

nederlands tijdschrift voor
natuurkunde

19 maart 1996

62/5



De effecten van vliegtuigemissies

De fysica van het fotokopiëren

NNV-jaarverslag 1995

Klimaat- en milieueffecten van mondiaal vliegverkeer

P.F.J. van Velthoven, J.P.F. Fortuin, W.M.F. Wauben, en H. Kelder

Door vliegtuigen worden stikstofoxyden, kooldioxyde, waterdamp, zwavel en roet uitgestoten. De uitstoot van stikstofoxyden verandert de samenstelling van de atmosfeer rond de tropopauze, met name de concentratie van ozon. De veranderingen van de atmosferische samenstelling en de door vliegtuigen gevormde condensstrepen beïnvloeden de stralingsbalans van de atmosfeer.

Sinds enige tijd bestaat er een hernieuwde belangstelling voor de gevolgen van de door vliegtuigen uitgestoten stoffen op het biosfeerklimatestelsel. In de zestiger en zeventiger jaren werd veel aandacht geschonken aan de mogelijke afbraak van de ozonlaag op hoogtes rond de 20 kilometer ten gevolge van de emissies door nieuw te ontwikkelen supersone vliegtuigen. In de negentiger jaren is er groeiende aandacht voor de gevolgen van emissies op lagere hoogte rond de tropopauze, de grens tussen de troposfeer en stratosfeer (zie figuur 1), waar het meest intensieve vliegverkeer plaatsvindt. Met name geldt dit voor het vliegverkeer tussen Europa en de VS, de zogenaamde Noordatlantische vliegcorridor, waar de tropopauzehoogte varieert tussen 8 en 12 km. Zo'n 40 % van het vliegverkeer vindt plaats boven de tropopauze, dat wil zeggen in de stratosfeer. Dit artikel geeft een overzicht van de huidige kennis van de klimaat- en milieueffecten ten gevolge van vliegtuigemissies.

Emissies

Door de verbranding van kerosine in vliegtuigmotoren komen in principe slechts geoxydeerde koolwaterstoffen, koolmonoxyde, kooldioxyde en waterdamp in de atmosfeer. Door de hoge temperatuur waarbij de verbranding plaats vindt, wordt een deel van het meest in de atmosfeer voorkomende gas, stikstof (N_2), gedissocieerd en vervolgens geoxydeerd tot stikstofoxyden ($NO_x = NO$ en NO_2). Door onvolledige verbranding komen daarnaast nog roet en allerlei koolwaterstoffen vrij. Kerosine bevat ook geringe hoeveelheden andere stoffen,

zoals zwavel, dat als zwaveldioxyde wordt uitgestoten. Tabel 1 geeft een overzicht van schattingen van de hoeveelheid door het vliegverkeer in de atmosfeer geëmitteerde stoffen voor 1990. In dat jaar bedroeg het geschatte verbruik van vliegtuigbrandstof 172 Mton, dat is ongeveer 3 % van de totale hoeveelheid verbruikte fossiele brandstoffen. De groei van het brandstofverbruik door het luchtverkeer tot het jaar 2000 wordt op 2 tot 4 % per jaar geschat, terwijl voor het aantal passagierskilometers een groei van 4 tot 6 % per jaar verwacht wordt. In de derde kolom van tabel 1 wordt het procentuele aandeel van vliegverkeer in de uitstoot door verbranding van fossiele brandstoffen gegeven. Hier-

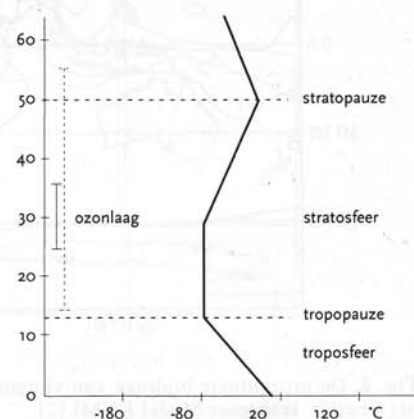


Fig. 1. Temperatuuroopbouw van de atmosfeer en locatie van de ozonlaag. Vliegtuigemissies vinden grotendeels plaats rond de tropopauze, het grensvlak tussen de troposfeer en de stratosfeer.

uit blijkt dat de relatieve bijdrage van vliegtuigemissies aan de totale uitstoot door verbranding van fossiele brandstoffen klein is. Vliegtuigemissies blijken echter meer dan evenredige veranderingen in de samenstel-

Tabel 1. De absolute en relatieve bijdrage van vliegtuigverkeer aan de emissies door verbranding van fossiele brandstoffen geschat voor het referentiejaar 1990. Ook zijn mogelijke effecten van de emissies aangegeven.

Directe verbrandingsprodukten:			
produkt	absolute bijdrage vliegtuigverkeer	procentuele bijdrage vliegtuigverkeer	mogelijke effecten
kooldioxyde (CO_2)	498 Mton	2,3 %	broeikaseffect
waterdamp	218 Mton		wolkvorming, broeikaseffect
zwaveldioxyde, (SO_2)	156 Mton	0,1 %	aerosolvorming
Produkten door onvolledige verbranding en van reacties in lucht bij hoge temperatuur:			
stikstofoxyden	0,8 Mton	3,5 %	ozonvorming en -afbraak
vluchtige organische stoffen (VOS)	406 kton	1,5 %	effect op ozonchemie
roet	3,5 kton		wolkvorming, afscherming straling
koolmonoxyde (CO)	679 kton	0,1 %	effect op ozonchemie
lachgas (N_2O)	verwaarloosbaar		broeikaseffect
methaan (CH_4)	verwaarloosbaar		effect op ozonchemie, broeikaseffect

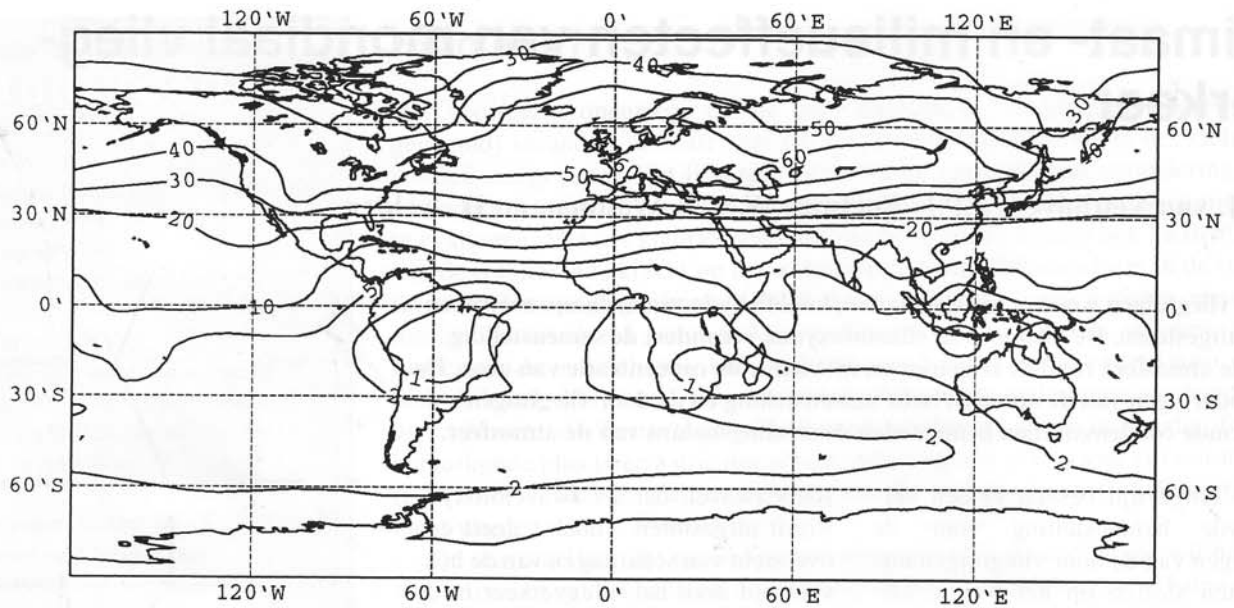


Fig. 2. De procentuele bijdrage van vliegtuigemissies aan de stikstofoxydeconcentratie op kruisvluchthoogte in januari, berekend met het Chemie Transport Model KNMI [2].

ling van de atmosfeer en het klimaat te veroorzaken, doordat ze niet bij het aardoppervlak plaatsvinden, maar in de vrije atmosfeer.

Verstoring van NO_x -concentraties

In de eerste plaats leiden de door vliegtuigen in de hoge troposfeer en lage stratosfeer geëmitteerde gassen en deeltjes tot een aanmerkelijke verstoring van achtergrondconcentraties. Zo kan de stikstofoxydeconcentratie ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) in jonge vliegtuigpluimen 1000 - 5000 pptv bedragen [1] (pptv = parts per trillion by volume). In de Noordatlantische vliegcorridor vinden we gemiddeld zo'n 150 pptv NO_x , en op tropopau-

zehoogte in gebieden met weinig vliegverkeer tussen 1 en 50 pptv. Tabel 2 laat de bijdrage van vliegverkeer zien in vergelijking met andere bronnen van stikstofoxyden. De marge in de emissie door vliegverkeer is voornamelijk een gevolg van onzekerheden in de hoeveelheid uitgestoten stikstofoxyde per eenheid brandstof op kruisvluchthoogte (het vluchtsegment tussen opstijgen en afdalen dat meestal op een hoogte tussen de 8 en 13 km ligt) en in de intensiteit en locatie van militair vliegverkeer. Een grote onzekerheid is verder de omvang van de stikstofoxydeproductie ten gevolge van bliksem. Deze bron is echter voorname-

lijk van belang boven land in de tropen en blijkt minder dan 10 % bij te dragen aan de stikstofoxydeconcentratie op gematigde breedtes [2]. Daarnaast is de flux vanuit het bovenste deel van de stratosfeer belangrijk. Daar wordt lachgas (N_2O), afkomstig van emissies aan het aardoppervlak, onder invloed van ultraviolette zonnestraling in NO_x omgezet. Bij deze bron is de grootte minder een probleem dan de onzekerheden in de beschrijving van het transport van de hogere stratosfeer naar de lagere stratosfeer en vervolgens naar de troposfeer [6].

In de lagere troposfeer worden stikstofoxyden door uitregenen en door droge depositie aan het aardoppervlak uit de atmosfeer verwijderd. De gemiddelde levensduur van stikstofoxydes bedraagt hier slechts enkele dagen, veel korter dan in de hogere troposfeer en stratosfeer. Hoewel de NO_x -emissie door de industrie aan het oppervlak ongeveer 35 maal zo groot is als die door vliegverkeer op kruisvluchthoogte, geeft ze toch maar een bijdrage van minder dan 30 % aan de stikstofoxydeconcentratie op tropopauzehoogte [2]. Dit is een gevolg van de korte verblijftijd in de lage troposfeer en de geringe frequentie van opwaarts transport van vervuiling in wolken en depressies.

Figuur 2 toont voor januari de

Tabel 2. Bronnen van stikstofoxyden, een schatting van hun grootte (met tussen haakjes het bereik van in de literatuur gegeven waarden), en het deel van de atmosfeer waar de emissies voornamelijk plaatsvinden [2].

Stikstofoxydebron	Grootte en bereik (Mton N per jaar)	Gebied van maximale bronsterkte
Vliegverkeer	0,8 (0,58 - 0,85)	Op 8 - 13 km hoogte op gematigde breedtes op het noordelijk halfrond
Biomassaverbranding	5,3 (1,5 - 24)	Landoppervlak in de tropen
Industrie en overig verkeer	22 (20 - 24)	Landoppervlak op gematigde breedtes op het noordelijk halfrond
Microben in de grond	3,9 (3-20)	Niet-polair landoppervlak
Bliksem	5 (2-20)	Vrije troposfeer in de tropen boven land in de zomer
Flux vanuit de hogere stratosfeer	0,64 (0,5-1)	Hogere stratosfeer

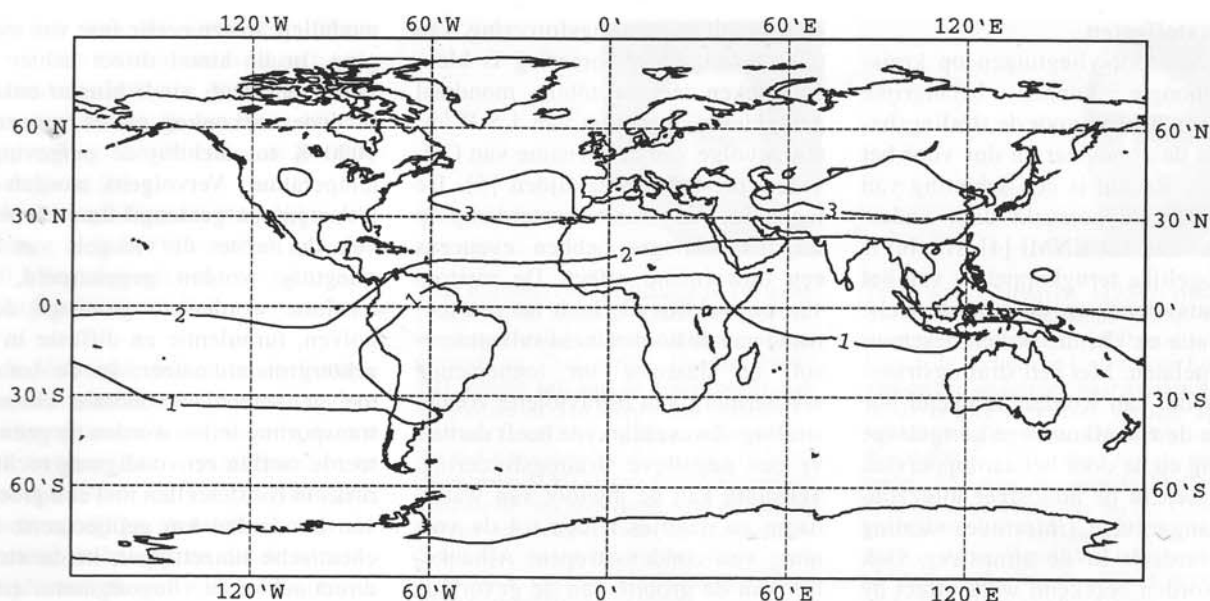


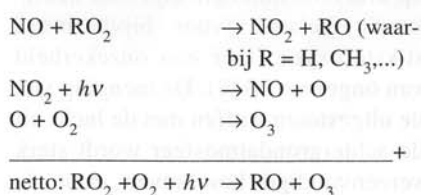
Fig. 3. De met figuur 2 corresponderende procentuele ozontoe name ten gevolge van vliegverkeer.

procentuele bijdrage van vliegtuig-emissies aan de stikstofoxydeconcentratie op kruisvluchthoogte (op 200 hPa ofwel een hoogte van ongeveer 12 km) berekend met het Chemie Transport Model KNMI (CTMK). Duidelijk is de Noordatlantische vliegcorridor te herkennen. De maximum toename door vliegverkeer bedraagt in deze corridor en stroomafwaarts ervan zo'n 60 %. In andere seizoenen is de toename kleiner, in juli bijvoorbeeld 50 %. De procentuele bijdrage van vliegtuig-emissies aan de stikstofoxydeconcentratie in de corridor is 's zomers het kleinst omdat de achtergrondconcentratie dan het grootst is doordat er meer stikstofoxyde door bliksem gevormd wordt en het opwaarts transport van oppervlakte-emissies door convectie sterker is. De toename van de zonaal (Oost-West) gemiddelde stikstofoxydeconcentratie door vliegverkeer bedraagt maximaal 53 % in januari en 34 % in juli. Het gaat hier dus ondanks de relatief geringe omvang van de vliegtuig-emissies ten opzichte van andere bronnen (zie tabel 1 en 2) om een aanzienlijke verstoring van de achtergrondconcentratie van NO_x .

Verstoring van de ozonverdeling

In de tweede plaats leiden de door vliegverkeer uitgestoten stikstofoxyden via chemische reacties tot veranderingen in andere atmosferische

bestanddelen, zoals ozon en het waterstofoxyderadicaal (een OH-molecuul met ongepaard elektron). Net als boven sterk vervuilde geïndustrialiseerde gebieden kan een toename van stikstofoxyden ook op kruisvluchthoogte leiden tot ozonvorming. Zo wordt geschat dat ten gevolge van menselijke activiteiten de hoeveelheid ozon in de vrije troposfeer de laatste 100 jaar op gematigde breedten op het noordelijk halfrond met zo'n 15 ppbv tot ongeveer 30 ppbv is toegenomen [5]. De belangrijkste reactieketen die leidt tot ozonvorming onder invloed van zonlicht is:



Bij deze reactieketen treden de stikstofoxyden als katalysator op (netto verdwijnt er geen NO of NO_2). De huidige modellen berekenen dat de ozontoe name ten gevolge van vliegtuig-emissies op tropopauzehoogte op gematigde breedten ongeveer 3 % bedraagt [1, 2]. Figuur 3 laat voor januari de procentuele bijdrage van vliegverkeer aan ozon voor de stikstofoxydeverstoring uit figuur 2 zien, zoals berekend met het CTMK model. Het feit dat de procentuele

toename van ozon veel minder groot is dan die van stikstofoxyde, is een gevolg van de geringe effectiviteit van ozonproductie en de relatief langere levensduur van ozon op tropopauzehoogte (enkele maanden) in vergelijking met die van stikstofoxyden, welke op die hoogte van de orde van tien dagen is. Daardoor heeft de verandering van de stikstofoxydeconcentratie ook een veel lokaler karakter dan de verandering van de ozonconcentratie. De toename in troposferisch ozon zou in principe tot een afname van de hoeveelheid schadelijke ultraviolette straling aan het aardoppervlak kunnen leiden. Negentig procent van alle ozon bevindt zich echter in de stratosfeer en daar is op gematigde breedten in de winter de hoeveelheid ozon met zo'n 3 tot 6 % afgenomen in de afgelopen tien jaar [3]. De ozontoe name in de troposfeer en de ozonafname in de stratosfeer hebben tegengestelde effecten op de uv-flux aan de grond. Trends in de uv-flux zijn nog niet met voldoende zekerheid te bepalen. Dit komt enerzijds doordat de meetreeksen van uv nog te kort zijn om de trend van natuurlijke variaties te kunnen onderscheiden. Anderzijds komt het doordat wolken en aerosolen de uv-flux aan de grond beïnvloeden en voor deze parameters kunnen de metingen nog niet voldoende nauwkeurig gecorrigeerd worden.

Klimaat effecten

Emissies door vliegtuigen op kruisvluchthoogte kunnen belangrijke gevolgen hebben voor de stralingsbalans in de atmosfeer en dus voor het klimaat. Recent is een schatting van deze effecten gemaakt door onderzoekers van het KNMI [4]. Hierbij is de mogelijke terugkoppeling van het klimaatsysteem op de atmosferische circulatie en chemie buiten beschouwing gelaten. Met een stralingstransportmodel kan worden berekend hoe de van de zon afkomstige kortgolvlige straling en de door het aardoppervlak en gasen in de atmosfeer uitgezonden langgolvlige (infrarode) straling zich verdeelt in de atmosfeer. Ook kan worden berekend welk effect de verandering van de atmosferische samenstelling door vliegtuigemissies heeft op de stralingsbalans. Een veel gebruikte grootte is de zogenaamde stralingsforcering, dat is de verandering in de netto neerwaartse stralingsenergieflux (in W/m^2) bij de tropopauze [5]. Een toename van de stralingsforcering is een indicatie voor het versterkte broeikas effect en zal normaal gesproken leiden tot een opwarming.

In het KNMI stralingstransportmodel zijn de concentraties van atmosferische bestanddelen veranderd overeenkomstig de verstoringen door vliegtuigemissies in de Noordatlantische vliegcorridor. Tabel 3 laat zien dat er zowel positieve als negatieve effecten op de stralingsforcering zijn. Bovendien zijn er grote verschillen tussen zomer en winter. De netto stralingsforcering ten gevolge van vliegtuigemissies is dan ook uitermate onzeker. Als broeikasgas zorgt het kooldioxyde dat afkomstig is van vliegtuigemissies direct voor

een positieve stralingsforcering van $0,02 W/m^2$. Deze forcering is klein vergeleken met de totale, mondiaal gemiddelde, forcering van $1,5 W/m^2$ ten gevolge van de toename van CO_2 sedert pre-industriële tijden [5]. De toenames van ozon en waterdamp op tropopauzehoogte hebben eveneens een opwarmend effect. De uitstoot van zwaveldioxyde leidt tot een toename van de hoeveelheid sulfaataerosol, en daarmee tot toenemende afscherming van ultraviolette zonnestraling. Zwaveldioxyde heeft derhalve een negatieve stralingsforcering. Tenslotte kan de uitstoot van waterdamp en deeltjes leiden tot de vorming van condensstrepen. Afhankelijk van de grootte van de gevormde ijsdeeltjes kunnen deze een negatieve of positieve stralingsforcering hebben, omdat ze zowel de kortgolvlige ultraviolette straling van de zon reflecteren als ook de langgolvlige infrarode straling vanuit het onderste deel van de atmosfeer absorberen.

Onzekerheden

Er bestaan nog veel onzekerheden met betrekking tot de effecten van vliegtuigemissies: de totale hoeveelheid vliegbewegingen is slecht bekend, in het bijzonder de bijdrage van militair vliegtuigverkeer. Voor 1991, het jaar van de Golfoorlog, wordt deze bijdrage wel op 40 % geschat. De emissie-indices (hoeveelheid uitgestoten stof per kilo brandstof) van verschillende stoffen op kruisvluchthoogte zijn niet nauwkeurig bekend (voor bijvoorbeeld stikstofoxyde is er een onzekerheid van ongeveer 30 %). De menging van de uitgestoten stoffen met de lucht uit de achtergrondatmosfeer wordt sterk vereenvoudigd beschreven door de

modellen. In een eerste fase van menging, in de straal direct achter de vliegtuiguitlaat, vindt binnen enkele seconden afkoeling plaats van zo'n 1000 K tot dichtbij de omgevings temperatuur. Vervolgens worden de uitlaatgassen gemengd door de wervels die achter de vleugels van het vliegtuig worden gegenereerd, en tenslotte worden ze gemengd door golven, turbulentie en diffusie in de achtergrondatmosfeer. In de tot nu toe gehanteerde mondiale chemie-transportmodellen worden de geëmitteerde stoffen eenvoudigweg rechtstreeks in roostercellen met een grootte van honderden km geïnjecteerd. De chemische omzettingen in de straal direct achter de vliegtuigmotor en in de pluim vormen een interessant onderzoeksgebied, waar nog veel werk aan gedaan moet worden.

De beschrijving van de chemie van de achtergrondatmosfeer in de modellen houdt momenteel weinig rekening met reacties op aerosolen of in wolken druppels (zogenaamde heterogene chemie). Voor een belangrijk deel zijn deze processen slecht bekend of zijn de reactiesnelheden nog niet met voldoende nauwkeurigheid gemeten. Daarnaast zijn de achtergrondconcentraties van sommige stoffen, zoals die van het waterstofoxyderadikaal en zwaveldioxyde, niet goed bekend. Voor een deel is dit terug te voeren op onzekerheden in de achtergrondemissies en in het transport. Zo is de vorming van stikstofdioxyde ten gevolge van elektrische ontladingen in tropische onweersbuien, welke net als het merendeel van de vliegtuigemissies plaatsvindt in de hogere troposfeer, slechts in orde van grootte bekend. De uitwisseling tussen de troposfeer en de stratosfeer alsmede het verticale transport in wolken vormen andere onzekerheden. Tenslotte zijn er nog niet veel metingen gedaan in de vrije troposfeer en lage stratosfeer waarmee de modellen vergeleken kunnen worden.

Het is nog onduidelijk of de gebruikte mondiale chemie-transportmodellen van de atmosfeer voldoende oplossend vermogen in ruimte en tijd hebben om de niet-lineaire chemie goed te kunnen simuleren. Tot voor kort werden er slechts berekeningen met twee-dimensionale

Tabel 3: De geschatte stralingsforceringen (W/m^2) van veranderingen in de achtergrondconcentraties in de Noordatlantische vliegcorridor door vliegverkeer.

	verstoring door vliegverkeer	stralingsforcering zomer (W/m^2)	stralingsforcering winter (W/m^2)
CO_2	+1,25 ppmv	0,02	0,02
H_2O	+76 tot +380 ppbv	+0,01 tot +0,05	+0,05 tot +0,24
O_3	+5 tot +20 ppbv	+0,03 tot +0,14	+0,01 tot +0,05
SO_2	+10 tot +30 %	-0,18 tot -0,55	-0,14 tot -0,42
condensstrepen, 0,5 % bedekking		-0,15 tot +0,30	+0,05 tot +0,30

modellen van de atmosfeer uitgevoerd. Een recente studie heeft aangetoond dat ook een goed oplossend vermogen nodig is om de verticale verspreiding van de emissies goed te beschrijven [6].

Met betrekking tot mogelijke veranderingen in het klimaat ten gevolge van vliegtuigemissies bestaan nog weinig serieuze studies.

In de Verenigde Staten en in Europa zijn momenteel een aantal onderzoeksprogramma's aan de gang die tot doel hebben deze onzekerheden te reduceren. Voor de vliegtuigindustrie is een spoedige vaststelling van de effecten van belang, omdat de ontwikkeltijd voor nieuwe vliegtuigmotoren en vliegtuigtypen vele jaren bedraagt. In Europa is zojuist het Aeronox programma afgesloten dat het effect van vliegtuigemissies op de atmosferische stikstofoxydeverdeling heeft bestudeerd [2]. Het KNMI was bij de modellering binnen Aeronox betrokken. De nog lopende Europese onderzoeksprojecten Polinat (Pollution from Aircraft Emissions in the North-Atlantic Flight Corridor) [1] en Stream (Stratosphere-Troposphere Experiment by Aircraft Measurements) zijn gericht op modelvalidatie door middel van vliegtuigmetingen van de atmosferische samenstelling rond de tropopauze in de vliegcorridors.

Referenties

1. Polinat, *Pollution from aircraft emissions in the North-Atlantic flight corridor*, ed. U. Schumann, Final report to CEC, CEC contract EV5V-CT93-0310, te verschijnen in 1996.
2. Aeronox, *The impact of NO_x emissions from aircraft upon the atmosphere at flight altitudes 8-15 km*, ed. U. Schumann, Final report to CEC, CEC contract EV5V-CT91-0044, 1995.
3. World Meteorological Organization (WMO), *Scientific assessment of ozone depletion: 1994*, WMO report no. 37, Geneva, 1994.
4. J.P.F. Fortuin, R. van Dorland, W.M.F. Wauben en H. Kelder, *Greenhouse effects of aircraft emissions as calculated by a radiative transfer model*, Ann. Geophys. **13**, 413-418, 1995.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate change 1994*, Cambridge University Press, 1994.
6. P.F.J. van Velthoven en H. Kelder, *Estimates of stratosphere-troposphere exchange: sensitivity to model formulation and horizontal resolution*, J. Geophys. Res. **101**, 1429-1434, 1996.



Paul Fortuin (1957) behaalde in 1979 een 'Bachelor of Science' graad in 'Electronic Engineering' aan de Universiteit van Pretoria in Zuid-Afrika. Daarna (1981-82) volgde hij, aan de Universiteit van California in San Diego een 'Master of Science' studie in 'Applied Ocean Science and Electrical Engineering'. In 1992 promoveerde hij aan de Rijksuniversiteit Utrecht op een onderzoek naar de massabalans en temperatuur op Antarctica. Sindsdien werkt hij bij het KNMI aan onderzoek naar de klimaatgevoeligheid voor veranderingen in ozon.



Peter van Velthoven (1958) studeerde Theoretische Natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Utrecht. In 1990 promoveerde hij aan de Technische Universiteit Eindhoven op een onderzoek naar zwaartegolven in de hogere atmosfeer verricht op het KNMI en bij de Sterrenwacht Westerbork. Van 1990 tot 1992 deed hij als postdoc onderzoek naar de uitwisseling tussen stratosfeer en troposfeer bij het Centre de Recherches en Physique de l'Environnement in Parijs. Vanaf 1992 is hij werkzaam als onderzoeker bij de sectie Klimaatscenario's en Ozon van het KNMI.



Hennie Kelder (1944) studeerde Theoretische Natuurkunde aan de Katholieke Universiteit Nijmegen. Na zijn afstuderen in 1970 trad hij in dienst van het KNMI voor het verrichten van onderzoek naar golfvoortplanting in de ionosfeer. In 1980 werkte hij een jaar bij de Service d'Aéronomie in Parijs. Hij is gepromoveerd aan de TU Eindhoven op onderwerpen op het gebied van golven in de atmosfeer. Hij is hoofd van de sectie Klimaatscenario's en Ozon van de afdeling Klimaatonderzoek en Seismologie van het KNMI.



Wiel Wauben (1963) studeerde Sterrenkunde aan de Katholieke Universiteit Nijmegen en promoveerde vervolgens in 1992 aan de Vrije Universiteit Amsterdam met een proefschrift over stralingstransport in planeetatmosferen. Sinds 1993 verricht hij onderzoek op het gebied van de mondiale modellering van atmosferische chemie en transport.