

TNO-rapport

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Referentienummer 93-199
Dossiernummer 112326-24218
Datum juni 1993
NP

Auteur
Ing. A. Boom

Bestemd voor
IMW-TNO
t.a.v. de heer Ir. C. Huygen
Postbus 6011
2600 JA Delft

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

SAMENVATTING

Door IMET-TNO zijn van een aantal typen vliegtuigmotoren onder verschillende bedrijfscondities geur- en koolwaterstofemissies bepaald. Deze metingen zijn uitgevoerd aan de motorentestbank van de KLM op Schiphol-Oost. Het doel van de metingen was het vaststellen van de verhouding tussen de geur- en koolwaterstofemissiefactoren. Met deze verhouding kunnen, via de in de literatuur bekende emissiefactoren voor koolwaterstoffen, de geuremissies van verschillende typen vliegtuigmotoren onder verschillende bedrijfscondities worden berekend. Aan de hand van de vliegtuigbewegingen op Schiphol kan daarmee de geurimmissiesituatie rondom Schiphol worden berekend. De resultaten van deze metingen zijn samengevat in de onderstaande tabellen.

verhouding koolwaterstof- geurconcentratie,
zonder correctie achtergrondconcentraties⁽¹⁾

activiteit	power setting %	emissie- factor Mge/gC _x H _y	standaard afwijking	95%-betr.int
taxiën	3	0.16	0.08	0.09 - 0.21
landen	10	0.13	0.07	0.09 - 0.18
proefdraaien	30-90	0.47	0.49	0.08 - 0.82
start	100	0.91	0.78	0.09 - 1.40

verhouding koolwaterstof- geurconcentratie,
met correctie achtergrondconcentraties⁽¹⁾

activiteit	power setting %	emissie- factor Mge/gC _x H _y	standaard afwijking	95%-betr.int
taxiën	3	0.17	0.09	0.10 - 0.23
landen	10	0.15	0.08	0.10 - 0.20
proefdraaien	30-90	3.17	7.32	0.09 - 8.40
start	100	3.04	3.91	0.10 - 5.52

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

- (1) In de door de motor aangezogen lucht bevinden zich ook koolwaterstoffen, onduidelijk is in welke mate deze koolwaterstoffen in de motor worden verbrand of bijdragen aan de gemeten concentraties. De resultaten worden daarom zowel zonder als met correctie weergegeven.

De spreiding in de resultaten bij het landen en taxiën kan verklaard worden uit de nauwkeurigheid van de gebruikte meetmethoden. Bij het proefdraaien en het starten waren de gemeten koolwaterstofconcentraties nauwelijks groter dan het achtergrondniveau. Kleine schommelingen in het achtergrondniveau geven bij deze belastingscondities aanleiding tot grote verschillen in het verhouding tussen de geur- en de koolwaterstofconcentratie. Het uiteindelijke effect van het verschil in resultaat met en zonder correctie voor de achtergrondconcentratie op de bepaling van geurimmissiesituatie rondom Schiphol zal blijken uit de verdere verwerking van deze resultaten. Dit is mede afhankelijk van de effectieve duur van de verschillende activiteiten en de koolwaterstofemissie van de desbetreffende motoren per activiteit.

Uit andere geurmetingen aan verbrandingsprocessen is gebleken dat minieme verschillen in bijvoorbeeld procescondities kunnen leiden tot forse verschillen in emissies. In het algemeen geldt dat kleine concentratieverschillen van componenten met een lage geurdrempel, zoals niet of gedeeltelijk geoxideerde koolwaterstoffen (z.g. kraakprodukten), kunnen leiden tot relatief grote verschillen in geurconcentratie, zonder dat dit in het totaal-koolwaterstofgehalte tot uiting komt. Verschillen in de exacte uitvoering van motoren kunnen dus leiden tot aanzienlijke verschillende geuremissies. De extrapolatie van de hier gevonden waarden naar andere motortypen en -merken zal met de nodige voorzichtigheid moeten worden uitgevoerd.

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	2
1. INLEIDING	5
2. MEETMETHODEN	7
2.1 Geurconcentratiemetingen	7
2.2 Bepaling concentratie totaal-koolwaterstoffen	8
2.3 Bepaling koolmonoxide- en kooldioxideconcentraties	8
2.4 Bepaling afgasdebiet	9
2.5 Meetdata verwerking	11
3. UITVOERING EN RESULTATEN	12
4. DISCUSSIE EN CONCLUSIES	18
5. REFERENTIES	22
6. VERANTWOORDING	23

FIGUUR 1 t/m 5

BIJLAGE 1: GEURCONCENTRATIEMETINGEN

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

1. INLEIDING

Ten behoeve van de MER, die wordt opgesteld in het kader van het project "Mainport & Milieu Schiphol", zijn door IMET-TNO emissiefactoren bepaald van een aantal typen vliegtuigmotoren. Het betrof de vaststelling van de koolwaterstof- en geuremissiefactoren, alsmede de relatie tussen deze beide factoren. De resultaten van deze metingen kunnen gebruikt worden voor de berekening van de geuremissies van andere typen vliegtuigmotoren waarvan alleen de emissiefactoren voor koolwaterstoffen bekend zijn, bijvoorbeeld uit de databank van de ICAO (International Civil Aviation Organisation) [1]. Aan de hand van de aantallen vliegtuigbewegingen kan, met de resultaten van deze metingen de in de omgeving van Schiphol optredende geurconcentraties worden berekend.

De metingen zijn uitgevoerd aan de motorentestbank van de KLM. De motoren worden daar, na bijvoorbeeld een onderhoudsbeurt, getest. Bij deze test doorlopen de motoren een aantal verschillende belastingscondities (power settings) die overeenkomen met de volgende activiteiten; taxiën, landen, proefdraaien en starten. In 1990 is door IMET-TNO aan dezelfde motorentestbank eveneens een meetprogramma uitgevoerd dat echter beperkter en anders van opzet was. Bij de in dit rapport beschreven metingen was meetopzet primair gericht op het vaststellen van de verhouding tussen de geur- en koolwaterstofconcentraties. De resultaten van beide meetseries zijn daardoor niet rechtstreeks te vergelijken.

De uitvoering van de metingen aan een motorentestbank had als voordeel dat de metingen onder gecontroleerde omstandigheden konden plaatsvinden. Een nadeel was echter het relatief beperkte aantal verschillende typen motoren van slechts één fabrikant (General Electric) waaraan de metingen konden worden uitgevoerd. Geuremissiemetingen waarbij gebruik wordt gemaakt van bemonsteringsmethoden zoals de lijzijdemethode, waarmee ook aan andere typen vliegtuigmotoren op Schiphol gemeten zouden kunnen worden, zijn in deze situatie bijzonder problematisch. Tevens geldt dat de emissiefactoren

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

voor koolwaterstoffen van de ICAO ook met behulp van motorentestbanken zijn bepaald. De gebruikte meetmethoden voor de koolmonoxide, kooldioxide en koolwaterstofconcentraties komen overeen met de door de ICAO toegepaste methoden [2].

Om de geurimmissiesituatie in de omgeving van een geurbron vast te stellen kunnen, naast het uitvoeren van geuremissiemetingen in combinatie met verspreidingsberekeningen, ook zogenaamde snuffelploegmetingen worden uitgevoerd. Bij deze snuffelploegmetingen wordt met een panel, in de directe omgeving van een geurbron, de waarneembaarheid van de bron vastgesteld. Een nadeel van deze methode is dat er nog geen werkwijze is vastgelegd. Naar de relatie tussen beide methoden is slechts in beperkte mate onderzoek gedaan [3,4], zeker bij complexe situaties is de praktijkervaring nog zeer beperkt.

De metingen zijn uitgevoerd in september en oktober 1992. In dit rapport worden de resultaten van de metingen aan de motorentestbank gepresenteerd. In hoofdstuk 2 worden de meetmethoden omschreven en in hoofdstuk 3 worden de meetresultaten gepresenteerd. In hoofdstuk 4 worden de resultaten en conclusies besproken.

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

2. MEETMETHODEN

2.1 Geurconcentratiemetingen

Bij sensorische geurmetingen wordt bepaald hoeveel maal een luchtmonster moet worden verdund met schone (geurvrije) lucht, zodat de helft van een panel van proefpersonen het verdunde monster juist niet meer van schone lucht kan onderscheiden.

Het verdunningsgetal (het verdund volume gedeeld door het oorspronkelijk volume) is dan de getalswaarde van de geurconcentratie, uitgedrukt in geureenheden per m^3 lucht, afgekort ge/m^3 .

Bijvoorbeeld:

Indien 2000 maal verdund moet worden, is de concentratie van het oorspronkelijke monster $2000 \text{ ge}/\text{m}^3$,

$1 \text{ ge}/\text{m}^3 = \text{geurdetectiedrempel}$

Uit de geurconcentratie (ge/m^3) en het afgasdebiet (m^3/h) kan de geuruitworp (ge/h) worden berekend. De bepaling van het afgasdebiet in deze specifieke situatie wordt in paragraaf 2.4 beschreven.

De bemonstering ten behoeve van de geurconcentratiemetingen vindt plaats door van de afgasstroom luchtmonsters in teflonmonsterzakken te verzamelen. Van de verzamelde monsters wordt binnen 24 uur de geurconcentratie sensorisch bepaald met de TNO-Geurmeetwagen. Uit onderzoek [5] is gebleken dat binnen 24 uur de geurconcentratie van het monster niet significant verandert. In bijlage 1 wordt een uitvoerige beschrijving gegeven van de olfactometerische geurconcentratiemetingen en de nauwkeurigheid van de resultaten.

*Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren***2.2 Bepaling concentratie totaal-koolwaterstoffen**

De bepaling van het gehalte totaal-koolwaterstoffen in de afgassen is, evenals bij het vaststellen van de ICAO-emissiefactoren [2], continu registrerend uitgevoerd met een zogenaamde vlamionisatiedetector (FID), type Ratfisch RS-55.

Opgemerkt dient te worden, dat de met behulp van de FID vastgestelde concentraties van koolwaterstoffen niet als absoluut mogen worden beschouwd. Omdat het totaal koolwaterstofgehalte de som is van een groot aantal organische verbindingen van vaak wisselende samenstelling, is het niet mogelijk de FID hierop te ijken. Het meetinstrument is daarom geijkt met behulp van een standaard ijkgas (propaan 30 ppm). De gemeten koolwaterstofconcentraties worden uitgedrukt in propaanequivalenten, die als zodanig wel als absolute concentraties kunnen worden beschouwd.

De gevoeligheid van de FID is voor verbindingen met een hoog C-gehalte groter dan voor verbindingen die bijvoorbeeld zuurstof, zwavel en/of stikstofatomen bevatten. De met behulp van de FID gemeten waarden kunnen derhalve in het uiterste geval per individuele verbinding een factor 2 tot 3 lager zijn dan de werkelijke concentraties aan organische verbindingen. De onnauwkeurigheid van deze meetmethode (concentratie uitgedrukt als propaanequivalenten) bedraagt ca. 10%.

2.3 Bepaling koolmonoxide- en kooldioxideconcentraties

De koolmonoxide- en kooldioxideconcentratie zijn, evenals bij het vaststellen van de ICAO-emissiefactoren [2], continu registrerend bepaald met behulp van een Niet Dispersieve Infrarood-absorptie (NDIR) meetmethode. Er is gebruik gemaakt van een Siemens Ultramat 22P 7MB 1123. De onnauwkeurigheid van deze meetmethode bedraagt ca. 10%.

2.4 Bepaling afgasdebiet

Gezien de afmetingen van het uitlaatkanaal van de motorentestbank (11 bij 18 meter) en de korte tijd dat de testcondities constant zijn (bij starten maximaal 3 min.), was het niet mogelijk om rechtstreeks het afgasdebiet volgens de in de NPR 2788 beschreven standaard methode (Gravimeterische bepaling van de stofconcentratie en stofdebiet) [6] te bepalen. In figuur 1 wordt de motorentestbank schematisch weergegeven. In deze figuur is eveneens het monsternamepunt aangegeven.

Door de KLM werd tijdens het proefdraaien het brandstofverbruik en het luchtdebiet door de motor bepaald. Gezien de hoge snelheid van de afgassen, direct achter de motor, is het waarschijnlijk dat naast de hoeveelheid lucht door de motor, ook een hoeveelheid lucht langs de motor wordt aangezogen. Daarnaast is het mogelijk dat, door temperatuurverschillen tussen de door en langs de motor aangezogen lucht, de afgassen niet volledig gemengd zijn. Het afgasdebiet is daarom bepaald aan de hand van het brandstofverbruik en de gemeten kooldioxide-, koolmonoxide en koolwaterstofconcentratie. Kooldioxide ontstaat bij volledige verbranding van de toegevoerde brandstof, een klein gedeelte wordt echter niet of niet geheel verbrand, daardoor komen eveneens koolmonoxide en koolwaterstoffen vrij. Uit het brandstofverbruik en het luchtdebiet door de motor kan de kooldioxideconcentratie worden berekend, indien geen onvolledige verbranding optreedt en inhomogeniteit en/of het indirect aanzuigen van lucht niet voorkomt. Uit de berekende en de gemeten concentraties volgt dan een correctiefactor voor de onvolledige verbranding, inhomogeniteit en/of het indirect aanzuigen. De berekening is als volgt uitgevoerd:

$$[\text{CO}_2] = \frac{\frac{Q_{\text{brst}} * V_m}{M \text{ C}_x\text{H}_y}}{\frac{Q_{\text{lucht}} * V_m}{M \text{ lucht}}} * 100\%$$

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Hieruit volgt voor de omstandigheden tijdens de metingen:

$$= \frac{Q_{\text{brst}}}{Q_{\text{lucht}}} * 2.07 * 100\%$$

De correctie factor wordt daarmee als volgt berekend:

$$C_f = \frac{([CO_2] + [CO] + [C_3H_8\text{-eq}] * 3) \text{ gemeten}}{([CO_2]) \text{ berekend}}$$

Hierin is:

[CO ₂]	: kooldioxideconcentratie (vol.%)
[CO]	: koolmonoxideconcentratie (vol.%)
[C ₃ H ₈ -eq]	: koolwaterstofconcentratie als propaanequivalenten (vol.%)
Q _{brst}	: verbruikte brandstof hoeveelheid (kg/s)
Q _{lucht}	: luchtdebiet door motor (kg/s)
M C _x H _y	: molmassa brandstof, uitgedrukt als verhouding totale molmassa per koolstof atoom (g) (d.w.z. bij een H/C verhouding van 1.92 bedraagt mm C _x H _y 13.92 g/mol)
M lucht	: gemiddelde molmassa lucht (g)
V _m	: molair volume (l)
C _f	: correctiefactor voor inhomogeniteit en indirect aangezogen lucht (-)

Bij de verwerking van de resultaten is er vanuit gegaan dat alle in de afgasstroom aanwezige componenten steeds in dezelfde verhouding aanwezig zijn. Uit het luchtdebiet door de motor, vermenigvuldigd met de correctiefactor en de concentratie van de componenten, kan de emissie worden berekend. Voor de bepaling van de verhouding tussen de emissiefactoren voor

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

geur- en koolwaterstoffen is het debiet feitelijk niet van belang. Het berekenen van de emissiefactoren voor koolwaterstoffen en koolmonoxide maakt, vergelijking met de ICAO-cijfers mogelijk.

2.5 Meetdata verwerking

De continu gemeten kooldioxide-, koolmonoxide en koolwaterstofconcentraties zijn met behulp van een data-acquisitiesysteem vastgelegd. De meetwaarden zijn elke 15 seconden in het data-acquisitiesysteem ingelezen. Per activiteit (motor-instelling) bedroeg de duur van de test van de motor op de proefbank 3 tot 5 minuten, in die periode werd tevens het geurmonster verzameld. Bij de verwerking van de resultaten zijn de kooldioxide-, koolmonoxide en koolwaterstofconcentraties gemiddeld over dezelfde periode, zodat per meetwaarde de middelling is uitgevoerd over 12 tot 20 waarnemingen.

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

3. UITVOERING EN RESULTATEN

De resultaten van de metingen en daaruit berekende waarden zijn in de tabellen 1 t/m 4 weergegeven. Achtereenvolgens zijn vermeld:

- het motortype,
- de meetdatum,
- het brandstofverbruik en het luchtdebiet door de motor (volgens opgave van de KLM) en de daaruit berekende kooldioxideconcentratie,
- de gemeten kooldioxideconcentratie en de correctiefactor voor de onvollende verbranding, inhomogeniteit en/of het indirect aanzuigen, alsmede het hieruit berekende luchtdebiet,
- de gemeten koolmonoxide-, koolwaterstof- en geurconcentratie,
- de berekenende emissiefactoren voor koolmonoxide, koolwaterstoffen en geur per gewichtseenheid verbruikte brandstof,
- de absolute geuremissie en de geuremissie per gewichtseenheid geëmitteerde hoeveelheid koolwaterstoffen.

Voor de, met behulp van de koolmonoxide- en koolwaterstofconcentraties berekende waarden, zijn de resultaten weergegeven voor met en zonder correctie voor de achtergrondconcentratie. Deze bedraagt voor beide componenten circa 1 ppm. Bij berekeningen waar voor de achtergrondconcentratie is gecorrigeerd, is deze concentratie op de gemeten concentratie in mindering gebracht, dit is aangegeven met een *. Tevens worden de resultaten weergegeven in de figuren 2 t/m 5.

De resultaten zijn per activiteit (taxiën, landen, proefdraaien en starten) gegroepeerd. De verschillende activiteiten komen overeen met een bepaald percentage van de maximale stuwkracht van de motor (de zogenaamde power setting), deze kan per motortype per activiteit verschillend zijn. De power-settings waarbij de motoren getest worden zijn in testprocedures van de KLM vastgelegd. Tijdens de uitgevoerde metingen was het niet mogelijk

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

hiervan af te wijken.

De metingen zijn uitgevoerd tijdens het testen van de volgende General Electric motoren; CF6-50C+, CF6-50E2, CF6-80A2, CF6-80C2 A1, CF6-80C2 B1 en CF6-80C2 B1F. De 50C+ en 50E2 hebben dezelfde basismotor, wel zijn de fanbladen verschillend waardoor de toerentallen iets afwijken. De 80A2 is een doorontwikkeling van de 50E2. De 80C2 A1, B1 en B1F-motoren zijn modernere motoren met meer stuwkracht. Bij de 80C2 A1 en B1 wordt de brandstoftoevoer hydro-mechanisch geregeld, bij de 80C2 B1F wordt dit elektronisch hydro-mechanisch geregeld. Deze motoren worden toegepast in de Airbus A300 en A310, de DC-10 en de Boeing 747. In 1990 bedroeg het percentage vliegtuigbewegingen op Schiphol van toestellen uitgerust met deze motoren ca. 14% [7].

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Tabel 1a. taxiën

motor	datum	pow.set. (%)	brandst. (kg/s)	lucht (kg/s)	CO ₂ -ber (vol%)	CO ₂ -gem. (vol%)	C _f (-)	lucht-t (nm ³ /s)
CF6-50C+	14/09/92	3	0.17	163	0.22	0.14	1.38	175
CF6-50C+	17/09/92	3	0.18	126	0.29	0.15	1.78	174
CF6-50C+	23/09/92	3	0.18	130	0.28	0.33	0.82	83
CF6-50E2	16/09/92	3	0.18	128	0.29	0.14	1.88	187
CF6-50E2	24/09/92	3	0.18	129	0.29	0.22	1.24	125
CF6-50E2	28/09/92	3	0.19	132	0.29	0.14	1.92	197
CF6-50E2	06/10/92	3	0.18	130	0.29	0.17	1.59	161
CF6-80A3	28/09/92	3	0.17	142	0.25	0.23	1.06	117
CF6-80C2 A1	21/09/92	3	0.15	162	0.19	0.20	0.89	112
CF6-80C2 B1	05/10/92	4	0.15	172	0.18	0.11	1.53	204
CF6-80C2 B1F	17/09/92	5	0.16	182	0.18	0.18	0.98	139
CF6-80C2 B1F	07/10/92	4	0.17	183	0.19	0.18	1.01	144

Tabel 1b. taxiën, zonder correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	73.9	28.1	770	95.38	57.06	0.86	524	0.02
CF6-50C+	17/09/92	70.4	22.5	4400	86.46	43.44	4.63	2951	0.11
CF6-50C+	23/09/92	75.8	25.9	9200	44.17	23.70	4.59	2933	0.19
CF6-50E2	16/09/92	41.0	28.6	5600	53.95	59.29	6.28	4019	0.11
CF6-50E2	24/09/92	69.0	23.8	6800	59.34	32.13	5.00	3269	0.16
CF6-50E2	28/09/92	63.7	19.6	8900	84.19	40.67	10.14	6813	0.25
CF6-50E2	06/10/92	67.0	22.2	12000	73.46	38.22	11.72	7730	0.31
CF6-80A3	28/09/92	23.5	14.7	5100	19.93	19.57	3.75	2329	0.19
CF6-80C2 A1	21/09/92	46.0	13.4	1600	44.39	20.26	1.34	701	0.07
CF6-80C2 B1	05/10/92	47.2	11.6	4400	80.31	31.00	6.49	3496	0.21
CF6-80C2 B1F	17/09/92	40.6	9.8	1400	43.62	16.48	1.25	727	0.08
CF6-80C2 B1F	07/10/92	42.6	6.3	2400	45.98	10.75	2.21	1323	0.21
gem:							5.28	3334	0.18

Tabel 1c. taxiën, met correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	72.9	27.1	770	94.09	55.03	0.86	524	0.02
CF6-50C+	17/09/92	69.4	21.5	4400	85.23	41.51	4.63	2951	0.11
CF6-50C+	23/09/92	74.8	24.9	9200	43.59	22.78	4.59	2933	0.20
CF6-50E2	16/09/92	40.0	27.6	5600	52.63	57.22	6.28	4019	0.11
CF6-50E2	24/09/92	68.0	22.8	6800	58.48	30.78	5.00	3269	0.16
CF6-50E2	28/09/92	62.7	18.6	8900	82.87	38.60	10.14	6813	0.26
CF6-50E2	06/10/92	66.0	21.2	12000	72.37	36.50	11.72	7730	0.32
CF6-80A3	28/09/92	22.5	13.7	5100	19.08	18.24	3.75	2329	0.21
CF6-80C2 A1	21/09/92	45.0	12.4	1600	43.43	18.74	1.34	701	0.07
CF6-80C2 B1	05/10/92	46.2	10.6	4400	78.61	28.32	6.49	3496	0.23
CF6-80C2 B1F	17/09/92	39.6	8.8	1400	42.55	14.79	1.25	727	0.08
CF6-80C2 B1F	07/10/92	41.6	5.3	2400	44.90	9.05	2.21	1323	0.24
gem:							5.28	3334	0.19

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Tabel 2a, landen

motor	datum	pow.set. (%)	brandst. (kg/s)	lucht (kg/s)	CO ₂ -ber (vol%)	CO ₂ -gem. (vol%)	C _f (-)	lucht-t (nm ³ /s)
CF6-50C+	14/09/92	9	0.27	215	0.26	0.20	1.27	212
CF6-50C+	17/09/92	10	0.29	226	0.27	0.10	2.46	431
CF6-50C+	23/09/92	10	0.29	222	0.27	0.23	1.11	192
CF6-50E2	16/09/92	11	0.31	237	0.27	0.20	1.32	242
CF6-50E2	24/09/92	10	0.28	227	0.25	0.18	1.36	240
CF6-50E2	28/09/92	10	0.30	229	0.27	0.14	1.82	325
CF6-50E2	06/10/92	11	0.30	240	0.26	0.21	1.20	224
CF6-80A3	28/09/92	11	0.29	259	0.23	0.23	0.98	197
CF6-80C2 A1	21/09/92	5	0.17	191	0.18	0.17	1.05	156
CF6-80C2 B1	05/10/92	8	0.22	246	0.18	0.09	1.96	374
CF6-80C2 B1F	17/09/92	9	0.22	245	0.18	0.18	1.00	192
CF6-80C2 B1F	07/10/92	8	0.22	247	0.18	0.21	0.86	165

Tabel 2b, landen, zonder correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	44.1	13.0	820	42.54	19.74	0.68	671	0.03
CF6-50C+	17/09/92	44.4	15.5	4000	81.89	44.88	6.38	6704	0.14
CF6-50C+	23/09/92	40.8	16.9	3700	34.35	22.27	2.69	2770	0.12
CF6-50E2	16/09/92	37.1	14.0	2700	35.93	21.34	2.27	2553	0.11
CF6-50E2	24/09/92	35.4	9.3	2700	38.23	15.74	2.50	2503	0.16
CF6-50E2	28/09/92	40.0	16.1	4500	54.11	34.21	5.24	5668	0.15
CF6-50E2	06/10/92	38.6	12.5	7000	35.68	18.11	5.58	6078	0.31
CF6-80A3	28/09/92	15.7	16.2	4000	13.33	21.70	2.89	3015	0.13
CF6-80C2 A1	21/09/92	27.4	7.4	800	31.55	13.33	0.79	482	0.06
CF6-80C2 B1	05/10/92	23.8	4.9	1400	51.05	16.54	2.51	1970	0.15
CF6-80C2 B1F	17/09/92	22.7	5.6	700	24.77	9.69	0.66	520	0.07
CF6-80C2 B1F	07/10/92	25.4	4.0	1200	23.93	5.86	0.94	745	0.16
gem:							2.76	2806	0.13

Tabel 2c, landen, met correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	43.1	12.0	820	41.57	18.22	0.68	671	0.04
CF6-50C+	17/09/92	43.4	14.5	4000	80.05	41.99	6.38	6704	0.15
CF6-50C+	23/09/92	39.8	15.9	3700	33.51	20.95	2.69	2770	0.13
CF6-50E2	16/09/92	36.1	13.0	2700	34.96	19.82	2.27	2553	0.11
CF6-50E2	24/09/92	34.4	8.3	2700	37.15	14.05	2.50	2503	0.18
CF6-50E2	28/09/92	39.0	15.1	4500	52.76	32.09	5.24	5668	0.16
CF6-50E2	06/10/92	37.6	11.5	7000	34.76	16.66	5.58	6078	0.33
CF6-80A3	28/09/92	14.7	15.2	4000	12.48	20.36	2.89	3015	0.14
CF6-80C2 A1	21/09/92	26.4	6.4	800	30.40	11.53	0.79	482	0.07
CF6-80C2 B1	05/10/92	22.8	3.9	1400	48.91	13.17	2.51	1970	0.19
CF6-80C2 B1F	17/09/92	21.7	4.6	700	23.67	7.97	0.66	520	0.08
CF6-80C2 B1F	07/10/92	24.4	3.0	1200	22.99	4.38	0.94	745	0.22
gem:							2.76	2806	0.15

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Tabel 3a, proefdraaien

motor	datum	pow.set. (%)	brandst. (kg/s)	lucht (kg/s)	CO2-ber (vol%)	CO2-gem. (vol%)	C _f (-)	lucht-t (nm ³ /s)
CF6-50C+	14/09/92	56	1.25	502	0.52	0.23	2.23	869
CF6-50C+	17/09/92	54	1.24	507	0.51	0.25	2.02	795
CF6-50C+	23/09/92	57	1.28	517	0.51	0.40	1.28	513
CF6-50E2	16/09/92	31	0.70	391	0.37	0.25	1.47	447
CF6-50E2	24/09/92	32	0.69	401	0.36	0.24	1.48	461
CF6-50E2	28/09/92	28	0.65	380	0.35	0.14	2.51	741
CF6-50E2	06/10/92	33	0.71	408	0.36	0.27	1.33	422
CF6-80A3	28/09/92	94	2.14	709	0.62	0.52	1.20	660
CF6-80C2 B1	05/10/92	88	2.02	758	0.55	0.37	1.48	875
CF6-80C2 B1F	07/10/92	87	2.06	770	0.55	0.51	1.09	650

Tabel 3b, proefdraaien, zonder correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	5.9	4.4	800	5.14	6.05	0.60	2688	0.10
CF6-50C+	17/09/92	6.9	1.8	1300	5.48	2.28	0.92	4127	0.41
CF6-50C+	23/09/92	2.3	2.3	880	1.14	1.81	0.38	1750	0.21
CF6-50E2	16/09/92	8.1	3.3	1300	6.47	4.08	0.87	2183	0.21
CF6-50E2	24/09/92	10.6	3.4	1100	8.81	4.43	0.80	1997	0.18
CF6-50E2	28/09/92	9.4	1.2	620	13.34	2.77	0.75	1766	0.27
CF6-50E2	06/10/92	6.9	1.4	1100	5.13	1.57	0.69	1775	0.44
CF6-80A3	28/09/92	1.7	2.4	2800	0.65	1.45	0.92	7071	0.63
CF6-80C2 B1	05/10/92	2.1	1.4	1300	1.16	1.22	0.60	4339	0.49
CF6-80C2 B1F	07/10/92	2.0	1.1	3500	0.79	0.67	1.19	8802	1.77
gem:							0.77	3650	0.47

Tabel 3c, proefdraaien, met correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₁ H ₄ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₁ H ₄ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₁ H ₄ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	4.9	3.4	800	4.28	4.69	0.60	2688	0.13
CF6-50C+	17/09/92	5.9	0.8	1300	4.68	1.02	0.92	4127	0.91
CF6-50C+	23/09/92	1.3	1.3	880	0.64	1.02	0.38	1750	0.37
CF6-50E2	16/09/92	7.1	2.3	1300	5.67	2.82	0.87	2183	0.31
CF6-50E2	24/09/92	9.6	2.4	1100	7.98	3.12	0.80	1997	0.26
CF6-50E2	28/09/92	8.4	0.2	620	11.91	0.54	0.75	1766	1.40
CF6-50E2	06/10/92	5.9	0.4	1100	4.39	0.41	0.69	1775	1.70
CF6-80A3	28/09/92	0.7	1.4	2800	0.26	0.84	0.92	7071	1.09
CF6-80C2 B1	05/10/92	1.1	0.4	1300	0.62	0.37	0.60	4339	1.63
CF6-80C2 B1F	07/10/92	1.0	0.1	3500	0.39	0.05	1.19	8802	23.92
gem:							0.77	3650	3.17

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

Tabel 4a, start

motor	datum	pow.set. (%)	brandst. (kg/s)	lucht (kg/s)	CO ₂ -ber (vol%)	CO ₂ -gem. (vol%)	C _f (-)	lucht-t (nm ³ /s)
CF6-50C+	14/09/92	100	2.14	635	0.70	0.38	1.83	904
CF6-50C+	17/09/92	100	2.30	662	0.72	0.39	1.84	947
CF6-50C+	23/09/92	100	2.25	658	0.71	0.54	1.31	668
CF6-50E2	16/09/92	100	2.30	656	0.73	0.50	1.45	738
CF6-50E2	24/09/92	100	2.39	674	0.74	0.51	1.44	754
CF6-50E2	28/09/92	100	2.49	679	0.76	0.40	1.89	999
CF6-50E2	06/10/92	100	2.38	676	0.73	0.49	1.48	781
CF6-80A3	28/09/92	100	2.32	730	0.66	0.54	1.22	691
CF6-80C2 A1	21/09/92	100	2.47	810	0.63	0.53	1.19	748
CF6-80C2 B1	05/10/92	100	2.32	802	0.60	0.43	1.39	868
CF6-80C2 B1F	17/09/92	100	2.08	770	0.56	0.49	1.13	680
CF6-80C2 B1F	07/10/92	100	2.47	814	0.63	0.55	1.14	722

Tabel 4b, start, zonder correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₂ H ₂ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₂ H ₂ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₂ H ₂ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	3.5	4.9	1700	1.82	4.06	0.75	5778	0.18
CF6-50C+	17/09/92	6.0	2.8	3200	3.08	2.28	1.41	11699	0.62
CF6-50C+	23/09/92	1.7	3.5	3100	0.65	2.03	0.97	7878	0.48
CF6-50E2	16/09/92	2.0	4.1	3600	0.79	2.58	1.25	10382	0.49
CF6-50E2	24/09/92	2.3	2.2	1600	0.89	1.34	0.56	4791	0.42
CF6-50E2	28/09/92	3.3	1.3	3300	1.65	1.02	1.42	12756	1.40
CF6-50E2	06/10/92	1.5	1.3	6300	0.61	0.86	2.23	19147	2.61
CF6-80A3	28/09/92	1.5	2.7	4400	0.54	1.55	1.41	11770	0.91
CF6-80C2 A1	21/09/92	6.1	5.5	2200	2.32	3.27	0.72	6447	0.22
CF6-80C2 B1	05/10/92	2.3	1.4	3000	1.06	1.05	1.20	10016	1.14
CF6-80C2 B1F	17/09/92	2.8	3.9	2300	1.13	2.53	0.82	6149	0.33
CF6-80C2 B1F	07/10/92	1.7	1.3	4800	0.64	0.72	1.51	13429	2.10
gem:							1.21	10276	1.01

Tabel 4c, start, met correctie voor achtergrondconcentratie

motor	datum	CO-gem (ppm)	C ₂ H ₂ -gem (ppm)	geur (ge/m ³)	CO (g/kg)	C ₂ H ₂ (g/kg)	geur (Mge/kg)	geur (Mge/h)	ge/C ₂ H ₂ (Mge/g)
CF6-50C+	14/09/92	2.5	3.9	1700	1.30	3.24	0.75	5778	0.23
CF6-50C+	17/09/92	5.0	1.8	3200	2.57	1.47	1.41	11699	0.96
CF6-50C+	23/09/92	0.7	2.5	3100	0.28	1.45	0.97	7878	0.67
CF6-50E2	16/09/92	1.0	3.1	3600	0.39	1.95	1.25	10382	0.64
CF6-50E2	24/09/92	1.3	1.2	1600	0.50	0.72	0.56	4791	0.77
CF6-50E2	28/09/92	2.3	0.3	3300	1.14	0.23	1.42	12756	6.23
CF6-50E2	06/10/92	0.5	0.3	6300	0.20	0.21	2.23	19147	10.51
CF6-80A3	28/09/92	0.5	1.7	4400	0.17	0.96	1.41	11770	1.46
CF6-80C2 A1	21/09/92	5.1	4.5	2200	1.94	2.68	0.72	6447	0.27
CF6-80C2 B1	05/10/92	1.3	0.4	3000	0.60	0.32	1.20	10016	3.80
CF6-80C2 B1F	17/09/92	1.8	2.9	2300	0.72	1.88	0.82	6149	0.44
CF6-80C2 B1F	07/10/92	0.7	0.3	4800	0.27	0.14	1.51	13429	10.52
gem:							1.21	10276	3.53

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

4. DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Uit de op de motorentestbank van de KLM uitgevoerde metingen kunnen, voor de verschillende activiteiten, de verhoudingen tussen de koolwaterstof- en de geurconcentraties worden berekend. Deze waarden staan vermeld in de tabellen 5a en 5b, hierin is tevens de standaard afwijking (s) van de meetresultaten alsmede het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de meetwaarde [8] aangegeven. De gepresenteerde waarden zijn gemiddelden van alle meetwaarden. De resultaten zijn niet onderverdeeld naar motortype aangezien bij de verdere verwerking van de resultaten tot een totale geuremissie van de vliegtuigbewegingen op Schiphol een dergelijke onderverdeling niet gebruikt wordt.

tabel 5a, verhouding koolwaterstof- geurconcentratie,
zonder correctie achtergrondconcentraties

activiteit	power setting	emissie- factor Mge/gC _x H _y	standaard afwijking	95%-betr.int
	%			
taxiën	3	0.16	0.08	0.09 - 0.21
landen	10	0.13	0.07	0.09 - 0.18
proefdraaien	30-90	0.47	0.49	0.08 - 0.82
start	100	0.91	0.78	0.09 - 1.40

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

tabel 5b, verhouding koolwaterstof- geurconcentratie,
met correctie achtergrondconcentraties

activiteit	power setting %	emissie- factor Mge/gC _x H _y	standaard afwijking	95%-betr.int
taxiën	3	0.17	0.09	0.10 - 0.23
landen	10	0.15	0.08	0.10 - 0.20
proefdraaien	30-90	3.17	7.32	0.09 - 8.40
start	100	3.04	3.91	0.10 - 5.52

De gebruikte power settings van de motorentestbank van de KLM komen gedeeltelijk overeen met de power settings die vermeld staan in de emissiefactorendatabank van de ICAO (oktober 1989), zodat de resultaten niet in alle gevallen direct met elkaar vergeleken kunnen worden. De door de ICAO [1] in de meeste gevallen gehanteerde power settings en omschrijvingen staan vermeld in tabel 6.

tabel 6, power settings ICAO

Omschrijving	power setting %
take-off	100
climb-out	85
approach	30
idle	7

Bij het taxiën en het landen kan de spreiding in de berekende verhoudingen uit de nauwkeurigheid van de gebruikte geur- en koolwaterstofmetingen

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

worden verklaard (zie bijlage 1). Bij het proefdraaien en starten waren de koolwaterstofconcentratie slechts in geringe mate hoger dan de achtergrondconcentratie. Per afzonderlijke meting zijn de exacte achtergrondconcentraties bekend, zodat betrekkelijk geringe schommelingen in de achtergrondconcentratie tot aanzienlijke verschillen in het uiteindelijke resultaat leiden, dit wordt zichtbaar in de figuren 3 en 4. Opgemerkt kan worden dat voor wat betreft de correctie voor de achtergrondconcentratie niet geheel zeker is of alle in de omgevingslucht aanwezige koolwaterstoffen (met name methaan) onveranderd door de testbank gaan. Een gedeelte van de door de motor aangezogen lucht (ca. 20%) gaat door de verbrandingskamer, hierin zullen de aanwezige koolwaterstoffen wel worden verbrand. De overige lucht wordt in de uitlaat bij de verbrandingsgassen bijgemengd, de uitlaatgastemperatuur zal waarschijnlijk niet hoog genoeg zijn om de aanwezige koolwaterstoffen om te zetten. De uitlaatgastemperatuur bedraagt ca 500 °C, terwijl de zelfontbrandingstemperatuur van methaan 540 °C is. De koolwaterstoffen in de buiten de motor om aangezogen lucht zullen zeker niet worden omgezet.

Het uiteindelijke effect van het verschil in resultaat met en zonder correctie voor de achtergrondconcentratie op de bepaling van de geurimmissiesituatie rondom Schiphol zal uit de verdere verwerking van deze resultaten blijken. De met behulp van deze meetresultaten berekende geurimmissieconcentraties zijn mede afhankelijk van de effectieve duur van de verschillende activiteiten en de koolwaterstofemissie van de desbetreffende motoren per activiteit.

Uit andere geurmetingen aan verbrandingsprocessen is gebleken dat slechts minieme verschillen in bijvoorbeeld procescondities kunnen leiden tot forse verschillen in emissies. In het algemeen geldt dat kleine concentratieverschillen van componenten met een lage geurdrempel, zoals niet of gedeeltelijk geoxideerde koolwaterstoffen (z.g. kraakprodukten), kunnen leiden tot relatief grote verschillen in geurconcentratie, zonder dat dit in het totaal-koolwaterstofgehalte tot uiting komt. Verschillen in de

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

uitvoering van motoren kunnen dus leiden tot aanzienlijke verschillende geuremissies. De extrapolatie van de hier gevonden waarden naar andere motortypen en -merken zal met de nodige voorzichtigheid moeten worden uitgevoerd.

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

5. REFERENTIES

- [1] ICAO engine exhaust emissions databank
ICAO committee on aviation environmental protection working group 3
meeting, 10 - 13 october 1989, Mariehamn, Aland.
- [2] ICAO, International standards and recommended practices,
volume II, Aircraft engine emissions.
- [3] Bruikbaarheid van snuffelploegmetingen bij stankonderzoek,
Ministerie VROM, publikatiereeks lucht nr. 66, april 1987.
- [4] Empirische vergelijking verspreidingsmodellen voor geur,
Ministerie VROM, publicatiereeks lucht nr. 84, september 1989.
- [5] Scheafer, Drs. J.,
Concentratie verloop vluchtige verbindingen in kunststofzakken,
Centraal Instituut voor Voedingsmiddelenonderzoek TNO,
rapport nr. R 6608, oktober 1980.
- [6] Nederlands Normalisatie Instituut, NPR 2788,
Luchtkwaliteit Rook-, proces- en uitlaatgassen,
Gravimeterische bepaling van de stofconcentratie en stofdebiet.
- [7] Statistical Annual Review 1990
Schiphol Airport Authority
- [8] Nederlands Normalisatie Instituut, NEN 3114,
Nauwkeurigheid van metingen, termen en definities.

Bepaling emissiefactoren van vliegtuigmotoren

6. VERANTWOORDING

- Naam en adres van de opdrachtgever:

IMW-TNO

t.a.v. de heer ir. C. Huygen

Postbus 6011

2600 JA Delft

- Namen en functies van de medewerkers

Ing. A. Boom, onderzoeksleider

W.L. van Kamp, onderzoeksmedewerker

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

-

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

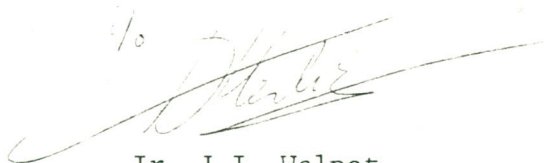
september 1992 - januari 1993

- Ondertekening



Ing. A. Boom
onderzoeksleider

Goedgekeurd door:



Ir. J.I. Walpot
werkgroep leider

Schema motoretestbank KLM

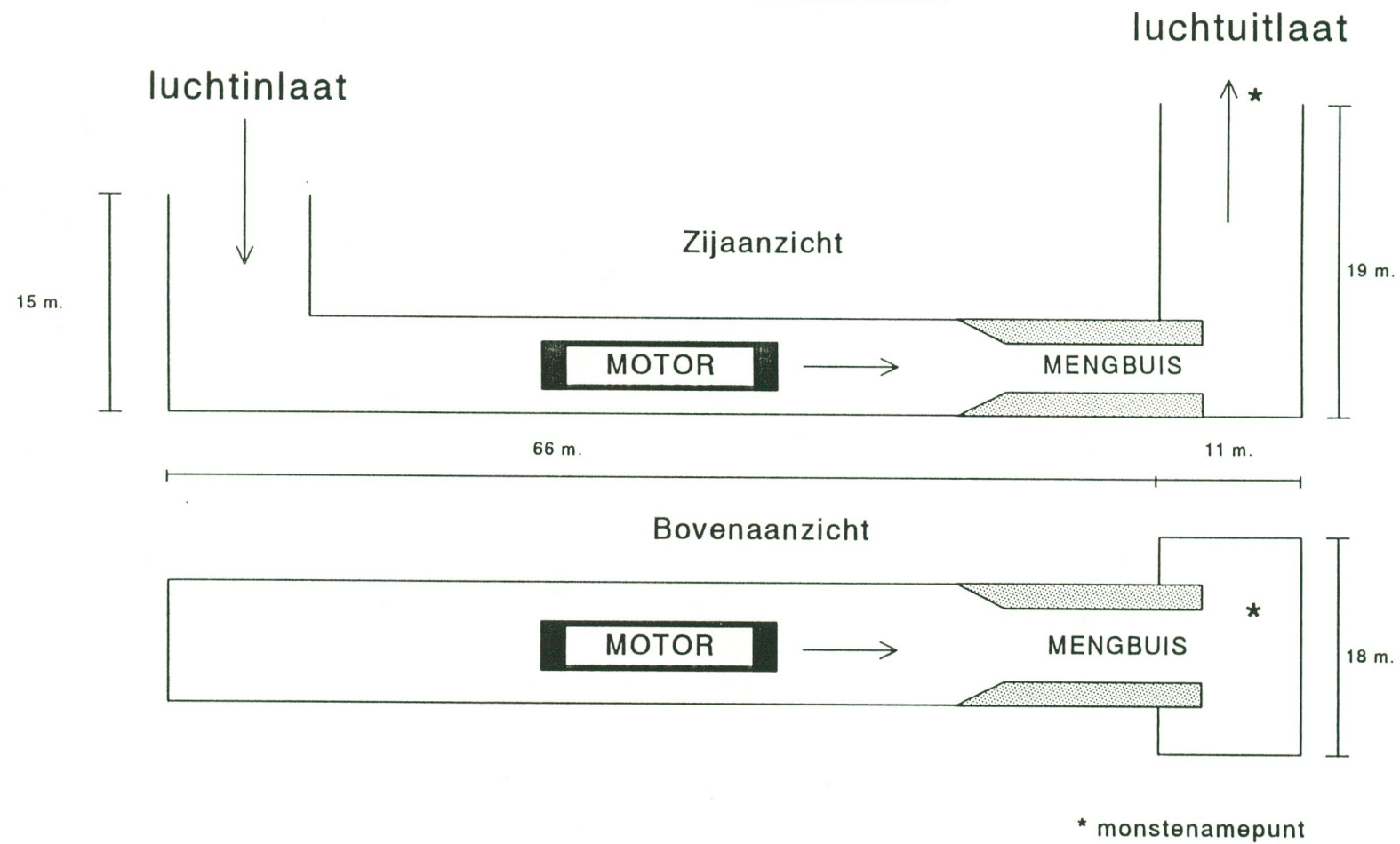


fig. 1



Metingen motorenproefbank KLM 1992
Landen

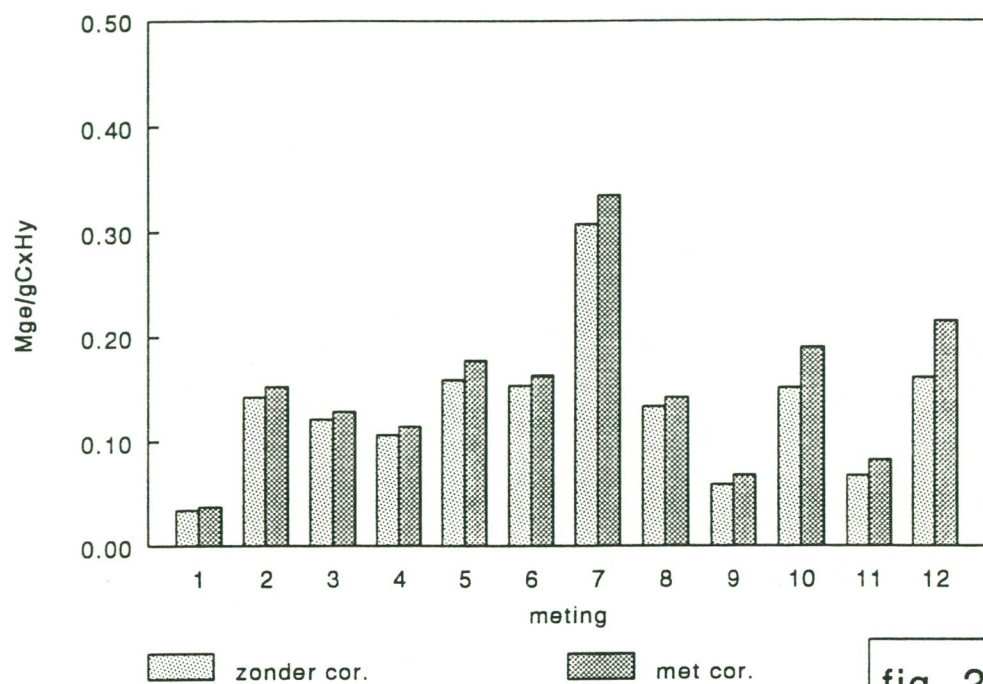


fig. 2



Metingen motorenproefbank KLM 1992
proefdraaien

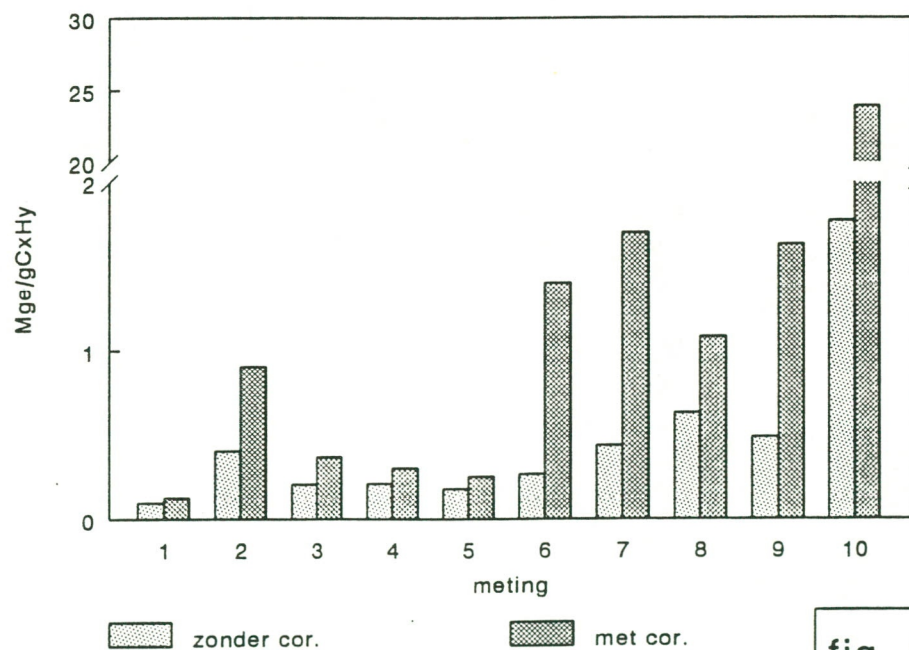


fig. 3



Metingen motorenproefbank KLM
start

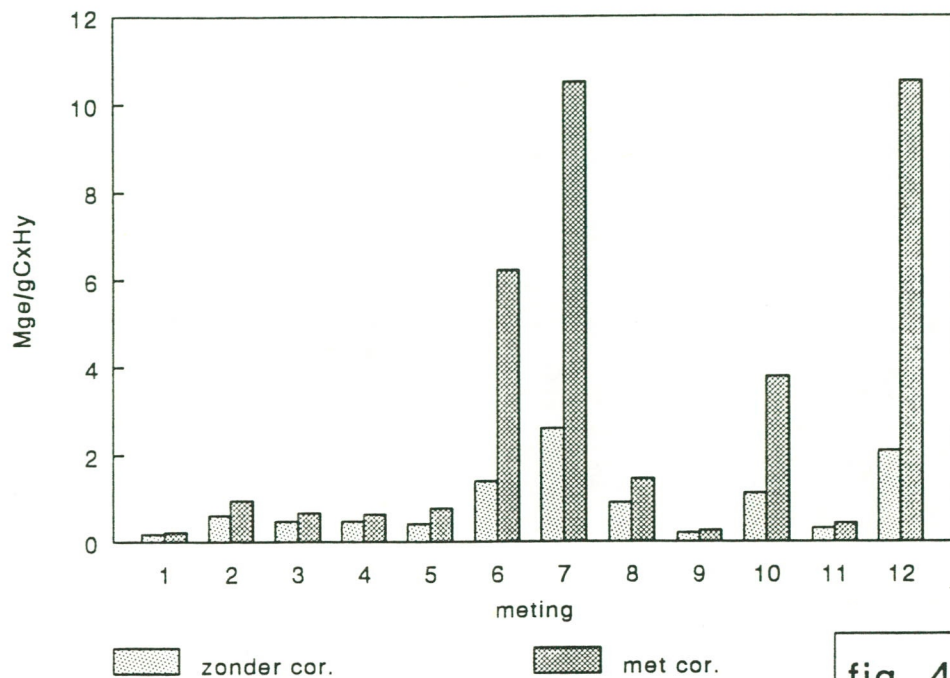


fig. 4



Metingen motorenproefbank KLM 1992
taxiën

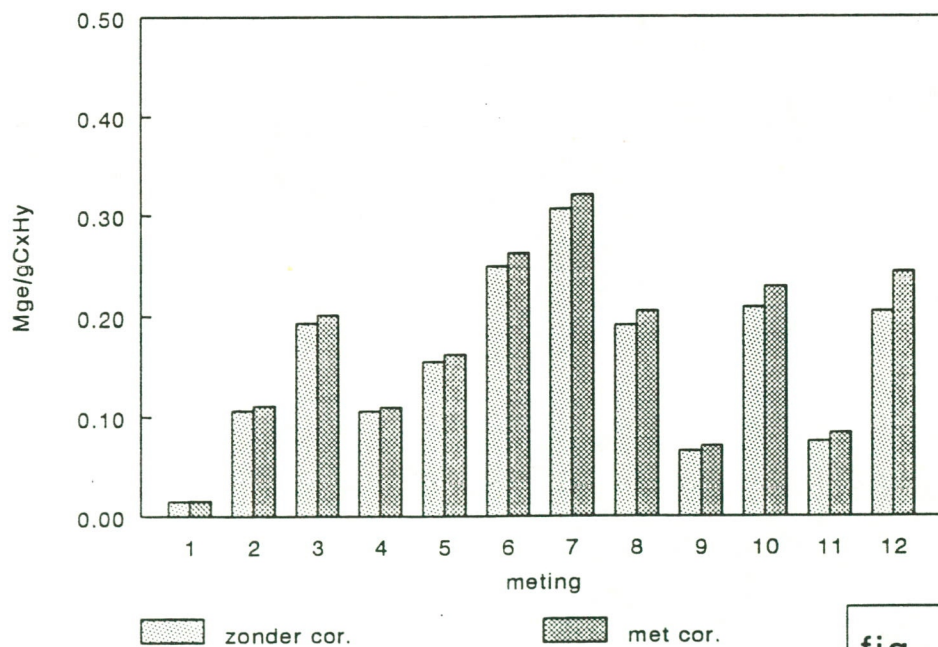


fig. 5

