetten motor;
2. *Take-Off*; opstijgen;
3. *Climb Out*; stijgen naar 3000 voet⁵;
4. *Climb (to cruise)*; stijgen van 3000 voet naar kruisvluchthoogte;
5. *Cruise*; vliegen op kruisvluchthoogte;
6. *Descent (from cruise)*; dalen van kruisvluchthoogte naar 3000 voet;
7. *Approach*; dalen vanaf 3000 voet.

⁵ 3000 voet komt overeen met 914 meter.

De Approach, Taxi-Idle, Take-Off en Climb Out ofwel de vier fasen onder de 3000 voet, worden samen de Landing-and-Take-Off-cyclus (LTO-cyclus) genoemd. Over deze cyclus zijn veel gegevens met betrekking tot energiegebruik en emissies bekend. Gegevens over de effecten van het vliegen boven de 3000 voet op de luchtkwaliteit bevatten nog veel hiaten, terwijl deze fase op de meeste vluchten veruit de langste is.

In tabel 2.1 staan per LTO-fase het motorvermogen en de (door ICAO gestandaardiseerde) tijdsduur weergegeven. In paragraaf 2.4 wordt verder ingegaan op de verschillende emissieniveaus per LTO-fase.

Tabel 2.1 *Vermogen en tijdsduur van elke LTO-fase*

LTO-fase	Vermogen t.o.v. maximum	Tijdsduur of TIM
	%	Seconden
Approach	30	240
Taxi-Idle	7	1.560
Take-off	100	42
Climb Out	85	132

Bron: (Peeters, 1997; Tweede Kamer, 1995)

Het motorvermogen tijdens de kruisvlucht is moeilijk te achterhalen en bovendien sterk afhankelijk van omstandigheden (bijvoorbeeld luchtstroming of het startgewicht van een vliegtuig). In literatuur worden schattingen gegeven. De Lauretis *et al.* (2001) spreken over 60% van het totale vermogen. Moorman en Dings (1996) daarentegen geven een lagere schatting: 20 à 50 procent⁶.

2.4 Energiegebruik

Brandstofverbruik en energiegebruik zijn twee termen die vaak naast elkaar gebruikt worden. Beide geven de hoeveelheid energie aan, uitgedrukt in kilogrammen brandstof of in megajoule energie. Elke kilogram kerosine bevat circa 43 Megajoule (MJ, Van Drimmelen, 1995). Het energiegebruik per passagiers- of tonkilometer wordt gedefinieerd als ‘de hoeveelheid benodigde energie om een passagier of een ton vracht 1 kilometer af te laten leggen’. De variabele wordt uitgedrukt in respectievelijk de eenheden MJ/passagierskilometer⁷ of MJ/tonkilometer⁸. (Hoogenstrijd, 1993)

⁶ De waarden komen uit ‘*Het specifiek energiegebruik van transportmodaliteiten*’, TU Delft rapportnr. 91.3.TT.2909, van P.A. van Laar, januari 1993. De schattingen zijn gebaseerd op een driemotorige DC-10 en een viermotorige Boeing 747-400. Door interpolatie van eigen data over brandstofverbruik en motorbelasting tijdens de LTO-cyclus is de motorbelasting tijdens de kruisvlucht bepaald.

⁷ Passagierskilometer: 1 kilometer, afgelegd door 1 passagier.

⁸ Tonkilometer: 1 kilometer afgelegd door 1 ton vracht.

In de luchtvaart wordt gebruik gemaakt van de brandstof jet-A1 en Aviation Gasoline (Avgas) (Hoogenstrijd, 1993). Voor de commerciële luchtvaart is jet-A1 de standaard brandstof. Vooral vliegtuigen met zuigermotoren gebruiken nog een relatief kleine hoeveelheid Avgas. In 1995 was dit percentage 1,1% van het totale brandstofverbruik voor luchtvaart in Nederland (Olivier en Peters, 1999). Vliegtuigbrandstof wordt gemaakt van aardolie. Tussen 1970 en 1995 is de mondiale consumptie van kerosine⁹ voor de burgerluchtvaart met gemiddeld 3,3 procent per jaar gestegen (Olivier en Peters, 1999). Dit is de resultante van een sterke groei in de luchtvaartsector en een toename in de energie-efficiëntie. Het mondiale brandstofverbruik bedroeg volgens de internationale energiestatistieken in 1990 172 miljoen ton. Noord-Amerika staat aan de top met circa 43% afzet van kerosine, Nederland scoort 0,9%. (Olivier en Peters, 1999; RMB, 1996; Tweede Kamer, 1995)

Vrijwel elk commercieel vliegtuig dat op Schiphol landt, wordt geheel of gedeeltelijk afgetankt. Elk vertrekkend vliegtuig neemt een exact uitgerekende hoeveelheid brandstof mee om de plaats van bestemming te kunnen bereiken plus een verplichte reserve om in noodgevallen te kunnen uitwijken naar een andere bestemming. Een vliegtuig heeft een maximaal gewicht waarmee het mag vertrekken en landen. Het toegestane startgewicht ligt hoger dan het maximaal toegestane landingsgewicht. Bij een noodgeval kan het zijn dat een vliegtuig daarom een deel van de brandstof moet lozen om gewicht te verliezen. Een dergelijke noodlozing, jettonising genoemd zal bij voorkeur boven onbewoond gebied, zoals boven zee, plaatsvinden. Zo zijn er bij de KLM in het boekjaar 1999/2000 27 noodlozingen geweest. Deze totale hoeveelheid geloosde brandstof bedroeg 0,036% van het totale brandstofverbruik van de KLM-vloot met een lozingsinstallatie. (KLM, 2000)

Het energiegebruik van vliegtuigen is van een aantal factoren afhankelijk. In de eerste plaats zijn de operationele omstandigheden van een vliegtuig van belang, zoals motorbelasting, snelheid en hoogte. De motor van een vliegtuig is niet altijd gelijk belast (zie tabel 2.1). Hoe hoger de motorbelasting, des te hoger is het brandstofverbruik per seconde. Dit geldt ook voor de snelheid: hoe sneller, hoe meer verbruik. Een bijkomstigheid is dat als een vliegtuig hoger vliegt, de luchtweerstand afneemt en daardoor ook het brandstofverbruik. De snelheid moet echter ook hoger worden om voldoende draagkracht te garanderen. Voor vliegtuigen is het efficiënt zo hoog mogelijk te vliegen tijdens hun vlucht. Hierbij moet echter wel rekening worden gehouden met het feit dat het naar grotere hoogte klimmen extra energie kost. Er moet bij een vlucht dus een afweging worden gemaakt naar welke hoogte stijgen de minste brandstof kost en dus het meest efficiënt is. De afweging zal onder andere afhangen van de afstand van de vlucht.

De tweede factor is de vlootopbouw. Wat is de gemiddelde leeftijd van de vloot en de daarbij behorende motoren? Een vloot met oudere vliegtuigen zal meer brandstof verbruiken dan een

⁹ In het vervolg van dit rapport wordt met de term 'kerosine' de vliegtuigbrandstof jet-A1 bedoeld.

vloot met nieuwere, vaak zuiniger vliegtuigen. Het is van belang in welke mate technologische ontwikkelingen op oudere vliegtuigen toegepast worden, zodat ze zuiniger vliegen.

2.5 Emissies

Emissies zijn kort gezegd chemische stoffen die ontstaan door de verbranding van brandstof. De stoffen worden uitgestoten in de atmosfeer en beïnvloeden het milieu. Omdat vliegtuigen stoffen op een dergelijke hoogte emitteren waarop geen andere antropogene¹⁰ bronnen aanwezig zijn, zijn de effecten van de emissies op de atmosfeer verschillend van die op leefniveau. Daarnaast is in de troposfeer de verblijftijd van bepaalde stoffen langer. NO_x bijvoorbeeld blijft op grote hoogte ongeveer 100 keer langer actief dan NO_x die vrijkomt op leefniveau (Beck, 1991; Sondorp, 1992).

Niet alleen gedurende de vlucht worden stoffen geëmitteerd. Ook tijdens het tanken, het vliegtuigonderhoud en door jettonising komen emissies vrij (Hoogenstrijd, 1993). In de afbakening (zie §1.3) is reeds aangegeven dat deze emissies buiten de grenzen van het onderzoek vallen. Vanaf het moment dat een vliegtuigmotor aangezet wordt, emitteert het vliegtuig. Bijvoorbeeld, tijdens het aan boord gaan van de passagiers wordt het vliegtuig verlicht en verwarmd. Hiervoor draait aan de achterkant van het vliegtuig een kleine motor, de zogenaamde Auxiliary Power Unit (APU). Deze motor draait tot aan het moment dat het vliegtuig weggesleept wordt om aan de taxi-fase te beginnen. Deze emissies vallen wel binnen het bereik van de studie.

De hoeveelheid emissie wordt bepaald door het volume verbrande brandstof en de omstandigheden waaronder de brandstof verbrand wordt. Dit laatste kan worden uitgedrukt in een emissiefactor. Dit is 'de hoeveelheid geëmitteerde chemische component die vrijkomt per kilogram verbrande brandstof in een bepaald vluchtstadium'. Deze waarde is onder andere afhankelijk van de vlieghoogte, vliegtuigtype, motorvermogen en motortype (Hoogenstrijd, 1993).

De stoffen die vrijkomen bij verbranding van kerosine, zijn o.a. (Beck, 1991):

- Koolstofdioxide (CO₂);
- Waterdamp (H₂O);
- Zwaveldioxide (SO₂);
- Stikstofoxiden (NO_x);¹¹
- Koolwaterstoffen of vluchtige organische stoffen (HC);
- Koolstofmonoxide (CO).

¹⁰ Antropogene emissies zijn emissies die een gevolg zijn van menselijk handelen.

¹¹ NO_x is een verzamelnaam voor NO en NO₂.

CO₂ en H₂O

Koolstofdioxide en waterdamp ontstaan bij volledige verbranding van kerosine. Beide emissiecomponenten zijn direct gerelateerd aan het brandstofverbruik en hebben dus een vaste emissiefactor. Voor CO₂ geldt dat er 3,155 kg/kg verbrande kerosine vrijkomt, terwijl de emissiefactor van H₂O 1,237 kg/kg is¹². (Van Drimmelen, 1995; Hoogenstrijd, 1993; SBSTA, 1996a; Sledsens, 1999; Tweede Kamer, 1995) De luchtvaart zorgde (in 1995) voor 2% van de mondiale CO₂-emissies (Olivier en Berdowski, 2001; Oliver *et al.*, 2001a).

SO₂

Zwavel dioxide ontstaat door de aanwezige zwavel in de kerosine. De emissiefactor is dan ook afhankelijk van de hoeveelheid zwavel in de brandstof. Omdat het zwavelgehalte niet meer dan 3 g/kg mag zijn, heeft de emissiefactor voor SO₂ een maximale waarde van 6 g/kg. De waarde ligt in de praktijk tussen de 1 tot 6 g/kg. (Van Drimmelen, 1995; Sledsens, 1999; Tweede Kamer, 1995)

NO_x

Zuurstof uit de atmosfeer en geëmitteerd stikstof vormen door de hoge temperatuur en druk in de motor NO en NO₂, samen aangeduid met de naam NO_x. Deze omstandigheden doen zich vooral voor als de motor op een hoog vermogen draait, zoals tijdens de take-off en climb out (zie tabel 2.1). De schatting van de emissiefactor voor NO_x varieert sterk. De hoogste schatting van de factor is van NASA, met een waarde van 40-60 g/kg. Gemiddeld ligt de waarde tijdens de kruisvlucht tussen de 6 en 18 g/kg. (Bahr, 1996; Van Drimmelen, 1995; Olivier, 1991)

HC en CO

Koolwaterstoffen en koolmonoxide ontstaan bij een onvolledige verbranding. Door de lage temperatuur en druk in de verbrandingskamer mengen brandstof en lucht slecht en is de verbranding niet volledig. De emissies van HC en CO spelen vooral een rol op en rond luchthavens. Tijdens proefdraaien, taxiën en approach hebben de motoren een laag vermogen (zie tabel 2.1), waardoor er relatief veel CO en HC (respectievelijk 1-40 g/kg voor HC en 10-80 g/kg voor CO) wordt uitgestoten (Peeters, 1997). De emissiefactoren van HC en CO liggen gemiddeld tussen de 1-3 g/kg (Van Drimmelen, 1995).

2.6 Milieueffecten

Welke effecten worden veroorzaakt door de luchtvaart? En welke geëmitteerde stof draagt bij aan welk verandering? De milieueffecten die in deze paragraaf besproken worden, zijn

¹² Voor Av-gas is de emissiefactor van CO₂ 3,13 kg/kg (Moorman en Dings, 1996).

ingedeeld naar de NMP¹³-milieuthema's. De luchtvaart heeft effect op de thema's: klimaatverandering, verzuring en versterking. Per paragraaf wordt een thema besproken.

2.6.1 Klimaatverandering

Het eerste thema klimaatverandering bestaat uit twee onderdelen: het broeikaseffect en de afbraak van stratosferische ozonlaag¹⁴. Beide onderdelen worden na elkaar besproken.

Broeikaseffect

Koolstofdioxide is het belangrijkste broeikasgas. De luchtvaart droeg in 1995 met de uitstoot van CO₂ voor 2,3% bij aan het mondiale broeikaseffect (Tweede Kamer, 1995). Andere broeikasgassen zijn NO_x, H₂O en SO₂ (Sledsens, 1999). De broeikasgassen veranderen de uitstraling van warmte uit de atmosfeer naar de ruimte. De onderste lagen van de atmosfeer zullen daardoor opwarmen en wereldwijd zullen klimaten veranderen. De verwarming van het aardoppervlak vindt plaats op twee manieren:

1. Door de vorming van broeikasgassen en ozon (O₃) in de troposfeer; bepaalde emissiecomponenten (CO₂ en HC) beïnvloeden het broeikaseffect direct en andere stoffen (NO_x) indirect door de vorming van ozon (Tweede Kamer, 1995). Broeikasgassen beïnvloeden echter ook indirect door de vorming en afbraak van ozon (KLM, 1993). De invloed van het gevormde ozon verschilt per hoogte. Op kruisvluchthoogte stijgt de concentratie van ozon door de uitstoot van NO_x, CO en HC en het aanwezige zonlicht. De concentratie van NO_x is op die hoogte zo laag, dat het de beperkende factor is voor de vorming van O₃. De gevormde troposferische ozon is schadelijk voor de gezondheid van mens, dier en plant. Daarnaast speelt het een rol in het broeikaseffect. (Beck, 1991; KLM, 1993; Sledsens, 1999; Sondorp, 1992). Een deel van de gevormde ozon daalt af tot leefniveau. Dit leidt tot een verhoging van de ozonconcentratie. En bij mooi, rustig weer ontstaan tijdelijke nog hogere concentraties, die kunnen leiden tot zomersmog. (KLM, 1993; Sondorp, 1992)
2. Door de vorming van wolken en aërosolen; Emissie van waterdamp zorgt voor condensstrepen van ijskristallen, de witte strepen die bij een blauwe lucht te zien zijn. Deze strepen vormen een sluierbewolking, waardoor de atmosferische stralingsbalans wordt beïnvloed. De bewolking en de in de lucht aanwezig aërosolen kaatsen namelijk de warmtestralen terug waardoor de aarde opwarmt. De betrokken emissiecomponenten zijn SO₂, H₂O en aërosolen. (Beck, 1991; Glasbergen, 1994; Sledsens, 1999; Sondorp, 1992)

2.6.2 Afbraak ozonlaag

Het tweede onderdeel van het thema klimaatverandering is de afbraak van de stratosferische ozonlaag. De ozonlaag bevindt zich tussen circa 20 en 40 kilometer hoogte in de stratosfeer en beschermt de aarde tegen schadelijke UV-B straling. Een deel van de uitgestoten NO_x komt in deze laag terecht. Supersonische vliegtuigen dragen bij aan dit probleem, omdat zij

¹³ NMP = Nationaal Milieu Plan

¹⁴ De ozonlaag is een laag bestaande uit 80% van alle atmosferische ozon en bevindt zich in de stratosfeer.

op deze hoogten vliegen. NO_x breekt de aanwezige ozon af, waardoor de ozonlaag langzaam dunner wordt (Tweede Kamer, 1995).

De afbraaksnelheid is afhankelijk van de grootte van de uitstoot en de verblijftijd. Met een dunner wordende ozonlaag neemt de UV-B straling op grondniveau toe en daarmee ook de kans op huidkanker en staar. Een ander gevolg van de UV-B straling is de aantasting van plankton in zee, waardoor het begin van de voedselketen ontregeld wordt. (Beck, 1991; Glasbergen, 1994; KLM, 1993; Sondorp, 1992)

2.6.3 Verzuring

Verzuring is de aantasting van bos- en natuurgebieden door depositie van zwavel en stikstof. De emissiecomponenten die bij dit effect een rol spelen zijn NO_x en (in veel beperktere mate) SO₂. In 1990 stootte de luchtvaart op mondiaal niveau 2,2% van de NO_x-emissies en 0,12% van de SO₂-emissies uit (Tweede Kamer, 1995).

De effecten van verzuring ontstaan enerzijds door de blootstelling aan te hoge concentraties van gasvormige luchtverontreiniging en anderzijds door de bodemverzuring als gevolg van de depositie van NO_x en SO₂. De combinatie van deze twee effecten zorgt voor het achteruitgaan van de gezondheid van planten en een afname van de biodiversiteit. Ook worden gebouwen en beelden aangetast door de depositie van de verzurende stoffen. (Glasbergen, 1994; KLM, 1993; Sledsens, 1999; Tweede Kamer, 1995)

2.6.4 Verstoring

Verstoring heeft betrekking op de aantasting van goede woon- en leefmilieukwaliteit door lokale luchtverontreiniging, geluids- en stankhinder en externe veiligheidsrisico's¹⁵ (Glasbergen, 1994; Tweede Kamer, 1995). Vooral het gebied rondom luchthavens heeft met deze problemen te kampen. Emissiecomponenten die hierbij een rol spelen, zijn SO₂, NO_x, HC en CO (Sledsens, 1999).

2.6.5 Immissies

De uitgestoten emissies hebben geen directe gevolgen voor de mens. Vliegtuigemissies worden uitgestoten op grote hoogten. Een deel van de geëmitteerde componenten zakt tot leefniveau en komt daar in direct contact met mens en dier. De verontreiniging op leefniveau wordt immissie genoemd. Niet iedereen echter wordt in gelijke mate blootgesteld aan de immissies. Als een persoon daadwerkelijk wordt blootgesteld aan immissies, dan verschilt het effect van de emissiestoffen op het lichaam per persoon. Het effect van emissies op mens en dier is daarom moeilijk in te schatten.

¹⁵ Alleen lokale luchtverontreiniging valt binnen de grenzen van dit onderzoek.

3 Berekening en verdeling van emissies

3.1 Het internationale karakter van luchtvaartemissies

In de afgelopen twee decennia is op conferenties van de Verenigde Naties (VN) het onderwerp (luchtvaart)emissies veelvuldig besproken. Uit scenario's is gebleken dat de luchtvaartsector de komende jaren sterk zal (blijven) groeien en daarmee ook de luchtvaartemissies. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) heeft berekend dat bij ongewijzigd beleid de mondiale CO₂-emissies in 2015 meer dan verdubbeld zullen zijn ten opzichte van 1990 (Lister *et al.*, 1999). Technologische verbeteringen worden wel geïmplementeerd, maar de daarmee behaalde resultaten worden direct ontkracht door de toenemende vraag naar luchttransport. (Tweede Kamer, 1995)

Het eerste resultaat van de VN-besprekingen op het gebied van emissies was het Montreal Protocol, dat in 1987 ondertekend werd. In dit protocol is vastgelegd dat in 2000 de productie en consumptie van stoffen die de stratosferische ozon aantasten, moeten zijn stopgezet. (AFEAS, 2001; CIESIN, 2001; UNEP, 2001) In 1992 is, na de VN-Conferentie in Rio de Janeiro, het 'United Nations Framework Convention on Climate Change' (UNFCCC) ondertekend. Een doelstelling van dit verdrag is 'het stabiliseren van concentraties van broeikasgassen op een zodanig niveau dat een schadelijk invloed op het klimaat wordt voorkomen'. Dit houdt in dat in 2000 de ontwikkelde landen de uitstoot van de belangrijkste broeikasgassen (CO₂, CH₄ en NO_x) zullen proberen te stabiliseren op het niveau van 1990. In artikel 4.2 van de Convention staat dat van de Annex I landen¹⁶ verwacht wordt dat zij gericht beleid en maatregelen invoeren om dat doel te bereiken. (Michaelis, 1997; Ministère des Ressources naturelles, 2001; RMB, 1996; UNFCCC, 2000) In dit document zijn echter geen eisen voor controle gesteld. De bedoeling was dat die eisen, na een periode van vijf jaar overleg tussen de verschillende overheden, in een wettelijk bindend protocol zouden worden vastgelegd (International Paper, 2001).

Dit is zes jaar later inderdaad uitgevoerd op de VN-Conferentie in Kyoto, naar aanleiding waarvan het Kyoto Protocol opgesteld is. In dit protocol is vastgelegd dat in 2010 de uitstoot van broeikasgassen voor de hele wereld met 5,2 procent (ten opzichte van 1990) verminderd moet zijn. Voor de Europese Unie (EU) bijvoorbeeld houdt dit een vermindering van acht procent in, voor Amerika zeven procent en voor Japan zes procent. Er zijn echter alleen afspraken gemaakt over de mate van vermindering en niet over de manier waarop het bereikt kon worden.

¹⁶ Annex I landen zijn de ontwikkelde landen en de landen met een economie in transitie.

Het Kyoto verdrag spreekt ook niet over de luchtvaart(emissies), omdat er geen overeenstemming bereikt kon worden over dit onderwerp. Er is echter wel afgesproken dat (UNFCCC, 2000):

'The Parties included in Annex I shall pursue limitation or reduction of emissions of greenhouse gasses not controlled by the Montreal Protocol from aviation (...) bunker fuel, working through the International Civil Aviation Organisation (...).'

(Article 2; paragraph 2 of the Kyoto Protocol)

Het Kyoto Protocol is ondertekend door 160 landen, waaronder de landen van de Europese Unie, de Verenigde Staten, Rusland, Japan en China (Kopp *et al.*, 2001). De ondertekening van het Protocol heeft geleid tot de erkenning van een belangrijke rol voor de International Civil Aviation Organisation (ICAO) (zie bovenstaand citaat). Een rol waarin deze organisatie gezien wordt als (toekomstig) mondiaal instrument voor ontwikkelde landen om de uitstoot van broeikasgassen door de luchtvaart te beperken of te verminderen. (UNFCCC, 2000)

In november 2000 is de wereldklimaattop nogmaals bij elkaar gekomen, ditmaal in Den Haag. Op deze VN-conferentie is gesproken over de manier waarop de eisen van het Kyoto protocol gehaald konden worden. Er kon echter geen overeenstemming bereikt worden, met name de Verenigde Staten waren het niet eens met de voorgestelde methoden. Ze wilden bijvoorbeeld meer gebruik kunnen maken van de bijdrage van bossen die CO₂ opnemen. Eind april 2001 is opnieuw een VN-bijeenkomst geweest in New York. Op deze vergadering is een nieuw compromisvoorstel besproken, dat landen wel de mogelijkheid geeft om bossen mee te laten tellen in het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen. In juli van hetzelfde jaar was de volgende bijeenkomst in Bonn, waar de betrokken landen dit keer wel sluitende afspraken hebben kunnen maken. Vastgelegd is op welke manier de industrielanden de uitstoot van broeikasgassen gaan verminderen. Ook is een akkoord bereikt over eventuele sancties bij het niet-halen van de emissieverminderingen. Een land moet voor elke ton CO₂ die het te weinig heeft gereduceerd, 0,3 ton extra reduceren in de tweede periode die in 2013 begint. De Verenigde Staten waren het niet eens met dit akkoord en ondertekenden het niet. Met het bereiken van dit akkoord kan het Kyoto Protocol in werking treden, nadat het door tenminste 55 partijen geratificeerd is. Die partijen moeten gezamenlijk minstens 55% van de totale hoeveelheid CO₂-emissies in 1990 vertegenwoordigen. (Trouw, 2000; Trouw, 2001, UNFCCC, 2001)

In juni 2002 hebben 74 landen het protocol geratificeerd. Deze landen vertegenwoordigen gezamenlijk 35,8% van de totale hoeveelheid CO₂-emissies. (UNFCCC, 2002)

3.2 Emissieberekening

In het Kyoto Protocol kon geen overeenstemming bereikt worden over de verdeling van de emissies door de internationale luchtvaart. Luchtvaartemissies zijn een internationaal probleem. Daarom moet, om de uitstoot van broeikasgassen door de luchtvaart te kunnen stabiliseren of zelfs te verminderen, een oplossing met een internationaal karakter worden gevonden. In Kyoto is besloten om een methode te gaan ontwikkelen om de internationale luchtvaartemissies toe te kunnen wijzen aan de betrokken landen. Voordat de voorgestelde allocatiemethoden aan bod komen, wordt eerst de huidige emissieberekening besproken.

3.2.1 Definitie internationale vlucht

Het IPCC heeft richtlijnen gedefinieerd wanneer een vlucht wel of niet internationaal is. In de onderstaande tabel (zie tabel 3.1) staan deze richtlijnen weergegeven.

Tabel 3.1 *IPCC-richtlijnen van de definitie van een internationale vlucht*

Beschrijving van de vlucht	Binnenlands?	Internationaal?
Vertrek en aankomst in hetzelfde land	Ja	Nee
Vertrek in land A en aankomst in land B	Nee	Ja
Vertrek in land A, stoppen in land A zonder afzetten of oppikken van nieuwe passagiers of vracht, en vervolgens arriveren in land B	Nee	Ja
Vertrek in land A, stoppen in land A en afzetten of oppikken van nieuwe passagiers of vracht, en vervolgens arriveren in land B	Binnenlands deel	Internationaal deel
Vertrek in land A, stoppen in land A en alleen oppikken van nieuwe passagiers of vracht, en arriveren in land B	Nee	Ja
Vertrek in land A met als bestemming land B, en een tussentijdse stop maken in land B waar geen nieuwe passagiers of vracht ingeladen worden	Nee	Beide delen internationaal

Bron: (Rypdal *et al.*, 2000)

3.2.2 Emissiestandaarden

Sinds 1981 zijn door ICAO eisen ten aanzien van emissies door straalmotoren opgesteld. Twaalf jaar later, in 1993, zijn de oorspronkelijke richtlijnen voor NO_x aangescherpt met 20%. Voor motoren die na 2003 ontworpen worden, zullen de eisen opnieuw aangescherpt worden tot circa 16 procent ten opzichte van de huidige richtlijnen. (ICAO, 1999; ICAO, 2001)

Er is geen wettelijke verplichting om te voldoen aan deze richtlijnen, maar in de praktijk zijn motorfabrikanten er wel aan gebonden (DHV, 1998; Van Drimmelen, 1995). De eisen zijn enkel gebaseerd op emissies tijdens de LTO-cyclus. De huidige regelgeving voor subsonische vliegtuigen stelt eisen aan de verhouding tussen de totale emissies in de LTO-cyclus van de

betreffende stoffen (D_p , in grammen) en de maximaal geleverde stuwkracht (F_{00} , in kilonewton of kN). Voor de kleine en militaire luchtvaart gelden geen emissiestandaarden. (Tweede Kamer, 1995) Een uitgebreide versie van de emissienormen staat in bijlage 3.

3.2.3 Huidige emissieberekening

Een deel van de emissies wordt in de huidige berekening wel aan landen toebedeeld. Hier bestaan twee methoden voor. De eerste methode is van het IPCC en wordt gebruikt bij de berekening van emissies van broeikasgassen, in dit geval alleen koolstofdioxide. Met behulp van de hoeveelheid in Nederland afgezette brandstoffen voor binnenlands gebruik en de betreffende emissiefactor kunnen de CO₂-emissies worden berekend. (Annema en Van den Brink, 2000; RIVM, 1998; Tweede Kamer, 1995)

De tweede methode geldt voor niet-broeikasgassen-emissies en berekent de LTO-emissies op alle Nederlandse luchthavens met behulp van het aantal LTO-cycli (zowel binnenlands als internationale vluchten). Voor elke combinatie van vliegtuig- en motortype zijn de emissies per seconde, het brandstofverbruik en de motorbelasting tijdens elke fase van de LTO-cyclus bekend. Door het aantal LTO-cycli te vermenigvuldigen met die gegevens, kunnen de totale LTO-emissies berekend worden. (Olivier *et al.*, 2001b; Tweede Kamer, 1995) In tabel 3.2 staat een overzicht van de emissiecategorieën, waarbij aangegeven is welke emissies aan Nederland in de huidige situatie worden toebedeeld. In de tabel worden de emissies dubbel vermeld: in de bovenste helft wordt onderscheid gemaakt tussen LTO- en kruisvluchtemissies, terwijl de onderste helft verschil maakt tussen binnenlandse en internationale vluchten.

Tabel 3.2 Overzicht van de emissies die in de huidige situatie aan Nederland toebedeeld worden

Categorieën	IPCC?
Emissies van CO ₂ tijdens LTO-cyclus	Alleen binnenlandse vluchten
Emissies van CO ₂ tijdens de kruisvlucht	Alleen binnenlandse vluchten
Emissies van niet-CO ₂ tijdens LTO-cyclus	Ja
Emissies van niet-CO ₂ tijdens de kruisvlucht	Nee
Emissies van CO ₂ door binnenlandse vluchten	Ja
Emissies van CO ₂ door internationale vluchten	Nee
Emissies van niet-CO ₂ door binnenlandse vluchten	Alleen LTO-emissies
Emissies van niet-CO ₂ door internationale vluchten	Alleen LTO-emissies

3.2.4 Toekomstige emissieberekening

Voor de verdeling van luchtvaartemissies tussen landen zijn twee mogelijkheden. De eerste manier is het emissieprobleem gezamenlijk aanpakken. De emissies worden niet toegewezen aan individuele landen, maar er wordt een internationaal gecoördineerde actie opgezet. Veel landen zijn bereid deel te nemen, maar alleen als er een internationaal beleid wordt gevormd.

Door het invoeren van maatregelen en emissiestandaarden wordt het probleem internationaal aangepakt en is allocatie naar landen niet meer nodig. ICAO kan hierin de coördinerende rol uitvoeren.

De tweede mogelijkheid voor aanpak is elk land afzonderlijk verantwoordelijk te houden voor haar emissies. Dit kan door de veroorzaakte luchtvaartemissies aan elk land afzonderlijk toe te bedelen. Wanneer vervolgens de vastgestelde emissienormen overschreden worden, kan een land daarop worden aangesproken. (AEF, 1999; CAN, 1998; UNFCCC, 2000; Wit, 1996)

In Kyoto is gekozen voor de tweede aanpak waarbij de luchtvaartemissies toebedeeld worden aan individuele landen. De eerste manier wordt echter wel meegenomen in de afweging.

3.3 Overzicht van de allocatiemethoden

Het Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA), een onderdeel van ICAO, heeft, naar aanleiding van het Kyoto protocol, acht allocatiemethoden voorgedragen. Op dit moment proberen zij de meest rechtvaardige allocatiemethode te vinden. (AEF, 1999; CAN, 1998; UNFCCC, 2000). Wanneer de uiteindelijke keuze van de meest geschikte allocatiemethode zal plaatsvinden, is niet bekend (CAN, 2000). De voorgestelde methoden zijn: (SBSTA, 1996a)

1. Allocatie van LTO-emissies¹⁷;
2. Allocatie naar landen op basis van de mondiale emissies van gebunkerde brandstoffen in verhouding tot de nationale emissies;
3. Allocatie naar landen op basis van het land waar de gebunkerde brandstof gekocht is¹⁸;
4. Allocatie naar landen op basis van de nationaliteit van de vervoersmaatschappij, het land waar het vliegtuig geregistreerd staat of het land van de uitvoerende luchtvaartmaatschappij (operator);
5. Allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van het vliegtuig, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het aankomst- en vertrekland;

¹⁷ Officieel is allocatiemethode 1 door SBSTA voorgesteld als: 'No allocation'. Om de onderlinge vergelijking van de allocatiemethoden betrouwbaarder te maken, is in dit onderzoek ervoor gekozen om de allocatie op basis van LTO-emissies te berekenen (zie ook §5.2.3).

¹⁸ De definitie van 'gebunkerde brandstof' is, volgens de International Energy Agency (IEA): 'Deliveries of aviation fuels to international civil aviation and to all domestic air transport, commercial, private, agricultural, military, etc.' (Wit, 1996) De IEA maakt in deze definitie dus geen onderscheid tussen gebunkerde brandstof voor internationale en binnenlandse vluchten. In dit rapport wordt echter alleen de brandstof die voor internationale vluchten gebunkerd is, meegeteld.

6. Allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van de passagiers of vracht, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het vertrek- en bestemmingsland;
7. Allocatie naar landen op basis van het land van herkomst van de passagiers of van de eigenaar van de vracht;
8. Allocatie naar landen op basis van de landsgrenzen, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld aan de hand van de nationale luchtruimen.

In de volgende paragrafen worden de allocatiemethoden uitgelegd, waarna met behulp van een voorbeeld elke methode toegelicht wordt. Het voorbeeld betreft een vliegtuig dat van Schiphol (Amsterdam) via Heathrow (Londen) naar Dulles Airport (Washington D.C.) vliegt. Op Schiphol stappen passagiers uit Nederland, Groot-Brittannië, België en Verenigde Staten in. De vervoersmaatschappij is Nederlands. Het vliegtuig is in Nederland volgetankt en tankt tijdens de tussenstop in Londen niet om tijdsverlies te voorkomen. In Londen stapt wel een aantal mensen uit en stappen er Britse en Amerikaanse passagiers aan boord.

Na de beschrijving en uitleg van de methode wordt een beoordeling gegeven van de huidige situatie op basis van (praktische) uitvoerbaarheid, efficiëntie en rechtvaardigheid (Wit, 1996). In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk volgt het eindresultaat van de beoordeling. Er volgt eerst een korte uitleg over deze drie criteria.

Uitvoerbaarheid

Onder (praktische) uitvoerbaarheid wordt verstaan in hoeverre de allocatie verwerkelijk kan worden in de praktijk. Ten eerste moeten de gegevens die nodig zijn om de methode uit te voeren, beschikbaar en overzichtelijk zijn. Daarnaast is het belangrijk dat de methode transparant is. Als de gemaakte berekeningen eenvoudig door derden gecontroleerd kunnen worden met de beschikbare gegevens, neemt de transparantie toe. Eenvoudige berekeningen hebben hierom de voorkeur, ook omdat de methode dan beter te begrijpen is en (daardoor sneller) geaccepteerd wordt door de gebruikers.

Efficiëntie

Het tweede criterium is efficiëntie. Vanuit economische oogpunt is het belangrijk dat de kosten van het te voeren beleid zo laag mogelijk zijn. Deze eigenschap is mede van belang voor de acceptatie van het beleid. Het houdt in dat de emissies zodanig moeten worden toebedeeld, dat een land de emissies met grote efficiëntie onder controle kan houden. Oftewel: de gekozen allocatiemethode moet landen de mogelijkheid bieden beleid te implementeren dat de hoeveelheid toebedeelde emissies effectief kan verminderen. Daarnaast is het van belang dat de methode een incentive of stimulans geeft aan de betrokken landen om de te nemen beleidsmaatregelen ook daadwerkelijk in te voeren.

Rechtvaardigheid

Dit criterium speelt een grote rol bij het maken van een keuze tussen de verschillende allocatiemethoden. Het meest rechtvaardig is om emissies toe te delen in verhouding tot de behaalde economische voordelen. Landen die voordeel behalen aan een vliegbeweging zijn het vertrek- en aankomstland, het land van de uitvoerende luchtvaartmaatschappij en van de landen van passagiers of vracht. Vanwege dit groot aantal mogelijke begunstigers is het moeilijk een rechtvaardige methode te definiëren. Het polluter-pays-principle is een mogelijkheid om een methode als rechtvaardig te beoordelen. Dit principe houdt in dat de vervuiler indirect betaalt voor de door hem veroorzaakte emissies. Door de invoering van een (internationaal) beleid moet een land geld investeren in maatregelen om de hoeveelheid emissies terug te dringen. Hoe meer emissies veroorzaakt zijn door het betreffende land, hoe meer geld geïnvesteerd moet worden in maatregelen en beleid. Als het vervuiler-betaalt-principe geldt, kan de methode als rechtvaardig worden gezien. (Wit, 1996)

Tabel 3.3 Overzicht van de criteria waarop de allocatiemethoden beoordeeld worden

Criterium	Deelcriterium
Uitvoerbaarheid	Zijn de juiste gegevens beschikbaar? Is de methode transparant?
Efficiëntie	Emissievermindering mogelijk tegen lage kosten? Geeft de methode een incentive?
Rechtvaardigheid	Kosten in verhouding tot economische voordelen? Geldt het polluter-pays-principle?

Elk criterium is opgesplitst in twee deelcriteria, zoals in de bovenstaande tabel te lezen is (zie tabel 3.3). Er moet echter wel rekening mee worden gehouden dat de deelcriteria elkaar kunnen beïnvloeden. In geval van efficiëntie geldt dat als de kosten voor het invoeren van beleidsmaatregelen hoog zijn, dat de betrokken landen geen incentive zal geven.

3.4 Allocatie LTO-emissies

De eerste allocatiemethode is ‘Allocatie LTO-emissies’. Er vindt geen verdeling van emissies plaats naar landen op nationaal niveau. De landen tellen (zoals in de huidige situatie) alleen de broeikasgasemissies door binnenlandse vluchten mee op basis van de hoeveelheid verkochte brandstof en van de overige niet-broeikasgassen alleen de emissies door de LTO-cycli van alle vluchten van en naar Schiphol (zie §3.2.3). De emissies door de internationale luchtvaart blijven onder artikel 4.2 van de Convention behoren (zie §3.1). Emissievermindering kan met deze methode alleen bereikt worden, als een internationaal emissiebeleid met als doel de broeikasgassen onder controle te houden, geïmplementeerd wordt. ICAO kan hierin de coördinerende rol spelen. (SBSTA, 1996a; Wit, 1996)

In het ontwikkelde model (zie hoofdstuk 4) wordt de gebruikte methode echter aangepast. Alleen de LTO-emissies door internationale vluchten van en naar Schiphol tellen mee in de berekening. Dit maakt de uiteindelijke vergelijking van de uitkomsten van het model betekenisvoller. Van de emissies uit het voorbeeld tellen bij deze methode alleen de LTO-emissies mee.

Uitvoerbaarheid

De methode is goed uitvoerbaar. De betrokken landen hebben ervaring met de te gebruiken rekenmethode, want die wordt ook in de huidige situatie gebruikt. De gegevens die nodig zijn, zijn beschikbaar. Data met betrekking tot de vliegbeweging zijn niet nodig. Vanuit politiek oogpunt is de uitvoerbaarheid hoog, want bij deze methode wordt een moeilijke discussie vermeden over welke allocatiemethode het beste en meest rechtvaardig is. Ook de transparantie van deze methode is hoog, omdat elk land eenvoudig gecontroleerd kan worden en er geen ingewikkelde rekenmethode gebruikt hoeft te worden. (Wit, 1996)

Een nadeel van deze methode is dat een groot deel van de internationale luchtvaartemissies niet wordt meegenomen in de berekening, namelijk de emissies tijdens de kruisvlucht.

Efficiëntie

Bij deze methode is een internationaal gecoördineerd beleid vereist om de hoeveelheid emissies terug te kunnen dringen. De efficiëntie daarvan hangt af van de bereidheid van de betrokken landen om een zogenaamd 'emissiebeleid' te implementeren en van het soort beleidsinstrument dat gebruikt wordt. Veel landen zijn bereid mee te werken, mits elk land meewerkt. Dit is van groot belang voor het slagen, want zonder de medewerking van alle landen faalt de methode. Internationale consensus is dus een minimum vereiste in dit proces. Als elk land meewerkt geeft dat alle betrokken landen een sterke stimulans, want gezamenlijk kan meer bereikt worden dan individueel. De emissies kunnen dan met hoge efficiëntie onder controle gehouden worden. De kosten voor het gezamenlijk verminderen van de emissies vallen lager uit dan bij een individuele actie. (Wit, 1996)

Rechtvaardigheid

Is de methode ook rechtvaardig? Het lijkt een rechtvaardige methode, toch is het echter moeilijk om een allocatiemethode te definiëren die voor alle partijen rechtvaardig uitvalt. Deze methode behandelt elk land gelijk in een internationaal emissiebeleid. Elk land krijgt, mits het mee wil werken, de taak de emissies terug te dringen die zij ook veroorzaakt heeft. De grootste vervuilers betalen het hoogste bedrag om de emissies in hun land terug te dringen; het polluter-pays-principle geldt bij deze methode. (Wit, 1996)

De methode is grotendeels in verhouding tot de economische voordelen. Een land verdient geld aan elk vliegtuig dat op haar luchthaven arriveert of weer vertrekt, terwijl de toedeling op basis van het aantal LTO-cycli gebeurt. Hoe meer vliegbewegingen in een land, hoe meer economische voordeel er behaald wordt, en des te meer emissies aan dat land worden toebedeeld.

3.5 Proportionele allocatie

Als tweede allocatiemethode is voorgesteld: ‘allocatie naar landen op basis van de mondiale emissies van gebunkerde brandstoffen in verhouding tot de nationale emissies’. Uitgangspunt is het percentage van de totale mondiale emissies dat door de internationale luchtvaart veroorzaakt wordt.

De methode is als volgt te formuleren:

toebedeelde emissies aan land i = $\frac{\text{totale internationale luchtvaartemissies}}{\text{totale mondiale emissies}} * (\text{nationale emissies door land } i)$

Stel, in 1990 was het aandeel van de CO₂-emissies door de internationale luchtvaart 2% van de totale mondiale CO₂-emissies. Elk deelnemend land telt vervolgens 2% extra bij haar nationale emissies. (SBSTA, 1996a; Wit, 1996)

In dit geval zijn de door het voorbeeldvliegtuig veroorzaakte emissies niet van belang. Elk land krijgt emissies toebedeeld, ongeacht de gemaakte vliegbewegingen.

Uitvoerbaarheid

Deze allocatiemethode is goed uitvoerbaar. Er zijn weinig data vereist en de beschikbaarheid daarvan is hoog. De benodigde data zijn niet gerelateerd aan de gemaakte vliegbeweging. Daarnaast is de methode transparant, doordat de te maken berekening eenvoudig is. Controle van de resultaten is dus goed mogelijk. (SBSTA, 1996a; Wit, 1996)

Efficiëntie

Ook bij deze methode is internationale consensus een vereiste. Om de emissies te kunnen verminderen, moeten landen samenwerken. Gezamenlijk kunnen de landen er voor zorgen dat de internationale luchtvaartemissies een kleiner percentage van de totale mondiale emissies vormen. Daarnaast kan een land werken aan vermindering van haar nationale emissies. Hierdoor vermindert de hoeveelheid emissies die moet worden opgeteld bij de nationale emissies om de luchtvaartemissies te compenseren.

De landen hebben verschillende mogelijkheden om hun hoeveelheid emissies te verlagen, zoals het geven van subsidies op schone motoren of het opleggen van heffingen op vervuilende vliegtuigen. De kosten vallen hierdoor gemiddeld uit. Daarnaast geeft de methode door de diverse mogelijkheden voor een verminderingsbeleid een duidelijk incentive aan landen. Elk land kan effectief de emissies aanpakken, mits er samengewerkt wordt.

Rechtvaardigheid

De rechtvaardigheid is moeilijk te bepalen. Er wordt bij deze methode uitgegaan van een verband tussen de nationale economie (en de daaraan gerelateerde emissie van broeikasgassen) en de vraag naar (lucht)transport. Binnen een bepaalde marge hangen

economische vooruitgang en de transportvraag wel samen: inwoners uit een land met een sterke economische groei reizen meer en zorgen daardoor voor een grotere uitstoot van vervuilende stoffen. Een land met een grote mobiliteit behaalt echter ook veel economisch voordeel uit de transportsector. De toebedeelde emissies zijn in verhouding tot de behaalde voordelen. (Wit, 1996)

Het polluter-pays-principle met betrekking tot luchtvaartemissies gaat niet op, alhoewel het voor de totale nationale emissies wel deels opgaat. Een land wordt beoordeeld op haar totale nationale emissies, waarvan slechts een klein deel door luchtvaart veroorzaakt zijn. De uitkomst van deze methode komt in het algemeen niet overeen met de luchtvaartemissies: landen omringd door water worden onderschat, terwijl landen met een energie-intensieve industrie overschat worden. (Wit, 1996)

Er geldt echter wel dat voor een land met hoge nationale emissies het percentage internationale luchtvaartemissies / mondiale emissies meer is, dan voor een land met lage nationale emissie.

Extra optie

Deze methode kan worden verbeterd door de emissies niet op basis van de nationale emissies toe te delen, maar op basis van het aantal LTO-cycli in het betreffende land. In formulevorm:

$$\text{toebedeelde emissies aan land } i = \frac{\text{totale internationale luchtvaartemissies}}{\text{totaal aantal mondiale LTO-cycli}} * (\text{aantal LTO-cycli in land } i)$$

Elk land beschikt over het aantal gemaakte LTO-cycli, waardoor de beschikbaarheid hoog is. De berekeningsmethode is eenvoudig en transparant. Verder geeft de methode een incentive om het aantal cycli in elk land te verminderen, door bijvoorbeeld het heffen van een LTO-toeslag. Op deze manier zou ook het polluter-pays-principle gelden, want in de landen waar veel vliegtuigen landen en opstijgen, zijn ook de emissies hoog.

3.6 Allocatie aan de hand van de hoeveelheid gebunkerde brandstof

De derde methode is ‘Allocatie naar landen op basis van het land waar de brandstof gebunkerd is’. Deze methode wordt al toegepast, want emissies veroorzaakt door het wegtransport worden aan landen toegewezen op basis van de brandstofafzet. Internationale luchtvaartemissies hebben echter te maken met andere factoren, zoals het aantal voertuigen en het groot aantal betrokken instanties en bijbehorende besluitvormingsproces. (SBSTA, 1996a; Wit, 1996)

In het voorbeeld is het vliegtuig volgetankt in Nederland. Tijdens de tussenlanding wordt niet meer brandstof bijgetankt. De emissies van deze vliegbeweging worden volledig aan Nederland toebedeeld.

Uitvoerbaarheid

Deze methode is uitvoerbaar, want de benodigde gegevens zijn simpel en beschikbaar. Er is geen extra informatie nodig over de vliegbeweging, zoals de bestemming of de nationaliteit van de passagiers. Daarnaast is de transparantie hoog, want de berekening is eenvoudig uit te voeren. Ook de controle is goed uitvoerbaar.

Een nadeel is dat er niet tijdens alle tussenlandingen getankt wordt. Er ontstaat een verschil tussen de hoeveelheid getankte brandstof en de hoeveelheid verbruikte brandstof op een vlucht, terwijl de emissies wel op basis van de hoeveelheid getankte brandstof worden verdeeld. (SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Efficiëntie

Deze methode scoort op het gebied van efficiëntie niet hoog. Het brandstofverbruik is bijvoorbeeld aan te pakken door het heffen van een brandstoftoeslag of het invoeren van een brandstofaccijns. Door het voeren van dergelijk beleid vindt er waarschijnlijk een verschuiving plaats van de landen waar normaal getankt wordt naar die landen waar geen toeslag op brandstof is geheven. Een vliegtuigmaatschappij verlegt haar vliegroutes en tankt de brandstof in een ander (goedkoper) land. Dit kan vermeden worden door een internationaal georganiseerde regeling, waardoor er geen ongelijkheid tussen de landen ontstaat. Er kan echter niet worden voorkomen dat luchtvaartmaatschappijen onbeperkt brandstof tanken. Een eventuele toeslag berekenen ze door in de prijs van hun vliegtickets. Het deel van de passagiers dat voor zaken vliegt, zal echter bereid zijn de hogere prijs te betalen (zie bijlage 11). De prijselasticiteit van dit soort reizigers is laag. De passagiers die daarentegen het vliegtuig voor vakantie hebben gekozen, worden door deze maatregel beïnvloed. Het aantal vluchten neemt langzaam af, net als het brandstofverbruik. Op Schiphol is 38 procent van alle reizigers zakelijk (Schiphol, 1999).

De hoeveelheid toebedeelde emissies is slechts gedeeltelijk te beïnvloeden, terwijl de (beleids)mogelijkheden beperkt zijn. Daarom krijgen de betrokken landen geen grote incentive voor deze methode. De kosten voor het beleid zijn echter niet hoog. (Michaelis, 1997; SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Rechtvaardigheid

Het polluter-pays-principle gaat bij deze methode deels op. Landen krijgen de emissies toebedeeld op basis van de gebunkerde brandstof die direct de emissies veroorzaakt. De verdeling is niet altijd eerlijk, vooral voor landen waar in de huidige situatie veel getankt wordt door de lage prijs of door de geografische ligging. Deze landen behalen weinig economisch voordeel uit de vlucht, terwijl ze wel de emissies toebedeeld krijgen.

Er wordt in deze methode ook geen rekening gehouden met extra gebunkerde brandstof: alle gebunkerde brandstof wordt verondersteld gebruikt te worden voor de vlucht waarvoor getankt is. Als een vliegtuig een tussenlanding maakt waar het geen brandstof meer bijtankt, kloppen de uitkomsten van deze methode niet. Tijdens het eerste deel van de vlucht wordt een overschatting van de verbruikte brandstof gemaakt, terwijl de tweede deel van de vlucht (na de tussenlanding) niet meegerekend wordt. Er is immers geen brandstof gebunkerd. (SBSTA, 1999; Van Velzen en Wit, 2000; Wit, 1996)

3.7 Allocatie aan de hand van de nationaliteit van de vervoersmaatschappij

‘Allocatie naar landen op basis van de nationaliteit van de vervoersmaatschappij, het land waar het vliegtuig geregistreerd staat of het land van de uitvoerende luchtvaartmaatschappij (operator)’ is de vierde methode. Er worden in deze methode drie opties gehanteerd, zoals in de bovenstaande omschrijving te lezen is. De eenvoudigste methode van toewijzen is op basis van de nationaliteit van de vervoersmaatschappij. De emissies worden in dit geval proportioneel toegewezen aan de landen waartoe de maatschappijen behoren. (SBSTA, 1996a; SBSTA, 1996b; Wit, 1996)

Het voorbeeldvliegtuig heeft een Nederlandse vervoersmaatschappij. Alle emissies worden daarom toegewezen aan Nederland.

Uitvoerbaarheid

De uitvoerbaarheid van deze methode is gemiddeld, met name het verzamelen van de juiste data. Elk land beschikt niet over de juiste gegevens. Veel data moeten worden verkregen bij de vervoersmaatschappijen zelf, die van hun gemaakte vliegbewegingen de juiste gegevens bijhouden. De vraag is in hoeverre de maatschappijen bereid zijn mee te werken. In dit geval moeten luchtvaartmaatschappijen een incentive krijgen om mee te werken en de juiste gegevens te verstrekken. Ook internationale samenwerking is van groot belang, om over de juiste informatie te kunnen beschikken.

De methode is deels transparant. De rekenmethode is eenvoudig, maar de controle van de gegevens is lastig. (SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Efficiëntie

Met deze methode kunnen landen hun nationale vloot efficiënt aanpakken door hen direct maatregelen op te leggen. Er wordt een incentive verkregen om de emissies van de nationale vervoersmaatschappijen te verminderen, bijvoorbeeld door een toeslag voor brandstof of een subsidie voor het gebruik van schone motoren. De kosten die dit met zich meebrengt, zijn gemiddeld. (Michaelis, 1997; SBSTA, 1996a; Wit, 1996) Een bijkomend probleem is echter

dat luchtvaartmaatschappijen zich kunnen laten overschrijven naar een ander land. Als er internationaal wordt samengewerkt, kan dit voorkomen worden.

Rechtvaardigheid

Een van de landen die economisch voordeel uit een vliegbeweging behaalt, is het land waar de vervoersmaatschappij vandaan komt. Dit land krijgt bij deze methode alle emissies toebedeeld, terwijl het indirect ook voor de emissies zorgt. Het polluter-pays-principle gaat daarom deels op. (Wit, 1996)

3.8 Allocatie aan de hand van het vertrek- en aankomstland van het vliegtuig

De vijfde methode is ‘Allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van het vliegtuig, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het aankomst- en vertrekland’. Er kan gekozen worden hoe de emissies tussen het vertrek- en het aankomstland verdeeld worden. In dit geval is gekozen om de helft van de totale emissies van de reis aan het vertrekland toe te delen, en de andere helft aan het aankomstland. Een tussenlanding wordt niet meegerekend. Het gaat om het land van vertrek en het land dat het vliegtuig als eindbestemming heeft. Er is echter een uitzondering: als het vliegtuig van vluchtnummer verandert, geldt de plaats waar dit gebeurt als eindbestemming. Het vliegtuig met het nieuwe vluchtnummer begint aan een nieuwe vliegbeweging.

Het vliegtuig uit het voorbeeld vertrekt uit Nederland naar de Verenigde Staten, maar maakt een tussenlanding in Londen. De emissies van de vlucht worden toegewezen aan Nederland en de Verenigde Staten.

Uitvoerbaarheid

De uitvoerbaarheid van deze methode is laag. In de eerste plaats zijn de benodigde gegevens moeilijk te verkrijgen, omdat ze niet (overall) openbaar zijn. Ten tweede is een goede uitwisseling van informatie tussen de betrokken landen noodzakelijk. De methode is niet transparant, want de gebruikte rekenmethode is ingewikkeld. Daarnaast is controle door derden lastig, omdat de basisgegevens moeilijk te controleren zijn. (SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Efficiëntie

Voor de betrokken landen is het moeilijk om de aan hun toebedeelde emissies te verminderen. Een mogelijkheid is een toeslag op kerosine om op die manier de hoeveelheid getankte brandstof in het vertrekland te verminderen. Daarnaast kunnen afspraken worden gemaakt over de maximaal toegelaten uitstoot van schadelijke stoffen door een vliegtuig. Dan kunnen vliegtuigen die in de betrokken landen mogen opstijgen en landen geselecteerd

worden op basis van de hoeveelheid emissies. De emissies dalen en de betrokken landen krijgen minder toebedeeld. Beide beleidsmaatregelen moeten wel internationaal worden ingevoerd om ongelijkheid tussen de betrokken landen te voorkomen. De kosten zijn hoog, bijvoorbeeld voor het verzamelen van alle benodigde gegevens. De incentive is laag door de moeilijkheid om de emissies te kunnen verminderen. Dit samen leidt tot een lage efficiëntie. (Michaelis, 1997; SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Rechtvaardigheid

De methode is grotendeels rechtvaardig. Twee landen die veel voordeel halen uit de betreffende vliegbeweging, krijgen de emissies toebedeeld. De methode wordt nog rechtvaardiger als de luchtvaartmaatschappij de nationaliteit heeft van één van de landen. Het polluter-pays-principle gaat dus grotendeels op. Het vertrek- en aankomstland zijn in dit geval de vervuilers. (SBSTA, 1999; Wit, 1996)

3.9 Allocatie aan de hand van het vertrek- en aankomstland van passagiers

De zesde methode houdt in: ‘allocatie naar landen op basis van het vertrek- en aankomstland van de passagiers of vracht, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld tussen het vertrek- en bestemmingsland’. Er wordt gekozen in deze methode gekozen om de helft van de internationale luchtvaartemissies toe te delen aan het vertrekland en de andere helft aan het aankomstland van de passagiers en vracht. (SBSTA, 1996a; Wit, 1996) Ook hier geldt een tussenlanding niet. Het gaat om de start- en eindbestemming van de passagiers. Wanneer ze echter van vliegtuig én vluchtnummer wisselen, geldt het land waar dit gebeurt als eindbestemming.

In dit geval worden de emissies veroorzaakt door het voorbeeldvliegtuig toegewezen aan Nederland, Groot-Brittannië en de Verenigde Staten. Een deel van de passagiers vliegt slechts een gedeelte van de vlucht mee: van Amsterdam tot Londen of van Londen naar Washington. Het andere deel vliegt de hele vlucht mee.

Uitvoerbaarheid

Ook voor deze methode is gedetailleerde informatie nodig, die moeilijk en niet wereldwijd verkrijgbaar is. Extra administratie is nodig om over de juiste gegevens te kunnen beschikken. Uitwisseling van informatie tussen de landen is noodzakelijk, wat zorgt voor een traag verwerkingsproces. Als laatste geldt dat de te gebruiken berekeningsmethode voor deze allocatiemethode lastig is, wat ervoor zorgt dat de transparantie laag is. Samen maakt dit de uitvoerbaarheid erg laag. (SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Efficiëntie

De kosten die bij deze methode gemaakt moeten worden, zijn hoog. Het verzamelen van de juiste gegevens kost extra geld, wat niet bijdraagt aan de efficiëntie van de methode. De methode geeft ook geen incentive om een verminderingsbeleid te implementeren. De emissies verminderen kan alleen door een daling in de vraag naar luchttransport. Dit kan bereikt worden door het invoeren van prijsmaatregelen, zoals een directe toeslag op het vliegticket of indirect door een brandstoftoeslag. De prijselasticiteit is afhankelijk van het soort reiziger. Zakenreizigers worden niet in grote mate beïnvloed door de prijs van het ticket. Vakantiereizigers daarentegen nemen de prijs wel degelijk mee in de beslissing of ze een vliegvakantie willen boeken. Door een toeslag op het ticket daalt de vraag onder vakantiegangers, maar voor zakenmensen blijft de vraag gelijk. Daarnaast hebben technische en operationele maatregelen geen effect op de vraag naar luchttransport. De efficiëntie van deze methode is daarom laag. (Olsthoorn, 2000; SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999; Wit, 1996)

Rechtvaardigheid

Het polluter-pays-principle gaat op, want de landen die de emissies veroorzaken worden bij deze methode ook belast. De passagiers en de vracht zorgen direct voor de vraag naar luchtvervoer en de bijbehorende emissies. Ook halen beide landen voordeel uit de vliegbeweging, waardoor de methode in verhouding is met de economische voordelen. De rechtvaardigheid is dus hoog. (SBSTA, 1999; Wit, 1996)

3.10 Allocatie aan de hand van de nationaliteit van passagiers

‘Allocatie naar landen op basis van het land van herkomst van de passagiers of van de eigenaar van de vracht’ is de zevende allocatiemethode. Aan de hand van de nationaliteit van de passagiers en vracht worden de emissies toebedeeld. Elk land wordt verantwoordelijk gesteld voor de emissies die veroorzaakt worden door haar inwoners. Voor tussenlandingen geldt hetzelfde als in de vorige twee methoden: ze worden niet meegerekend. Als passagiers in een bepaald land uitstappen of in een vliegtuig met een ander vluchtnummer overstappen, geldt dat land als eindbestemming.

In het vliegtuig uit het voorbeeld zaten passagiers uit Nederland, België, Groot-Brittannië en de Verenigde Staten. Deze vier landen krijgen elk een evenredig deel van de emissies toebedeeld.

Uitvoerbaarheid

Deze methode heeft gedetailleerde informatie nodig, die moeilijk te verkrijgen is. Ook de rekenmethode is gecompliceerd en moeilijk controleerbaar. (SBSTA, 1996a; SBSTA, 1999) Vooral voor personen die een internationale vlucht maken in het buitenland zijn de gegevens moeilijk te krijgen, bijvoorbeeld een Nederlander die een rondreis in Azië maakt en van

Thailand naar Indonesië vliegt. Dergelijke data maken de methode moeilijk uitvoerbaar en niet-transparant.

Efficiëntie

Ook deze methode heeft hoge kosten door de benodigde gedetailleerde data. Om de emissies daadwerkelijk te verminderen, geldt dezelfde moeilijkheid als bij de vorige methode: de vraag naar luchttransport moet dalen. Dat kan slechts deels bereikt worden door het invoeren van prijsmaatregelen. (SBSTA, 1996b) De beperkte mogelijkheden geeft de betrokken landen geen incentive. De efficiëntie van deze methode is daarom laag.

Rechtvaardigheid

In dit geval gaat het polluter-pays-principle zeker op. De passagiers bepalen de vraag en daarmee ook het aanbod van luchttransport. Ze zijn degenen die direct voor de vervuiling zorgen. Het land waartoe ze behoren, betaalt daar de prijs voor. Daarnaast is dit ook in verhouding tot de economische voordelen die behaald worden aan de vliegbeweging.

3.11 Allocatie aan de hand van de landsgrenzen

De achtste en laatste methode houdt in ‘Allocatie naar landen op basis van de landsgrenzen, waarbij de emissies gerelateerd aan de vliegbeweging worden verdeeld aan de hand van de nationale luchtruimen’.

In het voorbeeld wordt het grootste deel van de vlucht boven de Atlantische oceaan gevlogen. Een klein deel wordt boven Nederlands, Brits en Amerikaans grondgebied gevlogen. De emissies die binnen hun landsgrenzen zijn veroorzaakt, wordt aan hen toegewezen.

Uitvoerbaarheid

Deze methode is niet uitvoerbaar. De emissies door vliegbewegingen boven internationale wateren worden niet meegerekend, waardoor deze methode geen werelddekking geeft. De methode is niet transparant, want het controleren van hoeveel en hoelang de vliegtuigen in een nationaal luchtruim vliegen, kost veel tijd. (SBSTA, 1996a)

Efficiëntie

De efficiëntie van deze methode is laag. Landen kunnen de aan hun toebedeelde emissies niet beïnvloeden. De enige oplossing is de vliegroutes verleggen; als elk land dat echter zou doen, is er geen enkel vliegverkeer meer mogelijk. De methode geeft dus geen incentive aan de betrokken landen. De kosten van deze methode zijn niet te bepalen, omdat er geen beleid gevoerd kan worden.

Rechtvaardigheid

De methode lijkt rechtvaardig, maar het polluter-pays-principle gaat in dit geval niet op. Veel landen krijgen emissies toebedeeld, omdat het vliegtuig over hun grondgebied vliegt. Die landen zijn echter niet de vervuiler. Daarnaast behalen zij geen voordeel aan de betreffende vliegbewegingen. (SBSTA, 1999)

3.12 Vergelijking van de allocatiemethoden

In deze paragraaf worden de beoordelingen van de allocatiemethoden die in de vorige paragrafen aan bod zijn geweest, samengevat. Eerst wordt aangegeven welke landen door de voorbeeldvlucht emissies toebedeeld krijgen. Daarna wordt de beoordeling van de allocatiemethoden kwantitatief uitgedrukt, waarbij een gewogen eindscore berekend wordt aan de hand van de genoemde criteria.

Voorbeeld

Na de toelichting van elke methode is het genoemde voorbeeld behandeld. Hieronder staan de resultaten van het voorbeeld in een tabel gerangschikt (zie tabel 3.4). Per methode is aangegeven welk land (een deel van) de emissies krijgt toebedeeld.

De laatste kolom bevat afwijkende allocatiemethoden. Bij de eerste twee methoden krijgen alle landen emissies toebedeeld, ongeacht het aantal gemaakte vliegbewegingen. De achtste methode heeft geen volledige werelddekking, waardoor zij afwijkt van de andere methoden.

Tabel 3.4 Overzicht per allocatiemethode van de landen die naar aanleiding van het voorbeeld (een deel van) de emissies toebedeeld krijgen

Allocatiemethoden	België	G.B.	NL	V.S.	Anders
1 Allocatie LTO-emissies			X*		
2 Proportionele allocatie					X
3 Gebunkerde brandstof			X		
4 Nationaliteit vervoersmaatschappij			X		
5 Vertrek- en aankomstland vliegtuig			X	X	
6 Vertrek- en aankomstland passagiers		X	X	X	
7 Nationaliteit passagiers	X	X	X	X	
8 Landsgrenzen		X	X	X	X

* alleen LTO-emissies

Beoordeling

Tabel 3.5 geeft een samenvattend overzicht van de beoordeling, gegeven in de vorige paragrafen. Bijvoorbeeld, als een methode niet transparant is, staat in de tabel de waarde van - of --. Het kan echter ook zijn dat de gegevens goed beschikbaar zijn, waardoor aan het

betreffende criterium een waarde van + of ++ wordt toegekend. Een enkele keer is een methode neutraal beoordeeld. Dit betreft de eerste en tweede allocatiemethode, waarbij eerst internationale consensus bereikt moet zijn, voordat elk land bereid is mee te werken. Deze voorwaarde zorgt ervoor dat er geen inschatting van de efficiëntie gemaakt kan worden. Elk cijfer in de eerste kolom van de onderstaande tabel verwijst naar een allocatiemethode, waarvan de juiste omschrijving in tabel 3.4 te vinden is.

Tabel 3.5 Overzicht van de beoordeling van de verschillende allocatiemethoden

Allocatie- methoden	Uitvoerbaarheid		Efficiëntie		Rechtvaardigheid	
	Beschikbaar?	Transparant	Incentive?	Kosten?	PP-principle	I.v.t. ec. voordelen?
1	+	++	0	0	+	+
2	++	++	0	0	-	+
3	+	++	-	+	+	- ¹⁹
4	+	+	+	+	+	+
5	-	-	-	-	+	+
6	-	-	-	-	+	+
7	--	--	-	-	++	+
8	--	--	--	0	-	-
Weging	1x	2x	2x	2x	3x	3x

Legenda van tabel 3.5:

- Zeer negatief / zeer laag / zeer slecht
- Negatief / laag / slecht
- 0 Neutraal
- + Positief / hoog / goed
- ++ Zeer positief / zeer hoog / zeer goed

Door de bovenstaande beoordeling per methode op te tellen, wordt de eindscore berekend (zie tabel 3.6). Hierbij geldt een ‘++’ als +2 en een ‘-’ als -1. In dit onderzoek is gekozen om de criteria te wegen bij de berekening van de eindscore, want ze zijn niet allemaal van even groot belang (zie laatste rij in tabel 3.5). De hoogte van de wegingsfactoren is een eigen inschatting. Bij de weging speelt mee in hoeverre de beoordeling op een criterium in de toekomst zou kunnen worden verbeterd door bijvoorbeeld financiële middelen (denk aan data beschikbaarheid). De rechtvaardigheidscriteria zijn principiëler van aard van de uitvoerbaarheidscriteria en de scores daarop zijn minder beïnvloedbaar voor verbeteringen.

De score van het eerste criterium ‘beschikbaarheid gegevens’ telt één keer mee in de berekening van de eindscore. Dit criterium is te verbeteren door bijvoorbeeld organisaties te verplichten bepaalde data bij te houden voor de emissieberekening. Als die gegevens op dit moment nog niet voldoende beschikbaar zijn, is dat dus niet van groot belang.

¹⁹ Deze beoordeling is gemaakt op basis van de huidige situatie. Indien in de toekomst brandstofheffingen of accijnzen ingevoerd worden, zal deze negatieve beoordeling (-) wijzigen in een positief oordeel (+), omdat het mogelijk dat landen met een grote bunkermarkt inkomsten genereren uit de genoemde heffingen en/of accijnzen.

De scores van de criteria ‘Transparantie’, ‘Incentive’ en ‘Kosten’ tellen twee keer mee. Efficiëntie is moeilijker te verbeteren. Er hangt altijd een prijskaartje aan nieuwe maatregelen, terwijl de hoge kosten ook zorgen voor een lage incentive. Een overkoepelend orgaan kan de methoden wel financieel stimuleren, maar de uitwerking moet toch van de betrokken landen zelf komen. Ook het verbeteren van de transparantie van een methode is moeilijk te bereiken: de rekenmethode kan aangepast worden, maar de uitkomst moet wel hetzelfde blijven.

De scores van de laatste criteria ‘pp-principle’ en ‘i.v.t. ec. voordelen’ tellen drie maal mee. Bij deze criteria is het van belang dat ze nu al positief zijn. Het is niet mogelijk de methode zodanig te wijzigen dat deze beoordeling positiever uitvalt. Dit levert het resultaat uit tabel 3.6 op.

Tabel 3.6 *Eindscores in de beoordeling van de allocatiemethoden*

Allocatiemethoden	Eindscore
1 Allocatie LTO-emissies	+11
2 Proportionele allocatie	+6
3 Gebunkerde brandstof	+5
4 Nationaliteit vervoersmaatschappij	+13
5 Vertrek- en aankomstland vliegtuig	-1
6 Vertrek- en aankomstland passagiers / vracht	-1
7 Nationaliteit passagiers / vracht	-1
8 Landsgrenzen	-16

Het eerste dat opvalt aan de beoordeling, is de tweedeling in eindscores. De eerste vier methoden hebben een positieve eindscore. Ze zijn ook door de SBSTA goedgekeurd. De andere methoden vallen negatief uit. Ze zijn reeds door SBSTA gemerkt als niet praktisch vanwege onvoldoende beschikbaarheid van de gegevens of onvolledige werelddekking. (SBSTA, 1996a)

De allocatiemethode ‘Allocatie LTO-emissies’ en ‘Nationaliteit luchtvaartmaatschappij’ scoren het hoogst met respectievelijk 11 en 13 punten. De eerste optie lijkt door de hoge score ook een goede mogelijkheid. Het criterium ‘efficiëntie’ in methode 1 (‘Allocatie LTO-emissies’) zorgt echter voor een grote onzekerheid binnen de eindbeoordeling, omdat het resultaat van de methode niet in te schatten is. De overige criteria zijn wel positief gestemd. Het is echter geen (nieuwe) optie; de situatie blijft gelijk aan de huidige situatie. Nu rijst de vraag: ‘waarom moeten de emissie dan verdeeld worden? De huidige situatie voldoet blijkbaar prima?’ Dit klopt, alleen is voor deze methode internationale consensus een minimale voorwaarde. Zonder overeenstemming bereikt de eerste methode niet veel. In de overige methoden is in elk geval al besloten om de emissies gezamenlijk aan te pakken.

Landen worden door dergelijke methoden meer gebonden aan afspraken, terwijl bij de eerste optie meer ruimte is om de deelname te stoppen of beleid niet te accepteren of implementeren.

De methode ‘Nationaliteit luchtvaartmaatschappij’ valt op, omdat het de enige methode is met een positieve score voor elk criterium. De methode is zowel uitvoerbaar, efficiënt als rechtvaardig. Voorwaarde is dat de invoering van deze methode internationaal plaatsvindt, om zo het wisselen van nationaliteit van maatschappijen te voorkomen.

Allocatiemethode ‘Proportionele allocatie’ en ‘Gebunkerde brandstof’ vallen lager uit dan methode 1 en 4, maar blijven wel positief. De lagere score wordt vooral veroorzaakt door de criteria efficiëntie en rechtvaardigheid, de beschikbaarheid van de gegevens is daarentegen goed. Zoals hierboven ook vermeld is, is rechtvaardigheid niet te verbeteren. Dit maakt deze methoden minder goed geschikt als allocatiemethode.

De methoden ‘Vertrek- en aankomstland vliegtuig’, ‘Vertrek- en aankomstland passagiers’ en ‘Nationaliteit passagiers’ hebben een score net onder nul. Rechtvaardigheid scoort bij deze methoden goed, de nadelen zijn zowel de uitvoerbaarheid als de efficiëntie. Deze criteria zijn grotendeels te verbeteren, maar niet volledig. Aangezien elk deelcriterium van uitvoerbaarheid en efficiëntie een negatieve score heeft, zal een verbetering van de methode een complete verandering van de rekenwijze inhouden. Het resultaat zal een andere methode zijn en niet een verbetering van de huidige versie.

De laatste methode (‘Landsgrenzen’) valt af door de onvolledige werelddekking. Het doel van de allocatiemethode is om de emissies te kunnen verminderen door toedeling aan landen. Als een deel van de emissies onverdeeld blijven, is vermindering van emissies moeilijker te realiseren. Overigens, alle criteria bij deze methode komen negatief uit, zodat ook eindscore een zeer negatieve waarde heeft.

3.13 Conclusie

Concluderend kan gezegd worden dat bij de gehanteerde criteria, de gebruikte methodiek om de allocatiemethoden op criteria te laten scoren en de vastgestelde wegingsfactoren de methode ‘Nationaliteit luchtvaartmaatschappij’ het beste resultaat oplevert. De eindscore is het hoogst, en alle criteria scoorden positief. Een verdeling van emissies op basis van de nationaliteit van de luchtvaartmaatschappij levert een uitvoerbare, efficiënte en rechtvaardige methode op. Een bijkomend voordeel is dat deze methode vrij eenvoudig gecontroleerd kan worden. Per land is bekend hoeveel brandstof er binnen een jaar gebunkerd is. Door de mondiaal gebunkerde brandstof te vergelijken met de brandstof verbruikt door alle nationale

luchtvaartmaatschappijen gezamenlijk, kan gecontroleerd worden of de aangevoerde data volledig is.

De methoden ‘Allocatie LTO-emissies’, ‘Proportionele allocatie’ en ‘Gebunkerde brandstof’ hebben ook een positieve eindscore, maar zijn minder geschikt vanwege een negatieve score bij efficiëntie of rechtvaardigheid; een onderdeel dat moeilijk te veranderen is. De overige vier methoden vallen negatief uit in de eindbeoordeling.

4 De ontwikkeling van het model MOBLEM

4.1 Inleiding

Zoals reeds in het eerste hoofdstuk aangegeven is, worden de emissies voor verschillende allocatiemethoden berekend met behulp van een nieuw ontwikkeld model, genaamd MOBLEM (MOdel voor Berekening van LuchtvaartEMissies). Het model is gebaseerd op de Corinair rekenmethode, die in dit hoofdstuk beschreven wordt (TFEI, 2000). Zowel de oorsprong van de methode als de berekening worden in dit hoofdstuk besproken. Ook wordt het model MOBLEM en de toepassing van de Corinair-methode daarin uitgelegd.

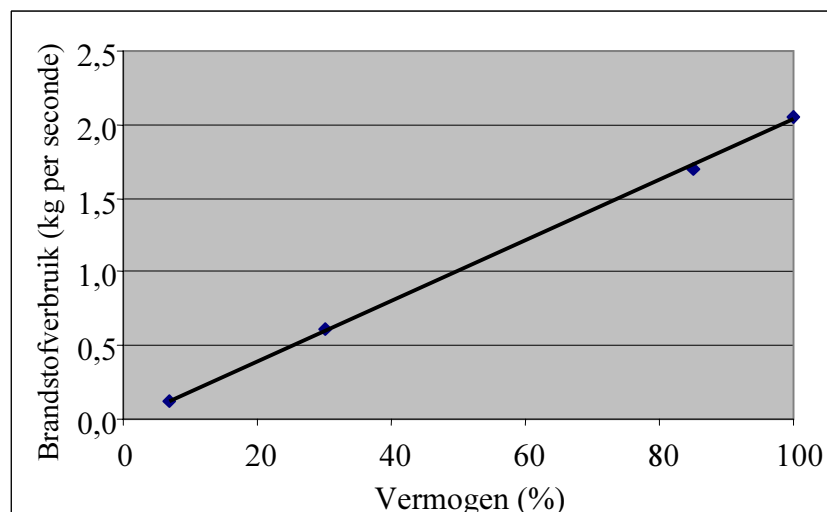
4.2 Algemene omschrijving van de Corinair-methode

4.2.1 Oorsprong van de rekenmethode

Corinair staat voor CORE INventory AIR emissions. De methode is ontwikkeld door het European Environment Agency (EEA) in samenwerking met het European Topic Centre on Air Emissions (ETC-AE). Het Corinair-project is in 1986 opgestart met als doel het opzetten van een gecoördineerde inventaris van atmosferische emissies. Vier jaar later werden de eerste resultaten gepubliceerd. In 1991 is besloten om het programma verder uit te breiden voor de emissies uit 1990, genaamd Corinair90. Het doel was om voor alle Europese landen een complete, consistente en transparante methode voor emissieberekening ter beschikking te stellen. De 29 deelnemende Europese landen konden daarmee hun emissies in een enkele inventaris samenvoegen en onderling vergelijken. (EEA, 1996; EEA, 2001; Spirit, 2001; Sweionet, 1999)

4.2.2 De drie rekenmethoden: een overzicht

De Corinair-methode bestaat uit drie rekenmethoden: de zeer eenvoudige (very simple), de eenvoudige (simple) en de gedetailleerde (detailed) methode, die onderling verschillen in aggregatieniveau. De drie rekenmethoden zijn gebaseerd op data van de LTO-cyclus, waarbij de data voor de kruisvlucht (die alleen in de gedetailleerde methode gebruikt worden) zijn afgeleid door interpolatie van de LTO-gegevens. ICAO heeft elke LTO-fase gekenmerkt met een specifieke vermogen en time-in-mode (zie §2.3.3). Door de LTO-brandstofgegevens uit de Corinair database om te rekenen naar het brandstofverbruik per seconde en uit te zetten tegen de specifieke motorbelasting, ontstaat voor ieder vliegtuig een lineair verband (zie figuur 4.1).



Figuur 4.1: Brandstofverbruik (kg per seconde) van een Boeing 737 400 (B734), uitgezet tegen de motorvermogen

Ervan uitgaande dat de motorbelasting tijdens de kruisvlucht bijvoorbeeld 40% is²⁰, kan met behulp van het figuur het brandstofverbruik tijdens de kruisvlucht bepaald worden. In het geval van de Boeing 737-400 is dit ongeveer 0,8 kilogram per seconde.

Niet alle emissiecomponenten worden in de rekenmethode meegenomen: voor NO_x, HC en CO zijn emissiefactoren gegeven; CO₂-emissies staan in vaste verhouding tot het brandstofverbruik. De wateremissies worden niet berekend met behulp van Corinair, maar geschat op basis van het brandstofverbruik.

Met behulp van de zeer eenvoudige (very simple) methode worden schattingen van emissies gemaakt zonder specifieke kennis over de samenstelling van de gebruikte vloot. De emissiefactor wordt gegeven voor één algemeen vliegtuigtype, waarbij gekozen kan worden tussen een oude of een gemiddelde vloot. De LTO-emissies worden berekend door het aantal LTO-cycli te vermenigvuldigen met één algemene emissiefactor. Het brandstofverbruik tijdens de kruisvlucht wordt geschat door het verschil te berekenen tussen de totaal gebunkerde brandstof en het verbruik tijdens de LTO-cyclus.

In de simpele (simple) en gedetailleerde (detailed) methode is gekozen voor een groep van 19 representatieve vliegtuigtypen, die binnen de Europese en Amerikaanse luchtvaart het meeste gebruikt worden. Het brandstofverbruik en de emissiefactoren van de representatieve vliegtuigtypen staan vermeld in een database, opgesteld door Corinair (TFEI, 2000). Per type gelden default emissiefactoren. Voor de LTO-cyclus zijn de factoren gegeven per LTO-fase, waarbij uitgegaan wordt van de gestandaardiseerde time-in-modes (zie §2.3.3). De kruisvluchtemissiefactoren zijn per vaste afstand vermeld. De database staat in bijlage 5.

²⁰ Het motorvermogen tijdens de kruisvlucht dat is gebruikt in de Corinair-methode, is niet bekend.

In de simpele methode wordt het aantal LTO-cycli per vliegtuigtype wel bekend geacht, de gevlogen kruisafstand is echter onbekend. De LTO-emissies worden ‘exact’ berekend met behulp van de Corinair database, maar de kruisvluchtemissies worden op dezelfde wijze geschat als bij de zeer eenvoudige methode.

De gedetailleerde methode is, zoals de naam al suggereert, de meest uitgebreide methode en gaat uit van afstand afhankelijke kruisvluchtemissies. Omdat de kruisvlucht in deze methode bestaat uit de drie fasen ‘climb’, ‘cruise’ en ‘descent’ (ofwel alle fasen boven de 3000 voet), kan er niet één emissiefactor per kilometer gedefinieerd worden. De afstand die tijdens de fase ‘cruise’ gevlogen wordt, is namelijk afhankelijk van de bestemming.

In dit onderzoek wordt uitgegaan van de gedetailleerde methode, omdat over de juiste invoergegevens kan worden beschikt. In wat volgt, verwijst de term ‘Corinair-methode’ naar de gedetailleerde methode.

4.2.3 Omschrijving gedetailleerde Corinair-methode

Binnen de gedetailleerde methode wordt gebruik gemaakt van een groep van 19 vliegtuigtypen, die in de rekenmethode representatief zijn voor de gebruikte vloot (zie tabel 4.1). Elk vliegtuigtype is gecombineerd met maar één motortype.

Tabel 4.1 Overzicht van de representatieve vliegtuigtypen van de Corinair90-methode

Vliegtuigtypen	ICAO-code	Aantal motoren
Airbus 310	A310	2
Airbus 320	A320	2
Airbus 330	A330	2
Airbus 340	A340	4
BAC1-11	BA11	2
BAe 146	BA46	4
Boeing 727	B721	3
Boeing 737 100	B731	2
Boeing 737 400	B734	2
Boeing 747 100-300	B741	4
Boeing 747 400	B744	4
Boeing 757	B757	2
Boeing 767 300 ER	B767	2
Boeing 777	B777	2
McDonnell Douglas DC-9	DC9	2
McDonnell Douglas DC-10	DC10	3
Fokker 28	F28	2
Fokker 100	F100	2
McDonnell Douglas M81-88	MD82	2

Bron: (TFEI, 2000)

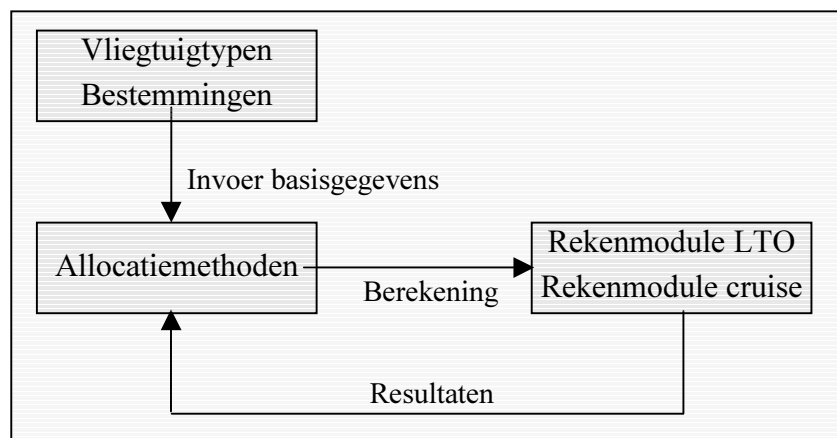
De eerste kolom in de tabel vermeldt het vliegtuigtype. In de tweede kolom staat de ICAO-code voor het betreffende vliegtuigtype gegeven en in de derde kolom staat het aantal

motoren. Bijlage 4 is een uitgebreide tabel, waarin de Corinair-verdeling van alle vliegtuigtypen naar de 19 representatieve typen staat.

In de rekenmethode worden het brandstofverbruik en de emissies berekend aan de hand van het aantal vluchten en de bijbehorende gevlogen afstand. Voor de berekening zijn de volgende gegevens nodig: de gebruikte vliegtuigtypen, het aantal LTO-cycli per type en de gevlogen afstand per type. Elk vliegtuigtype wordt vervolgens omgezet naar een representatief vliegtuigtype (zie bijlage 4). Met behulp van de combinatie van vliegtuigtype, aantal LTO-cycli en data over brandstofverbruik en emissiefactoren kunnen de LTO-emissies worden berekend. Voor de berekening van de kruisvluchtemissies moet ook de gevlogen afstand meegenomen worden. Als het brandstofverbruik en de emissies van de LTO-cycli opgeteld worden bij die van de kruisvlucht, zijn het totale brandstofverbruik en de totale emissies van de gehele vlucht bekend. In bijlage 6 staat de rekenmethode schematisch weergegeven.

4.3 Algemene omschrijving van MOBLEM

In MOBLEM (MOdel voor de Berekening van LuchtvaartEMissies) wordt de Corinair-methode als basis gebruikt. In figuur 4.2 is de structuur van MOBLEM schematisch afgebeeld.



Figuur 4.2: De modelstructuur in hoofdlijnen

Uitgangspunt van het model is het doorrekenen van *allocatiemethoden*. Hoe de emissies toebedeeld worden aan landen, is afhankelijk van de gekozen methode. De allocatiemethoden hebben basisgegevens nodig zoals de capaciteit van het gebruikte vliegtuigtype en de afstand tot een bepaalde bestemming. Deze gegevens zijn afkomstig uit *vliegtuigtypen* en *bestemmingen*²¹, die fungeren als naslag. Het model bevat verder twee rekenmodules,

²¹ Bestemmingen verwijst in de hele scriptie naar zowel de herkomsten als de bestemmingen.

waarmee per allocatiemethode de emissies berekend kunnen worden: *rekenmodule LTO* en *rekenmodule cruise*.

4.4 De berekening in MOBLEM

De samenhang tussen de diverse onderdelen is behandeld in de vorige paragraaf, waarna nu de onderdelen afzonderlijk besproken worden. Eerst worden de rekenmodules behandeld met daarin uitleg over de gegevens die nodig zijn voor de berekening en welke formules daarbij gebruikt worden. In bijlage 7 staat een overzicht van de bronnen die gebruikt zijn bij het verzamelen van de gegevens.

4.4.1 Rekenmodule LTO

Voor het maken van de berekening van LTO-emissies moeten de volgende gegevens bekend zijn:

- Het gebruikte vliegtuigtype
- Het aantal vluchten van het betreffende type (of aantal LTO-cycli)

Bij de berekening wordt gebruik gemaakt van de time-in-modes (TIM) van elke LTO-fase. In tabel 4.2 staan de ICAO- en de in MOBLEM gebruikte tijden weergegeven.

Tabel 4.2 *Time-in-modes voor elke LTO-fase op Schiphol van de representatieve vliegtuigtypen*

LTO-fase	Time-in-Mode (in seconden)			
	ICAO (standaard)	B741, B744 en DC10	AT4, AT7 en F50	Overige typen
Approach	240	240	270	240
Taxi-Idle	1.560	1.015	1.015	1.015
Take-off	42	56	30	34
Climb Out	132	120	150	100

Bron: (Klein *et al.*, 2002)

Het brandstofverbruik en de emissiefactoren per LTO-fase van elk representatief vliegtuigtype staan in de Corinair-database. Deze database is gebaseerd op de door ICAO gestandaardiseerde time-in-modes. In MOBLEM zijn het brandstofverbruik en de emissiefactoren van NO_x, HC en CO omgerekend naar kilogram per seconde, zodat gebruik gemaakt kan worden van de Time-in-Modes van Schiphol (TFEI, 2000). De emissiefactoren van CO₂, H₂O en SO₂ zijn vaste waarden, gegeven per kilogram brandstof. Per kilogram kerosine komt 3,155 kilogram CO₂, 1,237 kilogram H₂O en 1 gram SO₂ vrij (Moorman en Dings, 1996; SBSTA, 1996a). De emissiegegevens van de drie toegevoegde vliegtuigtypen (AT4, AT7 en F50) komen uit de Hurdy-Gurdy Solution van het Aeronautical Research Institute of Sweden, een database met gegevens over 25 turboprop vliegtuigen (voor uitleg over turboprop vliegtuigen, zie §2.3.3) (Hasselrot, 2000).

De gebruikte formules voor de berekening van de LTO-emissies, berekend per bestemming, zijn:

$$\text{brandstofverbruik} = \text{aantal vluchten} * \text{TIM} * \text{brandstofverbruik per seconde} \quad (1)$$

$$\text{emissie (CO}_2, \text{H}_2\text{O, SO}_2) = \text{totaal brandstofverbruik} * \text{emissiefactor in kg/kg} \quad (2)$$

$$\text{emissie (NO}_x, \text{HC, CO)} = \text{aantal vluchten} * \text{TIM} * \text{emissiefactor in kg/sec (per LTO-fase)} \quad (3)$$

Elke bestemming krijgt een specifiek vliegtuigtype toebedeeld (zie §4.5.4), zodat in de bovenstaande formules de waarden voor dat type ingevuld worden. Dit vliegtuigtype wisselt per bestemming en dus per berekening.

4.4.2 Rekenmodule Cruise

Bij het berekenen van de emissies tijdens de kruisvlucht moeten de volgende gegevens bekend zijn:

- De gevlogen afstand (in kilometer);
- Het gebruikte vliegtuigtype;
- Het aantal vluchten van het betreffende type (of aantal LTO-cycli).

Het brandstofverbruik en de emissiefactoren van NO_x, HC en CO (in kg per default afstand) tijdens de kruisvlucht zijn afkomstig uit de Corinair-database (TFEI, 2000). De gegevens van de drie toegevoegde vliegtuigtypen komen uit de Hurdy-Gurdy Solution van het Aeronautical Research Institute of Sweden (Hasselrot, 2000). In deze database missen echter de gegevens voor koolwaterstoffen. Bij navraag bleek dat de HC-emissies moeilijk te meten waren zodat ze in de database op nul gesteld waren. Om toch in het bezit te komen van deze gegevens is voor elk vliegtuigtype in de Hurdy-Gurdy Solution de verhouding HC/CO tijdens de LTO-cyclus en de kruisvlucht bepaald. Vervolgens is met behulp van deze verhouding de HC emissiefactor voor de 3 toegevoegde typen bepaald. Voor CO₂, H₂O en SO₂ wordt gebruik gemaakt van de vaste emissiefactoren (zie §4.4.1) (Moorman en Dings, 1996; SBSTA, 1996a).

In de Corinair database zijn de kruisafstanden in zeemijlen gegeven, in MOBLEM zijn deze afstanden omgerekend naar kilometers²². Het brandstofverbruik en de emissiefactoren worden gegeven per default afstand²³.

De kruisvluchtemissies zijn *per bestemming* berekend met de volgende formule:

$$\text{brandstofverbruik} = \text{aantal vluchten} * \text{brandstofverbruik in kg/default afstand} \quad (4)$$

$$\text{emissie (CO}_2, \text{H}_2\text{O, SO}_2) = \text{totaal brandstofverbruik} * \text{emissiefactor in kg/kg} \quad (5)$$

$$\text{emissie (NO}_x, \text{HC, CO)} = \text{aantal vluchten} * \text{emissiefactor in kg/ default afstand} \quad (6)$$

²² 1 zeemijl komt overeen met 1,852 kilometer (TFEI, 2000).

²³ De default afstanden in de Corinair database zijn 232, 463, 926, 1.389, 1.852, 2.778, 3.704, 4.630, 5.556, 6.482, 7.408, 8.334, 9.260, 10.186, 11.112 en 12.038 kilometer (TFEI, 2000).

Zowel het brandstofverbruik als de emissiefactor van NO_x, HC en CO worden opgezocht in de Corinair-database, waarbij de waarden per default vliegafstand gegeven zijn. De daadwerkelijke vliegafstand komt echter nooit exact overeen met een default afstand. Er blijft een rest-afstand over, waarvoor de emissies per kilometer berekend worden met behulp van de twee default afstanden die kleiner dan de vliegafstand zijn. De berekening van de rest-afstand is als volgt:

$$\text{emissie (rest-afstand)} = \frac{\text{emissie (afstand 2)} - \text{emissie (afstand 1)}}{\text{afstand 2} - \text{afstand 1}} * \text{rest-afstand} \quad (7)$$

waarbij: afstand 2 = de eerste default afstand onder de vliegafstand
 afstand 1 = de tweede default afstand onder de vliegafstand

Het voorbeeldvliegtuig (zie hoofdstuk 3) vliegt van Schiphol naar Washington over een afstand van 6.823 kilometer. Om het brandstofverbruik tijdens de kruisvlucht te berekenen, wordt in de Corinair database (zie bijlage 5) het brandstofverbruik bij 6.482 kilometer opgezocht: 66.486,12 kg. Er blijft nog 341 kilometer over. De berekening van de emissies voor de rest-afstand is:

$$\text{emissie (rest-afstand)} = \frac{\text{verbruik (6.482 km)} - \text{verbruik (5.556 km)}}{6.482 - 5.556} * 341 = 3.797,2 \text{ kg}$$

Het totale brandstofverbruik op deze vlucht is 66.486,12 + 3.797,2 = 70.283,3 kilogram. Voor CO₂, H₂O en SO₂ wordt de vaste emissiefactor vermenigvuldigd met het totale brandstofverbruik.

4.5 Basisgegevens in MOBLEM

4.5.1 Inleiding

Deze paragraaf gaat in op de volgende gegevens:

- De vluchten;
- De bestemmingen;
- Het vliegtuigtype per bestemming;
- De vliegafstand.

Alle bovengenoemde basisgegevens zijn nodig voor de emissieberekening (zie formules 1 tot en met 6 in §4.4), behalve de vliegafstand die alleen voor de kruisvluchtemissies van belang is.

4.5.2 De vluchten

Het aandeel van het goederenvervoer in de luchtvaart bedraagt mondiaal ongeveer dertig procent van alle vluchten, gemeten in tonkilometers. Elke passagiers telt in deze berekening mee als 92 kilo (Hof *et al.*, 2001). In 1998 was 3,4% van alle vluchten op Schiphol

vrachtluchten (Schiphol, 1999). Volgens Lister *et al.* (1999) wordt 80% van alle vracht vervoerd met passagiersvliegtuigen. Er is namelijk altijd nog wel plaats voor (enkele kilo's) vracht in een vliegtuig, dat met passagiersstoelen bezet is (Van Gelder, 2000). Er wordt daarom in MOBLEM geen onderscheid gemaakt tussen passagiers- en vrachtluchten. Alle vluchten vallen onder één noemer.

Uitgaande van de Corinair methode zijn de 363.889 vluchten (in 1998) van en naar Schiphol toebedeeld aan de 19 representatieve vliegtuigtypen (zie §4.2.3). In het jaarverslag van Schiphol (1999) staan voor 1998 het totaal aantal vluchten en het aantal vluchten per type vermeld. Door alle vliegtuigtypen met een maximaal startgewicht van meer dan 250.000 kilogram onder te verdelen volgens de Corinair-verdeling (zie bijlage 4), wordt het totaal aantal vluchten van alle representatieve typen bekend. Van de 363.889 vluchten zijn er door de representatieve vliegtuigtypen (met een gewicht meer dan 250 ton) 286.445 vluchten uitgevoerd (Schiphol, 1999). Dit dekt dus niet alle vluchten in 1998, omdat ook lichtere toestellen (minder dan de 250 ton) worden gebruikt. Om het verschil te verkleinen, zijn drie extra vliegtuigtypen toegevoegd voor de kortere afstanden (minder dan 1.500 kilometer). De keuze is gebaseerd op het aantal vluchten: alle typen met meer dan 10.000 vluchten vanaf of naar Schiphol, zijn toegevoegd (zie tabel 4.3).

Tabel 4.3 *Extra toegevoegde vliegtuigtypen in MOBLEM*

Extra vliegtuigtypen	ICAO-code	Aantal motoren
ATR 42	AT4	2
ATR 72	AT7	2
Fokker 50	F50	2

Door deze toevoeging worden nu 339.923 vluchten uitgevoerd door de representatieve typen, wat een dekking van 93,4% van alle vluchten inhoudt (Schiphol, 1999). In MOBLEM wordt verondersteld dat de overige 6,6% (23.966 vluchten) door de Boeing 737-400 is uitgevoerd. Dit type is gekozen, omdat het in 1998 van alle representatieve typen de meeste vluchten heeft uitgevoerd, namelijk 33,3% van alle vluchten.

4.5.3 De bestemmingen

Alle bestemmingen van en naar Schiphol in 1998 zijn per continent in alfabetische volgorde van land en plaats vermeld. In bijlage 8 staan alle bestemmingen van en naar Schiphol in 1998 vermeld, met de bijbehorende vliegafstand. De continenten zijn verdeeld in zes groepen:

- Europa
- Noord-Amerika
- Midden- en Zuid-Amerika
- Afrika
- Midden-Oosten
- Verre-Oosten

4.5.4 Het vliegtuigtype per land van bestemming

Om de emissies te kunnen berekenen, moet bekend zijn met welk vliegtuigtype op welke bestemming wordt gevlogen. De verdeling van de vliegtuigtypen per bestemming staat ook in bijlage 8.

Het is bij het maken van de verdeling van belang dat per land slechts één type gekozen wordt, om de berekening eenvoudig te houden. De toekenning van een standaard vliegtuigtype per land van bestemming in MOBLEM is gebaseerd op het bereik van het vliegtuig ofwel de maximale afstand waarvoor nog gegevens over de kruisvlucht in de Corinair-database aanwezig zijn (TFEI, 2000). Als meerdere typen een gelijk bereik hebben, is gesorteerd op capaciteitgrootte. In tabel 4.4 staan de vliegtuigtypen met het aantal uitgevoerde vluchten in 1998, het maximale bereik en de capaciteit weergegeven, in volgorde van bereik.

Tabel 4.4 *Aantal vluchten, het bereik en de capaciteit van de representatieve vliegtuigtypen*

ICAO	Vluchten	Bereik	Capaciteit
	<i>aantal</i>	<i>km</i>	<i>aantal stoelen</i>
B744	12.668	12.038	339
B777	1.234	12.037	320
A340	699	12.037	280
B741	8.561	11.111	400
DC10	14.303	10.185	286
B767	18.788	10.185	238
A330	102	8.333	331
A310	4.456	7.407	266
B757	12.249	5.555	206
A320	13.978	5.555	154
B721	1.060	4.629	164
B734	131.999	4.629	135
MD82	11.337	4.629	126
B731	964	4.629	112
DC9	3.896	4.629	103
BA11	798	4.629	99
BA46	19.491	3.703	105
F100	53.770	3.703	102
F28	58	3.703	75
AT4	14.536	1.388	68
F50	26.023	1.388	50
AT7	12.919	1.388	47

Bron: (Schiphol, 1999; TFEI, 2000)

Van elk type én van elke bestemming is bekend hoeveel vluchten er in 1998 van en naar Schiphol zijn gemaakt (Schiphol, 1999). Dat levert tabel 4.5 op.

Tabel 4.5 (On)bekende factoren bij de toedeling van de vliegtuigtypen aan bestemmingen

Aantal vluchten per	Type 1	Type 2	Type n	Totaal per bestemming
Bestemming A	?	?	?	?	?	Bekend
Bestemming B	?	?	?	?	?	Bekend
...	?	?	?	?	?	Bekend
...	?	?	?	?	?	Bekend
...	?	?	?	?	?	Bekend
...	?	?	?	?	?	Bekend
...	?	?	?	?	?	Bekend
Bestemming X	?	?	?	?	?	Bekend
Totaal per vliegtuigtype	Bekend	Bekend	Bekend	Bekend	Bekend	$1+2+(..) = A+B+(..)$

Voorwaarden bij de verdeling zijn:

- Het totaal aantal vluchten per vliegtuigtype moet gelijk zijn aan het totaal aantal vluchten per bestemming;
- Elke bestemming mag maximaal 1 vliegtuigtype toegekend krijgen. Een vliegtuigtype kan echter wel op meerdere bestemmingen vliegen. Dit houdt voor tabel 4.5 in dat per rij maar 1 cel ingevuld mag worden;
- Het verschil tussen het werkelijk aantal vluchten per type en het toebedeelde aantal vluchten per type mag maximaal 10% zijn.

Omdat type 1 het grootste bereik heeft en bestemming A de grootste afstand is, wordt de tabel ingevuld volgens de pijl. Hieronder volgt een voorbeeld om de toedeling te verhelderen.

Voorbeeld

Stel vanaf de luchthaven wordt naar acht verschillende landen A tot en met H gevlogen met drie verschillende Boeing-vliegtuigtypen: de Boeing 747-400 (B744, bereik²⁴ = 12.038 km), Boeing 747-100 (B741, bereik = 11.111 km) en de Boeing 767 (B767, bereik = 10.185 km). Voor bestemming A moet de grootste afstand worden gevlogen, namelijk 12.000 kilometer. De afstanden tot bestemmingen B tot en met H nemen in alfabetische volgorde af.

Stap 1

Het totaal aantal vluchten per vliegtuigtype (de laatste rij) en per bestemming (de laatste kolom) is bekend en in tabel 4.6 ingevuld. De totaal-rij telt de toebedeelde vluchten op en de onderste rij geeft aan hoeveel vliegbewegingen er volgens de statistieken van de luchthaven gemaakt zijn.

²⁴ Het bereik is opgezocht in tabel 4.4.

Tabel 4.6 Stap 1 van het voorbeeld hoe vliegtuigtypen per bestemming verdeeld worden

Aantal vluchten per	B744	B741	B767	Totaal per bestemming
Bestemming A				10
Bestemming B				20
Bestemming C				15
Bestemming D				10
Bestemming E				35
Bestemming F				10
Bestemming G				15
Bestemming H				5
Totaal toebedeeld				
Totaal per vliegtuigtype	50	30	40	120

Stap 2

Omdat de B744 het grootste bereik heeft, wordt dit type als eerste toebedeeld aan bestemming A, in dit geval de bestemming met de grootste vliegafstand. De B744 wordt ook aan de volgende bestemmingen toegekend, totdat er 50 vluchten gemaakt zijn. Er kan gekozen worden om bij bestemming C (45 vluchten) of D (55 vluchten) te stoppen. Er is gekozen voor bestemming D, wat te maken heeft met de toedeling van het volgende vliegtuigtype: de B741 heeft namelijk 30 vluchten gemaakt, terwijl er 35 keer naar bestemming E gevlogen is. Als de B744 alleen bestemming A tot en met C toebedeeld krijgt, dan moet het volgende type zowel op bestemming D als op E vliegen. Het resultaat is dat het verschil tussen het aantal toebedeelde vluchten en het daadwerkelijke aantal gevlogen vluchten (45 i.p.v. 30) groter wordt dan als de B744 ook bestemming D toebedeeld krijgt (55 i.p.v. 50). De streepjes (-) geven aan dat in die cellen niets meer ingevuld mag worden (zie tabel 4.7).

Tabel 4.7 Stap 2 van het voorbeeld hoe vliegtuigtypen per bestemming verdeeld worden

Aantal vluchten per	B744	B741	B767	Totaal per bestemming
Bestemming A	10	-	-	10
Bestemming B	20	-	-	20
Bestemming C	15	-	-	15
Bestemming D	10	-	-	10
Bestemming E	-			35
Bestemming F	-			10
Bestemming G	-			15
Bestemming H	-			5
Totaal toebedeeld	55			
Totaal per vliegtuigtype	50	30	40	120

Stap 3

De vluchten van de B744 zijn nu verdeeld. Het volgende type, de B741, kan ingevuld worden. Het maximaal aantal vluchten is snel bereikt: de B741 vliegt alleen naar bestemming E (zie tabel 4.8).

Tabel 4.8 Stap 3 van het voorbeeld hoe vliegtuigtypen per bestemming verdeeld worden

Aantal vluchten per	B744	B741	B767	Totaal per bestemming
Bestemming A	10	-	-	10
<i>Bestemming B</i>	20	-	-	20
<i>Bestemming C</i>	15	-	-	15
<i>Bestemming D</i>	10	-	-	10
<i>Bestemming E</i>	-	35	-	35
<i>Bestemming F</i>	-			10
<i>Bestemming G</i>	-			15
<i>Bestemming H</i>	-			5
Totaal toebedeeld	55	35		
Totaal per vliegtuigtype	50	30	40	120

Stap 4

Het laatste type, de B767, resteert en wordt voor de overige bestemmingen F tot en met H ingevuld (zie tabel 4.9).

Tabel 4.9 Stap 4 van het voorbeeld hoe vliegtuigtypen per bestemming verdeeld worden

Aantal vluchten per	B744	B741	B767	Totaal per bestemming
Bestemming A	10	-	-	10
<i>Bestemming B</i>	20	-	-	20
<i>Bestemming C</i>	15	-	-	15
<i>Bestemming D</i>	10	-	-	10
<i>Bestemming E</i>	-	35	-	35
<i>Bestemming F</i>	-	-	10	10
<i>Bestemming G</i>	-	-	15	15
<i>Bestemming H</i>	-	-	5	5
Totaal toebedeeld	55	35	30	120
Totaal per vliegtuigtype	50	30	40	120

Er ontstaat nu een verschil tussen het aantal daadwerkelijke vluchten en het aantal toebedeelde vluchten. Dit is een onvermijdelijk probleem bij deze wijze van toedeling, waarbij wel geprobeerd is om de afwijking tussen beide aantallen zo klein mogelijk te houden.

Er is wel voldaan aan de drie voorwaarden. Rechtsonder in de tabel is af te lezen dat de totalen van zowel het aantal toebedeelde vluchten als het aantal daadwerkelijke gevlogen vluchten aan elkaar gelijk zijn. Verder heeft elke bestemming slechts één vliegtuigtype toebedeeld gekregen.

In MOBLEM is de grootste vliegafstand naar Australië (18.313 kilometer, zie bijlage 8). Deze bestemming krijgt als eerste een vliegtuigtype toebedeeld, namelijk het type met het grootste bereik: de Boeing 747-400 (zie tabel 4.4). Het bereik van een Boeing 747-400 schiet echter tekort om deze afstand in een vlucht te overbruggen. Alleen bij dit vliegtuigtype geldt de uitzondering dat het een langere afstand kan afleggen dan zijn maximale bereik. In praktijk wordt er een tussenlanding gemaakt, zodat op de gehele vlucht twee LTO-cycli worden uitgevoerd. De extra LTO-cyclus wordt in MOBLEM niet meegenomen bij de emissieberekening: omdat het vaak bestemmingen op een grote vliegafstand betreft, blijft de ontstane fout klein. Verder is niet bekend op welke bestemmingen tussenlandingen gemaakt worden. Zelfs op relatief korte afstanden kan een tussenlanding gemaakt vanuit commercieel oogpunt: luchtvaartmaatschappijen bijvoorbeeld kunnen ervoor kiezen om passagiers voor twee verschillende bestemmingen te combineren op één vlucht. Dit vliegtuig is volgeboekt en zal onderweg een tussenlanding moeten maken.

Wanneer het verschil tussen het aantal gemaakte vluchten en het aantal toebedeelde vluchten minder dan 10% is van het aantal gemaakte vluchten, wordt de toedelingsprocedure vervolgd met het daaropvolgende type. In sommige gevallen komt het voor dat de 10% nog niet bereikt is, maar dat naar de volgende bestemming zo vaak gevlogen is dat de uitkomst ook niet binnen de 10%-grens valt. In een dergelijke situatie wordt deze bestemming overgeslagen en wordt de eerstvolgende bestemming die wel binnen de 10%-grens valt toebedeeld aan het betreffende type. De in eerste instantie overgeslagen bestemming wordt vervolgens toebedeeld aan het volgende vliegtuigtype. In tabel 4.10 staat een voorbeeld om deze situatie te verduidelijken.

Tabel 4.10 Voorbeeld van een afwijkende situatie bij de toedeling van vliegtuigtypen aan een bestemming

Aantal vluchten per	Type 1	Type 2	Totaal per bestemming
Bestemming A	10	-	10
Bestemming B	40	-	40
Bestemming C	-	75	75
Bestemming D	15	-	15
Bestemming E	-	25	25
Bestemming F	-	35	35
Totaal toebedeeld	65	135	200
Totaal per vliegtuigtype	60	140	200
Afwijking	8,3%	3,6%	

Er zijn drie mogelijke situaties (zie tabel 4.11).

Tabel 4.11 Drie mogelijke situaties om vliegtuigtype 1 aan diverse bestemmingen toe te delen

Situaties	Aantal vluchten voor type 1	Berekening	Afwijking
(1) bestemming A en B	50	$(50-60)/60$	-16,6%
(2) bestemming A, B en C	125	$(125-60)/60$	108,3%
(3) bestemming A, B en D	65	$(65-60)/60$	8,3%

In Situatie 1 is de 10% nog niet bereikt, dus het type moet meer bestemmingen en dus vluchten toebedeeld krijgen. Situatie 2 bevat bestemming C, waarnaar vaak gevlogen is. Als type 1 ook op deze bestemming vliegt, wordt de 10% nooit gehaald. Daarom wordt C overgeslagen bij de toedeling. Situatie 3 daarentegen levert het juist resultaat op; de afwijking is nu 8,3%.

Deze manier van verdelen is gebruikt tot een vluchtafstand van 3.703 kilometer; bijna elk representatief type heeft namelijk een groter bereik dan 3703 kilometer. Alleen de drie toegevoegde vliegtuigtypen (AT4, AT7 en F50) hebben een kleiner bereik. Bij het verdelen is erop gelet dat deze typen geen bestemmingen boven hun bereik toebedeeld kregen.

Vanaf deze afstand zijn de overgebleven typen ingevuld aan de hand van het aantal gemaakte vluchten per vliegtuigtypen en per bestemming. Voor een bestemming met veel vluchten werd een vliegtuigtype met veel vliegbewegingen uitgekozen. Voor deze afwijkende verdeling is gekozen om te voorkomen dat een land waarnaar vaak gevlogen is, een vliegtuigtype met weinig uitgevoerde vluchten toegekend krijgt.

Om dezelfde reden is de bestemming ‘Verenigde Staten’ in drie delen opgesplitst. Als geheel vormden ze ook een te groot aantal vluchten, waarbij problemen ontstonden bij het verdelen van vliegtuigtypen per land van bestemming. Er is gekozen voor een driedeling op basis van de afstand. Plaatsen in de Verenigde Staten op een afstand minder dan 7.000 kilometer van Schiphol vallen onder ‘Oost’, afstanden tussen de 7.000 en 9.000 kilometers vallen onder ‘Midden’ en afstanden verder dan 9.000 kilometer onder ‘West’.

Twee typen wijken van de bovenstaande todelingsmethode af. De A330 heeft maar 102 vluchten uitgevoerd, terwijl de toedeling hiervan plaatsvond in een bestemmingengedeelte met veel vluchten. Daarom is gekozen om de A330 eerder toe te delen aan een bestemming zodat de 10%-grens bereikt kon worden. De andere uitzondering is de Fokker 28. Ook hier geldt dat dit type slechts weinig vluchten heeft uitgevoerd. Binnen het bereik van dit type (3.703 kilometer) is gekeken wat de bestemming met het kleinste aantal vluchten was. Het type is vervolgens toebedeeld aan deze bestemming. De afwijking is hierdoor echter 247%. In de onderstaande tabel is de afwijking tussen het aantal daadwerkelijke vluchten en het aantal toebedeelde vluchten afgebeeld (zie tabel 4.12).

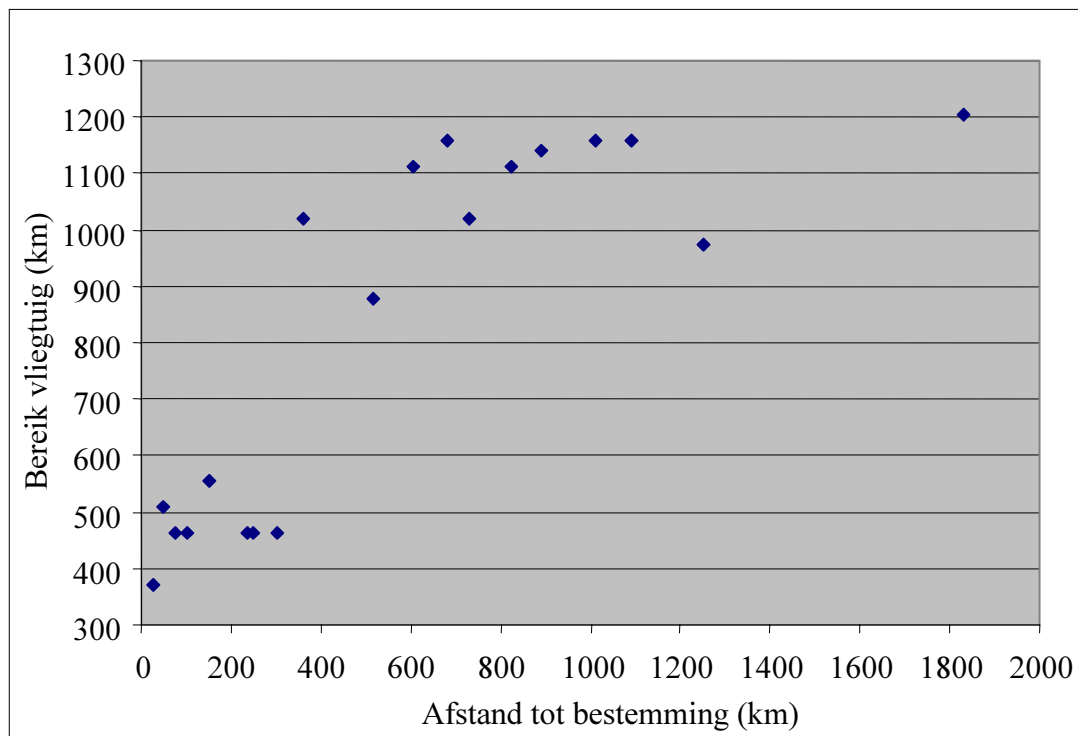
*Tabel 4.12 Verschil tussen de gemaakte vluchten en de toebedeelde vluchten
in 1998 voor alle representatieve vliegtuigtypen*

Vliegtuigtype	Schipholcijfers	Toebedeelde vluchten	Vershil
B744	12.668	12.667	0%
B777	1.234	1.273	3%
A340	699	684	2%
B741	8.561	8.682	1%
DC10	14.303	14.632	2%
B767	18.788	19.313	3%
A330	102	108	6%
A310	4.456	4.746	7%
B757	12.249	12.581	3%
A320	13.978	15.101	8%
B721	1.060	1.122	6%
B734	131.999	125.978	5%
MD82	11.337	11.844	4%
B731	964	878	9%
DC9	3.896	3.821	2%
BA11	798	736	8%
BA46	19.491	20.783	7%
F100	53.770	57.883	8%
F28	58	201	247%
AT4	14.536	14.487	0%
F50	26.023	24.270	7%
AT7	12.919	12.099	6%

Bron: (Schiphol, 1999)

Een belangrijke vraag is nu in hoeverre deze toedeling met de realiteit overeenkomt. Als eerste wordt in werkelijkheid niet met hetzelfde type op een land gevlogen. Dit is afhankelijk van de luchtvaartmaatschappij en de vloot waarmee zij vliegt. De maatschappij bepaalt welk type ingezet wordt op welke bestemming. Dit zal onder andere afhangen van het aantal passagiers, tonnen vracht en de afstand tot het land. Door per land een bepaald type toe te kennen, is de berekening van het model vereenvoudigd en overzichtelijk gehouden. De resultaten van emissies voor individuele landen wordt hierdoor wel onbetrouwbaar. Dit heeft echter geen gevolgen voor MOBLEM, omdat daarin alleen op mondiaal niveau wordt gekeken. In een gevoeligheidsanalyse (zie §5.4) wordt nog beoordeeld hoe gevoelig het model is voor de toedeling van vliegtuigtypen.

In de tweede plaats is een uitgangspunt dat de grootste vliegafstand het vliegtuig met het grootste bereik toebedeeld krijgt. Deze stelling is met behulp van twee internetsites voor het bestellen van vliegtuigtickets gecontroleerd (KLM, 2002; Vliegwinkel, 2002). Als de vliegafstand (genomen uit MOBLEM, §4.5.5) uitgezet wordt tegen het bereik van de vliegtuigtypen, ontstaat het volgende figuur (zie figuur 4.3).



Figuur 4.3 Het bereik van een vliegtuig (km) uitgezet tegen de afstand tot een bestemming (km)

Uit het figuur blijkt dat op grotere afstanden inderdaad vliegtuigtypen met een groter bereik worden ingezet.

4.5.5 De vliegafstand

De vliegafstand van Schiphol tot een plaats is berekend met behulp van een distance calculator (Indo.com, 2000; Landing.com, 2001). Op Indo.com (2000) wordt de ‘as-the-crow-flies’ of hemelsbrede afstand tussen twee plaatsen berekend. Ook is gebruik gemaakt van Landing.com (2001). Hier wordt de afstand berekend met behulp van ICAO-codes van de betreffende vliegvelden, die opgezocht zijn op AvInfo (2001)²⁵.

Een vliegtuig vliegt echter nooit de hemelsbrede afstand tussen twee vliegvelden. Start- en landingsbanen liggen niet altijd in de juiste richting. Vanaf welke baan gevlogen wordt, is onder andere afhankelijk van de windrichting en geluidsnormstellingen. Koerswijzingen en bijdraaien vergroten de totale vliegafstand. Ten tweede wordt vliegen boven bewoonde gebieden zo veel mogelijk vermeden om geluidsoverlast te voorkomen. Als laatste wordt de gevlogen afstand bepaald door de weersomstandigheden en de ligging van de luchtcorridors, een soort snelwegen in de lucht die het vliegverkeer beter controleerbaar maken en

²⁵ De uitkomsten van beide methoden zijn vergeleken en verschilden niet significant. Omdat de calculator op Indo.com (2000) eenvoudiger in gebruik was, is in eerste instantie gekozen voor deze methode. De afstanden tot bestemmingen die bij deze calculator niet bekend waren, zijn berekend met de calculator van Landing.com (2001) in combinatie met AvInfo (2001).

gevaarlijke situaties zoals tegemoet vliegend verkeer voorkomen. In bijlage 9 is een overzichtskaart afgebeeld, waarop de luchtcorridors boven Nederland aangegeven zijn. (Roos *et al.*, 1997)

De bovengenoemde redenen resulteren in een langere vliegafstand. De hemelsbrede afstand moet daarom gecorrigeerd worden met een omwegfactor. In Roos *et al.* (1997) wordt een omwegfactor van 1,15 aangehouden, maar dit betreft alleen (korte) Europese bestemmingen. In MOBLEM worden ook langere afstanden afgelegd. Omdat korte afstanden gevoeliger zijn voor omwegen, is onderscheid gemaakt tussen afstanden korter dan en langer dan 3.000 km. Voor afstanden korter dan 3.000 km (voornamelijk de Europese bestemmingen) is de omwegfactor 1,15. Voor de afstanden langer dan 3.000 km is gekozen voor de factor 1,10.

Vervolgens is de afstand van Schiphol tot een land berekend als het gewogen gemiddelde van alle luchthavens in het betreffende land, in verhouding tot het aantal vluchten dat in 1998 vanaf of naar Schiphol zijn gemaakt.

5 De toepassing van het model MOBLEM

5.1 Inleiding

Het vorige hoofdstuk is ingegaan op de ontwikkeling van het model, waarbij uitgelegd is hoe en welke berekeningen zijn uitgevoerd. Dit hoofdstuk berekent de emissies van diverse componenten voor de acht allocatiemethoden (zie hoofdstuk 3). De uitkomsten van de berekening worden eerst per emissiecomponent behandeld en vervolgens met andere onderzoeken vergeleken. Ook wordt de gevoeligheid van het model voor enkele modelparameters getest. Als laatste volgt de conclusie.

5.2 Invoer van de allocatiemethoden in MOBLEM

5.2.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt MOBLEM toegepast om de aan Nederland toe te rekenen emissies te berekenen, waarbij de hoogte van de emissies afhankelijk is van de gekozen allocatiemethode (zie hoofdstuk 3). In tabel 5.1 staat een overzicht van de gegevens die per allocatiemethode nodig zijn. Zoals uit de tabel is af te lezen, kunnen de bestemmingen zowel een land als een plaats (of specifieke luchthaven) zijn, waarbij in eerste instantie uitgegaan wordt van de plaats van bestemming. Bij allocatiemethoden 1, 7 en 8 is ervoor gekozen om de bestemmingen te groeperen naar landen, om zodoende het aantal berekeningen te reduceren. In bijlage 7 staan de bronnen, waaruit de gegevens van de acht allocatiemethoden komen.

Tabel 5.1 Benodigde gegevens voor alle allocatiemethoden

Benodigde gegevens	Allocatiemethoden							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Bestemming van vliegtuigen	x ^l			x ^{p*}	x ^p			x ^l
Bestemming van passagiers						x ^p	x ^l	
Vliegafstand per bestemming				x	x	x	x	x ⁺
Vliegtuigtype per bestemming	x			x	x	x	x	x
Aantal vluchten per bestemming	x			x [*]	x			x
Aantal passagiers per bestemming						x	x [#]	
Capaciteit van vliegtuigtype						x	x	
Bezettingsgraad van vliegtuigtype						x	x	
Uitvliegroute								x
Nationale emissies per emissiecomponent		x						
Internationale luchtvaartemissies per emissiecomponent		x	x					
Mondiale emissies per emissiecomponent		x						
Nederlands brandstofverbruik door internationale luchtvaart			x					

Legenda van tabel 5.1

- ^l = Land van bestemming
- ^p = Plaats van bestemming
- ^{*} = Alleen Nederlandse luchtvaartmaatschappijen
- [#] = Alleen Nederlandse passagiers
- ⁺ = Afstand tot aan de Nederlandse grens

Omschrijving allocatiemethoden

- 1 = Allocatie LTO-emissies
- 2 = Proportionele allocatie
- 3 = Gebunkerde brandstof
- 4 = Nationaliteit luchtvaartmaatschappij
- 5 = Vertrek- en aankomstland vliegtuig
- 6 = Vertrek- en aankomstland passagiers
- 7 = Nationaliteit passagiers
- 8 = Landsgrenzen

5.2.2 Huidige situatie

In de huidige situatie worden, als het gaat om niet-broeikasgassen, alleen de LTO-emissies van alle vliegtuigbewegingen op Nederlandse luchthavens aan Nederland toegerekend. Voor broeikasgassen (CO₂ in dit geval) geldt een andere toerekening: alleen de emissies tijdens binnenlandse vluchten worden aan Nederland toegerekend, de emissies tijdens internationale vluchten worden niet aan afzonderlijke landen toegerekend (zie ook §3.2.3).

5.2.3 Allocatiemethode 1

De eerste allocatiemethode is ‘Allocatie LTO-emissies’ en komt voor niet-broeikasgassen in principe overeen met de huidige allocatiemethode (zie §5.2.2). MOBLEM berekent echter alleen de LTO-emissies door internationale vluchten op Schiphol en laat binnenlandse vluchten van en naar Schiphol evenals vluchten van andere Nederlandse luchthavens buiten beschouwing. Deze keuze is gemaakt, omdat de politieke discussie gaat over de toedeling van internationale luchtvaartemissies en de internationale luchtvaart zich voornamelijk concentreert op Schiphol. De gegevens die noodzakelijk zijn voor de berekening van deze eerste methode, zijn zowel het aantal vluchten per bestemming als het gebruikte vliegtuigtype op de bestemming.

De uitvoering van de berekening was in principe eenvoudiger geweest door het aantal vluchten per vliegtuigtype te vermenigvuldigen met de LTO-emissies per vliegbeweging per vliegtuigtype. Er is toch gekozen voor de berekeningswijze waarbij de berekening van de LTO-emissies per bestemming plaatsvindt in plaats van per vliegtuigtype. De reden hiervoor is dat een dergelijke berekeningswijze ook bij de andere allocatiemethoden is gehanteerd. Dit maakt een onderlinge vergelijking van de acht methoden betrouwbaarder.

5.2.4 Allocatiemethode 2

Allocatiemethode 2 is de proportionele allocatie, waarbij de totale internationale luchtvaartemissies aan landen worden toegedeeld op basis van de verhouding tussen de nationale emissies en de totale mondiale emissies. In formulevorm:

$$\text{emissies}_{\text{allm}2} = \frac{\text{totale internationale luchtvaartemissies}}{\text{totale mondiale emissies}} * \text{nationale emissies}$$

waarbij de gegevens voor elke emissiecomponent apart moeten worden ingevoerd.

De H₂O-emissies zijn niet aan de IPCC gerapporteerd. In MOBLEM zijn deze emissies berekend met behulp van een vaste verhouding tussen de emissiefactoren van CO₂ en H₂O van 1:0,39 (SBSTA, 1996a). Bij de berekening van het brandstofverbruik is ook uitgegaan van een vaste verhouding tot de CO₂-emissies: 1 liter kerosine is gelijk aan 3,155 kg CO₂ (SBSTA, 1996a).

Bij gebrek aan gegevens over de internationale luchtvaartemissies uit 1998 is gekozen voor een ander basisjaar waarvoor de juiste gegevens wel beschikbaar waren, namelijk 1995 (Olivier *et al.*, 2001a). Vervolgens is ervoor gekozen om ook de mondiale emissies uit 1995 (Olivier en Berdowski, 2001) te gebruiken. De totale nationale emissies van Nederland gelden wel voor 1998 (Olivier *et al.*, 2001b).

5.2.5 Allocatiemethode 3

De derde allocatiemethode is gebaseerd op de hoeveelheid brandstof die per jaar door de internationale luchtvaart wordt gebunkerd in Nederland. Om de emissies uit de hoeveelheid gebunkerde brandstof te kunnen berekenen, is een gemiddelde emissiefactor (in kg/kg brandstof) nodig. Voor CO₂, H₂O en SO₂ is de emissiefactor afkomstig uit Moorman en Dings (1996) en SBSTA (1996a).

De berekening van de emissiefactor voor de NO_x-, HC- en CO-emissies is uitgevoerd met behulp van de gegevens uit allocatiemethode 2:

$$\text{emissiefactor} = \frac{\text{totale internationale luchtvaartemissies voor NO}_x / \text{HC} / \text{CO}}{\text{totale internationale luchtvaartemissies voor CO}_2} * \text{emissiefactor CO}_2$$

De internationale luchtvaartemissies (Olivier *et al.*, 2001a) zijn weer uit 1995 bij gebrek aan gegevens uit 1998. Tenslotte zijn de emissiefactoren per component vermenigvuldigd met het brandstofverbruik.

5.2.6 Allocatiemethode 4

Allocatiemethode 4 verdeelt de internationale luchtvaartemissies aan de hand van de nationaliteit van de luchtvaartmaatschappijen. Alleen de internationale vluchten die in 1998 door de negen Nederlandse maatschappijen zijn uitgevoerd, tellen mee. De gegevens, ontvangen van AAS (2001), bevatten alleen het aantal vertrekkende internationale vluchten vanaf Schiphol in 1998. Er is verondersteld dat de herkomsten en bestemmingen aan elkaar gelijk zijn, zodat de gegevens van het aantal vluchten per bestemming verdubbeld konden worden.

5.2.7 Allocatiemethode 5

De vijfde allocatiemethode deelt de helft van de totale emissies van alle vertrekkende en aankomende internationale vluchten van en naar Nederland toe aan Nederland. De gegevens bestaan uit het aantal vertrekkende en arriverende vluchten per bestemming van Schiphol in 1998.

5.2.8 Allocatiemethoden 6 en 7

De zesde methode is gebaseerd op het vertrek- en aankomstland van vliegtuigpassagiers. *Alle* passagiers van internationale vluchten op Schiphol hebben een herkomst en bestemming toegekend gekregen. Vervolgens is voor elke bestemming het aantal benodigde vluchten berekend om alle passagiers van en naar de betreffende bestemming te vervoeren. Als laatste stap zijn de emissies van alle vluchten per bestemming berekend.

In de zevende allocatiemethode tellen alleen *Nederlandse* passagiers op internationale vluchten mee in de berekening, waarbij de emissies wel voor 100% meetellen.

De bestemmingen

In allocatiemethode 7 is met landen gewerkt in plaats van plaatsen. De reden hiervoor is gebrek aan gedetailleerde gegevens. AAS (2001) beschikt alleen over gegevens per land.

De passagiers

Het aantal passagiers dat in methode 7 ingevuld is, zijn mensen die in Nederland woonachtig zijn. Dit houdt niet in dat elke persoon ook de Nederlandse nationaliteit bezit. Verder beschikt AAS alleen over gegevens van vertrekkende passagiers. Ervan uitgaande dat elke vertrokken Nederlandse passagier weer terugkeert naar Nederland vanaf dezelfde bestemming, zijn de aantallen per bestemming verdubbeld.

Nederlandse passagiers met bestemming ‘Verenigde Staten’ zijn verdeeld in dezelfde verhouding als het aantal vluchten uit allocatiemethode 5 (‘Vertrek- en aankomstland vliegtuig’) naar de drie bestemmingen in de Verenigde Staten (Oost, Midden en West, zie tabel 5.2).

Tabel 5.2 *Verdeling van het aantal vluchten en Nederlandse passagiers voor de bestemmingen in de Verenigde Staten*

Bestemming	Aantal	Aantal	Percentage
Verenigde Staten Oost	8.436	389.489	44,5%
Verenigde Staten Midden	7.581	350.014	40,0%
Verenigde Staten West	2.940	135.739	15,5%
<i>Totaal</i>	18.957	875.242	100,0%

Van passagiers naar vluchten

Om in MOBLEM de vliegtuigemissies te kunnen berekenen, moet een aantal vluchten bekend zijn. Hiertoe is het aantal passagiers omgerekend naar aantal vliegbewegingen met de volgende formule:

$$\text{aantal vluchten} = \frac{\text{aantal passagiers}}{\text{capaciteit} * \text{bezettingsgraad (van het representatieve vliegtuigtype)}}$$

Vrachtvluchten worden in methode 6 en 7 niet meegenomen. De reden is dat de beladingsgraad van deze vluchten onbekend is, zodat er geen omrekening van tonnen vracht naar aantal vluchten gemaakt kan worden. Daarnaast is bij methode 7 ook de eigenaar van vervoerde vracht niet bekend, zodat de hoeveelheid vracht van Nederlanders niet bepaald kan worden.

Capaciteit

De capaciteit van de vliegtuigen is in het algemeen gelijk gesteld aan de capaciteit van het aan de desbetreffende bestemming toebedeelde vliegtuigtype, zoals Schiphol die rapporteert in haar Statistisch Jaarverslag 1998. Het aantal zitplaatsen in identieke vliegtuigen kan echter verschillen per luchtvaartmaatschappij.

Bij gebrek aan gegevens is voor de Airbus 310 (A310) de capaciteit van de Airbus 300 genomen en voor de Boeing 737-100 (B731) de capaciteit van de Boeing 737-200. Voor de typen B747-100-300 (B741) en McDonnell Douglas DC-9 (DC9) is niet een enkel type te definiëren. De capaciteit van de B747 100-300 is een gewogen gemiddelde van de subtypen B747-100, B747-200 en B747-300. Voor de capaciteit van de DC-9 is een gewogen gemiddelde genomen van de capaciteit van subtypen DC-9-20, DC-9-30 en DC-9-40/50. Het gewogen gemiddelde is bepaald aan de hand van het aantal vluchten per subtype in 1998.

Bezettingsgraad

De bezettingsgraad is door AAS gegeven per vliegtuigtype en dus niet per bestemming. De bezettingsgraad hangt echter af van factoren als de maatschappij zelf, de bestemming en het

soort vlucht (charter-vlucht, zakenvlucht, e.d.). Een meer nauwkeurige toekenning zou dus per vliegtuigtype per bestemming zijn, maar die gegevens waren niet beschikbaar bij AAS (2001).

5.2.9 Allocatiemethode 8

In de achtste allocatiemethode vindt de toedeling plaats op basis van landsgrenzen, zodat alle emissies door vliegtuigen op het Nederlandse territorium (inclusief het Nederlandse luchtruim) moeten worden berekend.

De bestemmingen

Ook in deze allocatiemethode is uitgegaan van land van bestemming. Alleen de emissies op Nederlands territorium zijn van belang, daarom moet bekend zijn welke afstand het vliegtuig binnen de Nederlandse grenzen aflegt. De afstand is afhankelijk van de uitvliegroute waarlangs het vliegtuig Nederland verlaat. De uitvliegroute hangt af van de bestemming.

De uitvliegroutes

Bij allocatiemethode 8 moet de omvang van de emissies die binnen de grenzen van Nederland wordt uitgestoten, berekend worden. Om de berekening te kunnen uitvoeren, zijn de luchtcorridors geanalyseerd. Voor elke bestemming is tegelijk een uitvliegroute bepaald (zie bijlage 8). Vliegtuigen die vanaf Schiphol vertrekken of op weg zijn naar de luchthaven, komen Nederland binnen via de corridors. In totaal kent Schiphol vijf aan- of uitvliegroutes (zie bijlage 9). De uitvliegroute is ingeschat op basis van de windrichting waarin de bestemming ligt. Bijvoorbeeld vliegverkeer richting Frankrijk verlaat Nederland via de uitvliegroute in zuidelijke richting.

De afstand tot de grens

Als vliegafstand is nu de afstand tot de grens nodig. Deze is bepaald met behulp van de World Atlas (Encarta, 1998). Op de overzichtskaart in bijlage 9 staan coördinaten en aanliggende bakens van elke corridor vermeld. Deze coördinaten zijn ingevoerd in de World Atlas (Encarta, 1998) om zo de afstand te berekenen. Tenslotte zijn de hemelsbrede afstanden gecorrigeerd met een omwegfactor van 1,1 (zie §4.5.5). In tabel 5.3 staan de uitvliegroutes²⁶ met bijbehorende afstand tot de grens.

²⁶ De juiste route behorend bij de nummering, is te vinden in bijlage 9.

Tabel 5.3 De uitvliegroues boven Nederland en bijbehorende afstand

Uitvliegroute	Windrichting	Afstand tot grens	Gecorrigeerde afstand
		<i>km</i>	<i>km</i>
1	NO	190	209
2	O	130	143
3	ZW	100	110
4	W	30	33
5	NW	30	33

De overvliegende vliegtuigen

Ook de overvliegende vliegtuigen tellen mee, want ook zij emitteren binnen de Nederlandse grenzen. Eurocontrol (Konneman, 2001) houdt het aantal precies bij: in 1998 vlogen er 371.116 vliegtuigen door Nederlands luchtruim. Een deel van deze vliegtuigen kan echter door omstandigheden toch besloten hebben op Schiphol te landen. Het overvliegende aantal is daarom verminderd tot naar schatting 360.000²⁷. De berekening van LTO-emissies is voor deze vliegbewegingen niet van toepassing.

Om de kruisvluchtemissies van de overvliegende vliegtuigen te berekenen, zijn zowel de gevlogen afstand binnen Nederlandse grenzen nodig als een emissiefactor tijdens de kruisvlucht. Het is niet mogelijk het aantal overvliegende vliegtuigen op te splitsen per vliegtuigtype. Er is gekozen om een gemiddelde emissiefactor voor de componenten NO_x, HC en CO te berekenen voor alle vliegtuigen.

De emissiefactor voor deze overvliegende toestellen is berekend met de volgende formule:

$$\text{emissiefactor} = \sum_{v=1}^{22} \frac{\text{kruisvluchtemissie bij 926 km} * \text{percentage van alle vluchten per vliegtuigtype}}{926 \text{ km}}$$

waarbij v = de representatieve vliegtuigtypen

Het resultaat van de bovenstaande formule geeft de gemiddelde emissie per vliegtuigkilometer tijdens kruisvlucht van alle vliegtuigen die Schiphol aandoen, aan. De factoren zijn genomen voor de standaard afstand van 926 kilometer, wat de maximale afstand is waarbij voor elk type nog gegevens in de Corinair database staan.

Voor CO₂, H₂O en SO₂ werden de emissies berekend met de vaste emissiefactoren (Moorman en Dings, 1996; SBSTA, 1996a).

²⁷ De inschatting om het aantal overvliegende vliegtuigen te verminderen van 371.116 naar 360.000 is gemaakt door dhr. Konneman, werkzaam bij Eurocontrol. (Konneman, 2001)

De afstand van overvliegende vliegtuigen

De afstand die overvliegende vliegtuigen binnen Nederlandse grenzen vliegen, is geschat op 190 kilometer. Een vliegtuig kan via diverse routes over Nederland vliegen, waarbij uitgegaan wordt dat die routes Nederland geheel doorkruisen. Door Nederland voor te stellen als rechthoek, waarbij de Noord-Zuid-lijn 250 km is en de Oost-West-lijn 175 km, en daarbij te veronderstellen dat 80% Oost-West vliegt en de overige 20% Noord-Zuid (Konneman, 2001), is de gemiddelde vliegafstand over Nederland 190 km. Hierbij is geen rekening gehouden met het gedeelte boven zee dat buiten de landsgrenzen, maar nog wel binnen het Nederlandse luchtruim valt. De kruisvluchtemissies van deze overvliegende vluchten zijn berekend door het aantal vluchten te vermenigvuldigen met de gevlogen afstand en de gemiddelde emissiefactor.

5.3 Resultaten

5.3.1 Inleiding

In de resultaten wordt eerst een algemene vergelijking van de absolute resultaten van MOBLEM gegeven. Hierbij worden ter vergelijking ook de huidige gerapporteerde luchtvaartemissies en de totale emissies van de sector verkeer en vervoer gegeven.

Vervolgens worden de resultaten van koolstofdioxide en de andere componenten apart van elkaar behandeld. De emissies van CO₂ (en waterdamp) staan namelijk in vaste verhouding tot het brandstofverbruik en zijn onafhankelijk van de gebruikte vliegtuigtypen. De absolute resultaten kunnen hierdoor vergeleken worden. Van de andere niet-CO₂-componenten daarentegen is de emissiefactor geen standaard waarde. SO₂-emissies hangen af van het zwavelgehalte in de kerosine, terwijl NO_x, HC en CO afhangen van het gebruikte motor- en vliegtuigtype. Daarom worden eerst de gebruikte emissiefactoren berekend, waarna de verschillen onderling verklaard worden.

5.3.2 Algemene vergelijking van de resultaten

In tabel 5.4 staan de resultaten van MOBLEM vermeld. Ter vergelijking zijn ook de huidige situatie van toebedeelde emissies (zie §5.2.2) en de totale emissies van de sector verkeer en vervoer in de tabel opgenomen. Waterdampemissies worden niet gerapporteerd. Bij de huidige situatie is voor CO₂ de emissies door de binnenlandse luchtvaart gegeven, voor de andere vier componenten zijn de LTO-emissies (zowel internationaal als binnenlands) van alle Nederlandse luchthavens vermeld.

Tabel 5.4 Emissies per allocatiemethode

Allocatiemethoden	Brandstof	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>			<i>10⁶ kg</i>			
Huidige situatie	-	0,4	-	0,2	2,9	1,0	5,8
1. Allocatie LTO-emissies	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	0,4	1,8
2. Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3. Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4. Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,2	10,2	4,0	3,2	51,0	1,7	5,0
5. Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,7	8,6	3,4	2,7	41,7	1,4	4,5
6. Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
7. Nationaliteit passagiers	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
8. Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,1	1,0	4,6
Totale emissies sector verkeer en vervoer	-	33,8	-	23	282	125	484

Bron: (RIVM, 2001)

Allocatiemethode 1 komt voor alle emissiecomponenten behalve SO₂ en CO tot de laagste resultaten, omdat in deze methode alleen de LTO-emissies en geen kruisvluchtemissies berekend zijn. Methode 2 geeft voor SO₂ en CO de laagste uitkomsten.

Allocatiemethode 4, de emissies van de Nederlandse luchtvaartmaatschappijen, leidt tot de hoogste CO₂-, H₂O-, SO₂- en NO_x-emissies. Voor de overige componenten (HC en CO) levert allocatiemethode 3 de hoogste emissies op. De oorzaak hiervan wordt in §5.3.4 behandeld.

Het aandeel van internationale luchtvaartemissies in de totale emissies van de sector verkeer en vervoer verschilt per allocatiemethode en per component. Door de CO₂-emissies door de luchtvaart nemen de totale emissies verkeer en vervoer toe van 33,8*10⁹ kg tot maximaal 44,0*10⁹ kg, een stijging van circa 30%.

De emissies van de sector verkeer en vervoer bevatten voor de niet-CO₂-componenten de LTO-emissies door zowel de binnenlandse als de internationale luchtvaart. Voor de berekening van de totale verkeer en vervoer emissies na toedeling van de internationale luchtvaartemissies is het van belang om de LTO-emissies uit de huidige situatie weg te laten, om dubbeltelling van deze emissies te voorkomen. Aangezien het binnenlandse deel niet bekend is, kan ook het internationale deel niet bepaald worden. Het gevolg is dat de toename in de verkeer en vervoer emissies door de toedeling van de internationale luchtvaartemissies niet berekend kan worden voor deze componenten. Wel kan het percentage berekend worden dat de componenten SO₂, NO_x, HC en CO op de huidige totale verkeer en vervoer emissies vormen. Respectievelijk is dat een maximaal aandeel van 14%, 18%, 7% en 6%.

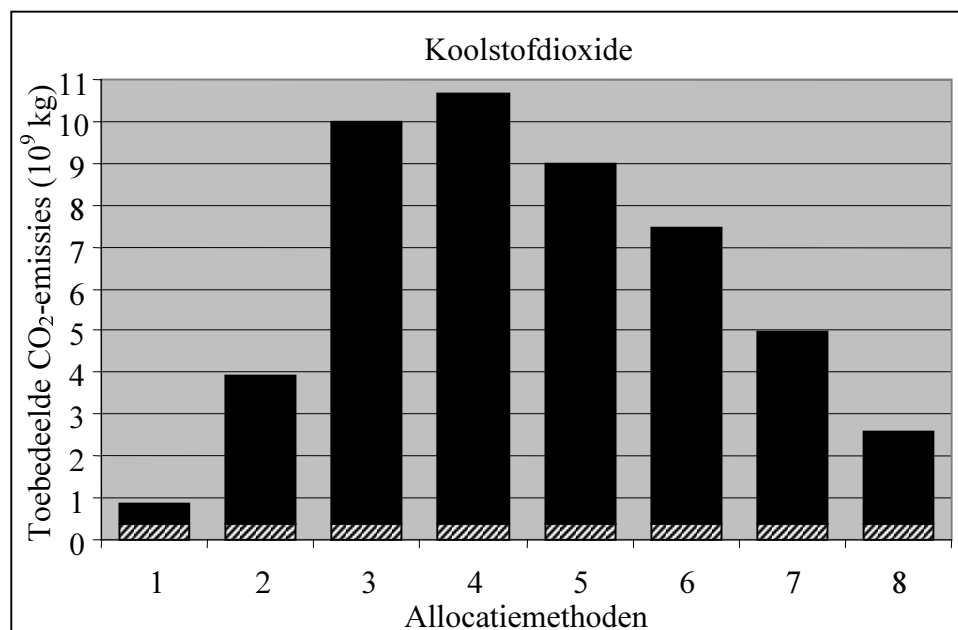
Ook de huidige situatie staat vermeld in tabel 5.4. Om dezelfde reden als bij de emissies van de verkeer en vervoer sector, kan ook voor de niet-CO₂-componenten het effect van de

toedeling op de hoogte van de emissies in vergelijking met de huidige situatie niet bepaald worden. Voor koolstofdioxide wordt de invloed van de toedeling op de rapportage aan de IPCC behandeld in §5.3.3.

5.3.3 Koolstofdioxide

Omdat koolstofdioxide (CO₂) een belangrijke rol speelt in de klimaatverandering (broeikaseffect), wordt deze component apart behandeld. De huidige situatie voor CO₂-emissies door de luchtvaart wijkt af van die van niet-broeikasgassen (§5.2.2). Elk jaar worden namelijk alleen de CO₂-emissies door de binnenlandse luchtvaart aan de IPCC gerapporteerd, in 1998 was dit $0,4 \cdot 10^9$ kg CO₂ (RIVM, 2001).

De totale aan Nederland toe te rekenen luchtvaartemissies in een toekomstige situatie zijn gelijk aan deze binnenlandse luchtvaartemissies plus de aan Nederland toebedeelde internationale luchtvaartemissies. Het resultaat van deze optelling staat in figuur 5.1, waarin het gestreepte gedeelte de emissies door de binnenlandse vluchten en het zwarte gedeelte de emissies door de internationale vluchten voorstellen.



Figuur 5.1 Resultaten van MOBLEM voor koolstofdioxide, plus de emissies van de binnenlandse luchtvaart (in 10^9 kg)

Bij de eerste allocatiemethode bijvoorbeeld verdubbelen de aan Nederland toebedeelde CO₂-emissies, terwijl de rapportage van de aan Nederland toebedeelde CO₂-emissies bij methode 4 met een factor 27 toeneemt.

In tabel 5.5 staan de huidige en mogelijke toekomstige situaties afgebeeld. Eerst is de huidige situatie berekend, waarin de totale verkeer en vervoer emissies $33,8 \cdot 10^9$ kg zijn (RIVM, 2001). In de tabel is ook berekend welk percentage de CO₂-luchtvaartemissies vormen in de

totale CO₂-emissies uit de sector verkeer en vervoer. Bij deze berekening is verondersteld dat de hoogte van de overige CO₂-emissies gelijk zijn gebleven aan de huidige situatie.

Tabel 5.5 Huidige situatie betreffende CO₂-emissierapportage en mogelijke toekomstige situaties, inclusief het aandeel in de totale CO₂-emissies in de sector verkeer en vervoer in 1998

	'Nederlandse' CO₂-emissies door de luchtvaart	Totale emissies verkeer en vervoer (inclusief luchtvaart)	Aandeel luchtvaartemissies in de totale verkeer en vervoer emissies
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>%</i>
Huidige situatie	0,4	33,8	1
Huidig + allocatiemethode 1	0,9	34,3	3
Huidig + allocatiemethode 2	3,9	37,3	10
Huidig + allocatiemethode 3	10,0	43,4	23
Huidig + allocatiemethode 4	10,6	44,0	24
Huidig + allocatiemethode 5	9,0	42,4	21
Huidig + allocatiemethode 6	7,4	40,8	18
Huidig + allocatiemethode 7	5,0	38,4	13
Huidig + allocatiemethode 8	2,6	36,0	7

Bron: (RIVM, 2001)

Uit de tabel is af te lezen, dat als de internationale luchtvaartemissies worden toebedeeld conform allocatiemethode 4, de luchtvaartemissies voor CO₂ circa 24% van de Nederlandse verkeer en vervoer emissies zullen uitmaken. De CO₂-emissies door de sector verkeer en vervoer zijn in dat geval (33,8) ongeveer 30% hoger dan in de huidige situatie (44,0) het geval is. De rapportage aan de IPCC neemt (conform methode 4) toe van 0,4 tot 10,6, een stijging met factor 27.

5.3.4 Overige componenten

Voor alle niet-CO₂-componenten zijn de emissiefactoren (in kg /kg brandstof) berekend per methode. Ter vergelijking is ook de emissiefactor van CO₂ genoemd. Als uitgangspunt bij de vergelijking dienen de resultaten van methoden 4 tot en met 7, omdat de gebruikte berekening in de betreffende methoden sterk overeenkomt. Verschillen groter dan 10% in de factoren ten opzichte van methoden 4 tot en met 7 zijn vetgedrukt (zie tabel 5.6).

Tabel 5.6 Emissiefactoren per allocatiemethode, berekend uit de resultaten van MOBLEM

Allocatiemethoden	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	kglkg		g/kg			
1. Allocatie LTO-emissies	3.2	1.2	1.0	14.0	2.5	12.4
2. Proportionele allocatie	3.2	1.2	0.1	6.9	0.8	1.1
3. Gebunkerde brandstof	3.2	1.2	1.0	12.1	2.9	9.0
4. Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3.2	1.2	1.0	15.7	0.5	1.5
5. Vertrek- en aankomstland vliegtuig	3.2	1.2	1.0	15.3	0.5	1.7
6. Vertrek- en aankomstland passagiers	3.2	1.2	1.0	14.9	0.5	1.8
7. Nationaliteit passagiers	3.2	1.2	1.0	14.6	0.5	1.8
8. Landsgrenzen	3.2	1.2	1.0	14.6	1.5	6.6

Brandstofverbruik en waterdamp (H₂O)

De resultaten voor brandstofverbruik en waterdampemissie zijn vergelijkbaar met de resultaten van internationale CO₂-luchtvaartemissies (zie figuur 5.1 zonder optelling van emissies van de binnenlandse emissies). De reden is dat over de emissiefactoren voor CO₂ en H₂O in kg per kg brandstof goede wetenschappelijke consensus is.

Zwavel dioxide (SO₂)

Zoals blijkt uit tabel 5.6 is de emissiefactor voor zwavel dioxide bij allocatiemethode 2 een factor 10 lager dan bij de overige allocatiemethoden. De reden voor dit verschil is dat Nederland in verhouding tot het wereldgemiddelde relatief weinig SO₂ emitteert per eenheid brandstof (of CO₂-emissie). Tabel 5.7 geeft de verhouding tussen de SO₂- en CO₂-emissies voor Nederland evenals het wereldgemiddelde.

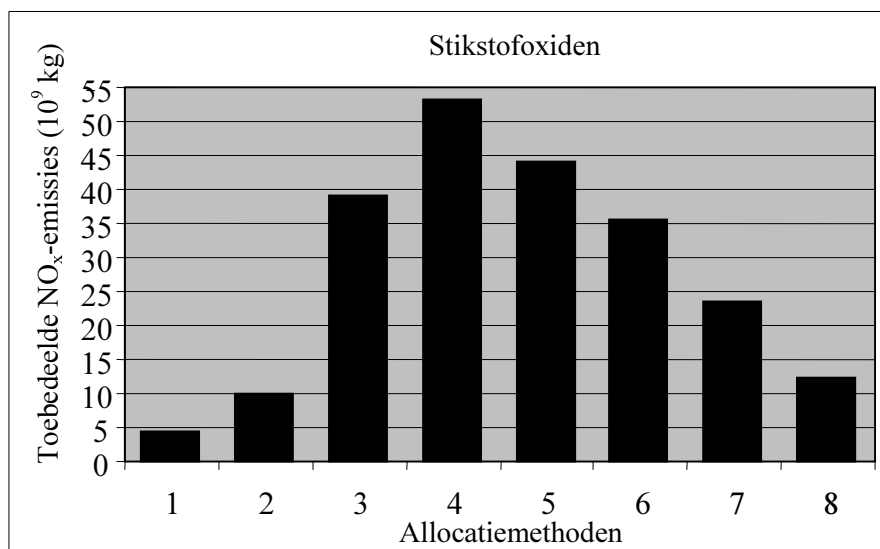
Tabel 5.7 Verhouding SO₂ / CO₂ voor Nederland en het wereldgemiddelde (in g/kg CO₂)

	SO ₂ / CO ₂
Wereldgemiddelde	5,3
Nederland	0,6

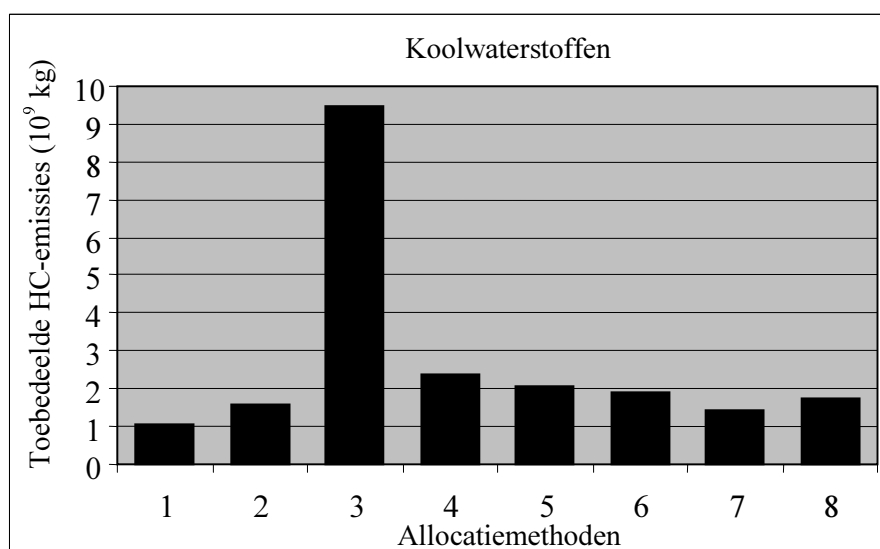
De redenen voor het verschil in de verhouding SO₂ / CO₂ tussen Nederland en het wereldgemiddelde zijn divers. Als eerste is het Europese milieubeleid gericht op een reductie van het zwavelgehalte van brandstoffen, met name die van het wegverkeer. Daarnaast is er beleid gericht op rookgasontzwaveling in kolencentrales, een chemisch proces waarbij zwavel dioxide uit de rookgassen wordt verwijderd. Een derde reden is dat in Nederland geen loodsmelters gevestigd zijn. Tijdens dit proces wordt namelijk veel zwavel dioxide geëmitteerd. In de vierde plaats is Nederland de laatste jaren overgestapt van hoogzwavelige aardolie op het gebruik van nauwelijks zwavel bevattend aardgas in elektriciteitscentrales. (Milieucompendium, 1999; Olivier, 2002)

Stikstofoxiden (NO_x), koolwaterstoffen (HC) en koolstofmonoxide (CO)

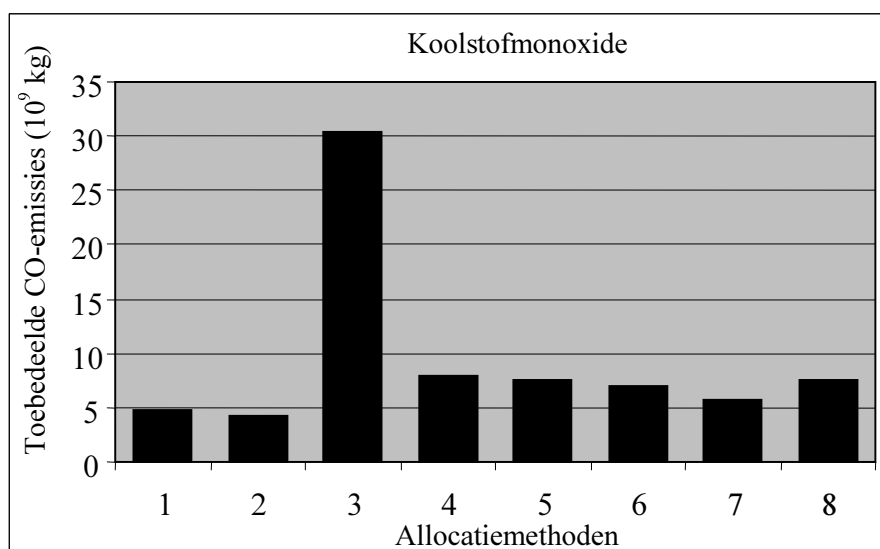
In de onderstaande figuren staan de uitkomsten van de laatste drie componenten (zie figuur 5.2, 5.3 en 5.4).



Figuur 5.2 Resultaten van MOBLEM voor stikstofoxiden (in 10⁹ kg)



Figuur 5.3 Resultaten van MOBLEM voor koolwaterstoffen (in 10⁹ kg)



Figuur 5.4 Resultaten van MOBLEM voor koolstofmonoxide (in 10⁹ kg)

De drie componenten vertonen afwijkingen in de allocatiemethode 2, 3 en 8 (zie vetgedrukte waarden in tabel 5.6). Om het verschil in de *tweede allocatiemethode* te kunnen verklaren, is de verhouding van de componenten ten opzichte van CO₂ berekend, voor zowel de mondiale als de nationale emissies (zie tabel 5.8).

Tabel 5.8 Verhouding NO_x, HC en CO / CO₂ voor Nederland en het wereldgemiddelde (in g/kg CO₂)

	NO _x / CO ₂	HC / CO ₂	CO / CO ₂
Wereldgemiddelde	4,13	5,92	31,92
Nederland	2,34	1,65	3,99

Het verschil tussen het wereldgemiddelde en Nederland wordt als eerste veroorzaakt door een (succesvol) beleid voor de drie componenten. Voor NO_x bijvoorbeeld wordt in grote industrie en centrales veel gebruik gemaakt van de-NO_x toepassingen, een soort katalytische verwijdering van NO_x uit rookgassen. Het zogenaamde koolwaterstoffen-reductie-programma (voor oplosmiddelen, verf, e.d.) is een overeenkomst tussen de overheid en (onder meer) de chemische industrie om de uitstoot van vluchtige organische koolwaterstoffen (HC-emissies) in het jaar 2000 te halveren ten opzichte van 1981. De tweede reden is dat in 1998 tweederde van het autopark op benzine en LPG in Nederland een katalysator bezat, terwijl alle nieuwe auto's er standaard mee uitgerust worden. De katalysator zet stikstofdioxide om in stikstof en zuurstof. Vervolgens wordt de zuurstof gebruikt om de koolstofmonoxiden en koolwaterstoffen te oxideren tot CO₂ en water. Met name in ontwikkelingslanden rijden nog veel auto's zonder katalysator. In de derde plaats wordt in Nederland weinig gedaan aan biomassaverbranding (m.n. brandhout en bos- en savannebranden) in vergelijking tot het wereldgemiddelde. Bij de verbranding van deze stoffen komt namelijk veel CO vrij. (Milieucompendium, 1999; Olivier, 2002)

De afwijking in *allocatiemethode 3* kan verklaard worden met de gebruikte emissiefactoren, die berekend zijn met behulp van gegevens uit methode 2 (zie §5.2.5). Zowel de internationale luchtvaartemissies voor CO₂ als voor de NO_x, HC en CO zijn afkomstig uit EDGAR²⁸ (Olivier *et al.*, 2001a). In tabel 5.9 zijn de emissiefactoren gegeven uit EDGAR, voor methode 3 en voor methoden 4 tot en met 7²⁹.

²⁸ Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR); een gezamenlijk project van het RIVM en TNO, dat een mondiale inventaris maakt van directe en indirecte broeikasgasemissies van antropogene bronnen (Olivier *et al.*, 2001a).

²⁹ Per allocatiemethode is een emissiefactor berekend door de emissie per component te delen door het bijbehorende brandstofverbruik. Vervolgens is voor elke component een gemiddelde factor over methode 4 tot en met 7 bepaald.

Tabel 5.9 Emissiefactoren uit MOBLEM en EDGAR voor NO_x, HC en CO (in g/kg brandstof)

	NO _x	HC	CO
EDGAR	10,9	2,6	8,4
Methode 3	12,1	2,9	9,0
Gemiddelde waarde voor methode 4 tot en met 7	15,1	0,5	1,7

De reden voor de hogere resultaten bij methode 3 is dat de emissiefactoren voor deze componenten (in g/kg brandstof) zoals afgeleid uit Olivier *et al.* (2001a) aanzienlijk hoger zijn dan de emissiefactoren die zijn berekend met de Corinair-methode (zie ook tabel 5.6). Een mogelijke oorzaak zou kunnen zijn dat in Olivier *et al.* (2001a) de mondiale luchtvaartemissies zijn berekend door de LTO-emissies op te schalen met de verhouding tussen het mondiale brandstofverbruik en het mondiale brandstofverbruik tijdens alleen de LTO-cycli. Aangezien de CO- en HC-emissiefactoren voor de LTO aanzienlijk hoger zijn dan die voor de gehele vlucht, zou dit een verklaring kunnen zijn voor de geconstateerde verschillen.

Een ander opvallend verschil betreft de hoge HC- en de CO-emissies in allocatiemethode 8. Een vlucht bestaat uit een LTO-cyclus en een kruisvlucht waarvan de tijdsduur onder andere afhankelijk is van de vluchtafstand. De emissies van HC en CO zijn tijdens de LTO-cyclus het hoogst. Omdat in allocatiemethode 8 de afstand tot de grens de vluchtafstand vormt, is de kruisvlucht in verhouding tot de andere allocatiemethoden korter. Het gevolg hiervan dat de LTO-emissies een groter deel van de totale emissies vormen. Dit heeft met name gevolgen voor de hoogte van de HC- en CO-emissies, zoals blijkt uit tabel 5.10 waarin de emissiefactoren van de kruisvlucht en de LTO-cyclus. De emissies door de overvliegende vliegtuigen zijn niet meegenomen in de berekening.

Tabel 5.10 Vergelijking van de emissiefactoren voor verschillende vluchtfasen bij allocatiemethode 8

	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	kg/kg	kg/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
LTO	3,2	1,2	1,0	13,9	2,5	12,3
Kruisvlucht	3,2	1,2	1,0	17,0	0,9	2,9

De LTO-emissiefactor van HC en CO is respectievelijk een factor 3 en 4 hoger dan de kruisvluchtemissiefactor. Voor de componenten CO₂, H₂O en SO₂ is er geen verschil tussen de emissiefactoren van de LTO-cyclus en kruisvlucht, want ze zijn gerelateerd door een vaste emissiefactor aan het brandstofverbruik. De LTO-emissiefactor van NO_x is juist lager dan de kruisvluchtemissiefactor. Een groter aandeel van de LTO-emissies in de totale emissies leidt voor HC en CO dus tot hogere emissies in verhouding met andere allocatiemethoden.

5.3.5 Conclusies

Bij vergelijking van de absolute waarden van de allocatiemethoden geven methode 1 voor CO₂, H₂O, NO_x en HC en methode 2 voor SO₂ en CO de laagste resultaten. Methode 4 leidt tot de hoogste CO₂-, H₂O-, SO₂- en NO_x-emissies, terwijl allocatiemethode 3 bij HC en CO voor de hoogste emissies zorgt.

Door ook de internationale luchtvaartemissies aan Nederland toe te delen, stijgt het aandeel van de CO₂-emissies door de luchtvaart in de totale verkeer en vervoer emissies van 1% tot maximaal 30%. Voor de niet-CO₂ emissies varieert het maximale percentage dat de componenten ten opzichte van de huidige totale verkeer en vervoer emissies vormen, van 6 tot 18%.

De rapportage van CO₂-emissies door de luchtvaart aan de IPCC neemt door de toedeling ten opzichte van de huidige rapportage maximaal met factor 27 toe.

De verschillen in absolute waarden van de allocatiemethoden ontstaan zowel door het verschil in toedelen als het verschil in emissiefactoren. De afwijkingen in de resultaten gelden vooral voor NO_x, HC en CO, omdat deze componenten geen vaste emissiefactor kennen. Ze worden beïnvloed door de gebruikte vliegtuigtypen en de vliegafstand waardoor het aandeel LTO-emissies in de totale emissies kan wijzigen.

5.4 Vergelijking met andere onderzoeken

5.4.1 Inleiding

Om na te gaan of MOBLEM betrouwbare resultaten oplevert, is een vergelijking gemaakt met andere onderzoeken. In deze paragraaf worden twee soorten vergelijkingen gemaakt. In de eerst plaats wordt gekeken of de emissieberekening in het algemeen overeenstemt met andere berekeningen. Er is gekozen voor de volgende twee rapporten en/of onderzoeken:

- *Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland*, een rapportagereeks MilieuMonitor nr. 4 (Klein *et al.*, 2002);
- De resultaten uit het *milieujaarverslag* van de Koninklijke Luchtvaartmaatschappij (KLM, 2000).

Als tweede zijn de uitkomsten van MOBLEM vergeleken met eerder uitgevoerde berekeningen over allocatie van luchtvaartemissies door Resource Analysis en het Centrum voor energiebesparing en schone technologie (van Velzen en Wit, 2000).

5.4.2 EAj-rapport

Het eerste onderzoek waarmee een vergelijking wordt gemaakt, is de Emissie- en AfvaljaarRapportage (EAj-rapport) van de CoördinatieCommissie DoelgroepMonitoring van

de Hoofdinspectie Milieuhygiëne (Klein *et al.*, 2002). In dit rapport worden voor verschillende componenten de totale LTO-emissies op Schiphol vermeld, voor zowel binnenlandse als internationale vluchten. In de onderstaande tabel wordt een vergelijking gemaakt tussen de uitkomsten van de eerste allocatiemethode van MOBLEM en de gegevens uit het EAj-rapport. De onderste rij in de tabel geeft de afwijking in de gegevens van MOBLEM aan, ten opzichte van het EAj-rapport (zie tabel 5.11).

Tabel 5.11 Vergelijking van de totale LTO-emissies op Schiphol in 1998, berekend in MOBLEM en in het EAj-rapport

	CO₂	SO₂	NO_x	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>
MOBLEM	460	146	2041	366	1804
EAj-rapport	479	137	2113	528	2251
<i>Vershil MOBLEM t.o.v. EAj</i>	-4%	7%	-3%	-31%	-20%

Bron: (Klein *et al.*, 2002)

De verschillen tussen de componenten CO₂, SO₂ en NO_x zijn klein, maar in de HC- en CO-emissies treden grote(re) afwijkingen op, namelijk 31 en 20 procent. Dit kan deels veroorzaakt worden doordat in het EAj-rapport gerekend is met circa 100 meest voorkomende vliegtuigtypen op Schiphol terwijl in MOBLEM het aantal vliegtuigtypen uitgaat van representatieve typen voor heel Europa en Amerika. Er kunnen op Schiphol andere motor-vliegtuigtypen-combinaties landen.

Daarnaast verschillen de LTO-data per vliegtuigtype. De data uit het EAj-rapport zijn daarom voor elk representatief vliegtuigtype (behalve voor de Fokker 28 wegens gebrek aan cijfers) vergeleken met de gegevens uit de Corinair database. De CO₂-, SO₂- en NO_x-waarden vertoonden afwijkingen tot 20%. Voor de HC- en CO-emissies echter weken de waarden van de Corinair-database (zowel positief als negatief) gemiddeld 274% en 59% af van het EAj-rapport. Deze gemiddelde percentages verschillen van de percentages uit tabel 5.11, omdat het hier om individuele vliegtuigtypen gaat en niet om de hele vloot. Het verschil geeft aan dat de vliegtuigtypen die Schiphol aandoen, niet overeenkomen met de gemiddelde typen uit Corinair. Dit zou kunnen zijn veroorzaakt door andere vliegtuigtype-motor-combinaties. De meeste vliegtuigen kunnen namelijk worden uitgerust met verschillende motortypen. De gekozen motortype voor veel voorkomende vliegtuigtypen op Schiphol is in het EAj-rapport hoofdzakelijk gebaseerd op de vliegtuigtype-motor-combinatie zoals gebruikt bij de drie grootste Nederlandse luchtvaartmaatschappijen (KLM, Transavia en Martinair) (Klein *et al.*, 2002). Dit zijn waarschijnlijk andere motoren dan die in de Europese en Amerikaanse luchtvaart waarop de Corinair-methode gebaseerd is³⁰ (§4.2.3).

³⁰ Het motortype waar in de Corinairmethodiek vanuit wordt gegaan, kon niet worden achterhaald.

5.4.3 Milieujaarverslag van KLM

In het jaarverslag van de Koninklijke LuchtvaartMaatschappij (KLM) staan het energiegebruik en de emissies over het jaar '98/'99³¹ vermeld van alle internationale vluchten van KLM en KLM Cityhopper vanaf en naar Schiphol (KLM, 2000). Omdat in allocatiemethode 4 de afzonderlijke Nederlandse luchtvaartmaatschappijen vermeld staan, kan met een eenvoudige berekening de emissies door de KLM en KLM Cityhopper met MOBLEM berekend worden. In tabel 5.12 staan de resultaten van MOBLEM in vergelijking met de cijfers uit het KLM-jaarverslag³².

Tabel 5.12 *Vergelijking van de totale emissies veroorzaakt door de KLM-vloot op Schiphol in 1998, berekend in MOBLEM en gerapporteerd door de KLM*

	Brandstof	CO₂	SO₂	NO_x	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>
MOBLEM	2,5	8,0	2,5	39,7	1,3	3,9
KLM	2,8	8,5	0,5	31,4	1,1	n.v.t.
<i>Vershil MOBLEM t.o.v. KLM</i>	<i>9%</i>	<i>6%</i>	<i>-369%</i>	<i>-27%</i>	<i>-14%</i>	<i>n.v.t.</i>

Bron: (KLM, 2000)

De KLM kan de hoeveelheid brandstof eenvoudig bepalen aan de hand van de bunkering, hetgeen inhoudt dat dit KLM-cijfer een relatief hoge mate van betrouwbaarheid heeft. Opvallend is het relatief geringe verschil tussen het met MOBLEM berekende en dat door de KLM opgegeven brandstofverbruik.

Omdat het brandstofverbruik van MOBLEM de KLM onderling weinig verschillen, moeten de verschillen in de emissies veroorzaakt worden door de emissiefactoren³³ (zie tabel 5.13).

Tabel 5.13 *Emissiefactoren berekend uit de totale emissies van zowel MOBLEM als van de KLM*

	CO₂	SO₂	NO_x	HC
	<i>kg/kg brandstof</i>	<i>g/kg brandstof</i>	<i>g/kg brandstof</i>	<i>g/kg brandstof</i>
MOBLEM	3,2	1,0	15,7	0,5
KLM	3,1	0,2	11,3	0,4

De KLM maakt, net als in MOBLEM en in andere methoden, gebruik van vaste emissiefactoren bij de berekening van CO₂- en SO₂-emissies. Deze emissies worden door het gebruik van deze methode onafhankelijk van de gebruikte vliegtuigtypen. Het verschil in de SO₂-emissies kan dus alleen verklaard worden door het verschil in emissiefactor. De KLM

³¹ Er is verondersteld dat de gegevens over het boekjaar 1998/1999 niet verschillen van de gegevens uit het jaar 1998 die in MOBLEM zijn gebruikt.

³² Waterdampemissies worden in het milieujaarverslag van de KLM niet gerapporteerd (KLM, 2000).

³³ Omdat in het milieujaarverslag van KLM de totale CO-emissies niet vermeld stonden, kon voor deze component geen emissiefactor berekend worden (KLM, 2000).

gaat uit van een ander zwavelgehalte in kerosine dan MOBLEM. In KLM (2000) staat aangegeven dat de SO₂-emissies worden berekend op basis van het zwavelgehalte van kerosine, zoals opgegeven door de brandstofleverancier op Schiphol. Zoals blijkt uit tabel 5.13 gebruikt MOBLEM een emissiefactor die een factor 5 hoger is³⁴.

Voor NO_x en HC berekent de KLM jaarlijks de emissiefactoren van elk vliegtuigtype voor elke afzonderlijke fase. Voor de berekening van de gegevens voor de Boeing 747-400, de Boeing 767 en de MD11 gebruikt de KLM recente motorgegevens, voor de overige typen ICAO-schattingen. (KLM, 2000). Deze afwijkingen kunnen zowel veroorzaakt worden door andere emissiefactoren als door een verschil van vloot tussen de KLM en Corinair. Het komt bijvoorbeeld voor dat in MOBLEM een vliegtuigtype is toegekend aan een bestemming waarop de KLM vliegt, maar dat de KLM het betreffende type niet in haar vloot heeft. Daarnaast kan de KLM-vloot zuiniger en minder vervuilend zijn doordat ze vliegtuigen met andere motoren gebruikt dan verondersteld wordt in Corinair.

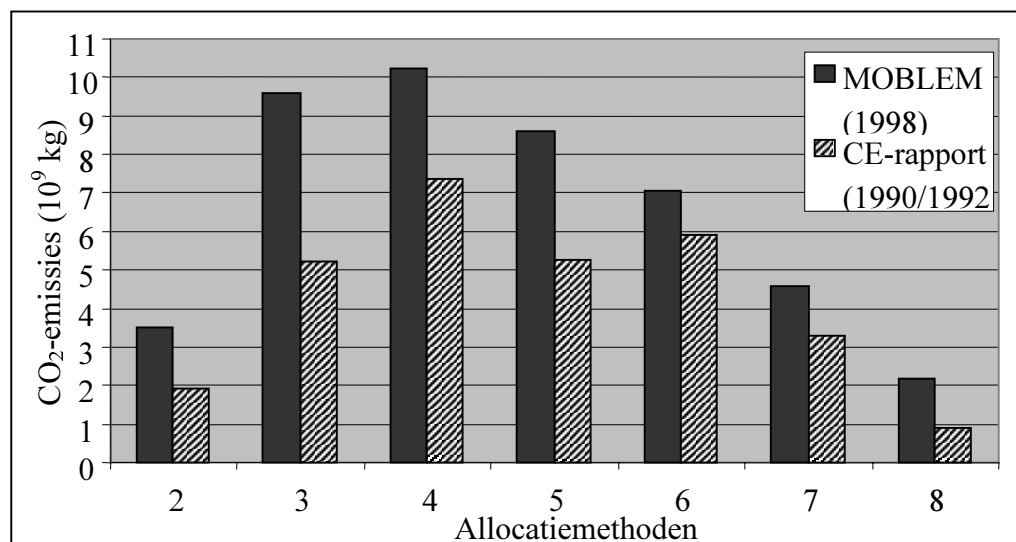
5.4.4 Rapportage Resource Analysis en CE

Naast de eerder gemaakte analyse van de rekenmethode wordt MOBLEM in deze paragraaf op het niveau van allocatiemethoden vergeleken. In een onderzoek, uitgevoerd door Resource Analysis en het Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie (hierna CE-rapport genoemd), zijn voor 23 landen de acht allocatiemethoden toegepast voor alleen de component CO₂ (Van Velzen en Wit, 2000).

De resultaten voor Nederland zijn vergeleken met de CO₂-emissies uit MOBLEM, de uitkomst hiervan staat in figuur 5.5. De eerste allocatiemethode bevat in het CE-rapport alleen de totale internationale luchtvaartemissies van de 23 landen en is daarom niet in deze vergelijking meegenomen.

Uit het figuur blijkt dat de absolute hoogte van de CO₂-emissies in MOBLEM hoger is dan in het CE-rapport, maar dat de verhoudingen tussen de allocatiemethoden in beide onderzoeken in he algemeen redelijk vergelijkbaar zijn. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het verschil in basisjaar. Het basisjaar uit het CE-rapport is een combinatie van 1990 en 1992 (bij gebrek aan juiste gegevens voor slechts één basisjaar) en MOBLEM heeft 1998 als basisjaar. De uitkomsten van het CE-rapport zijn lager uitgevallen, omdat het aantal vliegbewegingen in 1990 (en 1992) lager was dan in 1998 (Schiphol, 1999). In tabel 5.14 zijn de uitkomsten van beide methoden vergeleken.

³⁴ In het jaarverslag 2000/2001 van de KLM staat vermeld dat over het boekjaar 1999/2000 de hoeveelheid zwaveldioxide 1,4 gram en over het boekjaar 2000/2001 0,36 gram per kilogram verbruikte brandstof was (KLM, 2001). Deze waarden zijn dus een factor 2 tot hoger dan de berekende



Figuur 5.5 Vergelijking van de resultaten van MOBLEM en het CE-rapport

Bron: (Van Velzen en Wit, 2000)

Tabel 5.14 Vergelijking van de resultaten voor koolstofdioxide (in 10⁹ kg), zowel voor MOBLEM als het CE-rapport

Allocatiemethoden	CE-rapport	MOBLEM	MOBLEM (index: CE = 100)
Proportionele allocatie	1.9	3.5	184
Gebunkerde brandstof	5.2	9.6	183
Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	7.4	10.2	139
Vertrek- en aankomstland vliegtuig	5.3	8.6	164
Vertrek- en aankomstland pass./vracht	5.9	7.0	119
Nationaliteit pass./vracht	3.3	4.6	139
Landsgrenzen	0.9	2.2	238

Bron: (Van Velzen en Wit, 2000)

De emissies zoals berekend door MOBLEM zijn gemiddeld 66% hoger dan de in het CE-rapport gerapporteerde emissies. In 1990 (eerste basisjaar CE-rapport) zijn 246.504 vluchten uitgevoerd, tegenover 392.719³⁵ in 1998, wat inhoudt dat het aantal vliegbewegingen in 1998 circa 60% hoger is dan in 1990 en daarmee, bij gelijkblijvende brandstofefficiëntie, ook de CO₂-emissie. Daarnaast zal het feit dat in het CE-rapport gebruik is gemaakt van een ander model (namelijk het AERO model van het directoraat generaal Luchtvaart van Ministerie van Verkeer en Waterstaat) met een andere vloot met afwijkende motoren een deel van de verschillen verklaren. (Van Velzen en Wit, 2000]

5.4.5 Tussenconclusie

MOBLEM is in deze paragraaf vergeleken met drie methoden. Afwijkingen tussen MOBLEM en de andere methoden zijn waarschijnlijk veroorzaakt door de gemaakte

³⁵ Dit aantal vliegbewegingen wijkt af van het gebruikte aantal in MOBLEM. De reden hiervoor is dat dit getal zowel passagiers- als vrachtluchten zijn, en zowel de binnenlandse als internationale vluchten dekt.

vereenvoudiging in MOBLEM naar slechts 22 typen en het verschil in vliegtuigtype-motorcombinatie. Dit laatste houdt in dat de Corinair-methode wel representatief voor de gemiddelde Europese en Amerikaanse luchtvaartsector kan zijn, maar dat de vloot die Schiphol aandoet een andere combinatie van vliegtuigtype en motoren gebruikt dan de representatieve Corinair-typen.

5.5 Gevoeligheidsanalyse

5.5.1 Opzet gevoeligheidsanalyse

Onzekerheden komen in elke modellering voor, en het is van belang dat er een duidelijke beeld van geschetst wordt. Als laatste onderdeel in de modeltoepassing wordt daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te testen hoe gevoelig de uitkomsten van het model zijn voor veranderende parameters. Er bestaan twee soorten onzekerheden binnen de modellering:

1. Onzekerheden in de modelstructuur;
2. Onzekerheden in de invoergegevens.

Modelstructuur

Het eerste deel vloeit voort uit het feit dat er aannames zijn gedaan om het model eenvoudig en uitvoerbaar te houden. In MOBLEM zijn onder andere de volgende aannames gedaan:

- De berekende afstand inclusief de omwegfactor tot een bestemming;
- De toedeling van vliegtuigtypen per bestemming;
- De berekende emissiefactoren in allocatiemethode 3;
- De gebruikte capaciteit en bezettingsgraad bij allocatiemethode 6 en 7;
- De afstand tot de grens genomen met bijbehorende uitvliegroute in allocatiemethode 8;
- De afstand van vliegtuigen boven Nederlands grondgebied in allocatiemethode 8.

Er is gekozen om de toedeling van de vliegtuigtypen per bestemming nader te bekijken (in §5.5.2), omdat verwacht wordt dat deze parameter een grote invloed kan hebben op de resultaten.

Invoergegevens

In de tweede plaats zijn de uitkomsten van een model gevoelig voor de invoergegevens. Gepoogd is om zo betrouwbaar mogelijke data te gebruiken, maar afwijkingen met de werkelijkheid zijn onontkoombaar. In MOBLEM zijn invoerdata van drie verschillende bronnen gebruikt:

- Gegevens over het aantal vluchten en passagiers per bestemming (AAS, 2001);
- Gegevens over het energiegebruik en de emissies van de ATR 42, de ATR 72 en de Fokker 50 (Hasselrot, 2000);
- De Corinair-database waarin voor de overige 19 vliegtuigtypen het energiegebruik en de emissies vermeld staan (TFEI, 2000).

De onzekerheden in de invoerdata van AAS (2001) zijn niet bekend. Er is daarom gekozen de bezettingsgraad per vliegtuigtype te veranderen, om de invloed hiervan op de resultaten na te gaan (in §5.5.3). Ook zijn de onzekerheden in de Hurdy-Gurdy-Solution niet bekend. Verondersteld is dat de gegevens betrouwbaar zijn en dat de onzekerheden kleiner dan 10 procent zijn.

De Corinair-database bestaat uit de emissiegegevens van de representatieve vliegtuigtype-motor-combinaties. De onzekerheden omvatten zowel de representativiteit van deze typen voor Schiphol als de bijbehorende emissiefactoren. De onzekerheden in de emissiefactoren worden besproken in §5.5.4, terwijl de onzekerheden in vliegtuigtypen in §5.6 aan bod komen. De gevoeligheid van MOBLEM voor de invoergegevens van Corinair kan niet gecontroleerd worden, maar de betrouwbaarheid kan deels gecontroleerd worden door de uitkomsten van het model te vergelijken met die van andere onderzoeken, zoals in §5.4 uitgevoerd is.

5.5.2 Variatie in de verdeling van vliegtuigtypen per bestemming

De eerste analyse betreft de verdeling van vliegtuigtypen naar bestemmingen. In §4.5.4 is uitgelegd op welke wijze de toedeling is uitgevoerd. Er zijn echter meer mogelijkheden voor de toedeling. Daarom is er gekozen om de gemaakte aanname te wijzigen en de invloed ervan op het modelresultaten te controleren.

Zowel de resultaten van allocatiemethode 2 als 3 wijzigen niet door de veranderingen in de toedeling van vliegtuigtypen.

Per bestemming is een ander vliegtuigtype toebedeeld: eerst een type met een kleiner bereik dan het oorspronkelijke type en vervolgens een type met een groter bereik (zie tabel 5.15)³⁶.

³⁶ De twee uitgevoerde analyses worden in het vervolg van dit hoofdstuk ‘kleiner bereik’ en ‘groter bereik’ genoemd.

Tabel 5.15 *Volgorde in de verdeling van het bereik, zowel een kleiner, een normaal als een groter bereik*

Volgorde	Kleiner bereik	Normale verdeling	Groter bereik
1	Boeing 777	Boeing 747-400	Boeing 747-400
2	Airbus 340	Boeing 777	Boeing 747-400
3	Boeing 747-100	Airbus 340	Boeing 777
4	McDonnell Douglas DC10	Boeing 747-100	Airbus 340
5	Boeing 767	McDonnell Douglas DC10	Boeing 747-100
6	Airbus 330	Boeing 767	McDonnell Douglas DC10
7	Airbus 310	Airbus 330	Boeing 767
8	Boeing 757	Airbus 310	Airbus 330
9	Airbus 320	Boeing 757	Airbus 310
10	Boeing 727	Airbus 320	Boeing 757
11	Boeing 737-400	Boeing 727	Airbus 320
12	McDonnell Douglas 82	Boeing 737-400	Boeing 727
13	Boeing 737-100	McDonnell Douglas 82	Boeing 737-400
14	McDonnell Douglas DC9	Boeing 737-100	McDonnell Douglas 82
15	BAC 1-11	McDonnell Douglas DC9	Boeing 737-100
16	BAe 46	BAC1-11	McDonnell Douglas DC9
17	Fokker 100	BAe 46	BAC 1-11
18	Fokker 28	Fokker 100	BAe 46
19	ATR 42	Fokker 28	Fokker 100
20	Fokker 50	ATR 42	Fokker 28
21	ATR 72	Fokker 50	ATR 42
22	ATR 72	ATR 72	Fokker 50

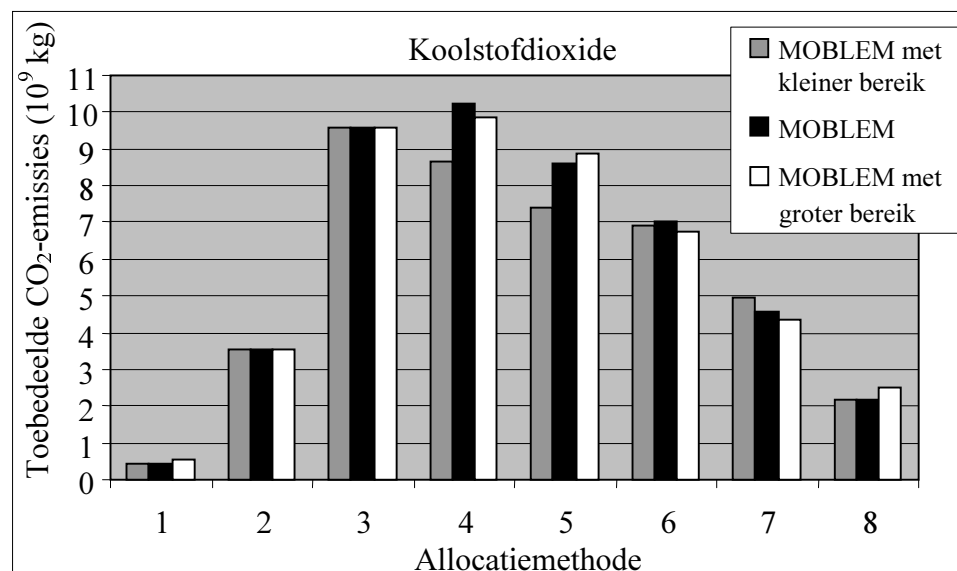
Door deze wijziging in toedeling vervallen de voorwaarden, die hoorden bij de oorspronkelijke verdeling (zie §4.5.4). Bij zowel ‘kleiner bereik’ als ‘groter bereik’ ontstaat een situatie, die in werkelijkheid niet voorkomt. Bepaalde vliegtuigtypen voeren nu in 1998 veel vluchten uit, terwijl bekend is uit het jaarverslag van Schiphol (1999) dat ze in werkelijkheid maar weinig vluchten hebben gevlogen. Bijvoorbeeld de Boeing 737-400 maakt in de oorspronkelijke verdeling ongeveer 33% van alle vluchten, maar wordt bij ‘kleiner bereik’ vervangen door de McDonnell Douglas 82. Deze verandering zal de resultaten waarschijnlijk beïnvloeden, omdat de emissies per vliegtuigtype grote verschillen kunnen vertonen (zie bijlage 5). Door deze nieuwe manier van verdelen heeft de gevoeligheidsanalyse een grote bandbreedte als gevolg van de niet waarschijnlijke situatie. Dit zorgt ervoor dat de bovengrens van de gevoeligheid voor de toedeling wordt geanalyseerd. De gevoeligheid van de resultaten zal waarschijnlijk kleiner zijn dan berekend wordt.

De vervanging door typen met een groter bereik leverde geen problemen op. Bij het invullen van vliegtuigtype met een kleiner bereik ontstonden wel problemen in de combinatie van het maximale bereik van een vliegtuigtype en de afstand tot een bestemming. Dit probleem is als volgt opgelost: bij afstanden die groter waren dan het maximale bereik van het betreffende vliegtuigtype, bleef het normale vliegtuigtype staan.

Dit vond plaats in de volgende situaties:

- Voor afstanden groter dan 12038 km bleef het type B744 ongewijzigd staan;
- Voor afstanden groter dan 10185 km bleef het type B741 ongewijzigd staan;
- Voor afstanden groter dan 1388 km bleef het type F28 ongewijzigd staan.

In figuur 5.6 staan de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor koolstofdioxide afgebeeld.



Figuur 5.6 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor koolstofdioxide (in 10⁹ kg)

In bijlage 10 staan alle resultaten vermeld. In deze paragraaf worden alleen de hoofdlijnen van de resultaten behandeld.

Bij resultaten van koolstofdioxiden valt op dat:

- de resultaten van methode 1 en 8 bij een groter bereik respectievelijk een verschil van 24% en 14% hebben ten opzichte van de resultaten met een normaal bereik;
- de resultaten van methode 4 en 5 bij een kleiner bereik respectievelijk een verschil van 15% en 14% hebben ten opzichte van de resultaten met een normaal bereik;
- de overige methoden minder dan 10% verschillen bij zowel groter als kleiner bereik.

Voor de overige componenten kan opgemerkt worden dat:

- de resultaten van H₂O en SO₂, gelijk zijn aan CO₂ bij zowel groter als kleiner bereik;
- de resultaten van NO_x ook verschillen vertonen in dezelfde methoden, alleen zijn deze waarden hoger (16% - 38%);
- de resultaten van HC vertonen grote verschillen ten opzichte van de resultaten met een normaal bereik. De bandbreedte bij groter bereik is 17% - 66% en bij kleiner bereik 45-172%;
- de resultaten van CO bij een groter bereik een verschil in methode 1 (17%) en 8 (15%) kent en bij een kleiner bereik een verschil in methode 6 (18%) en 7 (20%).

Er moet eerst worden opgemerkt dat de berekening bij deze gevoeligheidsanalyse niet consequent is uitgevoerd. Bij methoden 6 en 7 is het aantal vluchten aangepast aan de nieuwe toedeling, terwijl bij de andere vluchten het aantal vluchten gelijk is gebleven aan de berekening met het normale bereik. Deze methoden 6 en 7 zijn daardoor minder gevoelig dan de overige methoden, wat ook terug te vinden is in de resultaten. De overige methoden hebben bij een kleiner bereik een onderschatting van het aantal vluchten (de capaciteit daalt tenslotte, zodat hetzelfde aantal mensen nu met vliegtuigen met een kleinere capaciteit worden moet vervoerd) en bij een groter bereik een overschatting van het aantal vluchten. Het gevolg is dat de resultaten van de gevoeligheidsanalyse waarschijnlijk geen realistisch beeld zullen opleveren.

De grootste verschillen in de resultaten worden gevonden in de HC-emissies. Een verklaring hiervoor kan zijn, dat de verdeling van de vloot wijzigt. Met name de vervanging van de Boeing 734, die bij het normale bereik 33% van het totaal aantal vluchten uitgevoerd heeft, heeft grote invloed op de hoogte van de HC-emissies. Bij groter bereik is de B734 vervangen door de Boeing 721 en bij kleiner bereik door de MD82. Deze twee nieuwe vliegtuigtypen hebben hogere HC-emissiefactoren dan de Boeing 734. De emissies van MD82 en B721 stijgen respectievelijk met een factor 3 en 11 voor LTO-emissies en een factor 8 en 10 voor kruisvluchtemissies. Het gevolg is dat meer vervuilende vliegtuigen meer vluchten gaan uitvoeren, waardoor de HC-emissies aanzienlijk stijgen.

Concluderend kan worden gesteld dat hoe de vliegtuigtypen verdeeld zijn per bestemming wel invloed heeft op de resultaten. Deze invloed geldt in het bijzonder voor de HC-emissies. Dit kan veroorzaakt zijn doordat bij de nieuwe toedeling een meer vervuilend vliegtuig meer vluchten toebedeeld heeft gekregen. De andere verschillen kunnen niet verklaard worden, want dat hangt af van veel factoren waaronder de onder- en overschatting van het aantal vluchten. De maximale afwijking in de resultaten van CO₂ ten opzichte van normaal bereik is 24%, waarbij rekening wel moet worden gehouden met de onder- en overschatting. Voor de overige componenten is het verschil ten opzichte van het normale bereik maximaal 172%.

5.5.3 Variatie in de bezettingsgraad

Als tweede onderdeel in de gevoeligheidsanalyse is de bezettingsgraad gevarieerd. In methode 5 zijn de emissies berekend op basis van het aantal vluchten, terwijl bij methode 6 het aantal passagiers als basis diende. Vervolgens is het aantal passagiers omgerekend naar het aantal vluchten met behulp van de capaciteit en bezettingsgraad van het gebruikte vliegtuig (zie §5.2.8). Het levert het resultaat uit tabel 5.16 op.

Tabel 5.16 *Vergelijking van het aantal vluchten in allocatiemethoden 5, 6 en 7*

	Methode 5	Methode 6	Methode 7
Aantal vluchten met verschillende bezettingsgraden	363.889	375.007	127.273
Aantal vluchten met gewijzigde bezettingsgraad	363.889	352.249	121.195

Als de bezettingsgraad en capaciteit correct waren, zou het aantal vluchten uit methode 5 en 6 aan elkaar gelijk moeten zijn. Het verschil kan daarom alleen verklaard worden door het gebruik van een niet met de realiteit overeenkomende capaciteit en/of bezettingsgraad. Door het kiezen van een te lage bezettingsgraad of capaciteit levert de berekening van passagiers naar vluchten een te hoog aantal vluchten op. In deze gevoeligheidsanalyse is gekozen om de bezettingsgraad te variëren, omdat de gemiddelde bezettingsgraad in MOBLEM (67,6%, gewogen naar het aantal vluchten per vliegtuigtype) al afwijkt van het gemiddelde op Schiphol (70,4%) (Schiphol, 1999).

In deze analyse is voor alle typen dezelfde gemiddelde bezettingsgraad van 70,4% ingevuld. Deze verandering heeft alleen gevolgen voor allocatiemethoden 6 en 7, omdat de bezettingsgraad bij deze methoden in de berekening gebruikt wordt. De gemiddelde bezettingsgraad stijgt, zodat het aantal vluchten afneemt (zie tabel 5.17). Het aantal vluchten in methode 6 is met 6,0% gedaald, terwijl bij de zevende methode 4,8% minder vluchten zijn. De resultaten van de nieuwe emissieberekening staan in tabel 5.16.

Tabel 5.17 *Resultaten van allocatiemethode 6 en 7, zowel voor verschillende bezettingsgraden als van de nieuwe berekening met één vaste bezettingsgraad*

Allocatiemethode 6

	Brandstof	CO₂	H₂O	SO₂	NO_x	HC	CO
Verschillende	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
Eén bezettingsgraad	2,4	7,5	3,0	2,4	36,0	1,3	4,1
Afwijking	6,9%	6,9%	6,9%	6,9%	8,3%	5,6%	2,4%

Allocatiemethode 7

	Brandstof	CO₂	H₂O	SO₂	NO_x	HC	CO
Verschillende	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
Eén bezettingsgraad	1,5	4,9	1,9	1,5	22,9	0,8	2,7
Afwijking	6,7%	6,7%	6,7%	6,7%	8,2%	6,1%	2,5%

Door het veranderen van de bezettingsgraad wijzigen de resultaten van MOBLEM met 2% tot 8%. Dit houdt in dat de uitkomsten van het model door de gewijzigde bezettingsgraad niet sterk veranderen. De resultaten zijn niet erg gevoelig voor deze parameter.

5.5.4 Onzekerheden in de emissiefactoren

Tot slot, ook de Corinair gegevens bevatten onzekerheden. In de beschrijving van de gedetailleerde methode wordt vermeld dat de emissiefactoren voor de motoren wel bekend zijn, maar dat er ook onzekerheden bijhoren.

Ten eerste zit in de emissiefactoren voor de LTO-cyclus een onzekerheidsmarge van 5 tot 10%. De onzekerheden voor de kruisvluchtemissiefactoren liggen in de marge van 15 tot 40%. (TFEI, 2000)

Ten tweede zijn de kruisvluchtemissiefactoren en -brandstofverbruik voor de twee kortste afstanden 132 en 463 kilometer moeilijk te modelleren. De voorgestelde factoren in de database zijn daardoor 'hoogst onzeker', volgens TFEI (2000).

Ten derde wordt uitgegaan van één kruisvluchthoogte voor alle vliegtuigtypen, wat niet overeenkomt met de werkelijkheid. De feitelijke vlieghoogte verschilt namelijk per vliegtuig en omdat de hoogte van het brandstofverbruik kan beïnvloeden, wordt hierdoor ook de hoeveelheid van de emissies beïnvloed. (TFEI, 2000)

5.6 Algemeen beeld van de onzekerheden

Zoals uitgelegd is in §5.5, komen in MOBLEM zowel onzekerheden in de modelstructuur als in de invoergegevens voor. Het belang van deze onzekerheden verschilt per allocatiemethode en per component. Met name HC- en CO-emissies worden sterk beïnvloed door de veranderingen in de invoergegevens. Bij de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat juist de HC-resultaten het meest verschillen (maximaal 172% ten opzichte van resultaten van MOBLEM met een normaal bereik) als de toedeling van de vliegtuigtypen verandert. Voor de overige componenten variëren de afwijkingen ten opzichte van de originele resultaten tot 40 procent.

Onzekerheden in de Corinair-database zijn:

- De emissiefactoren;
- De gebruikte vliegtuigtypen en de representativiteit daarvan voor Schiphol.

De emissiefactoren

Onzekerheden in de luchtvaartemissies hangen nauw samen met de gebruikte emissiefactoren. Er is een onderscheid tussen LTO-emissiefactoren en kruisvluchtemissiefactoren. De LTO-emissiefactor is niet afhankelijk van de vluchtafstand. Er is veel kennis beschikbaar, omdat deze emissies in de huidige situatie al gerapporteerd worden. De onzekerheid in deze emissiefactoren is daarom relatief klein (circa 5 tot 10%). Er moet echter wel worden opgemerkt dat de onzekerheid per component verschilt. De resultaten voor koolstofdioxide hebben naar alle waarschijnlijkheid een kleinere onzekerheid dan de resultaten van bijvoorbeeld HC. Dit wordt veroorzaakt doordat CO₂ een vaste emissiefactor kent en de emissies van HC afhangen van een aantal factoren, zoals vliegtuigtypen of afgelegde afstand.

De kruisvluchtemissiefactoren echter bevatten een grotere onzekerheid (15 tot 40%). Het motorvermogen tijdens de kruisvlucht is niet bekend, wat tot gevolg heeft dat er geen standaard meetmethode is ontwikkeld voor het vaststellen van de kruisvluchtemissies.

Representativiteit van de vloot

In de Corinair-methode worden 22 typen gebruikt, die representatief verondersteld worden voor de Europese en Amerikaanse luchtvaart. Uit de vergelijking met andere onderzoeken waarin uitgegaan wordt van de daadwerkelijke Schiphol-vloot, is gebleken dat de Corinair-vloot niet representatief is voor de Nederlandse situatie. In 1998 kwamen op Schiphol vliegtuigtypen in combinatie met andere motoren dan die in de Corinair-database. Als de methodiek aangepast zou worden voor Schiphol wat betreft de vliegtuigtypen en -motoren, zouden de resultaten waarschijnlijk beter overkomen met de werkelijkheid.

5.7 Conclusie

Allocatiemethoden

De resultaten van MOBLEM zijn in tabel 5.18 afgebeeld³⁷.

Tabel 5.18 Overzicht van de resultaten per allocatiemethode, berekend met MOBLEM

Allocatiemethoden	Brandstof	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	10 ⁹ kg			10 ⁶ kg			
Huidige situatie	-	0,4	-	0,2	2,9	1,0	5,8
1. Allocatie LTO-emissies	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	0,4	1,8
2. Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3. Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4. Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,2	10,2	4,0	3,2	51,0	1,7	5,0
5. Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,7	8,6	3,4	2,7	41,7	1,4	4,5
6. Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
7. Nationaliteit passagiers	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
8. Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,1	1,0	4,6
Totale emissies sector verkeer en vervoer	-	33,8	-	23	282	125	484

Bij vergelijking van de absolute waarden van de allocatiemethoden geven methode 1 voor CO₂, H₂O, NO_x en HC en methode 2 voor SO₂ en CO de laagste resultaten. Methode 4 leidt tot de hoogste CO₂-, H₂O-, SO₂- en NO_x-emissies, terwijl allocatiemethode 3 bij HC en CO voor de hoogste emissies zorgt.

³⁷ Deze tabel is een herhaling van tabel 5.4.

Tussen de allocatiemethoden treden relatief grote verschillen op. Dit wordt deels veroorzaakt door de manier van verdelen en deels door de verschillen in emissiefactor. Vooral de HC- en CO-emissies zijn sterk afhankelijk van de emissiefactor, bepaald door zowel het gebruikte vliegtuigtype en de gevlogen afstand waardoor het aandeel LTO-emissies in de totale emissies wijzigt.

Als de emissies door de internationale luchtvaart aan landen toegedeeld gaan worden, worden voor koolstofdioxide de emissies door zowel binnenlandse als internationale luchtvaart gerapporteerd. De rapportage neemt daardoor toe met maximaal factor 27.

CO₂-luchtvaartemissies vormen door de toedeling van emissies door de internationale luchtvaart circa 1% tot 30% van de totale sector verkeer en vervoer. Bij de overige componenten zijn de internationale luchtvaartemissies maximaal 18% van de huidige totale verkeer en vervoer sector.

MOBLEM

Het ontwikkelde model MOBLEM is goed toepasbaar gebleken. Er wordt in het model een aantal veronderstellingen gedaan, maar uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat de invloed van deze onzekerheden in de waarden van de betreffende parameters aanvaardbaar blijft. Bij het variëren van de toedeling van vliegtuigtypen per bestemming vertonen vooral de HC-emissies aanzienlijke verschillen (maximaal 172%) met de normale verdeling. Ook de overige componenten verschillen, maar er moet hier wel rekening worden gehouden met het feit dat de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geen realistische situatie schetst. In een deel van de allocatiemethoden vindt een onder- en overschatting plaats van het aantal vluchten, dit beïnvloedt de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. Het variëren van de bezettingsgraad leverde wel afwijkingen kleiner dan 10% op, wat betekent dat de onzekerheid in deze parameter geen invloed heeft op de hoogte van de emissies.

Het model bevat twee grote onzekerheden. Ten eerste zijn de vliegtuigtypen uit de Corinair-methode niet toepasbaar voor de typen op Schiphol. Vergelijking met andere onderzoeken geeft aan dat er grote verschillen optreden, die voornamelijk te wijten zijn aan het gebruik van andere vliegtuigtypen en motoren. Een analyse van de verschillen kan niet worden uitgevoerd, omdat onbekend is welke motoren Corinair veronderstelt. Een aanpassing van de Corinair database voor de Nederlandse situatie zou de uitkomsten van MOBLEM mogelijk kunnen verbeteren.

Ten tweede zit in de kruisvluchtemissiefactoren een onzekerheidsmarge van 15 tot 40%. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat kruisvluchtemissies (nog) niet gerapporteerd hoeven te worden. Als gevolg hiervan zijn er nog maar weinig metingen uitgevoerd. Daarnaast bestaat er nog geen standaard methode om de kruisvluchtemissies te kunnen berekenen.

6 Conclusies en discussie

6.1 Conclusies

In dit laatste hoofdstuk wordt een antwoord gegeven op de in de inleiding gestelde onderzoeksvragen.

- *Welke consequenties hebben de diverse allocatiemethoden voor het emissieniveau van Nederland?*

Om de emissies door de internationale luchtvaart aan landen toe te delen, zijn acht mogelijke allocatiemethoden voorgesteld. Elke methode van verdelen leidt tot een andere hoeveelheid emissies. De reden hiervoor zijn de manier van verdelen en de verschillen in emissiefactoren. Voor CO₂, H₂O en SO₂ is vooral de manier van toedelen van belang, terwijl voor de andere drie componenten de gebruikte emissiefactor belangrijk is. De resultaten van elke methode staan in de onderstaande tabel.

Tabel 6.1 Overzicht van de resultaten per allocatiemethode

Allocatiemethoden	Brandstof	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>			<i>10⁶ kg</i>			
1. Allocatie LTO-emissies	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	0,4	1,8
2. Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3. Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4. Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,2	10,2	4,0	3,2	51,0	1,7	5,0
5. Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,7	8,6	3,4	2,7	41,7	1,4	4,5
6. Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
7. Nationaliteit passagiers	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
8. Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,1	1,0	4,6

Bij vergelijking van de absolute waarden van de allocatiemethoden geven methode 1 voor CO₂, H₂O, NO_x en HC en methode 2 voor SO₂ en CO de laagste resultaten. Methode 4 leidt tot de hoogste CO₂-, H₂O-, SO₂- en NO_x-emissies, terwijl allocatiemethode 3 bij HC en CO voor de hoogste emissies zorgt.

Tussen de allocatiemethoden treden relatief grote verschillen op. Dit wordt deels veroorzaakt door de manier van verdelen en deels door de verschillen in emissiefactor. Vooral de HC- en CO-emissies zijn sterk afhankelijk van de emissiefactor, bepaald door zowel het gebruikte vliegtuigtype en de gevlogen afstand waardoor het aandeel LTO-emissies in de totale emissies wijzigt.

Als de emissies door de internationale luchtvaart aan landen toegedeeld gaan worden, worden voor koolstofdioxide de emissies door zowel binnenlandse als internationale luchtvaart gerapporteerd. De rapportage neemt daardoor toe met maximaal factor 27.

CO₂-luchtvaartemissies vormen door de toedeling van emissies door de internationale luchtvaart circa 1% tot 30% van de totale sector verkeer en vervoer. Bij de overige componenten zijn de internationale luchtvaartemissies maximaal 18% van de huidige totale verkeer en vervoer sector.

- *In hoeverre is het ontwikkelde model geschikt om de emissies voor diverse allocatiemethoden te berekenen?*

MOBLEM blijkt goed toepasbaar voor het doorrekenen van de allocatiemethoden. Ondanks de veronderstellingen die in MOBLEM gedaan zijn, is uit een gevoeligheidsanalyse gebleken dat de invloed van deze onzekerheden in de waarden van de betreffende parameters beperkt blijft. Bij het variëren van de toedeling van vliegtuigtypen per bestemming vertonen vooral de HC-emissies aanzienlijke verschillen met de normale verdeling. Ook de overige componenten verschillen, maar er moet hier wel rekening worden gehouden met het feit dat de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geen realistische situatie schetst. In een deel van de allocatiemethoden vindt een onder- en overschatting plaats van het aantal vluchten, dit beïnvloedt de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. Het variëren van de bezettingsgraad leverde wel afwijkingen kleiner dan 10% op, wat betekent dat de onzekerheid in deze parameter geen invloed heeft op de hoogte van de emissies.

Het model bevat twee grote onzekerheden. Ten eerste komt de vloot uit de Corinair-methode niet overeen met de Nederlandse situatie door vereenvoudiging van het aantal typen en door andere motoren in combinatie met veelvoorkomende vliegtuigen te veronderstellen. Als de Corinair database aangepast wordt aan de Nederlandse situatie, zou dit de uitkomsten van MOBLEM kunnen verbeteren. Ten tweede zit in de kruisvluchtemissiefactoren uit de Corinair-database een onzekerheidsmarge van 15 tot 40%. Dit kan leiden tot onzekere resultaten. Er bestaat verder nog veel onduidelijkheid over de hoogte van deze kruisvluchtemissies, mede veroorzaakt doordat ze nog niet gerapporteerd hoeven te worden.

- *Hoe scoren de allocatiemethoden op daarvoor gangbare criteria?*

De acht allocatiemethoden zijn beoordeeld aan de hand van de criteria uitvoerbaarheid, efficiëntie en rechtvaardigheid. In de eindbeoordeling blijkt methode 4 ('Nationaliteit luchtvaartmaatschappij') zowel de hoogste eindscore te halen als op elk criterium uit de beoordeling positief te scoren. Volgens deze criteria, lijkt methode 4 de beste optie voor de toedeling van de emissies door de internationale luchtvaart. Uit de resultaten van MOBLEM volgt dat bij deze allocatiemethode de grootste hoeveelheid CO₂-emissies aan Nederland toebedeeld wordt.

6.2 Discussie

Zoals elk model, is ook MOBLEM een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Het gevolg is dat onderdelen uit het model bediscussieerd kunnen worden. Dit geldt voor:

- De invoergegevens;
- De modelstructuur.

Invoergegevens

MOBLEM is eigenlijk een combinatie van drie bronnen, namelijk Schiphol, the Hurdy-Gurdy Solution en Corinair. Met name in de Corinair gegevens zitten grote onzekerheden. Zowel de kruisvluchtemissiefactoren als de representativiteit van de gebruikte vloot kunnen bekritiseerd worden.

In de eerste plaats zijn de kruisvluchtemissiefactoren onzeker, vooral voor koolwaterstoffen en koolstofmonoxide. Omdat het motorvermogen tijdens de kruisvlucht niet vastgesteld kan worden, bestaat er nog geen standaard meetmethode voor kruisvluchtemissies. Verbetering van deze factoren kan de uitkomsten van MOBLEM zeker verbeteren.

Ten tweede is er discussie over de representativiteit van de Corinair-methode voor de Nederlandse situatie. Het is al eerder duidelijk gemaakt dat de vliegtuigtypen die in 1998 Schiphol aangedaan hebben, waarschijnlijk niet overeenkomen met de 22 representatieve vliegtuigtypen van de Corinair database. Dit wordt veroorzaakt door een verschil in vliegtuigtypen en/of een verschil in de motoren per vliegtuig. Het gevolg hiervan zijn afwijkende resultaten in de toebedeelde emissies van Nederland. Dit blijkt ook uit vergelijking met andere onderzoeken. Door deze vliegtuig- en motortypen voor de Nederlandse situatie aan te passen, kan MOBLEM verbeterd worden.

Modelstructuur

Daarnaast kan ook de modelstructuur van MOBLEM op een aantal punten aangepast of uitgebreid worden. In het huidige model zijn aannames gemaakt, die in een toekomstig model beter aangepast kunnen worden aan de Nederlandse situatie.

- Het is mogelijk om de vliegtuigtypen per plaats van bestemming te verdelen en niet per land van bestemming. De toedeling kan plaatsvinden aan de hand van de gegevens van Nederlandse luchtvaartmaatschappijen;
- Het aantal vliegtuigtypen kan uitgebreid worden tot bijvoorbeeld 50, waarbij beter geanalyseerd moet worden welke typen jaarlijks de meeste vluchten van en naar Schiphol uitvoeren;
- Ook bestaat de mogelijkheid om op een bepaalde bestemming niet één, maar meerdere vliegtuigtypen te laten vliegen. Dit zal waarschijnlijk beter overeenkomen met de werkelijke situatie.

Een gezamenlijk verbetering van deze drie onderdelen levert waarschijnlijk een resultaat op dat betrouwbaarder is dan het huidige.

Ook is het mogelijk om MOBLEM uit te breiden op de volgende punten:

- Door het bepalen van een gemiddelde beladingsgraad op basis van Nederlandse gegevens kunnen ook de vrachtluchten meegenomen worden in de emissieberekening;
- Ook kan de bezettingsgraad per bestemming gegeven worden in plaats van per vliegtuigtype;
- Als laatste is het misschien mogelijk om de extra LTO-cycli veroorzaakt door tussenlandingen mee te nemen.

Door uitbreiding op deze drie punten kan MOBLEM beter aansluiten op de Nederlandse situatie.

6.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Het laatste onderdeel in de conclusie betreft de aanbevelingen voor verder onderzoek. Twee mogelijkheden worden gegeven:

- Het ontwikkelen van een database die geschikt is voor de Nederlandse situatie. Door te bepalen van welke vliegtuig- en motortypen de internationale luchtvaart in Nederland gebruik maakt, kan voor deze typen een database opgesteld worden. De data uit de Corinair database zouden bijvoorbeeld gecombineerd kunnen worden met de data uit het Eaj-rapport.
- Op deze aanbeveling aansluitend kan gepoogd worden om een internationaal geaccepteerde uitgangssituatie te creëren door het ontwikkelen van een wereldomvattende database met vluchten.
- Voer een onderzoek uit naar de emissiefactoren van koolwaterstoffen en koolstofmonoxide. Mogelijk levert een literatuurstudie resultaten met een kleinere onzekerheid op. Deze aanbeveling geldt met name voor de emissies op kruisvluchthoogte.

Referenties

Literatuur

- AEF (1999) Inquiry into the UK Climate Change Programme, online beschikbaar op:
<http://www.parliament.the-stationery-office.co.uk/pa/cm199899/cmselect/cmenvtra/171/9072111.htm>, april 1999, geopend op 3 mei 2001
- AEF (2001) Aviation's Environmental Impact on the Global Atmosphere, Aviation Environment Federation, Londen
- AFEAS (2001) Montreal Protocol on Substances that deplete the ozone layer, online beschikbaar op: http://www.afeas.org/montreal_protocol.html, januari 2001, geopend op 3 mei 2001
- Annema, J.A. en Brink, R.M.M van den (2000) Transport and the monitoring of greenhouse gas emissions, In: Monitoring of Greenhouse Gases in the Netherlands: Uncertainty and Priorities for Improvement, Proceedings of a National Workshop, gehouden in Bilthoven op 1 september 1999, RIVM-rapport 773201003, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Avinfo (2001) Airports and airline codes, online beschikbaar op:
<http://www.wajb.freeserve.co.uk/codes.htm>, geopend op 12 november 2001
- Bahr, D. (1996) Aircraft Turbine Engine NO_x Emission Abatement, In: NATO Advanced Study Institutes series, ISSN 0168-132X, jaargang 306, pag. 243-266
- Beck, J.P. (1991) Effecten van vliegtuigemissies op de samenstelling van de atmosfeer, In: Lucht, nummer 2, jaargang 8, mei 1991, Samson H.D. Tjeenk Willink b.v., Alphen aan de Rijn, pag. 50-52
- Beck, J.P., Reeves, C.E., de Leeuw, F.A.A.M. en Penkett, S.A. (1990) The effect of aircraft emissions on atmospheric ozone in the northern hemisphere, RIVM-rapport 222201001, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Bij, J. van der, Boneschansker, E. en Moor, A.P.G. de (1994) Luchtvaart en milieu: instrumenten voor overheidsbeleid, Onderzoeksreeks nr. 60, Onderzoek in opdracht van de directie Geluid en Verkeer van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Instituut voor Onderzoek van Overheidsuitgaven, Den Haag
- Bleijenberg, A.N. en Moor, R. (1993) Air pollution by air traffic, overview of problems and possible solutions, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Bleijenberg, A.N. en Wit, R.C.N. (1998) An European environmental aviation charge, feasibility study, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Blok, P. en Wee, G.P. van (1994) Het verkeersvraagstuk, In: Basisboek Milieu-economie, Dietz, F., Hafkamp, J. en Van der Straaten, J. (red.), Boom, Amsterdam / Meppel

- Boeft, J. den, Huygen, C. en Tonkelaar, W.A.M. den (1993) Luchtverontreiniging en geur, thematische bijlage bij het Integrale Milieueffectrapport Schiphol, TNO, Apeldoorn
- Boeing (2001a) Boeing Executive Says Sonic Cruiser Will Be A 'Good Neighbor' Airplane, online beschikbaar op:
http://www.boeing.com/news/releases/2001/q3/nr_010710c.html, 10 juli 2001, geopend op 11 februari 2002
- Boeing, (2001b) first phase of low- and high-speed wind tunnel testing on the Boeing Sonic Cruiser completed, online beschikbaar op
http://www.boeing.com/news/releases/2001/q3/nr_010917a.html, 17 september 2001, geopend op 11 februari 2002
- Boeing (2002a) Faster, Longer Range Boeing Commercial Jet, online beschikbaar op:
<Http://www.boeing.com/news/feature/concept/factsheet.html>, geopend op 4 februari 2002
- Boeing (2002b) Sonic Cruiser Photo Gallery, online beschikbaar op:
<Http://www.boeing.com/news/feature/concept/photos.html>, geopend op 4 februari 2002
- BOV (1997) Vliegtuigen, AVL-cursus, Luchtverkeersbeveiliging, Amsterdam
- Brandsma, J. (2001) Nieuwe Boeing bijna net zo snel als geluid, artikel in Trouw, 31 maart 2001, Amsterdam
- Brink, R.M.M. van den (1997) Effecten van een substitutie tussen personenvervoerswijzen, In: J.A. Annema en R.M.M. van den Brink (red.) Bijdragen aan het Colloquium 'Verkeer, Milieu en Techniek', Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, pag. 89-102
- Brok, P.H.H. (2000) Toekomstige verbeteringen in NOx-technologie van vliegtuiggasturbinemotoren, paper voor het tweede colloquium 'Verkeer, milieu en techniek', op 29 juni 2000 bij Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Brons, M., Pels, E., Nijkamp, P. en Rietveld, P. (2001) Price Elasticities of Demand for Passenger Air Travel: A Meta-Analysis, Tinbergen Institute Discussion paper, TI 2001-047/3, Amsterdam
- CAN (1998) International Aviation Bunker Fuel Emissions – no free ride, online beschikbaar op: <http://www.netplus.ne.jp/~casa/paper/can-cop4-paper9812-lv.html>, oktober 1998, geopend op 3 mei 2001
- CAN (2000) Recommendations to ministers at COP4, online beschikbaar op:
<http://www.igc.org/climate/canlong.html>, geopend op 3 mei 2001
- CBS (2000) Statline, online beschikbaar op: <http://www.cbs.nl>, geopend op 27 juli 2000
- CIESIN (2001) The Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, online beschikbaar op: <http://www.ciesin.org/TG/PI/POLICY/montpro.html>, geopend op 3 mei 2001

- CPB (1997) Economie en fysieke omgeving. Beleidsopgaven en oplossingsrichtingen 1995-2020, Centraal PlanBureau, Sdu Uitgevers, Den Haag
- Cranfield (1999) Blended Wing Body Airliner – the next generation of civil transport aircraft, online beschikbaar op: <http://www.cranfield.ac.uk/coa/tech-avt/avt-4.htm>, geopend op 12 februari 2002
- DHV (1998) Milieunormen Luchtvaart, Een vergelijking van de normstelling voor milieu en veiligheid van luchtvaart, industrie en verkeer, DHV, Amersfoort
- Dings, J., Dijkstra, W.J. en Wit, R.C.N. (1997) European aviation emissions: trends and attainable reductions. Background study, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Dings, J., Peeters, P.M., Wijnen, A.A. en Heijden, R.E.C.M. van der (2000) ESCAPE, Economic Screening of Aircraft Preventing Emissions, Main Report, Centrum voor energiebesparing en schone technologie i.s.m. Peeters Advies en Technische Universiteit Delft, Delft / Ede
- Dobbie, L. en Eran-Tasker, M. (2001) Measures to minimize fuel consumption appear to be of greatest importance to airlines, In: ICAO Journal, vol. 56, afl. 4, pag. 24-25
- Drimmelen, R. van (1995) Luchtverontreiniging door luchtvaart, In: Lucht, nummer 4, december 1995, Samson H.D. Tjeenk Willink b.v., Alphen aan de Rijn, pag. 125-128
- EEA (1996) Annual Summary Report 1995, European Environment Agency, online beschikbaar op: http://reports.eea.e.int/92-9167-006-5/en/printable_html, januari 1996, geopend op 25 juni 2001
- EEA (2001) European Environment Agency, online beschikbaar op: <http://reports.eea.eu.int/EMEPCORIANIR/en/page005.html>, geopend op 25 juni 2001
- EPA (1997) Adopted Aircraft Engine Emission Standards, Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Feimann, P.F.L., Geurs, K.T., Brink, R.M.M van den, Annema, J.A. en Wee, G.P. van (2000) Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 5, RIVM-rapport 408129014, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Fransen, W. en Peper, J. (1993) Atmospheric effects of aircraft emissions, and an investigation of some operational measures to mitigate these effects, uitgevoerd door Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut en Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam / De Bilt
- Gelder, E. van (2000) Vrachtvervoer met Nederlandse vliegtuigen, in: Maandstatistiek nummer 1, CBS, Heerlen
- Geurs, K.T. en Wee, G.P. van (1997) Effecten van prijsbeleid op verkeer en vervoer, RIVM-rapport 773002005, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Glasbergen, P. (red.) (1994) Milieubeleid, een beleidswetenschappelijke inleiding, vierde herziene druk, VUGA Uitgeverij B.V., 's-Gravenhage

- Gunston, B. (1991) 's Werelds belangrijkste passagierslijnvliegtuigen, toestellen in dienst bij de burgerluchtvaart, speciale uitgave voor HEMA B.V., Amsterdam, Uitgeverij Helmond B.V., Helmond
- Hartman, J.B. (2000) Beleidsrapportage 1999, Beleidseffectmeting Verkeer en Vervoer, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Van de Ridder, Nijkerk
- Hasselrot, A. (2000) Database Model for Studying Emissions from Aircraft in Variable Flight Profile, Flygtekniska Försöksanstalten (the Aeronautical Research Institute of Sweden) rapportnummer FFA TN 2000-69, Bromma
- Henderson, S.C. en Wickrama, U.K. (1999) Aircraft emissions: current inventories and future scenarios, pag. 293-331
- Hiraoka, K. (1993) Aircraft Technology for CO₂ Emission Reduction and Tribology, In: Japanese journal of tribology, ISSN 1045-7828, nummer 5, jaargang 38, pag. 607-618
- Hof, A.F., Dings, J.M.W. en Dijkstra, W.J. (2001) Prijsgevoeligheid in de luchtvaart en scheepvaart (literatuurstudie) Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Hoogenstrijd, G.J. (1993) Luchtvaart grenzeloos? Een studie naar het energiegebruik en de specifieke milieubelasting van luchtvaart, gerelateerd aan de bij de voortstuwing gebruikte brandstoffen, Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde rapport nr. 71, Rijksuniversiteit Groningen
- ICAO (1999) ICAO adopts new aircraft engine emissions and noise standards, online beschikbaar op: <http://www.icao.int/icao/en/nr/pio9902.htm>, februari 1999, geopend op 14 maart 2001
- ICAO (2001) Aircraft Engine Emissions, online beschikbaar op: <http://www.icao.int/icao/en/env/aee.htm>, geopend op 14 maart 2001
- Indo.com (2000) How Far Is It? Bali & Indonesia on the Net, online beschikbaar op: <http://www.indo.com>, geopend op 12 november 2001
- International Paper (2001) Greenhouse Effect, online beschikbaar op: http://www.internationalpaper.com/our_world/greenhouse_effect.html, geopend op 3 mei 2001
- Kalivoda, M. en Fitzgerald, P. (1999) Air traffic emission simulation methodologies and inventories in Europe, 8th international symposium 'Transport and Air Pollution', Graz, 1999
- Kalivoda, M., Kudrna, M. en Fitzgerald, P. (1998) Methodologies for estimating emissions from air traffic, Future Emissions, ψA-Consulting, Wenen
- Klein, J., Brink, R.M.M van den, Hulskotte, J., Annema, J.A., Roovaart, J. van den, Borst, M., Gense, R. en Burgwal, E. van de (2002) Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland, Rapportagereeks MilieuMonitor nr. 4, Methodiekrapport Taakgroep Verkeer en Vervoer, Den Haag
- KLM (1993) KLM-Standpunt inzake luchtvaart en milieu, KLM N.V., Bureau Public Affairs Consultants, Amstelveen

- KLM (2000) Milieujaarverslag 1999/2000, KLM N.V., Amstelveen
- KLM (2001) Milieujaarverslag 2000/2001, KLM N.V., Amstelveen
- Kopp, R.J., Morgenstern, R.D. en Toman, M.A. (2001) The Kyoto Protocol: The Realities of Implementation, online beschikbaar op:
<http://www.weathervane.rff.org/features/feature027.html>, geopend op 7 mei 2001
- Landing.com (2001) Landings: Aviation's Database, online beschikbaar op:
http://www.landings.com/_landings/pages/search/search_dist_apt.html, geopend op 12 november 2001
- Lee, S.H., Dilosquer, M. le, Singh, R. en Rycroft, M.J. (1996) Further considerations of engine emissions from subsonic aircraft at cruise altitude, in: Atmospheric environment, Volume 30, afl. 22, pag. 3689-3696
- Leeuw, R. de, (1997) Schiphol - 'Dan liever stil en schoon de lucht in', In: Forum: tweewekelijks opinieblad van de Vereniging VNO-NCW, ISSN 1384-2102, 26 juni 1996, pag. 14-16
- Leijen, J. (1994) Schone technieken schieten tekort, In: Knipselkrant Schiphol voor dagsymposium 'Zo werkt dat niet', op 10 februari 1994, georganiseerd door de Vereniging van Milieukundigen en de Programmerings- en studiegroep Milieu en Economie (RMNO)
- Leurs, B.A., Manderveld, N.H. en Soest, J.P. van (2000) Nieuwe opties voor een groener fiscaal stelsel, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Lister, D., Penner, J.E., Griggs, D.J., Dokken, D.J. en McFarland, M. (1999) Aviation and the Global Atmosphere, a summary for policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Genève
- MacKeigan, D. (2001) New air route structure over North Pole offers major reduction in flight times, costs, In: ICAO Journal, vol. 56, afl. 3, pag. 20-22
- Michaelis, L. (1997) Policies and Measures for Common Action, Special Issues in Carbon/Energy Taxation: Carbon charges on Aviation Fuels, Annex I Expert Group on the UNFCCC
- Milieucompendium (1999) Milieucompendium 1999, Milieu in cijfers, RIVM-rapport 251701043, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu en Centraal Bureau voor de Statistiek, Bilthoven
- Ministère des Ressources naturelles du Québec (2001) Implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change - Québec Action Plan, online beschikbaar op: http://www.mrn.gouv.qc.ca/1/11/113/plan_an.asp, geopend op 3 mei 2001
- Moorman, S.A.H. en Dings, J.M.W. (1996) LUMIS emissiemodel voor de luchtvaart, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- NIVR (2000) Flying to Eminence, Nederlandse vliegtuigindustrie slaat mondiaal de vleugels uit, NIVR, Delft

- Offerman, H.A.J.M. en Bakker, M.W.P. (1998) Growing Pains of Major European Airports, Case Study: Amsterdam Airport Schiphol, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam, gepresenteerd op de tweede usa/europe air traffic management R&D seminar Orlando, december 1998
- Olivier, J.G.J. (1991) Inventory of aircraft emissions: a review of recent literature, RIVM-rapport 736301008, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Olivier, J.G.J. (1995) Scenarios for global emissions from air traffic, RIVM-rapport 773002003, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Olivier, J.G.J. en Peters, J.A.H.W. (1999) International marine and aviation bunker fuel: trends, ranking of countries and comparison with national CO₂ emissions, RIVM-rapport 773301002, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Olivier, J.G.J. en Berdowski, J.J.M. (2001) Global emissions sources and sinks, In: The Climate System, Swets & Zeilinger Publishers, Lisse (in voorbereiding)
- Olivier, J.G.J., Berdowski, J.J.M., Peters, J.A.H.W., Bakker, J., Visschedijk, A.J.H. en Bloos, J.P.J. (2001a) Applications of EDGAR, including a description of EDGAR V3.0: reference database with trend data for 1970-1995, RIVM-rapport 773301001 / NRP rapport 4102000051, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Olivier, J.G.J., Thomas, R., Brandes, L.J., Peters, J.A.H.W. en Coenen, P.W.H.G. (2001b) Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-1999; National Inventory Report 2001, RIVM-rapport 773201005, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Olsthoorn, X. (2000) Carbon dioxide emissions from international aviation: 1950 – 2050, In: Journal of Air Transport Management, Volume 2, afl. 7, pag 87 – 93
- Peeters, J.H.A.M. (1997) Vliegtuigtechniek en luchtverontreiniging in historisch perspectief, In: J.A. Annema en R.M.M. van den Brink (red.) Bijdragen aan het Colloquium ‘Verkeer, Milieu en Techniek’, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, pag. 302-311
- Reformatisch Dagblad (2001) Boeing presenteert Sonic Cruiser, artikel in Reformatisch Dagblad, 20 juni 2001, Katwijk
- RIVM (1998) Schiphol binnen milieugrenzen. Beoordeling van de groeimogelijkheden op Schiphol binnen de PKB-randvoorwaarden voor geluid en externe veiligheid voor de periode tot 2020, RIVM-rapport 40813004, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- RIVM (2001) Milieubalans 2001, het Nederlandse milieu verklaard, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Kluwer, Alphen aan de Rijn
- RLD (2000) Verantwoord vliegen, online beschikbaar op: http://www.rld.nl/algemeen/htm/s_algemeen.htm: Luchtvaart, geopend op 3 mei 2001
- RMB (1996) Naar een milieubeleid van de luchtvaart, advies rapport 96-02, Raad voor het Milieubeheer, Den Haag

- Roos, J., Bleijenberg, A.N. en Dijkstra, W.J. (1997) Energiegebruik en emissies van de luchtvaart en andere wijzen van personenverkeer op Europese afstanden, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Rypdal, K., Barbour, W., Dobbie, L., Falk, R., Gillenwater, M. en Hoppaus, R. (2000) Mobile Combustion: Aircraft (chapter 2.5) In: IPCC Good Practice Guidance en Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Geneve
- SBSTA (1996a) Communications from parties included in Annex I to the convention: guidelines, schedules and process for consideration: detailed information on electricity trade and international bunker fuels, online beschikbaar op: <http://www.unfccc.int/resource/docs/1996/sbsta/09a02.htm>, juni 1996, geopend op 3 mei 2001
- SBSTA (1996b) Communications from parties included in Annex I to the convention: guidelines, schedules and process for consideration: Methodological issues, online beschikbaar op: <http://www.unfccc.int/resource/docs/1996/sbsta/09a01.htm>, juni 1996, geopend op 3 mei 2001
- SBSTA (1999) Methodological issues: emissions resulting from fuel used for international transportation, online beschikbaar op: <http://www.unfccc.int/resource/docs/1999/sbsta/misc08.htm>, september 1999, geopend op 3 mei 2001
- Schiphol (1999) Your Amsterdam Airport Schiphol Statistical Annual Review 1998, Schiphol Group, Amsterdam
- Slanina (1992) De effecten van vliegtuigemissies op de atmosfeer; Een kritische evaluatie van de huidige literatuur en de stand van de wetenschap over de invloed van vliegtuigemissies op de atmosfeer, ECN, Petten
- Sledsens, T. (1999) Sustainable Aviation, the need for an European environmental aviation charge, T&E, Brussel
- Sondorp, K. (1992) Vliegen en milieu, een gezamenlijke uitgave van Stichting Natuur en Milieu en Wereld Natuur Fonds, Thieme, Nijmegen
- Spirit (2001) Corinair – The New Family of Software Tools, online beschikbaar op: http://www.spirit.sk/products/corinair/e_corinair.html, 16 maart 2001, geopend op 25 juni 2001
- Springer (2001) Straalmotor, online beschikbaar op: <http://www.springer-3.myweb.nl/straalmotor.htm>, september 2001, geopend op 18 september 2001
- Sweionet (1999) Corinair, Air Emissions Inventory, online beschikbaar op: <http://sweionet.viron.se/swenews/document/corinair.html>, 14 oktober 1999, geopend op 25 juni 2001
- Tertoolen, G. (1994) Uit eigen beweging...?! Een veldexperiment over beïnvloedingsmogelijkheden van het autogebruik en de daardoor opgeroepen psychologische weerstanden, Universiteit Utrecht, Utrecht
- TFEI (2000) online beschikbaar op: <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/TFEI/airdata.doc>, juni 2000, geopend op 3 mei 2001

- ThaiTechnics (2002) Welcome To Thai Technics.com, online beschikbaar op:
<http://www.thaitechnics.com/aircraft/concorde.html>, geopend op 7 februari 2002
- Trouw (2000) Amerikanen luisteren naar de 'markt', artikel in Trouw, 1 december 2000, Amsterdam
- Trouw (2001) Broeikasgassen / Pronk presenteert compromis voor 'Kyoto', artikel in Trouw, 12 april 2001, Amsterdam
- Tweede Kamer (1995) Luchtverontreiniging en Luchtvaart (LuLu) beleidsnota, Tweede Kamer, vergaderjaar 1994-1995, 24213, nr. 1, SDU Uitgeverij Plantijnstraat, 's-Gravenhage
- UNEP (2001) Ozone Treaties, online beschikbaar op:
<http://www.unep.org/ozone/treaties.shtml>, geopend op 3 mei 2001
- UNFCCC (2000) The convention and its Kyoto Protocol, online beschikbaar op:
<http://www.icao.int/icao/en/env/env-kyoto.htm>, geopend op 3 mei 2001
- UNFCCC (2001) Governments adopt Bonn agreement on Kyoto Protocol rules, press release van het secretariaat van UNFCCC, Bonn, 23 juli 2001, online beschikbaar op:
<http://unfccc.int/press/prel2001/pressrel230701.pdf>, geopend op 24 juli 2001
- UNFCCC (2002) Kyoto Protocol, status of ratification op 4 juni 2002, online beschikbaar op:
<http://unfccc.int/resource/kpstats.pdf>, geopend op 11 juni 2002
- Velzen, A. van en Wit, R.C.N., (2000) National allocation of international aviation and marine CO₂-emissions, Resource Analysis i.s.m. Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Vijgh, J.R. van der (1993) Energiegebruik door vliegtuigen op en nabij Nederlandse civiele luchthavens: een rekenmodel, Maandstaat Verkeer, CBS, Heerlen
- Vlek, S.P.H. en Vogels, M.E.S. (2000) AERO – Aviation Emissions and Evaluation of Reduction Options, A Netherlands policy analysis model on global environmental issues, NLR-rapport NLR-TP-2000-244, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam
- VU (1997) Vliegveld & Sub-Sahara Afrika, rapport cursus Milieu & Beleid I, Vrije Universiteit van Amsterdam, niet gepubliceerd
- Wee, G.P. van, Brink, R.M.M. van den en Geurs, K.T. (1997) Luchtvaart en milieu: indicatieve effecten van heffingen en substitutie naar rail, Rapportage voor de Commissie Vergroening Belastingen, RIVM-rapport 408137001, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Wit, J. de en Gent, H. van (1996) Economie en transport, Uitgeverij Lemma BV, Utrecht
- Wit, R.C.N. (1996) How to control greenhouse gas emissions from international aviation? Options for allocation, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
- Wubben, F.J.M. en Busink, J.J. (2000) Environmental benefits of continuous descent approaches at Schiphol Airport compared with conventional procedures, NLR-rapport NLR-TP-2000-275, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam

Overige bronnen

AAS (2001)

Gegevens ontvangen van Amsterdam Airport Schiphol; afdeling A / M&A / Statistiek & Ontwikkeling (dhr. J. Martens / dhr. M. Kreek)

AIP (1998)

Overzichtskaart van de uitvliegroutes boven Nederland, Aeronautical Information Publication (AIP) sectie Enroute 6-3-1, Luchtverkeersleiding Nederland, Schiphol, 1998

Encarta (1998)

World Atlas 1998, Microsoft Encarta, Redmond

KLM (2002)

[Http://www.klm.nl](http://www.klm.nl), KLM Royal Dutch Airlines Comprehensive Travel Planning Site

Konneman (2001)

Telefonische mededeling van Fred Konneman, werkzaam bij Eurocontrol in Maastricht, op 3 oktober 2001

Olivier (2002)

Mededeling van dhr. J.G.J.Olivier, werkzaam bij het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu in Bilthoven, op dinsdag 8 januari 2002

Vliegwinkel (2002)

[Http://www.vliegwinkel.nl](http://www.vliegwinkel.nl), online vliegtickets bestellen, powered by Airtrade

Bijlagen

BIJLAGE 1: VERZENDLIJST	119
BIJLAGE 2: AFKORTINGENLIJST	123
BIJLAGE 3: EMISSIENORMEN	125
BIJLAGE 4: CORINAIR-VERDELING VAN ALLE VLIEGTUIGTYPEN.....	127
BIJLAGE 5: DE CORINAIR DATABASE	131
BIJLAGE 6: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN CORINAIR-METHODE.....	173
BIJLAGE 7: OVERZICHT VAN DE BRONNEN, GEBRUIKT IN MOBLEM	175
BIJLAGE 8: BESTEMMINGEN VANAF SCHIPHOL	177
BIJLAGE 9: DE LUCHTCORRIDORS BOVEN NEDERLAND.....	187
BIJLAGE 10: RESULTATEN VAN DE VARIATIE IN TOEDELING VAN VLIEGTUIGTYPEN.....	189
BIJLAGE 11: MOGELIJKE OPLOSSINGEN VOOR EMISSIEREDUCTIE	191

Bijlage 1: Verzendlijst

- 1 DGM, Directie Strategische Planning, Mr. Ing. J.H. Enter
- 2 Directeur-Generaal Milieubeheer, Ir. J. van der Vlist
- 3 Prof. Dr. P. Nijkamp - Vrije Universiteit Amsterdam
- 4 Prof. Dr. P. Rietveld - Vrije Universiteit Amsterdam
- 5 Prof. Dr. F. den Butter - Vrije Universiteit
- 6 Prof. Dr. P.H.L. Bovy - Technische Universiteit Delft
- 7 Prof. Dr. A.I.J.M. van der Hoorn - Universiteit van Amsterdam/ AVV
- 8 Prof. Dr. F. le Clercq, Universiteit van Amsterdam/Twijnstra Gudde
- 9 Prof. Dr. M. van Maarseveen - Technische Universiteit Twente
- 10 Prof. Dr. Ir. H. Priemus - Technische Universiteit Delft/OTB
- 11 Prof. Dr. H.J. van Zuylen - Technische Universiteit Delft
- 12 Dr. C.M. Plug – VROM/DGM
- 13 Ir. A.J. Baayen - VROM/DGM
- 14 Drs. R. Bouman – VROM/DGM
- 15 Drs. H.C.G.M. Brouwer - VROM/DGM
- 16 Ing. D. de Jong – VROM/DGM
- 17 Mr. M.C. Kroon - VROM/DGM
- 18 W.J. Lenstra – VROM/DGM
- 19 Drs. A.J. van Marlen – VROM/DGM
- 20 Drs. P. Hofmeijer – VROM/DGM
- 21 Ir. W.J. Dijkstra – VROM/DGM
- 22 Drs. P. Godfroij – VROM/DGM (KVI)
- 23 Drs. H.E. ten Velden - RPD
- 24 Drs. R. Braakenburg van Backum - V&W
- 25 Ir. A.N. Bleijenberg – V&W
- 26 Ir. J.W. Pulles – V&W/DGL
- 27 Ing. H. Flikkema – RWS-AVV
- 28 H. Besseling - RWS-AVV
- 29 Ir. P.C.M. Polak - RWS-AVV
- 30 Ir. J. van der Waard – RWS-AVV
- 31 Ir. P. Jorritsma, RWS-AVV
- 32 J. Veurman – RWS-AVV
- 33 Ing. J.A.P. Klein – CBS
- 34 Drs. E.J. Dietz – CBS
- 35 E. van Gelder – CBS
- 36 Drs. M.A. Koning – CPB
- 37 Drs. T.H. van Hoek – CPB
- 38 Dr. C. Koopmans – SEO

- 39 Ir. J.J.E.A van Meel – NOVEM
40 Ir. P. Kroon – ECN
41 Ir. W. J. van Grondelle – SNM
42 Drs. J. Steijn – VNO/NCW
43 Drs. W. Korver – TNO-INRO
44 Ir. E.J. Verroen – Twijnstra Gudde
45 Ir. N.L.J. Gense – TNO-WT
46 Ir. J.H.J. Hulskotte – TNO-MEP
47 Dr. Ir. B.J.M. Rutten – CMG
48 Dr. H.J. Meurs – MuConsult
49 Dr. G.C. de Jong – HCG
50 Ing. P.M. Peeters – Peeters advies
51 Ir. C. Harders – TRANSEK (Zweden)
52 Ing. K.L. van de Zande – AGV
53 D.H.W.H. Hermans – Goudappel Coffeng
54 J.T. Jetten – NEA
55 Drs. L. van der Velde – NEA
56 Ir. J.M.W. Dings – Centrum voor energiebesparing en schone technologie
57 Ir. P. Janse – Centrum voor energiebesparing en schone technologie
58 Drs. R.C.N. Wit – Centrum voor energiebesparing en schone technologie
59 Drs. U.Ph. Blom – B&A
60 Dhr. J. Martens – Schiphol Group
61 Dhr. M.P. Kreek – Schiphol Group
62 Grontmij
63 Arcadis
64 Secretariaat VROM-Raad.
65 Depot van Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie
66 Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten
67 Bibliotheek VU
Bibliotheek UvA
68 Bibliotheek Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie – UvA
69 Bibliotheek SEO
70 Bibliotheek RPD
71 Bibliotheek V&W
72 Bibliotheek AVV
73 Bibliotheek TU Delft
74 Bibliotheek TU Eindhoven
75 Bibliotheek TU Twente
76 Bibliotheek RUU
77 Bibliotheek KUN
78 Bibliotheek NHTV
79 Connekt

80	Directie RIVM
81	Ir. F. Langeweg
82	Drs. R.J.M. Maas
83	Dr. J.A. Hoekstra
84	Drs. O.J. van Gerwen
85	Dr. Th.G. Aalbers
86	Prof. dr. G.P. van Wee
87	Drs. J.A. Annema
88	Drs. A. Hoen
89	Drs. ing. K.T. Geurs
90	Drs. H. Nijland
91	Ir. R.M.M. van den Brink
92	Drs. J.G.J. Olivier
93	Drs. K. van Velze
94-100	Auteur
101	SBC / Communicatie
102	Bibliotheek RIVM
103	Bureau Projecten- en rapportenregistratie
104-150	Reserve-exemplaren
151-160	Bureau Rapportenbeheer

Bijlage 2: Afkortingenlijst

AEF	Aviation Environment Federation
AFEAS	Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study
Avgas	Aviation Gasoline
BOV	Bureau Opleidingen Verkeersleiding
B.T.W.	Belasting over de toegevoegde waarde
BWB	Blended-Wing-Body
CAN	Climate Action Network
CIESIN	Centre for International Earth Science Information Network
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland
EPA	Environmental Protection Agency
EU	Europese Unie
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kg	Kilogram
KLM	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij
LFC	Laminar Flow Control
LTO-cyclus	Landing-and-Take-Off-cyclus
MJ	Megajoule
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SBSTA	Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice
SNM	Stichting Natuur en Milieu
SST	Supersonisch Transport
TIM	Time-In-Mode
TK	Tweede Kamer
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VN	Verenigde Naties

Bijlage 3: Emissienormen

Sinds 1981 zijn door ICAO eisen opgesteld ten aanzien van emissies door straalmotoren. De eisen zijn gebaseerd op emissies tijdens de LTO-cyclus.

Voor de emissiecertificatie worden voor de standaard motorinstellingen (zie §2.3.3) het brandstofverbruik en emissiefactoren van CO, C_xH_y en NO_x gemeten in een testopstelling. Ook wordt het Smoke Number, een maat voor de emissie van roetdeeltjes, gemeten. De resultaten van deze metingen worden gepubliceerd door ICAO en EPA.

De huidige regelgeving voor subsonische vliegtuigen stelt eisen aan de verhouding tussen de totale emissies in de LTO-cyclus van de betreffende stoffen (D_p, in grammen) en de maximaal geleverde stuwkracht (F₀₀, in kilonewton of kN). Deze eisen gelden voor motoren met een stuwkracht groter dan 26,7 kN. (Van Drimmelen, 1995; EPA, 1997; Moorman en Dings, 1996)

- CO

De emissiestandaard voor CO is: $D_p/F_{00} < 118 \text{ gram/kN}$

- HC

Voor HC geldt de eis: $D_p/F_{00} < 19,6 \text{ gram / kN}$

- NO_x

Voor NO_x hangt de emissie-eis ook af van de drukverhouding over de verbrandingskamer bij een maximale stuwkracht (Π₀₀). Hoe groter de drukverhouding is, des te hoger is de NO_x-emissie tijdens de LTO-cyclus. Voor NO_x wordt een onderscheid gemaakt in de productiedatum van de motoren. Bij hogere drukverhoudingen zijn de eisen ten aanzien van NO_x minder streng. De reden hiervoor is dat een hogere druk weliswaar leidt tot hogere temperaturen in de verbrandingskamer en daarmee tot een groter emissiefactor voor NO_x, maar daarentegen reduceert de hoge drukverhouding het specifiek brandstofverbruik (en daarmee de totale emissies). Motoren waarvan het eerste type op of voor 31 december 1995 geproduceerd werd of motoren die op of voor 31 december 1999 verkocht werden, geldt:

$$D_p/F_{00} < (40 + 2*\Pi_{00}) \text{ gram/kN}$$

Motoren waarvan het eerste type na 31 december 1995 geproduceerd werd of motoren die na 31 december 1999 verkocht werden, geldt:

$$D_p/F_{00} < (32 + 1,6*\Pi_{00}) \text{ gram/kN.}$$

- SO_2

Voor het zwavelgehalte in de brandstof gelden internationale eisen. De eis ligt nu op 0,3%. In praktijk is het gehalte circa 0,01%. (Van Drimmelen, 1995; Lister *et al.*, 1999; Tweede Kamer, 1995)

Bijlage 4: Corinair-verdeling van alle vliegtuigtypen

Nr.	Vliegtuigtype	ICAO	IATA	Type
1	Airbus 310	A310	310	Airbus Industrie A310 all pax models
			312	Airbus Industrie A310-200 pax
			313	Airbus Industrie A310-304 Polari
			A31	Airbus Industrie
2	Airbus 320	A320	320	Airbus Industrie A320-111
			32S	Airbus Industrie Airbus A318/A319/A320/A321
			321	Airbus Industrie A321-111
	<i>Airbus 319</i>	A319	319	Airbus Industrie A319-111
3	Airbus 330	A330	330	Airbus Industrie A330
			332	Airbus Industrie A330-202
			333	Airbus Industrie A330-300
4	Airbus 340	A340	340	Airbus Industrie A340
			342	Airbus Industrie A340-211
			343	Airbus Industrie A340-300
5	BAe 111	BA11	B11	Bae (BAC) One-Eleven
			B15	Bae (BAC) One-Eleven 500
			CRV	Aerospace (SUD) SE210 Caravelle 10B1R
			F23	Fokker F28 Fellowship 3000
			F24	Fokker F28 Fellowship 4000
			YK4	Yakovlev 40
6	BAe 146	BA46	141	Bae 146-100 Pax
			143	Bae 146-300 Pax
			146	Bae 146 all pax models
			14F	Bae 146 Freighter
7	Boeing 727-100	B721	721	Boeing 727-100 pax
	<i>Boeing 727-200</i>	B722	722	Boeing 727-200 pax
	<i>Boeing 727-300</i>	B727	727	Boeing 727 all pax models
			72A	Boeing 727-208 Advanced
			72F	Boeing 727-108C (QF)
			72M	Boeing 727 Combi
			72S	Boeing 727-200 Advanced Pax
			TU5	Tupolev 154
8	Boeing 737-100	B731	731	Boeing 737-112
		B732	732	Boeing 737-200

Nr.	Vliegtuigtype	ICAO	IATA	Type
	<i>McDonnell Douglas DC8</i>		DC8	McDonnell Douglas DC-8 all pax models
			D8F	McDonnell Douglas DC-8 freighter
			D8M	McDonnell Douglas DC-8 combi
			D8S	McDonnell Douglas DC-8 ?
			707	Boeing 707-436
			70F	Boeing 707-123B
			IL6	Illyushin 62
			B72	Boeing 720-022
9	Boeing 737-400	B734	734	Boeing 737-400
	<i>Boeing 737-500</i>	B735	735	Boeing 737-505
			73A	Boeing 737-200 Advanced
			73B	Boeing 737 ?
			73F	Boeing 737 all freighter model
			73M	Boeing 737 combi
			73S	Boeing 737 advanced pax
			D86	Boeing (Douglas) DC-8-61
			JET	?
			DAM	?
	<i>Boeing 737-600</i>	B736	736	Boeing 737-600
	<i>Boeing 737-300</i>	B733	733	Boeing 737-301
	<i>Boeing 737-700</i>	B737	737	Boeing 737 all pax models
10	Boeing 747 100-300	B741	741	Boeing 747-121
		B742	742	Boeing 747-206B
		B743	743	Boeing 747-300 pax
			747	Boeing 747 all pax models
			74D	Boeing 747-306 combi
			74E	Boeing 747-400 combi
			74F	Boeing 747 all freighter models
			A4F	Antonov 124 Ruslan
			74L	Boeing 747SP-09
			74M	Boeing 747 all combi models
			74R	Boeing 747SR pax
			IL7	Illyushin 76LL
			ILW	Illyushin 86
			NIM	?
			VCX	?
			C51	?
11	Boeing 747 400	B744	744	Boeing 747-400 pax
12	Boeing 757		757	Boeing 757 all pax models
			75F	Boeing 757 freighter
			TR2	?
13	Boeing 767 300 ER		762	Boeing 767-200

Nr.	Vliegtuigtype	ICAO	IATA	Type
			763	Boeing 767-304 (ER)
			767	Boeing 767 all pax models
			AB3	Airbus Industrie A300 pax
			AB6	Airbus Industrie A300-601
			A3E	?
			ABF	Airbus Industrie A300-B4-203 freighter
			AB4	Airbus Industrie A3—B2/B4/C4 pax
14	Boeing 777		777	Boeing 777 all pax models
	<i>Boeing 777-200</i>	B772	772	Boeing 777-200
	<i>Boeing 777-300</i>	B773	773	Boeing 777-312
15	McDonnell Douglas DC-9		D92	McDonnell Douglas DC-9-20 pax
			D93	McDonnell Douglas DC-9-30 pax
			D94	McDonnell Douglas DC-9-40 pax
			D95	McDonnell Douglas DC-9-50 pax
			D98	McDonnell Douglas DC-9 ?
			D9S	McDonnell Douglas DC-9-30/40/50 pax
			DC9	McDonnell Douglas DC-9 all pax models
			F21	Fokker F28 Fellowship 1000
			TRD	
			YK2	Yakovlev 42
16	McDonnell Douglas DC-10		D10	McDonnell Douglas DC-10 pax
			D11	McDonnell Douglas DC-10-10/15 pax
			D1C	McDonnell Douglas DC-10-30/40 pax
			D1F	McDonnell Douglas DC-10 all freighters
			L10	Lockheed L-1011 Tristar pax
			L11	Lockheed L-1011-1/50/100/150/200/250 Tristar pax
			L12	Lockheed L-1011 ?
			L15	Lockheed L-1011-500 Tristar pax
			M11	Boeing (Douglas) MD-11 pax
			M1F	Boeing (Douglas) MD-11 freighter
17	Fokker 28	F28	F28	Fokker F28 Fellowship
			TU3	Tupolev 144LL
18	Fokker 100	F100	100	Fokker 100
19	McDonnell Douglas M81-88	MD81-88	M80	Boeing (Douglas) MD-80
			M81	Boeing (Douglas) MD-81
			M82	Boeing (Douglas) MD-82
			M83	Boeing (Douglas) MD-83
			M87	Boeing (Douglas) MD-87
			M88	Boeing (Douglas) MD-88
	McDonnell Douglas M90	MD90	M90	Boeing (Douglas) MD-90-30

Bron: (TFEI, 2000)

Vervolg A310

Distance (km)		3704	4630	5556	6482
Fuel (kg)	Flight total	18981,64	23699,35	28675,28	33763,82
	LTO	1540,55	1540,55	1540,55	1540,55
	Taxi out	294,30	294,30	294,30	294,30
	Take off	182,16	182,16	182,16	182,16
	Climb out	472,54	472,54	472,54	472,54
	Climb/cruise/descent	17441,09	22158,80	27134,73	32223,27
	Approach landing	297,25	297,25	297,25	297,25
	Taxi in	294,30	294,30	294,30	294,30
NOx (kg)	Flight total	237,45	296,16	363,09	431,61
	LTO	23,20	23,20	23,20	23,20
	Taxi out	1,26	1,26	1,26	1,26
	Take off	5,53	5,53	5,53	5,53
	Climb out	12,19	12,19	12,19	12,19
	Climb/cruise/descent	214,26	272,97	339,89	408,42
	Approach landing	2,96	2,96	2,96	2,96
	Taxi in	1,26	1,26	1,26	1,26
HC (g)	Flight total	7921,80	8503,54	9128,70	9767,12
	LTO	5544,00	5544,00	5544,00	5544,00
	Taxi out	2709,63	2709,63	2709,63	2709,63
	Take off	14,57	14,57	14,57	14,57
	Climb out	47,16	47,16	47,16	47,16
	Climb/cruise/descent	2377,80	2959,54	3584,70	4223,13
	Approach landing	62,13	62,13	62,13	62,13
	Taxi in	2710,51	2710,51	2710,51	2710,51
CO (g)	Flight total	36185,02	38518,05	41045,30	43629,70
	LTO	25839,71	25839,71	25839,71	25839,71
	Taxi out	12410,37	12410,37	12410,37	12410,37
	Take off	107,47	107,47	107,47	107,47
	Climb out	268,87	268,87	268,87	268,87
	Climb/cruise/descent	10345,31	12678,34	15205,59	17789,99
	Approach landing	638,79	638,79	638,79	638,79
	Taxi in	12414,20	12414,20	12414,20	12414,20

Vervolg A320

Distance (km)		3704	4630
Fuel (kg)	Flight total	10865,90	13441,26
	LTO	802,33	802,33
	Taxi out	167,29	167,29
	Take off	89,89	89,89
	Climb out	232,47	232,47
	Climb/cruise/descent	10063,56	12638,93
	Approach landing	145,38	145,38
	Taxi in	167,29	167,29
NOx (kg)	Flight total	141,05	169,88
	LTO	10,83	10,83
	Taxi out	0,77	0,77
	Take off	2,49	2,49
	Climb out	5,45	5,45
	Climb/cruise/descent	130,22	159,05
	Approach landing	1,34	1,34
	Taxi in	0,77	0,77
HC (g)	Flight total	3669,76	4112,66
	LTO	1923,20	1923,20
	Taxi out	284,40	284,40
	Take off	8,90	8,90
	Climb out	23,25	23,25
	Climb/cruise/descent	1746,56	2189,46
	Approach landing	1322,25	1322,25
	Taxi in	284,40	284,40
CO (g)	Flight total	25442,39	27125,49
	LTO	17593,22	17593,22
	Taxi out	5689,03	5689,03
	Take off	53,94	53,94
	Climb out	581,17	581,17
	Climb/cruise/descent	7849,17	9532,27
	Approach landing	5580,06	5580,06
	Taxi in	5689,03	5689,03

Vervolg A330

Distance (km)		3704	4630	5556	6482	7408
Fuel (kg)	Flight total	25634,21	31714,79	38043,52	44311,94	51005,69
	LTO	2231,52	2231,52	2231,52	2231,52	2231,52
	Taxi out	436,80	436,80	436,80	436,80	436,80
	Take off	268,80	268,80	268,80	268,80	268,80
	Climb out	681,12	681,12	681,12	681,12	681,12
	Climb/cruise/descent	23402,69	29483,27	35812,00	42080,42	48774,17
	Approach landing	408,00	408,00	408,00	408,00	408,00
	Taxi in	436,80	436,80	436,80	436,80	436,80
NOx (kg)	Flight total	346,50	424,81	509,49	587,61	677,77
	LTO	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13
	Taxi out	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
	Take off	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24
	Climb out	18,46	18,46	18,46	18,46	18,46
	Climb/cruise/descent	310,37	388,68	473,36	551,48	641,64
	Approach landing	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31
	Taxi in	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
HC (g)	Flight total	24755,50	30472,88	36422,09	42274,37	48567,41
	LTO	2113,07	2113,07	2113,07	2113,07	2113,07
	Taxi out	987,17	987,17	987,17	987,17	987,17
	Take off	13,17	13,17	13,17	13,17	13,17
	Climb out	40,73	40,73	40,73	40,73	40,73
	Climb/cruise/descent	22642,43	28359,80	34309,02	40161,29	46454,34
	Approach landing	85,27	85,27	85,27	85,27	85,27
	Taxi in	986,73	986,73	986,73	986,73	986,73
CO (g)	Flight total	54705,44	62206,20	70004,23	77416,78	85664,38
	LTO	21500,02	21500,02	21500,02	21500,02	21500,02
	Taxi out	10087,90	10087,90	10087,90	10087,90	10087,90
	Take off	107,25	107,25	107,25	107,25	107,25
	Climb out	279,19	279,19	279,19	279,19	279,19
	Climb/cruise/descent	33205,42	40706,18	48504,20	55916,76	64164,36
	Approach landing	937,79	937,79	937,79	937,79	937,79
	Taxi in	10087,90	10087,90	10087,90	10087,90	10087,90

Vervolg A340

Distance (km)		9260	10186	11112
Fuel (kg)	Flight total	67669,69	75568,29	83691,99
	LTO	2019,89	2019,89	2019,89
	Taxi out	386,88	386,88	386,88
	Take off	244,61	244,61	244,61
	Climb out	630,96	630,96	630,96
	Climb/cruise/descent	65649,80	73548,40	81672,10
	Approach landing	370,56	370,56	370,56
	Taxi in	386,88	386,88	386,88
NOx (kg)	Flight total	1128,78	1280,69	1441,53
	LTO	35,37	35,37	35,37
	Taxi out	1,66	1,66	1,66
	Take off	9,21	9,21	9,21
	Climb out	18,79	18,79	18,79
	Climb/cruise/descent	1093,41	1245,31	1406,16
	Approach landing	4,05	4,05	4,05
	Taxi in	1,66	1,66	1,66
HC (g)	Flight total	65875,69	70072,50	69882,30
	LTO	18752,52	18752,52	18752,52
	Taxi out	8895,92	8895,92	8895,92
	Take off	146,76	146,76	146,76
	Climb out	441,04	441,04	441,04
	Climb/cruise/descent	47123,17	51319,97	51129,77
	Approach landing	370,56	370,56	370,56
	Taxi in	8898,24	8898,24	8898,24
CO (g)	Flight total	114946,92	120543,70	124963,95
	LTO	50564,91	50564,91	50564,91
	Taxi out	24096,43	24096,43	24096,43
	Take off	122,30	122,30	122,30
	Climb out	315,48	315,48	315,48
	Climb/cruise/descent	64382,00	69978,79	74399,04
	Approach landing	1926,91	1926,91	1926,91
	Taxi in	24103,78	24103,78	24103,78

Vervolg BA11

Distance (km)		3704
Fuel (kg)	Flight total	10160,03
	LTO	681,57
	Taxi out	179,40
	Take off	60,53
	Climb out	155,63
	Climb/cruise/descent	9478,46
	Approach landing	106,61
	Taxi in	179,40
NOx (kg)	Flight total	106,94
	LTO	4,93
	Taxi out	0,40
	Take off	1,13
	Climb out	2,43
	Climb/cruise/descent	102,01
	Approach landing	0,57
	Taxi in	0,40
HC (g)	Flight total	22746,52
	LTO	21394,08
	Taxi out	10179,51
	Take off	59,38
	Climb out	205,43
	Climb/cruise/descent	1352,44
	Approach landing	770,24
	Taxi in	10179,51
CO (g)	Flight total	45849,85
	LTO	37742,14
	Taxi out	17577,61
	Take off	109,68
	Climb out	320,59
	Climb/cruise/descent	8107,70
	Approach landing	2156,47
	Taxi in	17577,79

Vervolg B721

Distance (km)		3704	4630
Fuel (kg)	Flight total	17872,26	22238,06
	LTO	1412,83	1412,83
	Taxi out	332,68	332,68
	Take off	145,05	145,05
	Climb out	365,93	365,93
	Climb/cruise/descent	16459,43	20825,23
	Approach landing	236,49	236,49
	Taxi in	332,68	332,68
NOx (kg)	Flight total	159,27	197,71
	LTO	12,57	12,57
	Taxi out	1,17	1,17
	Take off	2,84	2,84
	Climb out	5,88	5,88
	Climb/cruise/descent	146,70	185,14
	Approach landing	1,51	1,51
	Taxi in	1,17	1,17
HC (g)	Flight total	14071,40	15677,67
	LTO	7200,54	7200,54
	Taxi out	3323,45	3323,45
	Take off	57,88	57,88
	Climb out	164,67	164,67
	Climb/cruise/descent	6870,86	8477,13
	Approach landing	331,09	331,09
	Taxi in	3323,45	3323,45
CO (g)	Flight total	53447,57	59887,90
	LTO	26372,67	26372,67
	Taxi out	11640,40	11640,40
	Take off	173,92	173,92
	Climb out	694,91	694,91
	Climb/cruise/descent	27074,91	33515,24
	Approach landing	2223,03	2223,03
	Taxi in	11640,40	11640,40

Vervolg B731

Distance (km)		3704
Fuel (kg)	Flight total	11438,03
	LTO	919,70
	Taxi out	217,00
	Take off	94,09
	Climb out	238,26
	Climb/cruise/descent	10518,33
	Approach landing	153,36
	Taxi in	217,00
NOx (kg)	Flight total	90,83
	LTO	7,97
	Taxi out	0,75
	Take off	1,79
	Climb out	3,73
	Climb/cruise/descent	82,85
	Approach landing	0,95
	Taxi in	0,75
HC (g)	Flight total	6843,43
	LTO	577,40
	Taxi out	206,15
	Take off	19,76
	Climb out	64,09
	Climb/cruise/descent	6266,03
	Approach landing	81,28
	Taxi in	206,12
CO (g)	Flight total	18033,91
	LTO	4816,78
	Taxi out	2046,27
	Take off	89,29
	Climb out	245,41
	Climb/cruise/descent	13217,14
	Approach landing	389,53
	Taxi in	2046,27

Vervolg B734

Distance (km)		3704
Fuel (kg)	Flight total	12167,63
	LTO	825,39
	Taxi out	183,53
	Take off	85,96
	Climb out	225,01
	Climb/cruise/descent	11342,24
	Approach landing	147,35
	Taxi in	183,53
NOx (kg)	Flight total	114,42
	LTO	8,25
	Taxi out	0,78
	Take off	1,59
	Climb out	3,86
	Climb/cruise/descent	106,17
	Approach landing	1,24
	Taxi in	0,78
HC (g)	Flight total	1374,14
	LTO	666,78
	Taxi out	321,18
	Take off	3,09
	Climb out	10,58
	Climb/cruise/descent	707,37
	Approach landing	10,74
	Taxi in	321,18
CO (g)	Flight total	26426,32
	LTO	11830,91
	Taxi out	5525,45
	Take off	77,19
	Climb out	202,29
	Climb/cruise/descent	14595,41
	Approach landing	500,54
	Taxi in	5525,45

Vervolg B741

Distance (km)		3704	4630	5556	6482	7408
Fuel (kg)	Flight total	44418,98	55255,17	66562,31	77909,24	90362,10
	LTO	3413,87	3413,87	3413,87	3413,87	3413,87
	Taxi out	702,43	702,43	702,43	702,43	702,43
	Take off	387,21	387,21	387,21	387,21	387,21
	Climb out	996,08	996,08	996,08	996,08	996,08
	Climb/cruise/descent	41005,11	51841,30	63148,44	74495,36	86948,23
	Approach landing	625,72	625,72	625,72	625,72	625,72
	Taxi in	702,43	702,43	702,43	702,43	702,43
NOx (kg)	Flight total	787,82	941,31	1151,28	1351,05	1589,32
	LTO	55,94	55,94	55,94	55,94	55,94
	Taxi out	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
	Take off	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36
	Climb out	30,60	30,60	30,60	30,60	30,60
	Climb/cruise/descent	731,88	885,37	1095,34	1295,10	1533,38
	Approach landing	5,35	5,35	5,35	5,35	5,35
	Taxi in	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
HC (g)	Flight total	52145,37	54004,00	56109,91	57813,33	60132,46
	LTO	37253,69	37253,69	37253,69	37253,69	37253,69
	Taxi out	18263,24	18263,24	18263,24	18263,24	18263,24
	Take off	116,16	116,16	116,16	116,16	116,16
	Climb out	298,82	298,82	298,82	298,82	298,82
	Climb/cruise/descent	14891,68	16750,30	18856,22	20559,64	22878,77
	Approach landing	312,23	312,23	312,23	312,23	312,23
	Taxi in	18263,24	18263,24	18263,24	18263,24	18263,24
CO (g)	Flight total	122189,22	128853,40	136203,74	142615,84	150710,93
	LTO	78233,16	78233,16	78233,16	78233,16	78233,16
	Taxi out	37931,34	37931,34	37931,34	37931,34	37931,34
	Take off	154,88	154,88	154,88	154,88	154,88
	Climb out	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44
	Climb/cruise/descent	43956,06	50620,24	57970,58	64382,68	72477,77
	Approach landing	1813,95	1813,95	1813,95	1813,95	1813,95
	Taxi in	37935,55	37935,55	37935,55	37935,55	37935,55

Vervolg B741

Distance (km)		8834	9260	10186
Fuel (kg)	Flight total	103265,90	116703,31	130411,02
	LTO	3413,87	3413,87	3413,87
	Taxi out	702,43	702,43	702,43
	Take off	387,21	387,21	387,21
	Climb out	996,08	996,08	996,08
	Climb/cruise/descent	99852,03	113289,44	126997,14
	Approach landing	625,72	625,72	625,72
	Taxi in	702,43	702,43	702,43
NOx (kg)	Flight total	1844,88	2124,83	2422,00
	LTO	55,94	55,94	55,94
	Taxi out	2,32	2,32	2,32
	Take off	15,36	15,36	15,36
	Climb out	30,60	30,60	30,60
	Climb/cruise/descent	1788,93	2068,89	2366,06
	Approach landing	5,35	5,35	5,35
	Taxi in	2,32	2,32	2,32
HC (g)	Flight total	62525,17	64996,79	67405,64
	LTO	37253,69	37253,69	37253,69
	Taxi out	18263,24	18263,24	18263,24
	Take off	116,16	116,16	116,16
	Climb out	298,82	298,82	298,82
	Climb/cruise/descent	25271,48	27743,10	30151,95
	Approach landing	312,23	312,23	312,23
	Taxi in	18263,24	18263,24	18263,24
CO (g)	Flight total	159073,87	167733,23	176313,28
	LTO	78233,16	78233,16	78233,16
	Taxi out	37931,34	37931,34	37931,34
	Take off	154,88	154,88	154,88
	Climb out	397,44	397,44	397,44
	Climb/cruise/descent	80840,72	89500,07	98080,12
	Approach landing	1813,95	1813,95	1813,95
	Taxi in	37935,55	37935,55	37935,55

Vervolg B744

Distance (km)		9260	10186	11112	12038
Fuel (kg)	Flight total	103611,40	115553,02	128170,81	141254,25
	LTO	3402,16	3402,16	3402,16	3402,16
	Taxi out	661,42	661,42	661,42	661,42
	Take off	411,90	411,90	411,90	411,90
	Climb out	1043,38	1043,38	1043,38	1043,38
	Climb/cruise/descent	100209,24	112150,86	124768,65	137852,09
	Approach landing	624,04	624,04	624,04	624,04
	Taxi in	661,42	661,42	661,42	661,42
NOx (kg)	Flight total	1492,29	1686,98	1899,74	2129,32
	LTO	56,64	56,64	56,64	56,64
	Taxi out	3,16	3,16	3,16	3,16
	Take off	14,87	14,87	14,87	14,87
	Climb out	29,55	29,55	29,55	29,55
	Climb/cruise/descent	1435,66	1630,34	1843,10	2072,68
	Approach landing	5,88	5,88	5,88	5,88
	Taxi in	3,16	3,16	3,16	3,16
HC (g)	Flight total	24414,36	25900,04	27817,32	29807,64
	LTO	1849,54	1849,54	1849,54	1849,54
	Taxi out	588,67	588,67	588,67	588,67
	Take off	160,64	160,64	160,64	160,64
	Climb out	280,67	280,67	280,67	280,67
	Climb/cruise/descent	22564,82	24050,50	25967,78	27958,11
	Approach landing	230,89	230,89	230,89	230,89
	Taxi in	588,67	588,67	588,67	588,67
CO (g)	Flight total	110223,61	117364,71	126348,17	135687,01
	LTO	19497,21	19497,21	19497,21	19497,21
	Taxi out	9087,96	9087,96	9087,96	9087,96
	Take off	243,02	243,02	243,02	243,02
	Climb out	448,65	448,65	448,65	448,65
	Climb/cruise/descent	90726,40	97867,50	106850,96	116189,80
	Approach landing	630,28	630,28	630,28	630,28
	Taxi in	9087,30	9087,30	9087,30	9087,30

Vervolg B757

Distance (km)		3704	4630
Fuel (kg)	Flight total	15407,03	19025,89
	LTO	1253,00	1253,00
	Taxi out	255,81	255,81
	Take off	144,33	144,33
	Climb out	370,74	370,74
	Climb/cruise/descent	14154,02	17772,89
	Approach landing	226,32	226,32
	Taxi in	255,81	255,81
NOx (kg)	Flight total	218,13	256,46
	LTO	19,73	19,73
	Taxi out	1,05	1,05
	Take off	5,19	5,19
	Climb out	10,47	10,47
	Climb/cruise/descent	198,40	236,73
	Approach landing	1,96	1,96
	Taxi in	1,05	1,05
HC (g)	Flight total	14809,18	18207,11
	LTO	1232,53	1232,53
	Taxi out	578,12	578,12
	Take off	7,07	7,07
	Climb out	22,17	22,17
	Climb/cruise/descent	13576,65	16974,58
	Approach landing	47,30	47,30
	Taxi in	577,86	577,86
CO (g)	Flight total	31835,07	36256,01
	LTO	12545,40	12545,40
	Taxi out	5907,83	5907,83
	Take off	57,59	57,59
	Climb out	151,97	151,97
	Climb/cruise/descent	19289,67	23710,61
	Approach landing	520,19	520,19
	Taxi in	5907,83	5907,83

Vervolg B767

Distance (km)		9260
Fuel (kg)	Flight total	52208,00
	LTO	1617,09
	Taxi out	300,05
	Take off	195,42
	Climb out	500,23
	Climb/cruise/descent	50590,91
	Approach landing	321,35
	Taxi in	300,05
NOx (kg)	Flight total	706,04
	LTO	26,03
	Taxi out	1,27
	Take off	6,53
	Climb out	13,70
	Climb/cruise/descent	680,01
	Approach landing	3,26
	Taxi in	1,27
HC (g)	Flight total	26076,48
	LTO	881,03
	Taxi out	375,06
	Take off	29,12
	Climb out	60,03
	Climb/cruise/descent	25195,44
	Approach landing	41,78
	Taxi in	375,06
CO (g)	Flight total	60462,04
	LTO	6077,32
	Taxi out	2648,80
	Take off	99,47
	Climb out	239,61
	Climb/cruise/descent	54384,72
	Approach landing	437,04
	Taxi in	2652,40

Vervolg B777

Distance (km)		9260	10186	11112
Fuel (kg)	Flight total	73655,15	82067,40	90693,23
	LTO	2562,84	2562,84	2562,84
	Taxi out	468,00	468,00	468,00
	Take off	328,44	328,44	328,44
	Climb out	818,40	818,40	818,40
	Climb/cruise/descent	71092,31	79504,56	88130,39
	Approach landing	480,00	480,00	480,00
	Taxi in	468,00	468,00	468,00
NOx (kg)	Flight total	1167,47	1315,79	1472,90
	LTO	53,64	53,64	53,64
	Taxi out	2,49	2,49	2,49
	Take off	15,01	15,01	15,01
	Climb out	27,94	27,94	27,94
	Climb/cruise/descent	1113,83	1262,15	1419,26
	Approach landing	5,70	5,70	5,70
	Taxi in	2,49	2,49	2,49
HC (g)	Flight total	75052,66	79307,61	81322,05
	LTO	22774,32	22774,32	22774,32
	Taxi out	10761,19	10761,19	10761,19
	Take off	197,06	197,06	197,06
	Climb out	572,06	572,06	572,06
	Climb/cruise/descent	52278,34	56533,29	58547,73
	Approach landing	480,00	480,00	480,00
	Taxi in	10764,00	10764,00	10764,00
CO (g)	Flight total	133953,46	139909,88	144817,51
	LTO	61376,14	61376,14	61376,14
	Taxi out	29148,91	29148,91	29148,91
	Take off	164,22	164,22	164,22
	Climb out	409,20	409,20	409,20
	Climb/cruise/descent	72577,33	78533,75	83441,37
	Approach landing	2496,00	2496,00	2496,00
	Taxi in	29157,80	29157,80	29157,80

Vervolg DC9

Distance (km)		3704
Fuel (kg)	Flight total	12353,90
	LTO	876,10
	Taxi out	209,14
	Take off	87,90
	Climb out	224,94
	Climb/cruise/descent	11477,81
	Approach landing	144,99
	Taxi in	209,14
NOx (kg)	Flight total	107,95
	LTO	7,26
	Taxi out	0,69
	Take off	1,60
	Climb out	3,41
	Climb/cruise/descent	100,68
	Approach landing	0,87
	Taxi in	0,69
HC (g)	Flight total	6954,29
	LTO	774,28
	Taxi out	305,34
	Take off	21,10
	Climb out	62,76
	Climb/cruise/descent	6180,01
	Approach landing	79,74
	Taxi in	305,34
CO (g)	Flight total	19427,40
	LTO	5352,14
	Taxi out	2300,52
	Take off	90,54
	Climb out	258,68
	Climb/cruise/descent	14075,25
	Approach landing	401,90
	Taxi in	2300,52

Vervolg DC10

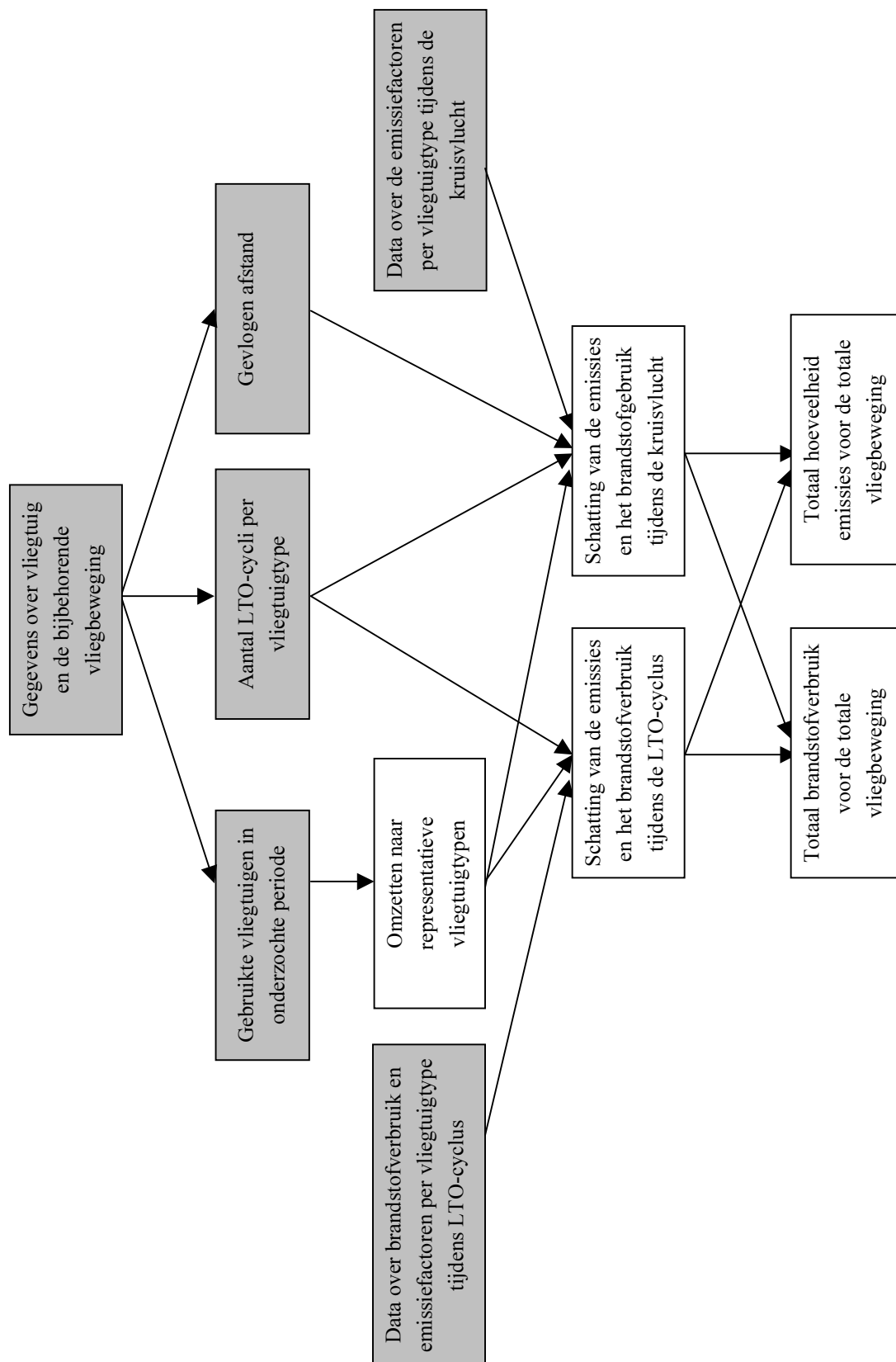
Distance (km)		9260
Fuel (kg)	Flight total	89397,99
	LTO	2381,18
	Taxi out	472,40
	Take off	283,11
	Climb out	716,78
	Climb/cruise/descent	87016,81
	Approach landing	436,48
	Taxi in	472,40
NOx (kg)	Flight total	1677,91
	LTO	41,71
	Taxi out	1,82
	Take off	10,89
	Climb out	22,55
	Climb/cruise/descent	1636,20
	Approach landing	4,62
	Taxi in	1,82
HC (g)	Flight total	78250,30
	LTO	22835,10
	Taxi out	10862,44
	Take off	169,86
	Climb out	501,03
	Climb/cruise/descent	55415,20
	Approach landing	436,48
	Taxi in	10865,28
CO (g)	Flight total	137385,75
	LTO	61624,97
	Taxi out	29423,17
	Take off	141,55
	Climb out	358,39
	Climb/cruise/descent	75760,77
	Approach landing	2269,71
	Taxi in	29432,15

Vervolg MD82

Distance (km)		3704
Fuel (kg)	Flight total	13738,70
	LTO	1003,06
	Taxi out	211,89
	Take off	111,62
	Climb out	284,41
	Climb/cruise/descent	12735,64
	Approach landing	183,25
	Taxi in	211,89
NOx (kg)	Flight total	158,52
	LTO	12,34
	Taxi out	0,85
	Take off	2,87
	Climb out	6,18
	Climb/cruise/descent	146,18
	Approach landing	1,60
	Taxi in	0,85
HC (g)	Flight total	7563,83
	LTO	1915,47
	Taxi out	737,36
	Take off	30,14
	Climb out	119,45
	Climb/cruise/descent	5648,36
	Approach landing	291,36
	Taxi in	737,15
CO (g)	Flight total	22794,42
	LTO	6521,11
	Taxi out	2676,93
	Take off	81,37
	Climb out	341,30
	Climb/cruise/descent	16273,31
	Approach landing	745,63
	Taxi in	2675,87

Bron: (TFEI, 2000)

Bijlage 6: Schematisch overzicht van Corinair-methode



Bijlage 7: Overzicht van de bronnen, gebruikt in MOBLEM

Gegevens	Bron
Afstand	
- Van Schiphol tot land	(AvInfo, 2001; Indo.com, 2001; Landing.com, 2001)
- Van Schiphol tot plaats	(AvInfo, 2001; Indo.com, 2001; Landing.com, 2001)
- Van Schiphol tot aan grens (via uitvliegroutes)	(Encarta, 1998)
- Gecorrigeerd met omwegfactor	(Encarta, 1998)
Bestemmingen	
- Continent	(AAS, 2001)
- Land	(AAS, 2001)
- Plaats	(AAS, 2001)
Bezettingsgraad per vliegtuigtype	(AAS, 2001)
Brandstofverbruik per LTO-fase per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Brandstofverbruik tijdens cruise per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Capaciteit per vliegtuigtype	(Schiphol, 1999)
Emissiefactor CO ₂	(SBSTA, 1996a)
Emissiefactor H ₂ O	(SBSTA, 1996a)
Emissiefactor SO ₂	(Moorman en Dings, 1996)
Emissiefactoren CO per LTO-fase per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Emissiefactoren CO tijdens cruise per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Emissiefactoren HC per LTO-fase per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Emissiefactoren HC tijdens cruise per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Emissiefactoren NO _x per LTO-fase per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Emissiefactoren NO _x tijdens cruise per vliegtuigtype	(TFEI, 2000)
Gebunkerde brandstof in Nederland (internationale vluchten)	(Olivier <i>et al.</i> , 2001b)
ICAO-codes van de vliegtuigtypen	(TFEI, 2000)
Motoren	(Gunston, 1991)
Passagiers	
- Allm 6 (Alle passagiers)	(AAS, 2001)
- Alm 7 (Alle Nederlandse passagiers)	(AAS, 2001)
Time-in-modes op Schiphol per LTO-fase per vliegtuigtype	(Klein <i>et al.</i> , 2002)
Totale internationale luchtvaartemissies in 1995	(Olivier <i>et al.</i> , 2001a)
Totale mondiale emissies in 1995 (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , HC, CO)	(Olivier en Berdowski, 2001)
Totale nationale emissies in 1998 (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , HC, CO)	(Olivier en Peters, 2001)
Uitvliegroutes	(AIP, 1998)
Vliegtuigtypen	(TFEI, 2000)
Vluchten	
- Allm 1 (Vertrekkend van of arriverend op Schiphol)	(AAS, 2001)
- Allm 4 (Nederlandse luchtvaartmaatschappijen)	(AAS, 2001)
- Allm 5 (Vertrekkend van of arriverend op Schiphol)	(AAS, 2001)
- Allm 8 (Vertrekkend van of arriverend op Schiphol)	(AAS, 2001)
- Allm 8 (Overvliegende vluchten)	(Eurocontrol, 2001)
- Per vliegtuigtype	(Schiphol, 1999)

Bijlage 8: Bestemmingen vanaf Schiphol

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVliegROUTE ³⁸
EUROPA				
Albanie	Tirana	B731	1921	2
Armenie	Yerevan	A310	3618	2
Azerbadsjan	Bakoe	B767	3731	2
Belgie	Antwerpen	B734	150	3
Belgie	Brussel	B734	197	3
Belgie	Luik	B734	220	3
Belgie	Oostende	B734	242	3
Belgie	Vevelgem	B734	227	3
Bulgarije	Bourgas	B734	2312	2
Bulgarije	Plovdiv	B734	2169	2
Bulgarije	Sofia	B734	2009	2
Bulgarije	Varna	B734	2281	2
Cyprus	Larnaca	A310	3438	2
Cyprus	Paphos	A310	3376	2
Denemarken	Aalborg	F100	711	1
Denemarken	Aarhus	F100	671	1
Denemarken	Billund	F100	548	1
Denemarken	Esbjerg	F100	500	1
Denemarken	Kolding	F100	527	1
Denemarken	Kopenhagen	F100	715	1
Denemarken	Skive	F100	633	1
Denemarken	Sonderborg	F100	510	1
Duitsland	Berlijn	F100	662	2
Duitsland	Braunschweig	F100	378	2
Duitsland	Bremen	F100	317	2
Duitsland	Dortmund	F100	240	2
Duitsland	Dresden	F100	728	2
Duitsland	Dusseldorf	F100	202	2
Duitsland	Frankfurt	F100	420	2
Duitsland	Hahn	F100	362	2
Duitsland	Hamburg	F100	429	2
Duitsland	Hannover	F100	378	2
Duitsland	Keulen	F100	266	2
Duitsland	Leipzig	F100	595	2
Duitsland	Lemwerder	F100	317	2
Duitsland	Monchengladbach	F100	195	2
Duitsland	Munchen	F100	771	2
Duitsland	Munster	F100	230	2
Duitsland	Neurenberg	F100	626	2
Duitsland	Paderborn	F100	316	2
Duitsland	Ramstein	F100	434	2
Duitsland	Rhein-Main	F100	421	2

³⁸ Voor de juiste uitvliegroute bij de betreffende nummering: zie bijlage 9

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Duitsland	Saarbrücken	F100	438	2
Duitsland	Stuttgart	F100	577	2
Duitsland	Zelfde	F100	423	2
Estland	Tallin	B731	1684	2
Finland	Helsinki	B734	1732	1
Finland	Kemi	B734	2139	1
Finland	Kitilla	B734	2324	1
Finland	Rovaniemi	B734	2255	1
Frankrijk	Ajaccio	F50	1372	3
Frankrijk	Bordeaux	F50	1067	3
Frankrijk	Calvi	F50	1298	3
Frankrijk	Chambery	F50	857	3
Frankrijk	Chateauxroux	F50	740	3
Frankrijk	Clermont-Fer	F50	844	3
Frankrijk	La Rochelle	F50	1171	3
Frankrijk	Le Havre	F50	528	3
Frankrijk	Lourdes	F50	1235	3
Frankrijk	Lyon	F50	846	3
Frankrijk	Marseille	F50	1158	3
Frankrijk	Metz	F50	428	3
Frankrijk	Montpellier	F50	1118	3
Frankrijk	Mulhouse	F50	645	3
Frankrijk	Nantes	F50	842	3
Frankrijk	Nice	F50	1126	3
Frankrijk	Parijs	F50	493	3
Frankrijk	Pontoise	F50	466	3
Frankrijk	Rennes	F50	726	3
Frankrijk	Rouen	F50	484	3
Frankrijk	Straatsburg	F50	537	3
Frankrijk	Toulouse	F50	1155	3
Frankrijk	Vichy	F50	792	3
Georgie	Tbilisi	A310	3530	2
Griekenland	Athene	A320	2486	2
Griekenland	Chania	A320	2772	2
Griekenland	Chios	A320	2603	2
Griekenland	Corfu	A320	2100	2
Griekenland	Heraklion	A320	2851	2
Griekenland	Kalamata	A320	2487	2
Griekenland	Karpathos	A320	2962	2
Griekenland	Kavala	A320	2235	2
Griekenland	Kefallinia	A320	2291	2
Griekenland	Kos	A320	2818	2
Griekenland	Lemnos	A320	2393	2
Griekenland	Mitilini	A320	2564	2
Griekenland	Mykonos	A320	2644	2
Griekenland	Preveza	A320	2220	2
Griekenland	Rhodos	A320	2920	2

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Griekenland	Samos	A320	2717	2
Griekenland	Santorini	A320	2758	2
Griekenland	Skiathos	A320	2355	2
Griekenland	Skyros	A320	2437	2
Griekenland	Tanagra	A320	2443	2
Griekenland	Thessaloniki	A320	2189	2
Griekenland	Volos	A320	2298	2
Griekenland	Zakynthos	A320	2351	2
Groot-Brittannie	Aberdeen	B734	811	4
Groot-Brittannie	Belfast	B734	869	4
Groot-Brittannie	Birmingham	B734	528	4
Groot-Brittannie	Bristol	B734	605	4
Groot-Brittannie	Cambridge	B734	369	4
Groot-Brittannie	Cardiff	B734	654	4
Groot-Brittannie	Coventry	B734	487	4
Groot-Brittannie	Eastmidlands	B734	478	4
Groot-Brittannie	Edinburgh	B734	759	4
Groot-Brittannie	Exeter	B734	680	4
Groot-Brittannie	Filton	B734	588	4
Groot-Brittannie	Glasgow	B734	831	4
Groot-Brittannie	Guernsey	B734	698	4
Groot-Brittannie	Humberside	B734	426	4
Groot-Brittannie	Inverness	B734	936	4
Groot-Brittannie	Jersey	B734	688	4
Groot-Brittannie	Lasham	B734	480	4
Groot-Brittannie	Leedsbrdford	B734	528	4
Groot-Brittannie	Liverpool	B734	614	4
Groot-Brittannie	Londen	B734	409	4
Groot-Brittannie	Manchester	B734	567	4
Groot-Brittannie	Manston	B734	297	4
Groot-Brittannie	Mildenhall	B734	334	4
Groot-Brittannie	Newcastle	B734	559	4
Groot-Brittannie	Norwich	B734	275	4
Groot-Brittannie	Sheffield	B734	508	4
Groot-Brittannie	Southampton	B734	539	4
Groot-Brittannie	Southend	B734	334	4
Groot-Brittannie	Tees Side	B734	549	4
Groot-Brittannie	Waddington	B734	423	4
Hongarije	Boedapest	MD82	1341	2
Ierland	Cork	B734	1041	5
Ierland	Dublin	B734	871	5
Ierland	Kerry	B734	1116	5
Ierland	Shannon	B734	1075	5
IJsland	Reykjavik	A310	2325	5
Italie	Alghero	BA46	1524	2
Italie	Ancona	BA46	1355	2
Italie	Bergamo	BA46	944	2

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Italie	Bologna	BA46	1137	2
Italie	Cagliari	BA46	1712	2
Italie	Catania	BA46	2109	2
Italie	Florence	BA46	1226	2
Italie	Milaan	BA46	951	2
Italie	Napels	BA46	1708	2
Italie	Pisa	BA46	1202	2
Italie	Rimini	BA46	1251	2
Italie	Rome	BA46	1500	2
Italie	Treviso	BA46	1045	2
Italie	Trieste	BA46	1135	2
Italie	Turijn	BA46	953	2
Italie	Venetie	BA46	1084	2
Italie	Verona	BA46	1015	2
Kroatie	Split	BA11	1490	2
Kroatie	Zagreb	BA11	1251	2
Letland	Riga	B731	1538	2
Litouwen	Shauliaj	B734	1487	2
Litouwen	Vilnius	B734	1582	2
Luxemburg	Luxemburg	DC9	366	3
Macedonie	Skopje	A310	1952	2
Malta	Malta	A310	2280	2
Moldavie	Kishinev	B721	2092	2
Noorwegen	Bardufoss	MD82	2295	1
Noorwegen	Bergen	MD82	1017	1
Noorwegen	Evenes	MD82	2191	1
Noorwegen	Fagernes	MD82	1156	1
Noorwegen	Kristiansand	MD82	1396	1
Noorwegen	Oslo	MD82	1056	1
Noorwegen	Sandefjord	MD82	1834	1
Noorwegen	Stavanger	MD82	842	1
Noorwegen	Trondheim	MD82	1484	1
Oekraïne	Dnjepetro	B721	2502	2
Oekraïne	Kiev	B721	2050	2
Oekraïne	Lvov	B721	1654	2
Oostenrijk	Innsbruck	A320	843	2
Oostenrijk	Klagenfurt	A320	1074	2
Oostenrijk	Linz	A320	927	2
Oostenrijk	Salzburg	A320	888	2
Oostenrijk	Wenen	A320	1079	2
Polen	Poznan	B734	940	2
Polen	Warschau	B734	1265	2
Portugal	Faro	B757	2264	3
Portugal	Funchal	B757	3212	3
Portugal	Lissabon	B757	2140	3
Portugal	Oporto	B757	1834	3
Portugal	Santa Maria	B757	3315	3

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Portugal	Terceira Isl	B757	3296	3
Roemenie	Boekarest	DC9	2070	2
Roemenie	Constanta	DC9	2243	2
Roemenie	Sibiu	DC9	1813	2
Rusland	Kaliningrad	BA46	1232	2
Rusland	Moskou	BA46	2481	2
Rusland	S.Petersburg	BA46	2046	2
Servie	Belgrado	B731	1638	2
Slovenie	Ljubljana	B734	1140	2
Spanje	Alicante	B734	1854	3
Spanje	Almeria	B734	2078	3
Spanje	Arrecife	B734	3304	3
Spanje	Barcelona	B734	1433	3
Spanje	Bilbao	B734	1324	3
Spanje	Fuerteventur	B734	3371	3
Spanje	Gerona	B734	1341	3
Spanje	Granada	B734	2151	3
Spanje	Ibiza	B734	1743	3
Spanje	Jerez	B734	2214	3
Spanje	La Coruna	B734	1607	3
Spanje	Las Palmas	B734	3508	3
Spanje	Madrid	B734	1699	3
Spanje	Mahon	B734	1591	3
Spanje	Malaga	B734	2165	3
Spanje	Palma	B734	1640	3
Spanje	Pamplona	B734	1341	3
Spanje	Reus	B734	1460	3
Spanje	Santa Cruz	B734	3541	3
Spanje	Santander	B734	1351	3
Spanje	Santiago Com	B734	1649	3
Spanje	Sevilla	B734	2139	3
Spanje	Tenerife	B734	3544	3
Spanje	Valencia	B734	1702	3
Spanje	Vittorio	B734	1365	3
Spanje	Zaragoza	B734	1459	3
Tsjechie	Ostrava	F100	1122	2
Tsjechie	Praag	F100	821	2
Turkije	Adana	B757	3356	2
Turkije	Ankara	B757	2916	2
Turkije	Antalya	B757	3050	2
Turkije	Bodrum	B757	2820	2
Turkije	Dalaman	B757	2935	2
Turkije	Istanbul	B757	2550	2
Turkije	Izmir	B757	2640	2
Turkije	Trabzon	B757	3352	2
Zweden	Gothenburg	AT7	878	1
Zweden	Karlstad	AT7	1094	1

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Zweden	Kristianstad	AT7	836	1
Zweden	Malmo	AT7	767	1
Zweden	Nykoping	AT7	1149	1
Zweden	Orebro	AT7	1150	1
Zweden	Stockholm	AT7	1302	1
Zwitserland	Bazel	AT4	645	2
Zwitserland	Bern	AT4	727	2
Zwitserland	Geneve	AT4	789	2
Zwitserland	Lugano	AT4	877	2
Zwitserland	Sion	AT4	807	2
Zwitserland	Zurich	AT4	706	2
NOORD-AMERIKA				
Canada	Calgary	DC10	7919	5
Canada	Edmonton	DC10	7653	5
Canada	Gander	DC10	4512	5
Canada	Halifax	DC10	5430	5
Canada	Montreal	DC10	6063	5
Canada	Stephenville	DC10	4793	5
Canada	Toronto	DC10	6596	5
Canada	Vancouver	DC10	8494	5
Verenigde Staten Oost	Bangor	B767	5784	5
Verenigde Staten Oost	Boston	B767	6128	5
Verenigde Staten Oost	Detroit	B767	6949	5
Verenigde Staten Oost	Dover Afb. D	B767	6698	5
Verenigde Staten Oost	New York	B767	6465	5
Verenigde Staten Oost	Newark	B767	6476	5
Verenigde Staten Oost	Philadelphia	B767	6601	5
Verenigde Staten Oost	Travis	B767	6488	5
Verenigde Staten Oost	Washington	B767	6823	5
Verenigde Staten Oost	Wrightstown	B767	6565	5
Verenigde Staten Midden	Anchorage	DC10	7929	5
Verenigde Staten Midden	Atlanta	DC10	7785	5
Verenigde Staten Midden	Chicago	DC10	7295	5
Verenigde Staten Midden	Cincinnati	DC10	7318	5
Verenigde Staten Midden	Columbus, Oh	DC10	7143	5
Verenigde Staten Midden	Denver	DC10	8542	5
Verenigde Staten Midden	Fairbanks	DC10	7476	5
Verenigde Staten Midden	Fayetteville	DC10	7281	5
Verenigde Staten Midden	Hopkinsville	DC10	7720	5
Verenigde Staten Midden	Houston	DC10	8901	5
Verenigde Staten Midden	Memphis	DC10	8045	5
Verenigde Staten Midden	Miami	DC10	8204	5
Verenigde Staten Midden	Minneapolis	DC10	7374	5
Verenigde Staten Midden	Orlando	DC10	8040	5
Verenigde Staten Midden	Savannah	DC10	7707	5
Verenigde Staten Midden	Seattle	DC10	8619	5
Verenigde Staten Midden	Seattle Bf	DC10	8610	5

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVliegROUTE
Verenigde Staten Midden	Tampa	DC10	8170	5
Verenigde Staten Midden	Wichita	DC10	8284	5
Verenigde Staten West	Long Beach	B741	9880	5
Verenigde Staten West	Los Angeles	B741	9859	5
Verenigde Staten West	Oakland	B741	9667	5
Verenigde Staten West	Phoenix	B741	9571	5
Verenigde Staten West	Sanfrancisco	B741	9680	5
MIDDEN EN ZUID-AMERIKA				
Argentinië	Buenos Aires	B744	12539	4
Argentinië	Mendoza	B744	13016	4
Barbados	Barbados	DC10	7846	4
Bermuda	Hamilton	B767	6378	4
Brazilië	Curitiba	B777	11110	4
Brazilië	Fortaleza	B777	8182	4
Brazilië	Recife	B777	8463	4
Brazilië	Riodejaneiro	B777	10431	4
Brazilië	Salvador	B777	9170	4
Brazilië	Santarem	B777	11805	4
Brazilië	Sao Paulo	B777	10758	4
Chili	Santiago	B744	13186	4
Colombia	Bogota	B777	9737	4
Costa Rica	San Jose	B777	9976	4
Cuba	Holguin	B741	8351	4
Cuba	Varadero	B741	8501	4
Dominicaanse Rep.	Puerto Plata	B741	8017	4
Dominicaanse Rep.	Punta Cana	B741	7963	4
Dominicaanse Rep.	Santodomingo	B741	8095	4
Ecuador	Guayaquil	B744	10834	4
Ecuador	Quito	B744	10524	4
Frans Antillen	Point A Pitir	DC10	7671	4
Guatemala	Guatemala	B744	10009	4
Jamaica	Montego Bay	A340	8707	4
Mexico	Cancun	A340	9114	4
Mexico	Guadalajara	A340	10302	4
Mexico	Mexico City	A340	10150	4
Mexico	Monterrey	A340	9571	4
Mexico	Puerto Valla	A340	10415	4
Ned. Antillen	Aruba	B741	8661	4
Ned. Antillen	Bonaire	B741	8567	4
Ned. Antillen	Curacao	B741	8612	4
Ned. Antillen	St Maarten	B741	7621	4
Panama	Panama City	A340	9709	4
Peru	Lima	B744	11564	4
Puerto Rico	San Juan	DC10	7828	4
Suriname	Paramaribo	B741	8235	4
Venezuela	Barcelona	B741	8496	4
Venezuela	Caracas	B741	8643	4

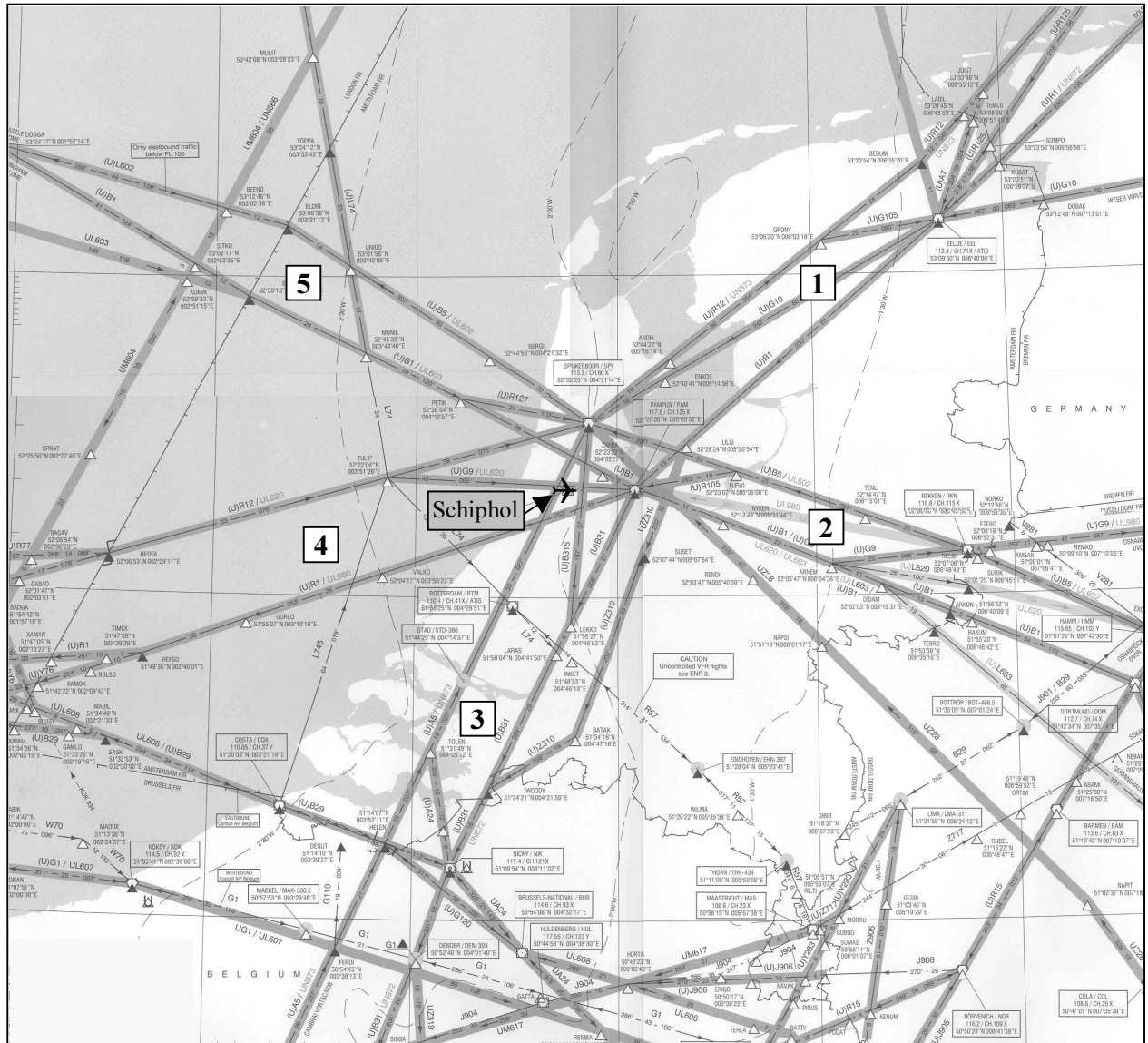
LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Venezuela	Porlamar	B741	8365	4
AFRIKA				
Angola	Luanda	DC10	7528	3
Centr. Afrik. Rep.	Bangui	B767	6015	3
Egypte	Alexandria	B767	3421	3
Egypte	Cairo	B767	3620	3
Egypte	Hurghada	B767	4055	3
Egypte	Luxor	B767	4149	3
Egypte	Sharm El Sh.	B767	4009	3
Gabon	Port Gentil	DC10	6495	3
Gambia	Banjul	A330	5209	3
Ghana	Accra	B767	5723	3
Ivoorkust	Abidjan	B767	5819	3
Kaap Verd. Eil.	Ilha Do Sal	B767	5100	3
Kenya	Mombasa	DC10	7770	3
Kenya	Nairobi	DC10	7318	3
Marokko	Agadir	B757	3107	3
Marokko	Al Hoceima	B757	2324	3
Marokko	Casablanca	B757	2668	3
Marokko	Marrakech	B757	2901	3
Marokko	Ouarzazate	B757	2941	3
Marokko	Oujda	B757	2321	3
Marokko	Tanger	B757	2323	3
Nigeria	Kano	B767	4930	3
Nigeria	Lagos	B767	5585	3
Oeganda	Entebbe	DC10	6976	3
Sao Tome & Principe	Sao Tome Is	B767	6350	3
Tanzania	Dares Salaam	DC10	8053	3
Tanzania	Kilimanjaro	DC10	7587	3
Togo	Lome	B767	5649	3
Tunesie	Djerba	B734	2421	3
Tunesie	Monastir	B734	2182	3
Tunesie	Tozeur	B734	2368	3
Tunesie	Tunis	B734	2039	3
Zambia	Lusaka	B741	8615	3
Zimbabwe	Harare	B741	8995	3
Zuid-Afrika	Durban	B744	10401	3
Zuid-Afrika	Johannesburg	B744	9877	3
Zuid-Afrika	Kaapstad	B744	10599	3
MIDDEN-OOSTEN				
Bahrein	Bahrain	B767	5250	2
Iran	Abadan	B767	4703	2
Iran	Teheran	B767	4484	2
Israel	Eilat	B767	3885	2
Israel	Ovda	B767	3834	2
Israel	Tel Aviv	B767	3642	2
Jemen	Sanaa	B767	5925	2

LAND	PLAATS	VLIEGTUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Jordanie	Amman	A310	3717	2
Kuweit	Kuwait	B767	4807	2
Libanon	Beirut	A310	3506	2
Oman	Muscat	B767	6046	2
Oman	Ras El Khaym	B767	5743	2
Qatar	Doha	B767	5412	2
Saoedi-Arabie	Dhahran	B767	5220	2
Saoedi-Arabie	Jeddah	B767	4963	2
Saoedi-Arabie	Medina	B767	4684	2
Saoedi-Arabie	Riyadh	B767	5151	2
Syrie	Aleppo	F28	3414	2
Syrie	Damascus	F28	3593	2
Ver. Arab. Emiraten	Abu Dhabi	B767	5707	2
Ver. Arab. Emiraten	Dubai	B767	5686	2
Ver. Arab. Emiraten	Sharjah	B767	5686	2
VERRE-OOSTEN				
Australie	Melbourne	B744	18214	2
Australie	Sydney	B744	18314	2
Brunei	Bandan Seri	B744	11990	2
China	Beijing	B741	8628	2
China	Guangzhou	B741	10066	2
China	Hong Kong	B741	10337	2
China	Shanghai	B741	9785	2
Filippijnen	Manila	B744	11448	2
India	Bombay	DC10	7555	2
India	Calcutta	DC10	8385	2
India	Goa	DC10	7962	2
India	Madras	DC10	8665	2
India	New Delhi	DC10	6984	2
Indonesie	Denpasar	B744	13364	2
Indonesie	Jakarta	B744	12497	2
Japan	Nagoya	B744	10171	2
Japan	Osaka	B744	10153	2
Japan	Sapporo	B744	9497	2
Japan	Tokio	B744	10249	2
Kazakhstan	Alma Ata	B767	5790	2
Macau	Macau	B744	10181	2
Malediven	Male	B741	9001	2
Maleisie	K.Lumpur	B744	11218	2
Maleisie	Penang	B744	10903	2
Nepal	Kathmandu	DC10	7682	2
Pakistan	Islamabad	DC10	6273	2
Pakistan	Karachi	DC10	6586	2
Pakistan	Lahore	DC10	6499	2
Singapore	Singapore	B744	11541	2
Sri-Lanka	Colombo	B741	9218	2
Taiwan	Taipei	B744	10427	2




LAND	PLAATS	VLIETUIGTYPE	AFSTAND (KM)	UITVLIEGROUTE
Thailand	Bangkok	B744	10097	2
Thailand	Phuket	B744	10486	2
Uzbekistan	Tashkent	B767	5379	2
Vietnam	Ho Chi Minh	B744	10844	2
Zuid-Korea	Seoul	B741	9442	2

Bron: (AAS, 2001)

Bijlage 9: De luchtcorridors boven Nederland



Bron: (AIP, 1998)

-  Vliegroute van de vliegtuigen, zowel van als naar Schiphol
-  Nummering van de uitvliegroutes, zoals gebruikt in MOBLEM
-  Luchtcorridor, gevormd door de combinatie van de vliegroute naar Schiphol toe en de vliegroute vanaf Schiphol naar de grens

Bijlage 10: Resultaten van de variatie in toedeling van vliegtuigtypen

MOBLEM

Methode op basis van:	Brandstof	CO2	H2O	SO2	NOx	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>
1 Geen allocatie	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	0,4	1,8
2 Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3 Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4 Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,2	10,2	4,0	3,2	51,0	1,7	5,0
5 Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,7	8,6	3,4	2,7	41,7	1,4	4,5
6 Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	7,0	2,8	2,2	33,3	1,2	4,0
7 Nationaliteit passagiers	1,4	4,6	1,8	1,4	21,2	0,7	2,7
8 Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,1	1,0	4,6

MOBLEM met kleiner bereik

Methode op basis van:	Brandstof	CO2	H2O	SO2	NOx	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>
1 Geen allocatie	0,1	0,5	0,2	0,1	2,0	1,0	2,0
2 Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3 Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4 Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	2,8	8,7	3,4	2,8	41,1	2,4	4,9
5 Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,4	7,4	2,9	2,4	34,8	2,4	4,6
6 Vertrek- en aankomstland passagiers	2,2	6,9	2,7	2,2	31,4	2,4	4,7
7 Nationaliteit passagiers	1,6	4,9	1,9	1,6	22,5	1,5	3,2
8 Landsgrenzen	0,7	2,2	0,9	0,7	10,0	2,4	4,9

MOBLEM met groter bereik

Methode op basis van:	Brandstof	CO2	H2O	SO2	NOx	HC	CO
	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁹ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>	<i>10⁶ kg</i>
1 Geen allocatie	0,2	0,6	0,2	0,2	2,8	0,6	2,1
2 Proportionele allocatie	1,1	3,5	1,4	0,1	7,7	0,9	1,3
3 Gebunkerde brandstof	3,0	9,6	3,8	3,0	36,8	8,8	27,4
4 Nationaliteit luchtvaartmaatschappij	3,1	9,9	3,9	3,1	47,3	1,9	5,3
5 Vertrek- en aankomstland vliegtuig	2,8	8,9	3,5	2,8	43,5	1,7	5,0
6 Vertrek- en aankomstland passagiers	2,1	6,7	2,6	2,1	31,8	1,4	4,0
7 Nationaliteit passagiers	1,4	4,4	1,7	1,4	20,5	1,0	2,7
8 Landsgrenzen	0,8	2,5	1,0	0,8	12,7	1,6	5,3

Bijlage 11: Mogelijke oplossingen voor emissiereductie

1 Inleiding

Door de toedeling van de emissies door de internationale luchtvaart stijgt de hoeveelheid aan Nederland toebedeelde emissies. Daarnaast geven prognoses aan dat het aantal vliegbewegingen in de toekomst blijft stijgen (Feimann *et al.*, 2000; Tweede Kamer, 1995). Redenen zijn economische groei, verdere globalisering van de economie en liberalisering van de luchtvaart, en als gevolg daarvan toenemende mobiliteit en meer goederenvervoer per vliegtuig. (CPB, 1997; Van Drimmelen, 1995). Om te voorkomen dat emissies ook in dezelfde mate toenemen als het aantal vluchten, is het van belang om efficiënte oplossingen te bedenken en de juiste maatregelen te nemen om de toebedeelde emissies te kunnen reduceren.

De actoren, die betrokken kunnen zijn bij te nemen maatregelen in de luchtvaart, zijn: (Van der Bij *et al.*, 1994; NIVR, 2000; RMB, 1996)

- Luchthavens;
- Luchtvaartmaatschappijen;
- Passagiers en verladers van vracht;
- Luchtvaartindustrie;
- Overheid (bijvoorbeeld de Europese Unie);
- Organisaties die luchtvaartverwante activiteiten uitvoeren (Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL), Eurocontrol, Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart (NIVR), Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), Rijksluchtvaartschool, International Civil Aviation Organisation, e.a.);
- Overige organisaties (bijvoorbeeld milieubewegingen).

Als in dit hoofdstuk gesproken wordt over ‘de luchtvaartsector’ wordt verwezen naar de samenvoeging van de volgende actoren: passagiers en verladers van vracht, de luchthaven en de luchtvaartmaatschappijen.

In paragraaf 2 wordt eerst ingegaan op de autonome ontwikkeling van de emissies. Vervolgens worden maatregelen besproken, die kunnen bijdragen aan emissievermindering. De oplossingen zijn verdeeld in drie groepen (Hartman, 2000; ICAO, 2001; Wit, 1996):

1. Prijsbeleid;
2. Technologische maatregelen;
3. Operationele maatregelen.

Bij de bespreking van de maatregelen moet onderscheid worden gemaakt tussen beleidsinstrumenten en het gebied waarop het instrument effect heeft. In de tabel staat aangegeven welke instrumenten ingezet kunnen worden in de sector verkeer en vervoer (zie tabel 1).

Tabel 1 Overzicht van beleidsinstrumenten in de sector verkeer en vervoer

Beleidsinstrumenten	Gedrag	Gebruik	Techniek	Keuze vervoermiddel	Volume
Infrastructuur	x	x		x	x
Informatie en organisatie		x		x	
Marketing				x	
Ruimtelijke ordening	x	x		x	x
Prijzen	x	x	x	x	x
Restricties	x	x	x	x	x

Bron: (Blok en Van Wee, 1994)

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het instrument prijsbeleid (§3), dat als aangrijpingspunt de kosten voor zowel luchtvaartsector als de -industrie heeft en informatie en organisatie (§6; voorlichting) wat invloed heeft op het keuze van de consument wat betreft het vervoermiddel.

Prijsbeleid kan invloed hebben op het volume, met name deze prijsmaatregelen zullen worden besproken. Daarnaast kan het ook dienen als stimulans voor technologische innovaties en gewijzigde operationele procedures ('gebruik' in tabel 1). Er kan gedacht worden aan heffingen of subsidies. In paragraaf 3 komen deze oplossingen uitgebreider aan bod.

Dit hoofdstuk gaat verder in op technologische maatregelen (§4), waarvan een deel door prijsbeleid gestimuleerd kan worden. Dit soort maatregelen wordt met name uitgevoerd door producenten van vliegtuigen en vliegtuigmotoren. Bijvoorbeeld, door technologische verbeteringen kan de efficiëntie van een motor verbeterd worden. Of er kunnen aërodynamische verbeteringen aan de huidige vliegtuigen aangebracht worden, waardoor het brandstofverbruik daalt.

Ook gaat dit hoofdstuk in op de operationele maatregelen (§5), waarbij luchtvaartmaatschappijen proberen om met de huidige vloot een verminderde uitstoot te bereiken. Dit kan door wijzigingen aan te brengen in de operationele procedures van het vliegtuig. Voorbeelden zijn het wijzigen van de LTO-cyclus, het veranderen van de kruisvluchthoogte of het aanpassen van de vliegroutes. Veranderingen in het gebruik van vliegtuigen kunnen deels gestimuleerd worden door prijsbeleid.

Naast de uitleg over de diverse maatregelen wordt een inschatting gemaakt van het effect op de toekomstige emissies. Het maken van inschattingen van ontwikkelingen in het brandstofverbruik zijn echter 'een hachelijk zaak', volgens Moorman en Dings (1996). Het

verbruik is van veel factoren afhankelijk die niet alleen technologisch, maar ook economisch van aard kunnen zijn. Afhankelijk van de ontwikkeling van de markt is bijvoorbeeld de prijs van kerosine en daarmee samenhangend het onderzoek naar alternatieve brandstoffen. De productieprijs van deze brandstoffen kan nu nog (te) hoog zijn. Als kerosine echter duurder wordt, kan het wel rendabel worden om alternatieve brandstoffen te produceren (Moorman en Dings, 1996). Een andere belangrijke economische factor is de afschrijvingstermijn van vliegtuigen en motoren. De termijn is afhankelijk van de veiligheid van het toestel, van operationele factoren en van de hoogte van de kosten (Hoogenstrijd, 1993; Lister *et al.*, 1999; Moorman en Dings, 1996).

2 Toekomstverwachtingen

De afgelopen jaren is de luchtvaartsector sterk gegroeid. Elk jaar groeit het aantal passagierskilometers mondiaal met 5 tot 7%. De verwachting is dat na 2000 de jaarlijkse stijging afneemt tot 4 à 5%. De stijging wordt door twee factoren veroorzaakt, namelijk de groei van het aantal passagiers en de toename van de gemiddelde vliegafstand. De stijging in passagierskilometers leidt mondiaal gezien tot een jaarlijkse toename van twee procent in het aantal vliegbewegingen. Het verschil in toename tussen de passagierskilometers en de vliegbewegingen wordt veroorzaakt door het gebruik van vliegtuigen met een grotere capaciteit. (SBSTA, 1996a; Tweede Kamer, 1995; Wit, 1996)

De mondiale kerosineconsumptie door de burgerluchtvaart is tussen 1976 en 1990 jaarlijks met gemiddeld 3,4% toegenomen. De stijging in de brandstofconsumptie is een resultante van de groei van de luchtvaartsector en een toename van de energie-efficiëntie. Tot 2010 wordt de jaarlijkse groei van het brandstofverbruik ingeschat op 2,5% tot 6%, waarbij is rekening gehouden met mogelijke technische verbeteringen. De prognoses voor efficiëntieverbetering per stoelkilometer geven voor dezelfde periode een waarde van 2 tot 3% aan. (Fransen en Peper, 1993; RMB, 1996; Wit, 1996)

Het gevolg van de stijgende brandstofconsumptie is een toename in de emissies. De prognoses geven aan dat de mondiale CO₂- en NO_x-emissies in 2015 ten opzichte van 1990 verdrievoudigen, waarbij rekening is gehouden met een aantal autonome ontwikkelingen³⁹ (Tweede Kamer, 1995).

Voor de Nederlandse situatie wordt in de Nationale Milieuverkenning 5 geprognosticeerd dat tussen 1995 en 2020 de LTO-emissies op Nederlandse luchthavens zullen veranderen, zoals vermeld in tabel 2.

³⁹ De autonome ontwikkelingen houden in een stijging van de bezettingsgraad met 4%, een daling van het kerosineverbruik van 12,5%, een stijging van het aantal passagiers met 350% en een reductie in de NO_x-emissies van 17% (Tweede Kamer, 1995).

Tabel 2 Prognoses voor de LTO-emissies van verschillende componenten, bepaald voor Schiphol over de periode 1995 - 2020

Jaar	Brandstof	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	HC
	10 ⁹ kg	10 ⁹ kg	10 ⁹ kg	10 ⁹ kg	10 ⁹ kg	10 ⁹ kg
1995	138	434	0,14	1,8	2,2	0,7
2020-EC	429	1.347	0,43	5,4	7,0	1,5
2020-GC	599	1.884	0,60	7,7	9,6	2,1
Prognoses 2020 (index: 1995 = 100)	311-434	310-434	307-429	300-428	318-436	214-300

Bron: (CPB, 1997; Feimann *et al.*, 2000)

In tabel 3 wordt een samenvattend overzicht gegeven van de jaarlijkse autonome ontwikkeling (mondiaal) van drie belangrijke factoren in de luchtvaartsector⁴⁰.

Tabel 3 Overzicht van de toekomstige jaarlijkse en autonome ontwikkelingen in de mondiale luchtvaartsector

Business-as-usual	Percentage
Groei luchtvaart (in passkm)	4 tot 5%
Efficiëntieverbetering (per stoelkilometer)	2 tot 3%
Groei brandstofverbruik	2,5 tot 6%

Bron: (Fransen en Peper, 1993; RMB, 1996; SBSTA, 1996a; Tweede Kamer, 1995; Wit, 1996)

3 Prijsbeleid

3.1 Algemeen

Prijzmaatregelen zijn onder andere bedoeld als stimulans. Ze kunnen door de overheid worden toegepast om de luchtvaartindustrie te stimuleren om nieuwe technologieën te ontwikkelen en toe te passen en om de luchtvaartmaatschappijen nieuwe operationele procedures in gebruik te laten nemen. De overheid speelt dus een belangrijke rol bij prijsbeleid.

Het uitgangspunt van deze maatregelen is het verhogen of differentiëren van de kosten, waardoor het gedrag van de aanbieder of van de vrager wijzigt (Lister *et al.*, 1999; Olivier, 1995). Bijvoorbeeld, het stijgen van de ticketprijs kan leiden tot een afname van de vraag naar luchttransport (Geurs en Van Wee, 1997).

Prijzmaatregelen werken niet op korte termijn. Vaak moet eerst een juridisch draagvlak gecreëerd worden om de maatregelen in te voeren, want door internationale wetgeving gelden er veel beperkingen met betrekking tot de luchtvaartsector. Heffingen en subsidies mogen nu (nog) niet geïmplementeerd worden vanwege internationaal vastgelegde regels, zoals de

⁴⁰ De bronnen waaruit de drie factoren komen, zijn onderling niet consequent. De factoren sluiten daardoor niet op elkaar aan.

ICAO-council over belastingen (zie §6.3.2). Als de maatregelen uiteindelijk ingevoerd (mogen) worden, verloopt er nog enige tijd voordat de markt zich aangepast heeft aan de nieuwe situatie.

Een maat voor hoe de markt reageert op economische veranderingen, is de zogenoemde elasticiteit, ofwel ‘het percentage waarmee een variabele verandert als gevolg van een verandering van 1% in een andere variabele’ (Hof *et al.*, 2001). Er zijn verschillende soorten elasticiteiten, bijvoorbeeld brandstofprijselasticiteit, (ticket)prijselasticiteit en inkomens-elasticiteit. In de luchtvaartsector geeft de prijselasticiteit van de vraag naar luchttransport aan in welke mate de vraag naar luchttransport verandert door veranderingen in de prijs van het luchttransport (meestal de prijs van het vliegticket). Inkomenselasticiteit geeft de relatie tussen de vraag naar luchttransport en het inkomen van de reizigers aan. Bij deze twee elasticiteiten moet onderscheid worden gemaakt tussen recreatief en zakelijk verkeer, want beide soorten reizigers reageren anders op prijsveranderingen (Brons *et al.*, 2001; Hof *et al.*, 2001). Er bestaan veel onzekerheden over de hoogte van de elasticiteiten. In Hof *et al.* (2001) is daarom een literatuurstudie gedaan naar de prijsgevoeligheid in de luchtvaart. De resultaten van dit rapport staan in tabel 4.

Tabel 4 Prijs- en inkomenselasticiteit (uitgedrukt in passagierskilometers) voor zowel de zakelijke als de recreatieve reiziger in de luchtvaart.

	Zakelijke reizigers	Niet-zakelijke reizigers
Prijselasticiteit	-0,4 tot -1,2	-1,1 tot -2,7
Inkomenselasticiteit	1,5	2,0

Bron: (Hof *et al.*, 2001)

In Geurs en Van Wee (1997) worden andere schattingen van de elasticiteit gegeven. Zij gaan uit van drie primaire bronnen, waarin de prijselasticiteit (uitgedrukt in het aantal passagiers) voor de luchtvaart wordt aangegeven (zie tabel 5).

Tabel 5 Prijselasticiteit (uitgedrukt in aantal passagiers) uit verschillende bronnen voor zowel de zakelijke als de recreatieve reiziger in de luchtvaart

	Zakelijke reizigers	Niet-zakelijke reizigers
Bron 1		Gemiddeld -0,5
Bron 2	-0,65 tot -1,15	-0,4 tot -4,6
Bron 3	-0,1	-1,0

Bron: (Geurs en Van Wee, 1997)

Uit de bovenstaande tabellen blijkt dat als het vliegticket duurder wordt, de zakelijke reiziger bereid is een hogere prijs per passagierskilometer te betalen dan de recreatieve reizigers: de elasticiteit van de zakelijke reiziger is over het algemeen lager dan van de recreatieve reizigers. Daarnaast is voor recreatieve reizigers het inkomen ook van groter belang bij de keuze van het soort transport. Als het inkomen stijgt, neemt het aantal passagierskilometer van deze groep meer toe dan die van de zakelijke reiziger.

De brandstofprijselasticiteit ligt tussen $-0,1$ en $-0,4$: dit houdt in dat als de prijs van de brandstof met 10% stijgt, dan neemt de vraag naar brandstof met 1 tot 4% af (Geurs en Van Wee, 1997; Hof *et al.*, 2001).

Het verhogen van de kosten in de luchtvaartsector kan op diverse manieren bereikt worden. In de volgende paragrafen worden de volgende drie prijsmaatregelen behandeld:

- Heffingen;
- Subsidies;
- Verhandelbare emissierechten.

Heffingen verhogen direct de kosten (Lister *et al.*, 1999). Subsidies daarentegen verlagen de kosten: luchthavens en luchtvaartmaatschappijen kunnen geld ontvangen als ze emissiereducerende technieken invoeren (Geurs en Van Wee, 1997). Verhandelbare emissierechten proberen met behulp van marktwerking de emissies te reduceren.

3.2 Heffingen

Heffingen vormen een van de belangrijkste financieel-economische instrumenten, want ze zijn een directe weerspiegeling van het polluter-pays-principe (zie hoofdstuk 3) (Van der Bij *et al.*, 1994). Er bestaan zowel algemene heffingen zoals de belasting over de toegevoegde waarde (B.T.W.) als specifieke heffingen. In het laatste geval worden bezit of gebruik belast, bijvoorbeeld in de vorm van een accijns. (Wit en Van Gent, 1996)

In deze paragraaf wordt een aantal mogelijkheden besproken. Kosten bestaan uit een vast en een variabel deel. Vaste kosten zijn bijvoorbeeld de aankoop van nieuwe toestellen. Variabele kosten zijn, zoals de naam al aangeeft, afhankelijk van het aantal vliegtuigkilometers.

Kerosine-accijns

Wereldwijd wordt er op dit moment nauwelijks of geen accijns of BTW geheven op vliegtuigbrandstoffen. Het invoeren van een kerosine-accijns zorgt voor een verhoging van de variabele kosten en geeft een prikkel aan de luchtvaartsector om de brandstofefficiëntie te verhogen en indirect de emissies te reduceren. Ten tweede wordt een (deel van de) kerosine-accijns doorberekend naar de passagiers. De prijs van het ticket wordt verhoogd, wat leidt tot een vraaguitval. (Geurs en Van Wee, 1997; Lister *et al.*, 1999; RMB, 1996) Het voordeel van een kerosine-accijns ten opzichte van bijvoorbeeld regulering is dat de keuze van brandstofbesparende maatregelen aan de luchtvaartsector zelf wordt overgelaten, maar er wordt wel een incentive gegeven voor technologisch en operationele verbeteringen ter verhoging van de brandstofefficiëntie.

De enige voorwaarde is dat de invoering op Europees of internationaal niveau uitgevoerd moet worden, om ongewenste concurrentievervalsingen te voorkomen (RMB, 1996). Knelpunten voor Europese invoering zijn dat vliegtuigen zullen proberen buiten Europa te

tanken, waardoor de concurrentiepositie van Europa aangetast wordt (Bleijenberg en Wit, 1998). De extra buiten Europa gebunkerde brandstof heeft tot gevolg dat vliegtuigen tijdens vluchten naar Europa extra zwaar beladen zijn en daardoor een hoger energieverbruik hebben. Een ander bijkomend nadeel is dat internationale wetgeving de invoering van een brandstofheffing in de weg staat. Veel overeenkomsten tussen landen verbieden belasting op gebunkerde brandstof. Door aanpassingen van de geldende internationale regels kan deze heffing wel geïmplementeerd worden. (Bleijenberg en Wit, 1998)

De introductie van een accijnsheffing van €0,42 per liter (exclusief B.T.W.) op vluchten binnen de Europese Unie kan leiden tot een prijsstijging van 38% voor Europese vluchten (Bleijenberg en Moor, 1993). Uitgaande van een ticketprijselasticiteit⁴¹ van -0,1 voor de zakelijke reizigers en -1,0 voor de niet-zakelijke reiziger (uitgedrukt in het aantal passagiers) leidt dat tot een daling van respectievelijk 3,8 en 38% (Leurs *et al.*, 2000).

Als een brandstofheffing van \$ 0,20 (equivalent circa € 0,22) per liter brandstof op Europees niveau wordt ingevoerd, kan dat een energiebesparing van 20 à 35% in 2025 opleveren. De reductie wordt vooral bereikt door een verbetering van de technologie, een optimaler ontwerp van het vliegtuig en een daling in het aantal passagierskilometers. Ook kunnen het vlieggedrag en -route aangepast worden. Verder zou het luchtvaartmaatschappijen stimuleren de bezettingsgraad te vergroten en minder vervuilende vliegtuigen te gebruiken. (Bleijenberg en Wit, 1998; Leurs *et al.*, 2000) Als gevolg van de brandstofheffing stijgt de ticketprijs, want de luchtvaartmaatschappijen berekenen (een deel van) de heffing door aan de passagiers, waardoor ook de vraag naar luchttransport daalt.

LTO-heffing

De variabele kosten kunnen ook verhoogd worden door een heffing op de LTO-cyclus. Nederlandse luchthavens hebben, net als andere Europese vliegvelden, al start- en landingsgelden, wat inhoudt dat elk landend vliegtuig een heffing moet betalen aan de betreffende luchthaven. Het is mogelijk een extra heffing in te voeren. Omdat daardoor de kosten van het vliegverkeer stijgen, zal een daling in het vliegverkeer optreden. Een heffing van 25% op het landingstarief voor grote vliegtuigen (met meer dan 180 stoelen) leidt tot een daling van 2% in het aantal vliegbewegingen (bij deze prognose is geen rekening gehouden met een verschuiving naar kleinere vliegtuigen). (Bleijenberg en Wit, 1998; Geurs en Van Wee, 1997)

BTW op ticket

Het is ook mogelijk een belasting op het vliegticket te heffen. De luchtvaart is nu vrijgesteld van een BTW-heffing op internationale tickets, wat in overeenstemming is met de huidige

⁴¹ Er wordt bij deze berekening uitgegaan van de elasticiteit, gevonden in 'Bron 3' in Geurs en Van Wee (1997). De reden hiervoor is dat deze waarden ook gebruikt worden in PROLIN.

ICAO-regelgeving⁴². Een negatief gevolg van de invoering van BTW kan de verslechterde concurrentiepositie van de deelnemende landen zijn, met name landen aan de ‘buitenkant’ van het deelnemende gebied. In geval dat het op Europees niveau ingevoerd zou worden, zouden reizigers uit bijvoorbeeld Oostenrijk eerst naar Tsjechië kunnen reizen om daar vervolgens met een goedkoper vliegticket op het vliegtuig te stappen. (Bleijenberg en Wit, 1998)

Door het invoeren van een BTW-heffing worden vliegtickets 17,5% duurder⁴³, wat een daling van 9% in het aantal Europese passagiers en 6% in het totaal aantal passagiers tot gevolg heeft (Geurs en Van Wee, 1997). Door de reductie van de vraag dalen zowel het energieverbruik als de emissies. Onder de veronderstelling dat de gemiddelde vlucht lengte en de bezettingsgraden constant blijven, daalt het energiegebruik en de CO₂-emissies met 6 tot 12% (Bleijenberg en Wit, 1998; Geurs en Van Wee, 1997).

Emissieheffing

Een optie is het invoeren van een en-route heffing, gebaseerd op de hoeveelheid emissies tijdens de hele vlucht (Bleijenberg en Wit, 1998; Leurs *et al.*, 2000). Het voordeel is dat luchtvaartmaatschappijen (en -industrie) een directe prikkel krijgen om de emissies te verminderen, bijvoorbeeld door technologische verbeteringen aan de motor, operationele maatregelen of verhoging van de brandstoffefficiëntie. Een heffing op koolstofdioxide kan geïmplementeerd worden door een heffing op brandstof, omdat deze emissie direct gerelateerd is aan de brandstof(efficiëntie). Omdat directe meting van NO_x-emissies te kostbaar is, zou een NO_x-heffing gebaseerd moeten zijn op motorkarakteristieken. Dit is mogelijk omdat er een beperkt aantal motoren in gebruik is, waarvan de emissies met een redelijke nauwkeurigheid kunnen worden vastgesteld. (Bleijenberg en Wit, 1998; RMB, 1996)

Knelpunt bij een dergelijke heffing is dat de invoering internationaal moet plaatsvinden om de Europese concurrentiepositie te behouden. Het CE in Delft is medio 2002 bezig met een onderzoek, waar uit de conceptresultaten blijkt dat de invoer van een regionale emissieheffing mogelijk erwijs echter geen significante economische verstoringen zou veroorzaken.⁴⁴

⁴² De ICAO-council Resolution van 14 december 1993 gaat over belastingen met betrekking tot de verkoop of gebruik van internationaal luchttransport. In lid IV staat ‘Each Contracting State shall reduce to the fullest practicable extent and make plans to eliminate as soon as its economic conditions permit all forms of taxation on the sale or use of international transport by air (...)’ (RMB, 1996).

⁴³ Er is in (Geurs en Van Wee, 1997) nog sprake van het oude BTW-tarief. Tegenwoordig is het tarief van de BTW gestegen naar 19%.

⁴⁴ Wit, R.C.N en Dings, J.M.W. Dings (2002), Economic incentives to mitigate greenhousegas emissions from air transport in Europe, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft (rapport in voorbereiding).

Ook wordt bij de motorkarakteristieken uitgegaan van een standaardvlucht, zodat aanpassingen in het vlieggedrag geen effect hebben op de hoogte van de heffing. Als laatste bestaat er geen internationaal geaccepteerd methode voor de berekening van de kruisvluchtemissies, waardoor er nauwelijks of geen draagvlak gecreëerd kan worden voor een heffing op de emissies van de gehele vlucht. (Bleijenberg en Wit, 1998; Leurs *et al.*, 2000)

Overige heffingen

Er zijn nog andere prijsmaatregelen die kort genoemd worden:

- Heffing op lege vliegtuigstoelen om een verbetering van de bezettingsgraad te stimuleren (Lister *et al.*, 1999);
- Heffing op de aankoop prijs van nieuwe vliegtuigen, waarbij de heffing op vliegtuigen met een laag brandstofverbruik of met lage uitstoot minder groot is dan op vervuilende vliegtuigen (Geurs en Van Wee, 1997);
- Jaarlijkse heffing op (het bezit van) vliegtuigen (Geurs en Van Wee, 1997);
- Vluchtafstand afhankelijke heffing om het aantal vluchten die korter zijn dan een minimum afstand te reduceren (Geurs en Van Wee, 1997; Lister *et al.*, 1999).

3.3 Subsidies

De subsidie is een tegenhanger van de heffing. In dit geval wordt milieuvriendelijk gedrag beloond en wordt de vervuiler financieel gestimuleerd om zijn gedrag te veranderen (Van der Bij *et al.*, 1994; Lister *et al.*, 1999). Van der Bij *et al.* (1994) definieert subsidies als volgt: ‘uitgave van de overheid die rechtstreeks samenhangt met bepaalde activiteiten van het gesubsidieerde subject en waarmee wordt beoogd de hoeveelheid en de kwaliteit van de activiteiten te beïnvloeden’.

Er bestaan twee soorten subsidies (Van der Bij *et al.*, 1994). Als eerste bestaan er ‘schone’ subsidies. Deze subsidies kunnen worden beschouwd als een premie voor het schone alternatief. Door het gebruik van reeds bestaande vliegtuigen met ‘schone’ motoren die relatief weinig emitteren te stimuleren, neemt de vervuiling af (Geurs en Van Wee, 1997).

De tweede categorie van subsidies is R&D-subsidies. Ze zijn gericht op het stimuleren van innovatie en toepassingen van nieuwe milieuvriendelijke technieken. Een voorbeeld is de stimulans van de technische ontwikkeling van schone vliegtuigen in de onderzoeksfase. (Van der Bij *et al.*, 1994; RMB, 1996). De belangrijkste beperkingen die aan deze subsidie kleven, zijn van Europees-rechtelijke aard. Subsidies vallen namelijk onder het begrip ‘steun’ en zijn op grond van Europese wetgeving niet toelaatbaar. Echter, een aantal afwijkingen zijn hierin mogelijk, zodat een R&D-subsidie wel verschaft kan worden. (RMB, 1996)

Er is geen literatuur aangetroffen over de mogelijke effecten van subsidies.

3.4 Verhandelbare emissierechten

Bij een systeem met verhandelbare emissierechten wordt een emissieplafond vastgesteld, waarna alle landen volgens een bepaalde verdeelsleutel emissierechten krijgen toebedeeld. Het doel van dit systeem is om met behulp van de marktwerking emissiereductie te stimuleren. Met deze rechten kan namelijk gehandeld worden. Mocht een land meer uitstoten dan de voor haar geldende norm, dan moet het emissierechten bijkopen van een andere land dat minder dan de norm uitstoot. (Lister *et al.*, 1999; RMB, 1996) Er moet echter eerst wel een aantal administratieve problemen en complicaties met betrekking tot de verdeling worden opgelost. Want aan wie de emissierechten moeten worden toegekend en hoe de initiële verdeling moet zijn, is nog onbekend. (RMB, 1996)

4 Technologische maatregelen

4.1 Inleiding

Tegenwoordig zijn subsonische vliegtuigen circa 70% zuiniger per passagierskilometer dan de vliegtuigen van 40 jaar geleden, en de ontwikkeling zet door (Lister *et al.*, 1999). Er wordt geschat dat door technologische aanpassingen het brandstofverbruik per passagierskilometer ten opzichte van 1990 in 2050 40 tot 60% verbeterd kan zijn (AEF, 2001; Wit, 1996). Ook is geprognoseerd dat een 50% afname in NO_x-emissies ten opzichte van de huidige norm in 2010 mogelijk is, door het gebruik van nieuwe motoren die nog in ontwikkeling zijn (Brok, 2000).

De gemiddelde levensduur van een vliegtuigmotor is tien jaar, terwijl een vliegtuig na 25 tot 35 jaar vervangen wordt (Beck *et al.*, 1990; Den Boeft *et al.*, 1993; Hoogenstrijd, 1993; Lister *et al.*, 1999). Door deze relatief lange levensduur is de invoering van nieuwe technologie een langzaam proces. Ook de ontwikkelingstijd van nieuwe technologieën is van belang. Gemiddeld duurt het 15 tot 20 jaar voor een nieuwe technologie in de markt geïntegreerd is (Dobbie en Eran-Tasker, 2001; Lister *et al.*, 1999). Deze langzame marktintroductie zorgt ervoor dat met technologische maatregelen de emissies alleen op lange termijn verminderd kunnen worden.

Technologische maatregelen kunnen betrekking hebben op het ontwerp van de vliegtuigmotor, op het vliegtuigontwerp of op de gebruikte vliegtuigbrandstof (Tweede Kamer, 1995). In de volgende paragrafen worden daarom de volgende drie technologische mogelijkheden besproken:

- Nieuw vliegtuigontwerp;
- Ontwikkeling nieuwe motor en/of verbrandingsproces;
- Alternatieve brandstoffen.

Met name de luchtvaartindustrie speelt bij deze mogelijkheden een grote rol: zij bepaalt namelijk het aanbod van nieuwe technologieën. De vraag naar deze vernieuwing wordt uitgeoefend door zowel de luchtvaartmaatschappijen als de overheid.

4.2 Nieuw vliegtuigontwerp of -concept

Het ontwerp van het vliegtuig heeft grote invloed op het energiegebruik en daarmee op de emissies van een vliegtuig. Om het energiegebruik te verminderen kan het huidige vliegtuigontwerp aangepast worden of een geheel nieuw ontwerp op de markt worden gebracht (Tweede Kamer, 1995). Beide mogelijkheden komen aan bod.

Veranderingen aan het huidige ontwerp

Aan het huidige vliegtuig kunnen diverse eigenschappen aangepast worden. De huidige verkeersvliegtuigen voor lange afstand hebben twee tot vier motoren. Omdat motoren in de loop van de tijd zowel krachtiger als betrouwbaarder zijn geworden, is het mogelijk om in de toekomst vliegtuigen met 2 motoren uit te rusten. De luchtweerstand neemt daardoor af, waardoor het brandstofverbruik daalt. (Tweede Kamer, 1995) Als tweede punt is het ook mogelijk om de vliegtuigen groter te maken, zodat per vlucht meer passagiers vervoerd kunnen worden. Het brandstofverbruik per passagierskilometer of zitplaats kan hierdoor dalen. (Hoogenstrijd, 1993; Peeters, 1997; SBSTA, 1996a) En ten derde is het gewicht van de huidige motoren bij subsonische vliegtuigen vaak 10 tot 15% van het leeggewicht van een vliegtuig (Lister *et al.*, 1999). Een gewichtsreductie van de motoren kan leiden tot een verlaging van het brandstofverbruik (Hoogenstrijd, 1993).

Ook kunnen de passagiersvoorzieningen verminderd worden. Door het reduceren van bijvoorbeeld het passagiersvermaak aan boord (zoals afspelen van speelfilm tijdens vlucht) daalt het leeggewicht van het vliegtuig en daardoor het brandstofverbruik⁴⁵. Deze optie zou mogelijkwjs op korte afstanden kunnen worden toegepast, mits het door de passagiers wordt geaccepteerd. Het effect van deze gewichtsreductie op het brandstofverbruik wordt geschat op 1%. (Lister *et al.*, 1999)

⁴⁵ Deze gewichtsverbetering vindt echter nu ook al plaats. Door de huidige technologische ontwikkelingen wegen bijvoorbeeld de audiovisuele apparaten aan boord minder dan 10 jaar geleden (Lister *et al.*, 1999).

Een andere optie om het huidige ontwerp te wijzigen is het veranderen van het materiaal waaruit het vliegtuig geconstrueerd is. Dit kan het leeggewicht van het vliegtuig verlagen, terwijl de structurele sterkte gelijk blijft of zelfs verbeterd wordt. Niet alleen het gewicht van het vliegtuig zelf neemt af, maar ook dat van de motoren; een lichter vliegtuig heeft kleinere motoren nodig waardoor het totaal gewicht eveneens daalt. Er is op deze manier minder brandstof nodig tijdens een vlucht, waardoor ook minder emissies worden uitgestoten. (Dings *et al.*, 1997; Hiraoka, 1993; Kalivoda en Fitzgerald, 1999; SBSTA, 1996a)

Het gebruik van lichtere materialen zoals composietmateriaal (een met koolstof- en/of glasvezels versterkte kunststof) kan een gewichtsreductie van 30% opleveren, mits een vliegtuig uit minimaal 80% composietmateriaal geconstrueerd wordt (Kalivoda *et al.*, 1998). De huidige toestellen bestaan voor 97% uit metaal plus nog een paar kleine onderdelen uit composietmateriaal, zoals vloerpanelen, staartvlakken en vleugelkleppen (De Leeuw, 1997; NIVR, 2000). De A3XX, de Super Jumbo van Airbus die op dit moment in ontwikkeling is, bestaat voor een groter deel uit composietmateriaal: het volledige staartvlak en grote delen van de vleugels bestaan uit dit materiaal. De verwachting is dat in de toekomst ook primaire constructies zoals de complete vleugels of de rompen van kleinere vliegtuigen van composiet gemaakt kunnen worden. Op langere termijn wordt zelfs gedacht aan delen van het onderstel, zware beslagen en klepuithouders. (De Leeuw, 1997; NIVR, 2000)

De Technische Universiteit Delft heeft een nieuw materiaal ontwikkeld, genaamd Glare. Dit is opgebouwd uit afwisselend laagjes aluminium en met glasvezel versterkte kunststof. Als de bovenhelft van de A3XX met Glare geproduceerd wordt, levert dit een winst van 1,5 ton op een totaal gewicht van circa 580 ton op ofwel een gewichtsbesparing van 0,26%. (De Leeuw, 1997)

Als laatste optie kan de aërodynamica van het vliegtuig verbeterd worden. Aanpassingen aan het ontwerp van het vliegtuig kunnen een verbeterde stroomlijn opleveren, zodat de aërodynamische luchtweerstand vermindert (Dings *et al.*, 1997; SBSTA, 1996a). Een voorbeeld van een dergelijke aanpassing zijn winglets, die voor meer aërodynamisch gevormde vleugels zorgen. Dit zijn omhoogstaande uiteinden aan de vleugels, die voor de additionele lift zorgen maar niet bijdragen aan de luchtweerstand zoals conventionele vleugels (Kalivoda *et al.*, 1998; Lister *et al.*, 1999). Verder kunnen op de vleugels riblets worden aangebracht: kleine groeven in de richting van de luchtstroom (Lister *et al.*, 1999).

De grootste uitdaging op aërodynamisch gebied ligt bij Laminar Flow Control (LFC), ofwel controle over een laminaire grenslaag door grenslaagafzuiging. Het idee is om door middel van kleine gaatjes in het vleugeloppervlak een turbulente luchtlaag (grenslaag) weg te zuigen. Het is belangrijk uit aërodynamisch oogpunt om de stroming vloeiend over de vleugel huid te laten lopen, maar in de praktijk ontstaat bij de vleugelvoorrand een turbulente laag die de luchtweerstand van het vliegtuig vergroot. Door deze laag weg te zuigen wordt de stroming over het vleugeloppervlak gelijkmatiger en blijft de lucht als het ware 'plakken' aan de

vleugel. (Kalivoda *et al.*, 1998; De Leeuw, 1997; Lister *et al.*, 1999) De weerstand vermindert, hetgeen een brandstofbesparing kan opleveren van 10 tot 40 procent (Hoogenstrijd, 1993; Leijen, 1994). Een praktisch probleem is het open houden van de gaatjes in de vleugel. Insecten die tegen de vleugel te pletter staan, verstopen de gaatjes. Er zijn echter al technieken bedacht om met behulp van speciale vloeistoffen de gaatjes open te houden. Ondanks diverse experimenten wordt LFC (nog) niet bij verkeersvliegtuigen toegepast. (De Leeuw, 1997) Een belangrijke afweging bij de ontwikkeling van LFC is het gewicht van een dergelijk systeem en de daarvoor benodigde energievoorziening. Deze moet lager zijn dan de energiewinst door besparingen in de luchtweerstand, die het systeem tijdens het gebruik oplevert, om het systeem rendabel te maken (Lister *et al.*, 1999).

Aërodynamische efficiëntieverbeteringen zoals een hogere draagkracht/luchtweerstand verhouding, nieuwe materialen en een verbetering in het controlesysteem van het vliegtuig⁴⁶ kunnen gezamenlijk een verbetering in de brandstofefficiëntie opleveren van ongeveer 10% in vergelijking met de huidige vliegtuigen (Lister *et al.*, 1999).

Nieuwe vliegtuigconcepten

Verschillende vliegtuigfabrikanten zijn bezig met het ontwikkelen van nieuwe vliegtuigconcepten. Elk speelt op zijn eigen manier op de markt in.

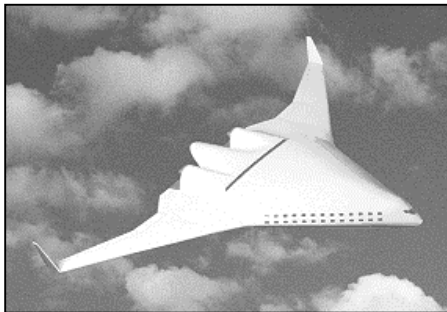
Boeing werkt op dit moment aan een vliegtuig met een hogere snelheid en een groter bereik, genaamd de Sonic Cruiser (zie figuur 1). In maart 2001 heeft Boeing het concept voor het eerst getoond. Het vliegtuig heeft een maximale snelheid van Mach 0.98 (98% van de geluidssnelheid). Het voordeel van net onder de geluidssnelheid vliegen is dat het vliegtuig ook boven land met deze snelheid mag vliegen. Een supersonisch vliegtuig zoals de Concorde (zie verderop in deze paragraaf) mag pas boven zee naar snelheden boven de Mach 1 vanwege de harde knal, die tijdens het doorbreken van de geluidsbarrière wordt veroorzaakt (Brandsma, 2001). Het resultaat is een verkorte reistijd: Londen naar New York is met de Sonic Cruiser een uur korter vliegen, terwijl de vlucht van Singapore naar Los Angeles 2 ½ uur korter duurt (Boeing, 2002b).



Figuur 1 De Sonic Cruiser (Boeing, 2002b)

⁴⁶ In plaats van mechanische, hydraulische en elektrische systemen voor het besturen van het vliegtuig wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van nieuwe lichtere technologieën als fly-by-light en fly-by-wire (Lister *et al.*, 1999).

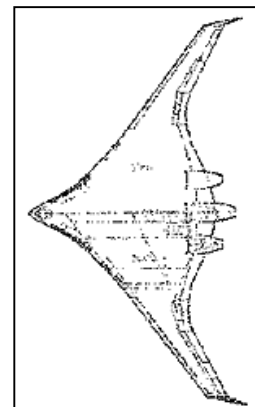
Het bereik van het vliegtuig is vergroot ten opzichte van de huidige vliegtuigen en ligt tussen de 11.000 en 13.900 kilometer. Het aantal passagiers dat met dit vliegtuig vervoerd kan worden, is 200 tot 250. De kruisvluchthoogte van de Sonic Cruiser is minimaal 13 kilometer, hetgeen hoger is dan van andere vliegtuigen. Het voordeel hiervan is, zo claimt Boeing, dat langzamere vliegtuigen de Sonic Cruiser niet vertragen en de vlucht comfortabeler zal verlopen voor passagiers (Boeing, 2001a). Volgens Boeing zal het brandstofverbruik van dit type vergelijkbaar zijn met dat van de zuinigste vliegtuigen van de huidige vloot. Daarnaast verwacht Boeing dat het nieuwe concept lagere NO_x-emissies heeft dan de huidige vloot en schoner is dan de huidige standaarden voorschrijven. De eerste fase met testen in de windtunnel is achter de rug. Het toestel moet tussen 2006 en 2008 in gebruik worden genomen. (Boeing, 2001a; Boeing, 2001b; Boeing, 2002a; Brandsma, 2001; Reformatorisch Dagblad, 2001)



Figuur 2 De Blended Wing Body in vogelvlucht (Cranfield, 1999)

Een geheel ander concept is de Blended Wing Body (BWB), een soort ‘flying wing’ (zie figuur 2 en 3). Het concept is bedacht door de McDonnell Douglas Corporation. Het idee erachter is ‘het maximaliseren van de efficiëntie door het integreren van de motoren, vleugels en body in één dragend oppervlak.’ (Kalivoda *et al.*, 1998) In dit vliegtuig passen circa 800 passagiers. De kruissnelheid ligt rond de 900 kilometer per uur. De verwachting is dat zowel de brandstof als de emissies per passagierskilometer met 33% gereduceerd worden. Andere voordelen zijn de aërodynamische uitvoering van het vliegtuig, de lage(re) operationele kosten en het verminderde geluidsniveau. Onzekerheden liggen nog bij de controleerbaarheid van dit toestel. Begin 2002 wordt begonnen met testvluchten. (Dings *et al.*, 2000, Kalivoda *et al.*, 1998)

Het eerste BWB-concept zal waarschijnlijk pas na 2020 in gebruik worden genomen. Op dit moment liggen de uitdagingen bij de structurele sterkte van de ovale drukcabine, de integratie van de voortstuwing en vliegtuigcasco (i.e. de romp en vleugels, maar zonder motoren), veilige nooduitgangen op land en boven water voor passagiers, de acceptatie van het nieuwe concept door de passagiers en de compatibiliteit van de luchthavens. (Lister *et al.*, 1999)



Figuur 3 Schets van de Blended Wing Body, van bovenaf gezien (Lister et al., 1999)

De laatste categorie in ‘nieuwe concepten’ is het supersonisch transport (SST). Eigenlijk is deze optie geen nieuw concept, de Concorde (zie figuur 4) vliegt al sinds begin jaren 70 (ThaiTechnics, 2002). Toch is de ontwikkeling van een nieuwe generatie supersonische vliegtuigen wel een toekomstbeeld. Zowel in Europa als de Verenigde Staten worden de mogelijkheden bestudeerd. De verwachting was dat in de eenentwintigste eeuw een potentiële



Figuur 4 De Concorde (ThaiTechnics, 2002)

markt zou zijn voor 500 tot 1000 SST, maar door het ongeluk met de Concorde in Frankrijk in juli 2000 is de markt veranderd. Na een stop van een jaar zijn de vluchten met de Concorde in augustus 2001 weer hervat. (Hoogenstrijd, 1993; Tweede Kamer, 1995)

De ontwikkeling van een nieuwe vloot hangt af van de mogelijke internationale samenwerking, de milieurandvoorwaarden, de technische haalbaarheid van een nieuw SST vliegtuig en de acceptatie van de passagiers. De huidige Concorde heeft een gemiddelde levensduur van 10 à 15 jaar. Er worden voor een vlucht hoge tarieven berekend, maar de tijdswinst is groot: de vlucht over de Atlantische oceaan duurt met een normaal vliegtuig ongeveer 9 uur, maar met de Concorde 3 uur en 45 minuten (ThaiTechnics, 2002; Vliegwinkel, 2002).

Het brandstofverbruik en de emissies stijgen wel als de SST vloot uitgebreid wordt. De supersonische snelheid is tot op heden alleen te bereiken met een hoog motorvermogen en een hoog brandstofverbruik. Ter vergelijking: op een kruisvlucht voor de lange afstand verbruikt de Concorde totaal drie keer zoveel brandstof als een Boeing 747. De emissiefactor voor NO_x ligt voor het supersonische vliegtuig minimaal 2 keer zo hoog als de subsonische toestellen. (Hoogenstrijd, 1993; Lister *et al.*, 1999; Tweede Kamer, 1995)

4.3 Ontwikkeling van nieuwe motor en/of verbrandingsproces

De verbetering van de motor of het verbrandingsproces kan plaatsvinden om twee redenen:

- Reductie van het brandstofverbruik;
- Verlaging van de NO_x-emissies.

Beide opties worden besproken.

Brandstofverbruik

In de loop van de jaren is het brandstofverbruik per stoelkilometer aanzienlijk gedaald (Peeters, 1997). Airbus verwacht dat met de thans bekende technieken de motorefficiëntie van de huidige vloot nog 30 tot 40 procent beter kan (De Leeuw, 1997). Zuiniger motoren zijn in aantocht; een indirect effect hiervan is dat minder benodigde brandstof voor een lager gewicht zorgt of dat het bereik van het vliegtuig vergroot wordt (Dings *et al.*, 1997; Hoogenstrijd, 1993).

Een andere optie voor reductie van het brandstofverbruik is een verhoging van de temperatuur van de verbrandingsgassen. Er zijn speciale technieken nodig om de metalen bestanddelen tegen de hitte bestand te maken, bijvoorbeeld door toepassing van isolerende lagen en geavanceerde koeltechnieken voor rotorbladen. Er is echter een nadeel: door de hogere temperatuur nemen de NO_x-emissies toe. Om deze te matigen, is een speciaal

ontworpen verbrandingskamer nodig (hier wordt verder op ingegaan bij de vermindering van de NO_x-emissies). (Hoogenstrijdt, 1993; NIVR, 2000; Peeters, 1997)

Een derde mogelijkheid is het verhogen van de omloopverhouding: meer lucht langs de motor laten stromen. Dit soort motoren heeft een lager brandstofverbruik (NIVR, 2000). Door het inzetten van een propfan (de combinatie van een gasturbine met een propeller) wordt een verhoogde omloopverhouding gecreëerd. Deze voortstuwing is erg efficiënt en verbruikt 35% minder brandstof dan de huidige turboprop-motoren. Gecombineerd zouden verbeteringen aan de motoren kunnen leiden tot een brandstofreductie van 50% ten opzichte van de gangbare motoren. Een ander gevolg is dat door de lage drukverhouding de NO_x-emissies dalen. (Dings *et al.*, 2000; Hoogenstrijdt, 1993; NIVR, 2000)

NO_x-emissies

De emissies van stikstofoxiden zijn pas sinds eind jaren tachtig een aandachtspunt in het motorontwerp, vooral vanwege de effecten op het versterkte broeikas effect en op ozonafbraak in de stratosfeer (zie §2.6) (Peeters, 1997).

De normstelling met betrekking tot NO_x bestaat uit een formule waarbij de norm stijgt met toenemende drukverhouding over de verbrandingskamer. Hoe groter de drukverhouding is, des te hoger is de NO_x-emissie tijdens de LTO-cyclus (zie bijlage 3). Het gevolg van deze eis is dat de laatste veertig jaar de emissies van NO_x per kilogram brandstof zijn toegenomen. Door een sterke afname van het brandstofverbruik per stoelkilometer zijn de emissies per stoelkilometer desalniettemin gedaald. Hogere temperaturen en drukken in de verbrandingskamer van de motoren als gevolg van een stijgend brandstofrendement, hebben geleid tot een verhoogde vorming van NO_x. Een hoger rendement hoeft echter niet altijd ten koste te gaan van de NO_x-emissies per stoelkilometer, omdat door een verbeterde efficiëntie een verhoogd rendement van vliegtuig en motoren de hogere NO_x-emissies per kilogram brandstof of kN stuwkracht kan compenseren (Peeters, 1997).

De trade-off tussen brandstof/CO₂ en NO_x zorgt bij technologische verbeteringen aan de motor en/of verbrandingsproces voor tegenstrijdige oplossingen:

- Bij laag vermogen en lage brandstof/lucht-verhouding moet een oplossing bedacht worden om de HC- en CO-emissies laag te houden;
- Bij hoog vermogen en hoge brandstof/lucht-verhouding moeten juist de NO_x-emissies zo laag mogelijk worden gehouden.

Er moet gezocht worden naar een tussenoplossing, waarbij alle emissies dalen. Om lagere NO_x-emissies te bereiken is een herontwerp van de verbrandingskamer nodig. Nabehandeling met katalysatoren, zoals bij personenauto's, is niet mogelijk. Er ontstaan dan mogelijk moeilijkheden wat betreft betrouwbaarheid en veiligheid. Ook ontbreekt het marktmechanisme voor lagere NO_x-emissies. De enige drijfveer voor fabrikanten om de emissies te reduceren zijn de emissienormen. Daarom probeert ICAO de negatieve

ontwikkeling van de emissies tegen te gaan door de emissienormen steeds verder aan te scherpen, maar in de praktijk blijkt dat de gestelde normen juist de technologische vooruitgang volgen in plaats van omgekeerd. (Brok, 2000; Hoogenstrijd, 1993; Peeters, 1997; Tweede Kamer, 1995)

In 2010 kan 50%-reductie in NO_x-emissies ten opzichte van de huidige norm gehaald worden door gebruik van nieuwe motoren, die op dit moment in ontwikkeling zijn (Brok, 2000). Een reductie van 70% op lange termijn wordt ook haalbaar geacht (Brok, 2000; Slanina, 1992). Motoren met een lagere NO_x-emissies zijn in ontwikkeling, de verwachte introductiedatum ligt rond 2005 (Bahr, 1996).

Het aanpassen van het verbrandingsproces kan emissieverlagende effecten teweegbrengen. Een verbeterde verbrander kan bijvoorbeeld zowel NO_x als CO₂ verlagen (Lister *et al.*, 1999). Daarnaast kunnen speciale verbrandingstechnieken de emissies terugdringen: voormenging, voorverdamping en getrapte verbranding (Van Drimmelen, 1995; Peeters, 1997; Tweede Kamer, 1995). Om veiligheidsredenen (een kans op een onstabiele vlam) en gewichtseisen en vanwege de kosten bevinden deze nieuwe technieken zich nog grotendeels in de ontwikkelingsfase (Van Drimmelen, 1995).

Een voorbeeld van een getrapte verbranding is de Dual Annular Combustor. Dit is een systeem, dat bestaat uit twee gescheiden verbrandingskamers. De eerste fase zorgt voor een goede operationele prestatie die nodig is bij een laag vermogen, terwijl de hoofdfase voor lage NO_x-emissies bij hoog vermogen zorgt. Lage NO_x-emissies worden bereikt door een arm brandstof/luchtmengsel, die de temperatuur van de vlam laag houdt en de vlamfrontsnelheid hoog. Hierdoor wordt de tijd om NO_x te kunnen vormen verlaagd. Dit verbrandingsproces vereist echter een complexer controlesysteem dan het huidige proces. Deze techniek kan leiden tot circa 40% lagere NO_x-uitstoot per eenheid geleverde stuwkracht. (Van Drimmelen, 1995; Kalivoda *et al.*, 1998; Lister *et al.*, 1999)

Als laatste worden er nog twee andere nieuwe verbrandingsprocessen besproken die de NO_x-emissies kunnen reduceren. De verwachting is dat deze nieuwe concepten rond 2010 gaan worden toegepast in vliegtuigmotoren. (Brok, 2000; Dings *et al.*, 2000; Kalivoda *et al.*, 1998; Lister *et al.*, 1999)

- *Rich Burn, Quick Quench, Lean Burn*; de verbeterde verbrander verbrandt kerosine efficiënter en schoner waardoor de HC-, CO- en NO_x-emissies verminderen. Dit wordt bereikt door het gebruik van drie verschillende kamers in het verbrandingsproces: een verbrandingskamer voor een rijk brandstof/luchtmengsel, een kamer waarin het mengsel omgezet wordt van rijk naar arm en als laatste een soort herverbrandingskamer waarin het arme mengsel opnieuw verbrand wordt. Het voormixen vindt al plaats in een gedeelte buiten de verbrandingskamer;
- *Lean Premix Prevaporized*; een veelbelovende techniek die mogelijk ook toepasbaar is in de verbrandingskamer van supersonische vliegtuigen. Bij deze methode is het mogelijk

om bij elk vermogen een arm brandstof/luchtmengsel te creëren (in plaats van alleen bij laag vermogen). Dit vereist een zeer homogeen mengsel, wat bereikt kan worden door voormixen en voorverdampen. Het mixen kan zowel in als buiten de verbrandingskamer plaatsvinden. Beide processen dragen risico's met zich mee. Bij binnen in de kamer mixen wordt het risico genomen dat de ontsteking plaatsvindt voordat het mixen gereed is. Bij het mixen buiten de verbrandingskamer wordt gereskeerd dat de ontsteking in de 'verkeerde' ruimte gebeurt.

4.4 Alternatieve brandstoffen

Er zijn verschillende mogelijkheden als alternatief voor kerosine. Voorbeelden zijn waterstof, methaan en aardgas. Alle opties worden in deze paragraaf besproken. Alternatieve brandstoffen zijn (nog) niet haalbaar op korte termijn, vanwege distributie- en opslagproblemen (AEF, 2001; Hoogenstrijd, 1993). Voorwaarden waaraan de brandstoffen moeten voldoen om gebruikt te kunnen worden in de huidige motoren, zijn (Lister *et al.*, 1999):

- Combineerbaar zijn met de huidige vliegtuigen;
- Voldoende energiedichtheid hebben;
- Combineerbaar zijn met alle materialen gebruikt in het brandstofsysteem van de motor;
- Voldoende smeringcapaciteit bezitten om te garanderen dat de huidige standaarden van veiligheidsonderdelen (bijvoorbeeld in de brandstofpompen) niet in gevaar worden gebracht.

Waterstof

De eerste mogelijkheid voor een alternatief voor kerosine is waterstof. Het Duitse bedrijf Deutsche Aerospace en het Russische bedrijf Tupolev hebben een samenwerkingsverband opgesteld, dat bekend is onder de naam Cryoplane. Het bestudeert de mogelijkheden van een vliegtuig dat gebruik maakt van vloeibare waterstof. (Tweede Kamer, 1995)

Waterstof is volgens Kalivoda en Fitzgerald (1999) het meest belovende alternatief, maar de ontwikkeling van deze brandstof heeft nog een lange weg te gaan. De redenen zijn onder andere onduidelijke veiligheidsaspecten en de hoge ontwikkelingskosten van nieuwe vliegtuigen met voor waterstof geschikte motoren en brandstoftanks. Het is mogelijk dat de introductie nog 50 jaar duurt. (Kalivoda en Fitzgerald, 1999; Slanina, 1992; Tweede Kamer, 1995)

Waterstof kan gewonnen worden uit de splitsing van watermoleculen (De Leeuw, 1997). Het is een hernieuwbare bron, die drie keer zoveel energie per kilogram bevat als kerosine. Er zijn wel hoge productiekosten aan waterstof verbonden, omdat de brandstof niet in de natuur beschikbaar is. Het kan echter wel geproduceerd worden met schone energiebronnen zoals hydro-elektriciteit of zonne-energie. (Kalivoda *et al.*, 1998) Bij een waterstofmotor wordt gebruik gemaakt van de energie die vrijkomt bij de verbranding van waterstof met zuurstof (uit de lucht). In theorie komt bij dit proces alleen water (H₂O) vrij, maar de hoeveelheid

bedraagt ongeveer het drievoudige van die van de huidige brandstoffen. In de troposfeer ontstaan hierdoor meer condensstrepen, die bijdragen aan wolkvorming (zie §2.6). Omdat de aangezogen buitenlucht voor 80% uit stikstof bestaat, leidt dit verbrandingsproces ook tot NO_x-emissies. De hoeveelheid NO_x die vrijkomt is lager dan bij kerosine, omdat het verbrandingsproces bij een lagere temperatuur plaatsvindt. (De Leeuw, 1997; Dings *et al.*, 2000; Tweede Kamer, 1995)

Het gebruik van waterstof vereist zowel een nieuw vliegtuigontwerp als een nieuwe aanvoerinfrastructuur in het vliegtuig (Lister *et al.*, 1999). De huidige gasturbines zijn niet ontworpen om te opereren met alternatieve brandstoffen: de brandstofsysteem kunnen de brandstof niet aan. Daarnaast kan de waterstof niet opgeslagen worden in de vleugel, maar zijn aparte brandstoftanks nodig. Omdat waterstof weliswaar een lager gewicht heeft, maar een groter volume per eenheid energie (factor 4), moeten de opslagruimten ook groter worden dan in de huidige toestellen. (Dings *et al.*, 2000; Hoogenstrijd, 1993; Lister *et al.*, 1999)

Methaan

Een tweede optie is methaan ofwel aardgas. De CO₂-emissies liggen per megajoule brandstof circa 25 procent lager dan kerosine door een lager koolstofgehalte. Ook de emissies van NO_x, CO en HC liggen meer dan 50% onder het niveau van kerosine. Er zijn echter wel voorwaarden verbonden aan de introductie van methaan op de markt (Slanina, 1992). Er moet deels nog een infrastructuur speciaal voor (vloeibaar) aardgas aangelegd worden. Vliegtuigmotorproducenten moeten geschikte motoren op de markt brengen, de opslagruimte voor de brandstof moet 50% groter en de veiligheid van het gebruik van methaan moet worden verzekerd (Dings *et al.*, 2000). Slanina (1992) verwacht dat in Nederland geen of slechts een beperkte introductie van methaan plaatsvindt.

Overig

Kernenergie is vanwege de veiligheid geen optie, terwijl elektrische voortstuwing te weinig energie levert. Ethanol en methanol zijn wel vernieuwbare bronnen, maar vanwege het lage warmtegehalte zijn ze onpraktisch als alternatief. (Kalivoda *et al.*, 1998; Lister *et al.*, 1999)

5 Operationele maatregelen

5.1 Algemeen

Deze maatregelen hebben betrekking op het gebruik van het vliegtuig. Lister *et al.* (1999) schat in dat in de komende 20 jaar door verbeteringen in de operationele procedures het brandstofverbruik met 8 tot 18% kan verminderen, waarvan het merendeel (6 tot 12%) voor rekening van de luchtverkeersleiding komt. (Lister *et al.*, 1999)

Zowel de luchtvaartmaatschappijen als de organisaties die luchtverwante activiteiten uitvoeren spelen bij de operationele maatregelen een rol, maar ook de overheid is betrokken.

De luchtverkeersleiding bijvoorbeeld kan proberen haar werk efficiënter uit te voeren, de overheid kan hierbij een stimulerende rol hebben. Hetzelfde geldt voor luchtvaartmaatschappijen. Zij kunnen de operationele procedures wijzigen, de overheid speelt echter een belangrijke rol bij het stimuleren daarvan.

5.2 Het veranderen van de kruissnelheid

Over het wijzigen van de kruissnelheid zijn de meningen verdeeld: zowel de snelheid verlagen als verhogen heeft gunstige gevolgen volgens de literatuur.

Een verlaging van de kruissnelheid is gunstig voor het brandstofverbruik (SBSTA, 1996a; Sondorp, 1992). De snelheid verlagen naar 750 kilometer per uur bespaart op een afstand van 1000 kilometer⁴⁷ circa 12% brandstof (Sondorp, 1992).

In Lee *et al.* (1996) heeft onderzoek echter uitgewezen dat het vliegen met een snelheid van Mach 0.85 (de snelheid van de huidige vloot) de laagste milieubelasting oplevert. Deze snelheid, ook wel de zogenaamde Maximum Range Speed genoemd levert bij een gegeven vliegtuigtype, gewicht en vlieghoogte het laagste brandstofverbruik per kilometer. Een afwijking van deze snelheid resulteert in een hoger brandstofverbruik per gevlogen kilometer. Veranderen van de kruissnelheid is dus geen optie, tenzij het vliegtuigontwerp aangepast wordt aan de nieuwe snelheid. (Fransen en Peper, 1993; Tweede Kamer, 1995)

5.3 Verlagen van de kruisvluchthoogte

De optimale vlieghoogte wat betreft energiegebruik wordt bepaald door tal van factoren, onder andere door atmosferische condities en het gewicht van het vliegtuig. Kort na de start weegt een vliegtuig zwaar door een volle brandstoftank en ligt de optimale hoogte onder de tropopauze (zie §2.3.3). Gedurende de vlucht wordt de tank leger en neemt de optimale vlieghoogte toe. Een verlaging van de kruisvluchthoogte, wat in discussies soms als een oplossing wordt aangedragen, heeft tot gevolg dat een deel van de vloot gedwongen wordt lager te vliegen dan hun optimale vlieghoogte. Dit zal leiden tot een toename in het brandstofverbruik en de emissies. (Fransen en Peper, 1993; Tweede Kamer, 1995)

Het verlagen van de kruisvluchthoogte kan bereikt worden door het instellen van vlieghoogterestricties. Deze maatregel zorgt in eerste instantie voor een vermindering van de emissies in de stratosfeer, maar op langere termijn voor een verhoging van de emissies in de troposfeer.

⁴⁷ Het effect van deze maatregel is afhankelijk van de vluchtafstand. Op kortere afstanden is het aandeel van de LTO-cyclus in de totale emissies groter voor op langere afstanden. Omdat bij het veranderen van de kruissnelheid voornamelijk de hoogte van de kruisvluchtemissies beïnvloed wordt, heeft de maatregel bij een kortere afstand een kleiner effect op het brandstofverbruik en bij een langere afstand een groter effect.

De huidige vliegtuigen zijn ontworpen om te vliegen op grote hoogten. De wrijvingsweerstand is daar laag, zodat het mogelijk is met hoge snelheid te vliegen en het brandstofverbruik laag te houden. (Dings *et al.*, 1997; Lister *et al.*, 1999; SBSTA, 1996a; Vlek en Vogels, 2001) Voor de kruisvluchthoogte geldt dus hetzelfde als voor het veranderen van de snelheid: zolang de huidige vloot gebruikt wordt, heeft het verlagen van de kruisvluchthoogte geen positief effect. Pas als een vliegtuig ontworpen is om lager te vliegen, kan deze maatregel toegepast worden.

Het betreft hier een continue wisselwerking tussen het vliegtuigontwerp, de snelheid waarmee en de hoogte waarop het meest efficiënt gevlogen kan worden. Pas wanneer de drie componenten tegelijk veranderd worden, kan emissiereductie bereikt worden. Dus als een nieuw ontwerp op de markt komt, dat voor een lagere snelheid en hoogte is geoptimaliseerd, kunnen bovenstaande maatregelen effect hebben.

5.4 Verbeteren van de efficiëntie van de luchtverkeerssystemen

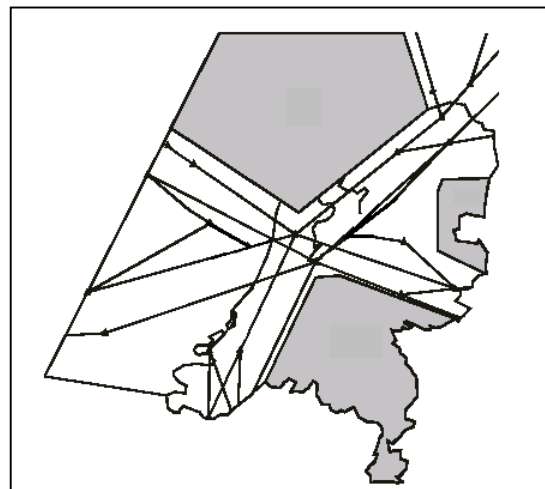
Het verbeteren van de efficiëntie van luchtverkeerssystemen bestaat ook uit diverse mogelijkheden. Een eerste optie is het veranderen van vliegroutes. Vliegtuigen vliegen vaak niet de kortste afstand naar hun bestemming, want ze zijn gebonden aan vaste vliegroutes. In het huidige systeem van internationaal vastgelegde routes zitten veel omwegen om politieke, militaire of andere redenen, die de vliegafstand vergroten. Er bestaan plannen om nieuwe vliegroutes aan te leggen over de Noordpool. Met name de vliegtijd tussen Noord-Amerika en Azië verandert hierdoor: de reistijd van Los Angeles naar Bangkok wordt dan verkort met 142 minuten, terwijl de vlucht van Vancouver naar Hong Kong 125 minuten korter duurt. (MacKeigan, 2001; SBSTA, 1996a; Sondorp, 1992) Het veranderen van de vliegroutes kan leiden tot milieuvoordelen, mits de routes boven gebieden liggen waar de milieueffecten het kleinst zijn (Tweede Kamer, 1995). Over de rol en bijdrage van luchtvaartemissies aan klimaatverandering is echter onvoldoende bekend om een afgewogen oordeel te geven over de voor- en nadelen van deze maatregel (Fransen en Peper, 1993; Tweede Kamer, 1995).

Een tweede maatregel om de efficiëntie van luchtverkeerssystemen te verbeteren, is het zo snel en efficiënt mogelijk afhandelen van landende en vertrekkende vliegtuigen op vliegvelden. Een snellere afhandeling van landende en vertrekkende vliegtuigen kan brandstof besparen (Lister *et al.*, 1999; Vlek en Vogels, 2001). Als een vliegtuig namelijk niet direct kan landen, wordt het toestel in een zogenaamde holding gebracht. Hier blijft het op de bepaalde hoogte volgens een vaste koers cirkelen, totdat het kan landen.

Een efficiënte afhandeling kan bereikt worden door zowel vliegschema's zo efficiënt mogelijk op te stellen als het luchtruim op een zo flexibel mogelijke manier te beheren. Dit laatste kan bereikt worden door het wijzigen van de verdeling van het luchtruim (SBSTA, 1996a). Dit betreft vooral de verdeling tussen burger- en militaire luchtvaart. In Nederland is het luchtruim in principe militair gebied, maar worden er delen vrijgegeven aan de civiele luchtvaart, mits er geen militaire activiteiten plaatsvinden. Zo ontstaat er corridors (zie

figuur 5) tussen de militaire gebieden door, die de civiele luchtvaart de mogelijkheid geven om te landen op een Nederlandse luchthaven. Tijdens perioden met veel civiele vluchten (bijvoorbeeld in de zomer) worden delen van militair gecontroleerd luchtruim ter beschikking gesteld aan de civiele luchtvaart. De indeling en gebruik van het luchtruim in Nederland is dus geen vaststaand gegeven, de civiele en militaire luchtvaartautoriteiten proberen voortdurend het luchtruim zo flexibel mogelijk in te delen. (Dings *et al.*, 1997; Tweede Kamer, 1995)

Een gevolg van een snellere afhandeling is onder andere dat het gebruik van de holdings verminderd wordt. Totaal levert deze maatregel per vlucht een energiebesparing van 6 tot 12% op (Lister *et al.*, 1999; Vlek en Vogels, 2001). Voor alleen de Europese luchtvaart zijn de effecten ingeschat op 10% reductie op het totale verbruik (Tweede Kamer, 1995).



Figuur 5 Overzicht van het Nederlandse luchtruim
Bron: (Offerman en Bakker, 1998)

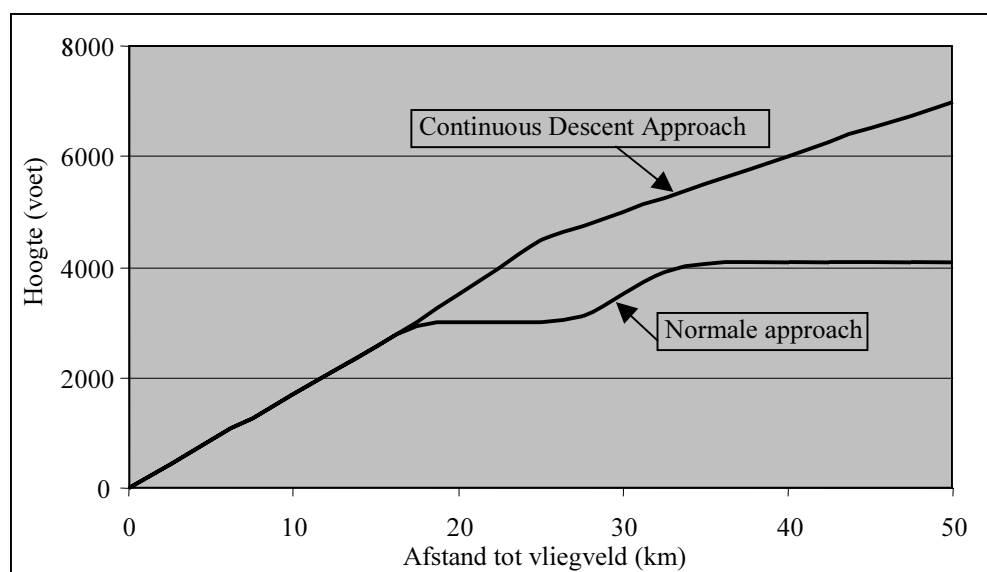
Legenda bij figuur 6.5:

- Militair luchtruim
- Corridors voor civiel luchtverkeer

5.5 Wijzigen van de LTO-procedure op vliegvelden

Een volgende mogelijke operationele maatregel is het wijzigen van de LTO-procedure op vliegvelden (SBSTA, 1996a). Zo kunnen vliegtuigen naar de startbaan gesleept worden in plaats van zelf te taxiën (VU, 1997). Deze methode bespaart brandstof en emissies, met name CO- en HC-emissies die vooral ontstaan bij een motor die een laag vermogen hoeft te leveren (zie §2.5).

Een geheel andere wijziging is het gebruik van een nieuwe aanvlieprocedure: de Continuous Descent Approach (CDA, zie figuur 6). Vliegtuigen zetten de approach naar de landingsbaan in vanaf 7.000 voet en dalen onder een steilere hoek dan gebruikelijk. De afdaling verloopt in een vloeiende lijn en wordt niet onderbroken door gedeelten horizontaal vliegen. Het bijgeven van gas wordt hierdoor overbodig, zodat geluidsoverlast beperkt wordt. De procedure wordt nu al op Schiphol toegepast, maar voorlopig alleen 's nachts. Omdat de CDA-procedure complex is, is het niet geschikt voor spitsuren overdag. De tijd tussen twee landende vliegtuigen moet namelijk vergroot worden van 1,8 naar 4 minuten om de veiligheid van de vliegtuigen te garanderen. Overdag is er teveel vliegverkeer om deze procedure te kunnen gebruiken. (Dobbie en Eran-Tasker, 2001; De Leeuw, 1997)



Figuur 6 De hoogte van het vliegtuig (in voet) afgezet tegen de afstand tot het vliegveld (in kilometers) voor zowel de normale approach als de CDA-procedure (bron: Wubben en Busink, 2000)

Behalve geluidsreductie heeft deze procedure ook milieuvoordelen⁴⁸: het brandstofverbruik wordt tijdens de laatste 45 kilometer⁴⁹ van de vlucht met 25 tot 40% gereduceerd. Voor een Boeing 747-400 is dit circa 400 kilogram, terwijl een Boeing 737-300/400 55 kilo brandstof bespaart (Wubben en Busink, 2000). Deze besparing is echter een klein percentage op de hele vlucht gezien.

6 Overige maatregelen

6.1 Communicatieve maatregelen

Een mogelijk instrument is maatschappelijke beïnvloeding door middel van voorlichting. In Van der Bij *et al.* (1994) wordt voorlichting gedefinieerd als: ‘het verstrekken van informatie gericht op de bewustwording van milieuproblemen en het aangeven van de gewenste gedragsaanpassingen’. Consumenten zijn op de hoogte van de milieubelasting, veroorzaakt

⁴⁸ De CDA-procedure is ingesteld met als doel geluidsreductie. Emissiereductie is van onderschikt belang. Er wordt in de literatuur aangegeven dat de CDA-procedure met name op de laatste 45 kilometer van de vlucht brandstof bespaart, dit wordt veroorzaakt door het feit dat het vliegtuig de landingsbaan in een glijvlucht nadert waardoor het niet noodzakelijk is om gas bij te geven, dit in tegenstelling tot de normale landingsprocedure. Het is echter niet bekend wat de brandstofbesparing van een CDA-nadering is als de gehele landingsprocedure wordt geanalyseerd: op 50 kilometer voor het vliegveld wordt bij een CDA-approach namelijk nog steeds op 7000 voet gevlogen terwijl het bij de normale approach reeds gedaald is tot 4000 voet. Wellicht wordt de besparing van een CDA-approach op de laatste 50 kilometer teniet gedaan doordat langer op grotere hoogte moet worden doorgevlogen.

⁴⁹ De gemiddelde vliegafstand van Schiphol in 1998 is 2080 kilometer, berekend met MOBLEM. De gestelde 45 kilometer is dus 2% van de totale gemiddelde vliegafstand.

door vliegwezen. Echter, gedrag aanpassen is een lang proces. Mensen moeten eerst bewust worden van hun gedrag en de gevolgen daarvan, zodat het draagvlak voor (in dit geval) emissieverminderende maatregelen vergroot wordt. Hierbij is te denken aan recreatieve reizigers te wijzen op de gevolgen en proberen af te zien van ‘het genot van verre reizen, ten gunste van het milieu’ (RMB, 1996) en het aanbieden van alternatieven die dichterbij liggen. De overheid zou hierin ook het goede voorbeeld kunnen geven door bijvoorbeeld voor afstanden onder de 500 kilometers niet met het vliegtuig te reizen. Tenslotte kunnen de zakelijke reizigers gewezen worden op nieuwe technologische ontwikkelingen zoals videoconferenties. (Van der Bij *et al.*, 1994; RMB, 1996; Sledsens, 1999)

Onderzoek naar het effect van voorlichting op autogebruik toont echter aan dat hiervan geen substantiële effecten verwacht mogen worden (Tertoolen, 1994).

6.2 Substitutie naar railvervoer

Studies naar de milieubelasting van diverse verkeersmodaliteiten zijn meerdere malen uitgevoerd. Reizen per vliegtuig leidt op kortere afstanden tot een relatief grote milieubelasting (Roos *et al.*, 1997). Om deze emissies te reduceren, kunnen vervoersalternatieven gestimuleerd worden, zoals de hogesnelheidstrein. Vooral CO₂-emissies worden gereduceerd door de substitutie naar railvervoer. De infrastructuur moet echter wel worden verbeterd, zodat de modaliteit daadwerkelijk een concurrerend alternatief wordt. (Roos *et al.*, 1997; Tweede Kamer, 1995)

Door substitutie naar railvervoer wordt op korte termijn het vervoersaanbod niet gereduceerd. Op lange termijn daarentegen leidt substitutie wel tot reductie van energiegebruik en CO₂- en NO_x-emissies. De reductie wordt veroorzaakt doordat per reiziger de hogesnelheidslijn veel lagere CO₂-emissies (82%) en NO_x-emissies (96% lager) heeft dan het vliegtuig. (Van den Brink, 1997, Van Wee *et al.*, 1997)

De verschuiving naar railtransport kan in 2025 een vermindering in brandstofverbruik ten opzichte van 1990 opleveren van 5 tot 15% (Bleijenberg en Moor, 1993; Wit, 1996).

7 Conclusie

In deze bijlage is gekeken naar vier soorten maatregelen: technologisch, operationeel, economisch en overig. Alledrie de categorieën kunnen leiden tot emissiereductie. De meeste effecten zullen pas op langere termijn gerealiseerd worden. Aan het einde van de paragraaf staat een tabel (zie tabel 6), waarin de potentiële effecten van de vier soorten maatregelen opgesomd staan.

Prijsbeleid

Om technologische en operationele maatregelen te stimuleren, zijn prijsmaatregelen zoals heffingen of subsidies van belang. Heffingen zijn het belangrijkste instrument. Er bestaan allerlei variaties, die veelal een prikkel geven aan de luchtvaartsector om de vervuiling aan te pakken. Het gevolg van de heffingen is tweeledig. Ten eerste neemt de vraag naar luchttransport af, omdat passagiers niet bereid zijn een hogere prijs voor hun ticket te betalen. Ten tweede stappen maatschappijen over op zuiniger vliegtuigen, wat een energie- en emissiebesparing oplevert. Het invoeren van heffingen duurt vaak lang vanwege de beperkingen als gevolg van Europese wetgeving. Op korte termijn kan daarom weinig met prijsbeleid bereikt worden.

Met het invoeren van een kerosine-accijns van €0,42 per liter kan het aantal passagiers op Europese vluchten dalen met 38%, terwijl een heffing van €0,22 per liter brandstof een energiebesparing van gemiddeld 30 procent oplevert. Ook de invoer van BTW op vliegtickets kan leiden tot een daling van 6% van het aantal passagiers. Daarnaast kan het geven van subsidies stimulerend werken voor het invoeren van zuiniger en minder vervuilende vliegtuigen. Ook verhandelbare emissierechten dragen bij aan emissiereductie: elk land heeft de maximale hoeveelheid emissies toebedeeld gekregen en overschrijding zal leiden tot extra kosten. Er wordt verwacht dat dit systeem de juiste markt creëert en vervolgens ook daadwerkelijk emissies kan verminderen door bijvoorbeeld jaarlijks het emissieplafond te verlagen.

Technologische maatregelen

Veranderingen in het huidige vliegtuigconcept zijn vooral gericht op het verlagen van het gewicht, om zo het brandstofverbruik te reduceren. Nieuwe technieken zoals Laminar Flow Control verlagen het energiegebruik met maximaal 40% door het verbeteren van de aërodynamica. Ook het verminderen van het aantal motoren of het produceren van lichtere motoren dragen bij aan brandstofreductie. In totaal kunnen aërodynamische verbeteringen aan de huidige vloot zorgen voor een reductie in de kerosineconsumptie van 10%.

Op langere termijn zijn grotere veranderingen mogelijk. Prognoses in de literatuur geven aan dat technologische verbeteringen kunnen leiden tot een 40 tot 65%-reductie in de kerosineconsumptie. Door de lange levensduur van vliegtuigen en motoren verloopt de invoer

van nieuwe technologieën op de markt langzaam, gemiddeld 15 à 20 jaar. Verbeteringen op de lange termijn kunnen de volgende zijn:

- Er wordt aan nieuwe vliegtuigconcepten met lagere NO_x-emissies gewerkt. Het gebruik van de Sonic Cruiser verlaagt vooral de NO_x-emissies, terwijl de BWB zowel de brandstof als emissies per passagierskilometer met 33% reduceert;
- Ook op het gebied van motoren en het verbrandingsproces is vooruitgang geboekt. Ondanks de wisselwerking tussen brandstof en NO_x stelt een prognose dat de NO_x-emissies 40 tot 50% kunnen dalen, mits de juiste verbrandingskamer met een lage verbrandingstemperatuur ontwikkeld wordt. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden met een nieuwe verbrandingskamer: de Dual Annular Combustor;
- Alternatieve brandstoffen worden waarschijnlijk voorlopig niet ingevoerd. Het voordeel is lagere emissies, maar de kosten en de (veiligheids)risico's zijn nog te hoog. Met name waterstof is een goede toekomstige kanshebber, maar de introductie hiervan vindt waarschijnlijk niet plaats voor de tweede helft van de 21^e eeuw.

Operationele maatregelen

Met operationele maatregelen is het mogelijk op korte termijn een emissievermindering te bereiken door het voortzetten van het nachtelijk gebruik van de CDA-procedure. De brandstofreductie ligt (voor de laatste 45 kilometer van de vlucht) tussen 10 en 25 procent, een percentage dat op de hele vlucht maar een klein deel vormt. Andere opties op de korte termijn zoals het veranderen van de kruisvluchthoogte of -snelheid zijn alleen zinvol als het vliegtuigontwerp daarop aangepast wordt, bijvoorbeeld door het te voorzien van een groter vleugeloppervlak. De huidige vloot vliegt onder de meest optimale omstandigheden, zodat het brandstofverbruik zo laag mogelijk is. Pas als bij het ontwerpen van nieuwe concepten rekening gehouden wordt met een lagere snelheid en hoogte, verminderen de emissies door dit soort maatregelen.

In de periode 2000-2020 wordt een reductie in het brandstofverbruik per reizigerskilometer verwacht van 8 tot 18%, waarvan 6 tot 12% vooral door het verbeteren van de efficiëntie van de luchtverkeerssystemen. Als er nieuwe concepten op de markt komen, kan op langere termijn ook besparingen gehaald worden uit een lagere kruissnelheid of -hoogte. Voorwaarde is wel dat de nieuwe toestellen aangepast zijn aan deze vliegomstandigheden.

Algemeen bekend is dat bij elke (beleids)maatregel de medewerking van de actoren nodig is. Er moet een draagvlak gecreëerd worden, zodat veranderingen geaccepteerd worden bij de implementatie ervan. Om dit draagvlak te verkrijgen, zijn soms (financiële) stimuleringsmaatregelen nodig. Soms kunnen communicatieve maatregelen er toe bijdragen dat actoren hun gedrag aanpassen.

De maatregel wat betreft substitutie naar railvervoer is gericht op het veranderen van het gedrag van de consument. Dergelijke maatregelen missen hun uitwerking als er onvoldoende draagvlak vanuit de samenleving is. Zowel bewustmaking van de milieubelasting van

vliegvlagen als stimuleren van vervoersalternatieven kunnen een brandstofreductie opleveren, mits de reizigers meewerken.

Tabel 6 Samenvatting van de potentiële effecten op het energiegebruik van de besproken maatregelen, zowel op korte termijn (tot 2005) als op lange termijn (2020 tot 2050)

Maatregelen	Korte termijn	Lange termijn
Technologische maatregelen	10%	40-65%
Operationele maatregelen	<1%	8-18%
Prijsbeleid	Juridisch en politiek gezien niet haalbaar	30%

