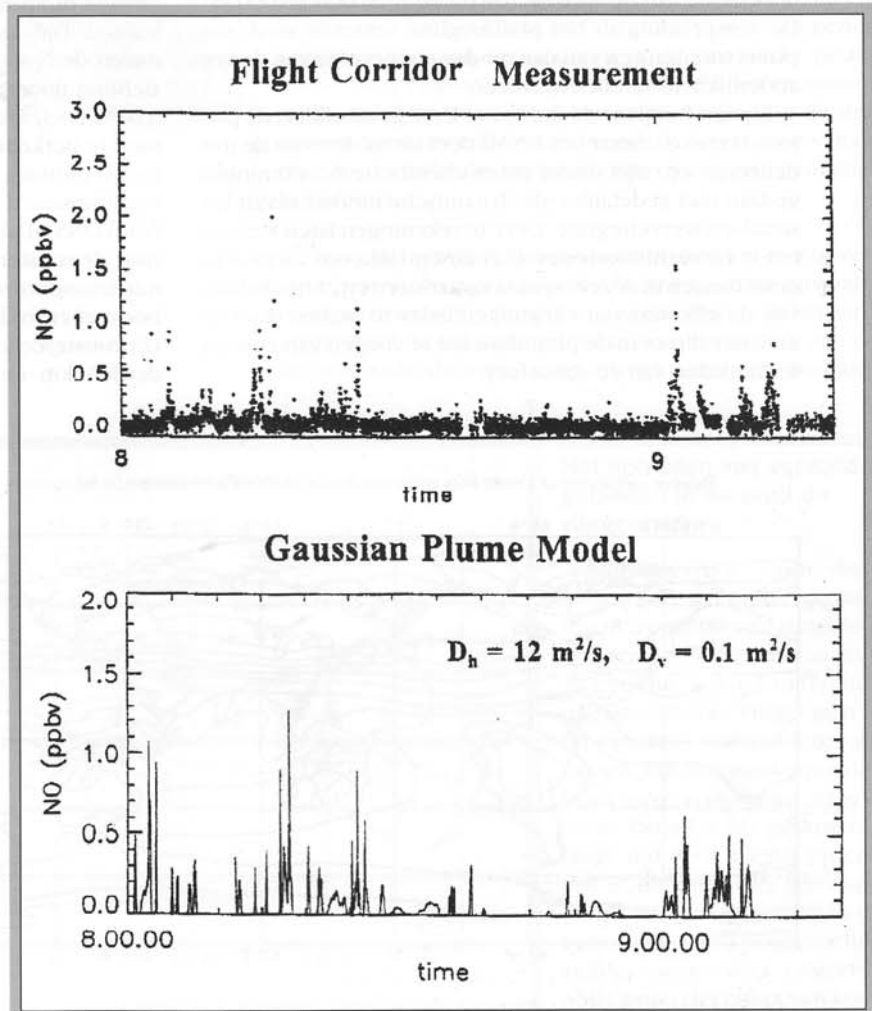


Grootschalige verspreiding van vliegtuig-emissies in de troposfeer en stratosfeer

Relevante fysische processen

In dit artikel worden de relevante verspreidingsprocessen alsmede de klimaateffecten van luchtverontreiniging door vliegtuigen besproken. Met betrekking tot de korter levende bestanddelen van de verontreiniging zoals NO_x is er sprake van een grote mate van variabiliteit in de verspreiding ten gevolge van de dagelijkse veranderingen van het weer. De verticale verspreiding in de stratosfeer waar zo'n 40 % van de emissies plaatsvindt is langzaam en beperkt. In de troposfeer vindt snelle verticale menging plaats. De uitwisseling tussen troposfeer en stratosfeer is niet nauwkeurig bekend, zodat verder onderzoek nodig is. Een schatting van de klimaateffecten van vliegtuigverkeer door veranderingen in CO_2 , waterdamp, sulfaataerosolen, ozon en condenssporen geeft aan dat de stralingsforcering 's winters in de Noord-Atlantische vlieggkorridor in de orde van een aantal procent van de opwarming door verdubbeling van CO_2 zou kunnen bedragen. In de zomer is nog onzeker of er sprake is van afkoeling dan wel opwarming. Deze schatting bevat grote onzekerheden die onderwerp zullen zijn van verder onderzoek.

Peter van Velthoven,
Hennie Kelder
en Wiel Wauben



Figuur 1: Waarneming van vliegtuigpluimen op kruisvluchthoogte in de Noord-Atlantische vlieggkorridor. Boven: Gemeten stikstofoxydeconcentratie. Onder: Met een Gaussisch pluimmodel berekende stikstofoxydeconcentratie. Met dank aan Dr. U. Schumann, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt².

Verspreiding van vliegtuigemissies direct achter het vliegtuig

De verspreiding van uitlaatgassen direct achter een vliegtuig kan onderverdeeld worden in drie achtereenvolgende fasen: verspreiding in de straal, de wervel en de pluim. Dit is een onderverdeling naar de dynamische processen die een rol spelen in de verspreiding. In het straalregime bevinden de uitlaatgassen zich in de stralen (jets) achter de verschillende individuele motoren. Aan het eind van het straalregime komen de stralen bij elkaar en worden opgenomen in de wervels die zich ten gevolge van de luchtstroming achter elk vliegtuig bevinden. De wervels worden na geruime tijd onstabiel en komen dan in het pluimregime waarin de verdere verspreiding door dyna-

Over de auteurs

Dr. P. van Velthoven en dr. W. Wauben

zijn werkzaam als Onderzoeker in de Sectie Klimaatscenario's en Ozononderzoek van het KNMI.

Dr. H. Kelder

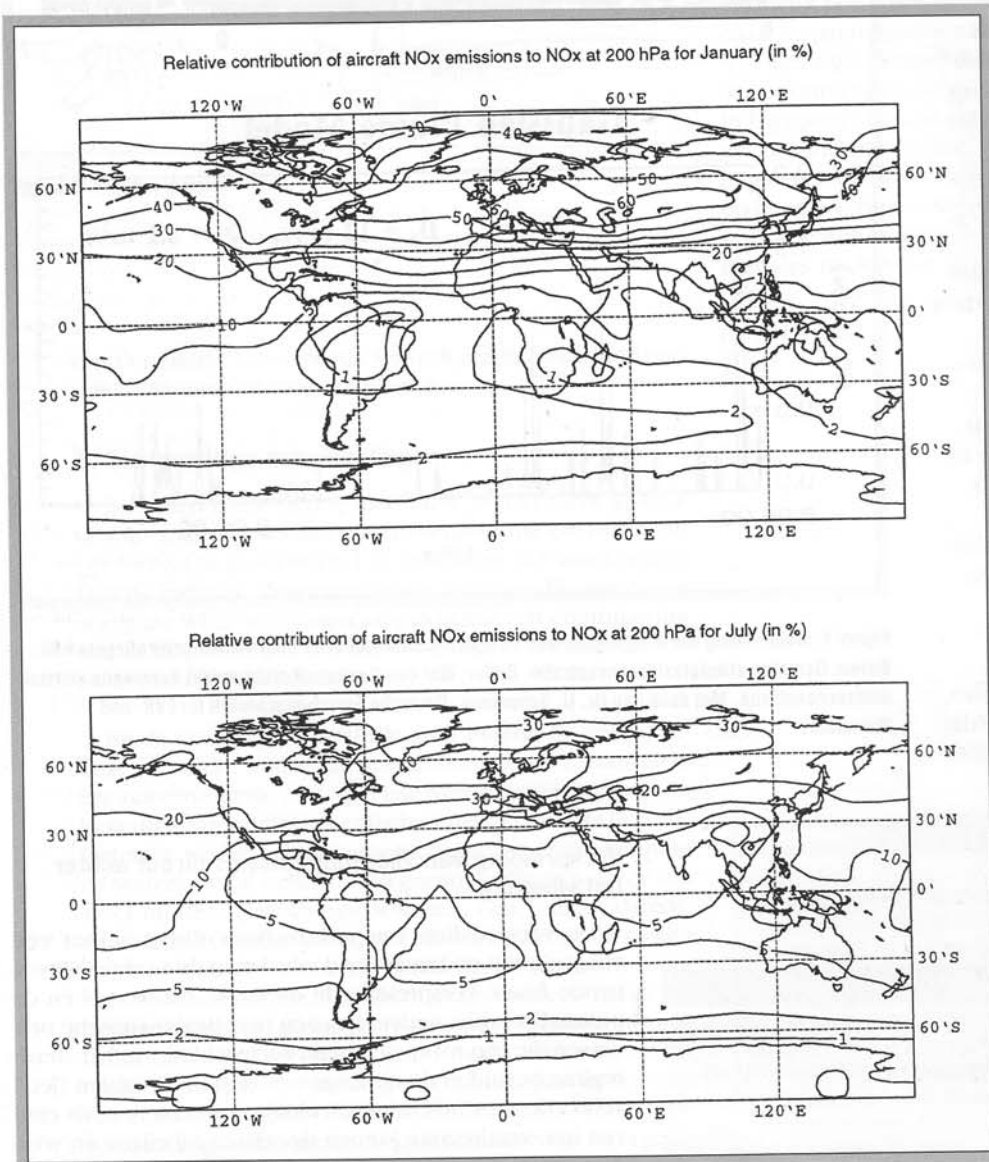
is hoofd van de Sectie Klimaatscenario's en Ozononderzoek bij het KNMI. KNMI, Sectie Klimaatscenario's en Ozononderzoek, Postbus 201, 3730 AE De Bilt, telefoon 030 - 2 206 911.

mische atmosferische processen zoals windschering en turbulentie bepaald wordt.

Voor een Boeing 747 vliegtuig neemt de effectieve doorsnede van de uitlaatgassen in de straalfase in 10 seconden toe van ongeveer 3 m² tot ongeveer 5000 m². De temperatuur neemt daarbij af van rond de 1000 K tot de omgevingstemperatuur. In het hieropvolgende wervelregime dat ongeveer 2-3 minuten duurt neemt de effectieve doorsnede van de wervels toe tot zo'n 20.000-50.000 m². De verspreiding in het pluimregime verschilt sterk van plaats tot plaats en van dag tot dag ten gevolge van de veranderlijkheid van de atmosfeer.

Binnen het door de Europese Unie gesubsidieerde project Aeronox¹, waar het KNMI deel uitmaakte van de modelleergroep, zijn onder meer chemische berekeningen gedaan met gedetailleerde dynamische modellen van het straal- en wervelregime. Deze berekeningen laten zien dat het in eerste instantie gerechtvaardigd lijkt om chemische omzettingen in deze fase te verwaarlozen en een schatting van de effecten van vliegtuigemissies te maken door de emissies direct in de pluimfase toe te voegen aan computermodellen van de atmosfeer.

Figuur 1 toont een meting van stikstofoxide in de Noord-Atlantische vlieggkorridor gedaan binnen het Europese Unie project POLINAT² (Pollution from Aircraft Emissions in the North-Atlantic Flight Corridor). In dit project, waar het KNMI de theoretische groep leidt, worden met het meetvliegtuig Falcon van het DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt) metingen achter verkeersvliegtuigen op kruisvluchthoogte gedaan. De basisluchthaven van het meetvliegtuig is Shannon in Ierland. Tijdens een typische meetvlucht wordt een aantal malen de Noord-Atlantische vlieggkorridor in Noord-Zuid richting doorsneden. Figuur 1 toont zo'n doorsnede op 31000 voet. Duidelijk zijn een aantal jonge vliegtuigpluimen te herkennen. De verspreiding en het transport van jonge pluimen worden gemodelleerd met trajectorijen, een Gaussisch pluimmodel en Directe Numerieke Simulatie (DNS). Dat soort modellen is nodig om de "vertaling" naar de roostercellen van de regionale en mondiale chemie-transport modellen te maken, d.w.z. om te bepalen hoeveel er in die grote roostercellen geëmitteerd wordt. Die roostercellen hebben horizontale afmetingen van honderden km en een verticale afmeting van honderden meters tot 1 km.



Figuur 2: De bijdrage van vliegtuigverkeer aan de stikstofoxideconcentratie op kruisvluchthoogte in 1990 (in %) voor Januari (boven) en Juli (onder) berekend met CTMK (Chemie-Transport Model KNMI)^{1,4,7}.

Atmosferische verspreidingsprocessen

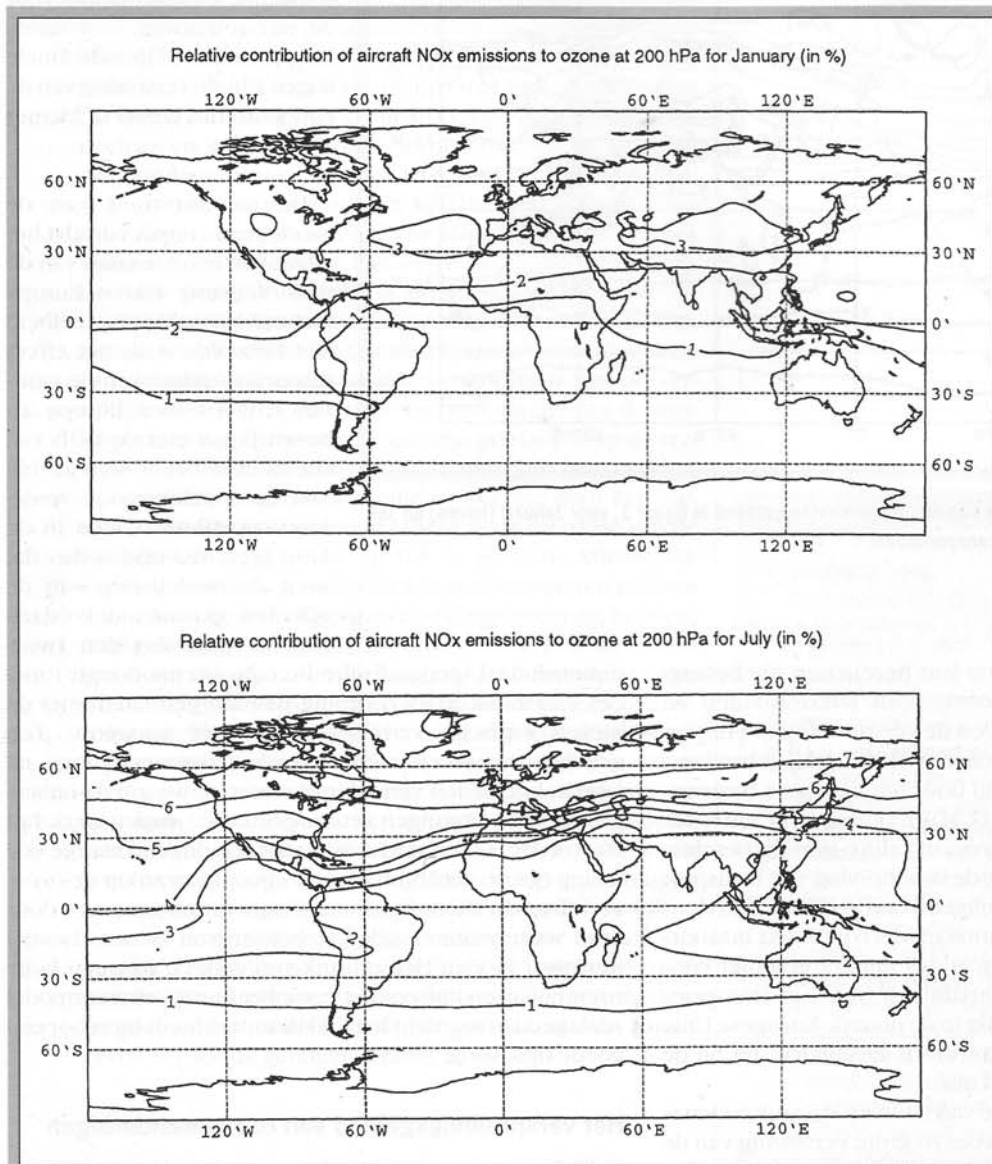
De grootschalige atmosferische verspreiding en menging van vliegtuigemissies vindt tijdens het pluimregime plaats door de gemiddelde wind, turbulentie, convectieve processen in wolken en door atmosferische golven. De gemiddelde wind transporteert de uitlaatgassen met de richting van de klok mee en langzaam omlaag in hogedrukgebieden en ertegenin en langzaam omhoog in lagedrukgebieden. Gemiddeld is er sprake van transport van west naar oost. Langs de grenzen tussen hoge en lagedrukgebieden (fronten) kunnen sterke verticale bewegingen optreden. Verticale bewegingen zijn in de troposfeer veel intenser dan in de stratosfeer ten gevolge van het verschil in stabiliteit tussen de stratosfeer en de troposfeer. Daardoor is er ook weinig menging tussen de troposfeer en de stratosfeer en in de stratosfeer zelf³. Het scheidingsvlak tussen de troposfeer en de stratosfeer, de tropopauze, die meestal samenvalt met een temperatuurminimum, vormt een barrière voor vertikaal transport. In de stratosfeer is de intensiteit van turbulentie een factor 10 tot 100 kleiner dan in de troposfeer. Ook de gebieden met sterk opgaande beweging in convectieve wol-

Tabel 1: Een schatting van de lokale effecten van vliegtuigemissies in de Noord-Atlantische vlieggkorridor voor het klimaat, hier uitgedrukt in termen van stralingsforcering (W/m²). De schatting voor condenssporen is gebaseerd op een geschatte bedekkingsgraad van 0.5 %. Ter vergelijking: de mondiale stralingsforcering van een verdubbeling van CO₂ bedraagt 4 W/m².

	verandering door vliegtuigen	stralingsforcering s' zomers	stralingsforcering s' winters
CO ₂	+1.25 ppmv	0.02	0.02
H ₂ O	+76 - +380 ppbv	0.01 - 0.05	0.05 - 0.24
sulfaataerosol	+10 - +30 %	-0.18 - -0.55	-0.14 - -0.42
O ₃	+5 - +20 ppbv	0.03 - 0.14	0.01 - 0.05
condensstrepen	+0.5 %	-0.15 - 0.30	0.05 - 0.30

ken (zogenaamde updrafts) kunnen niet ver in de stratosfeer doordringen. De stratosfeer is ten gevolge van het uitvriezen van waterdamp ook veel droger dan de troposfeer. De uitwisseling tussen troposfeer en stratosfeer wordt experimenteel onder meer bestudeerd door middel van metingen vanuit een Cessna Citation vliegtuig van de TU Delft in het Europese STREAM-project (Stratosphere-Troposphere Experiment by Aircraft Measurements). De verschillen tussen de troposfeer en de stratosfeer zijn erg belangrijk voor het effect van vliegtuigemissies aangezien ongeveer 40% van de vluchten in de stratosfeer plaatsvindt¹. In de troposfeer regenen stikstofoxiden en zwaveloxiden snel uit en veroorzaken zo zure regen. In de stratosfeer zijn nauwelijks wolken en is de levensduur van de meeste vervuulende bestanddelen van vliegtuigemissies het grootst.

De sterke verticale bewegingen bij fronten en convectieve bewolking zijn verder van belang voor het opwaarts transport van luchtverontreiniging afkomstig van het aardoppervlak. De bijdrage van deze verontreiniging aan de stikstofoxideconcentratie op kruisvluchthoogte bedraagt 20-30%^{1,3,4}.

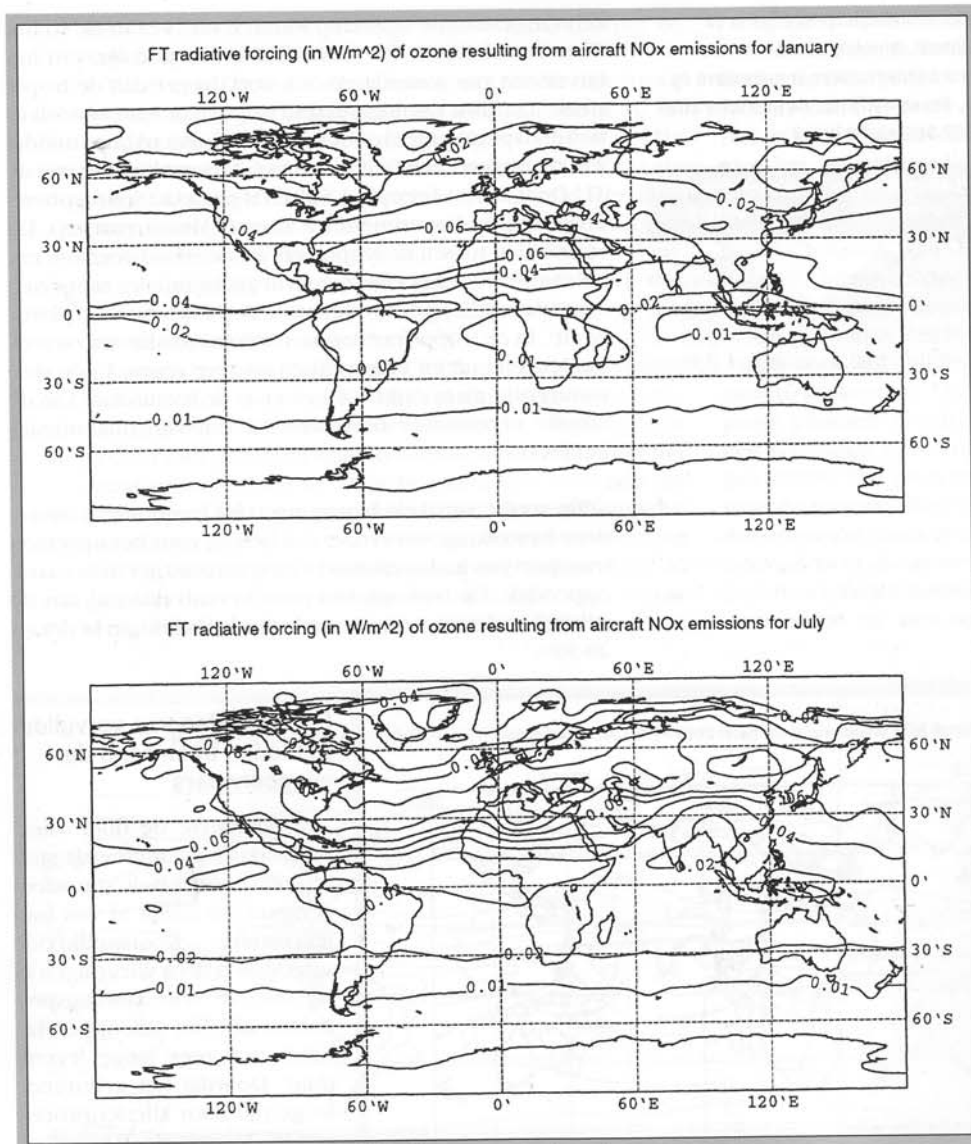


Figuur 3: De toename van ozon door luchtverkeer in 1990 in % ten gevolge van de stikstofoxide-verstoring getoond in figuur 2 voor Januari (boven) en Juli (onder) berekend met het CTMK model^{1,4,7}.

Het optreden van vervuilde gebieden in en rond de vlieggkorridors

In hoeverre de door vliegtuigverkeer geëmitteerde stoffen zich over de hele atmosfeer verspreiden hangt af van hun levensduur. Koolstofdioxide uitgestoten door vliegtuigen of bij andere verbrandingsprocessen aan het aardoppervlak heeft een zeer lange levensduur. Doordat het gedurende lange tijd door allerlei processen in de atmosfeer gemengd wordt is de concentratie in de atmosfeer overal ongeveer hetzelfde, momenteel ongeveer 350 ppmv. Het effect van koolstofdioxide toename kan daardoor redelijk eenvoudig in rekening worden gebracht en dit is dus ook het best uitgewerkt in de nota Lulu⁵.

Stikstofoxiden hebben een levensduur van 5-20 dagen op kruisvluchthoogte^{1,3}. Ten gevolge van deze kortere levensduur zijn ze niet gelijkmatig verdeeld over de atmosfeer. Zo zijn de stikstofoxiden afkomstig van het transatlantisch luchtverkeer geconcentreerd rond de zogenaamde Noord-Atlantische Vlieggkorridor welke duidelijk te herkennen is in figuur 2 die resultaten toont van een simulatie met het Chemie-Transport Model KNMI (CTMK). CTMK is een wereldwijd model dat de budgetten en verdelingen van een aantal



Figuur 4: De stralingsforcering ten gevolge van de ozonversterking getoond in figuur 3, voor Januari (boven) en Juli (onder) berekend met het KNMI stralingstransportmodel⁴.

atmosferische bestanddelen kan berekenen die belangrijk zijn voor de ozonchemie zoals stikstofoxiden en methaan. Om het transport en de verspreiding van de verschillende stoffen te berekenen wordt daarbij gebruik gemaakt van winden berekend door het Europese weermiddel. Deze winden van het ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) zijn 6-uurlijks beschikbaar, hetgeen voldoet voor de beschrijving van transport door depressies en hoge drukgebieden in CTMK. Het door het RIVM toegepaste Moguntia model 6 gebruikt maandelijks gemiddelde winden en is dus minder geschikt voor het beschrijven van de variabiliteit van het transport. CTMK is onder meer gebruikt in de door de Europese Unie gesubsidieerde projecten Aeronox¹ en Polinat, en bij de voorbereiding van de nota Lulu⁵.

De atmosferische chemie van ozon en stikstofoxiden is niet-lineair, dwz een twee keer zo grote versterking van de stikstofoxideconcentratie zal niet noodzakelijkerwijs leiden tot een twee keer zo grote toename van de hoeveelheid ozon. Het is daarom van belang de stikstofoxidever-

deling goed te kennen. Het modelleren van de versterking van de stikstofoxideverdeling ten gevolge van vliegtuigemissies was een van de hoofddoelstellingen van het Europese Unie project Aeronox¹. Daartoe zijn de resultaten van een aantal modellen, waaronder CTMK van het KNMI, vergeleken. Een conclusie van dit project is dat de bijdrage van het vliegtuigverkeer aan stikstofoxide in de Noordatlantische vlieggord in de winter het grootst is namelijk gemiddeld ongeveer 50%. In de zomer is de gemiddelde bijdrage van vliegtuigen aan de stikstofoxideconcentratie ongeveer 35% in dit gebied. Hierbij is een geïdealiseerde jaarlijkse emissiecyclus, bestaande uit vier verschillende emissie-niveaus voor de vier seizoenen, in aanmerking genomen. Op individuele dagen kan de versterking van de concentraties groter of kleiner zijn.

De niet-lineariteit van de ozonchemie impliceert dat het effect van een toename van de stikstofemissie boven Europa met een bepaalde hoeveelheid niet hetzelfde is als het effect van een toename van de emissies zowel boven Europa als boven Japan met de helft van die hoeveelheid. Een gevolg van de ongelijkmatige verdeling van stikstofoxiden in de Oost-West richting is dus dat voor de modellering van de effecten op ozon niet volstaan kan worden met een twee-

dimensionaal (geografische breedte versus hoogte) model. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de meteorologische variabiliteit van het transport. Ten gevolge van weersystemen zoals passerende hoge en lagedrukgebieden verandert de richting waarin de uitlaatgassen van vliegtuigen getransporteerd worden sterk van dag tot dag. Ook dat leidt weer tot een ongelijkmatige verdeling (grote variabiliteit). Het effect hiervan op de ozonvorming kan alleen in aanmerking worden genomen door deze weersystemen goed te beschrijven in een chemie-transport model. Het gebruik van winden met een hoge ruimtelijke- en tijdsresolutie, uit het Europees weermiddel zoals gedaan wordt in het CTMK model biedt hiervoor een goede oplossing.

Het verspreidingsgebied van ozonveranderingen

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat de stikstofoxiden door hun korte levensduur van de orde van 5 tot 20 dagen over het algemeen ongelijkmatig verdeeld blijven, ge-

concentreerd rond de vliegkorridors. In de gebieden waar sprake is van aanzienlijke concentraties van stikstofoxiden zal ozonvorming op kunnen treden^{6,7}. Het gevormde ozon heeft een veel langere levensduur van de orde van enkele maanden. De verstoring van de ozonconcentratie is dan ook veel symmetrischer in de Oost-West richting en is relatief kleiner dan de verstoring van stikstofoxideconcentratie doordat ze niet beperkt blijft tot de naaste omgeving van de vliegkorridor. Figuur 3 laat zien dat de gemiddelde verstoring van de ozonconcentratie ten gevolge van vliegtuigemissies maximaal ongeveer 3% bedraagt in de winter en ongeveer 6% in de zomer op kruisvluchthoogte op noordelijke breedtes. De berekeningen tonen aan dat de effecten van vliegtuigemissies op kruisvluchthoogte een sterk niet-lokaal karakter hebben.

Klimaat effecten

Kooldioxide, ozon en waterdamp zijn broeikasgassen en hebben een positieve stralingsforcering (opwarmend effect). Met betrekking tot ozon geldt dat het stralings-evenwicht juist rond de tropopauze waar het meeste vliegtuigverkeer plaatsvindt zeer gevoelig is voor veranderingen in de concentratie. Zwaveldioxide is een bron van sulfaataerosolen welke de zonnestraling afschermen en een afkoelend effect geven. Condenssporen ontstaan als de lucht verzadigd is met waterdamp en er kondensatiekernen (deeltjes) aanwezig zijn. De uitstoot van waterdamp, roetdeeltjes en sulfaataerosolen bevorderen dus de vorming van condenssporen en in een later stadium van wolken.

Door medewerkers van het KNMI is één van de eerste schattingen van de effecten van vliegtuigverkeer op het klimaat in de omgeving van de Noord-Atlantische vliegkorridor gemaakt⁸. Hierbij is de terugkoppeling van de stralingsforcering naar de atmosferische circulatie en chemie verwaarloosd. Tabel 1 geeft uitgaande van schattingen van de minimale en maximale verstoringen van de verschillende stoffen een onder- en bovengrens van de stralingsforcering. De berekeningen zijn gebaseerd op de veranderingen in en rond de Noord-Atlantische vliegkorridor. Voor de schatting van de stralingsforcering door een toename van condenssporen in tabel 1 is de toename van de wolkenbedekkingsgraad op 0.5% geschat. Afhankelijk van de grootte van de ijsdeeltjes in condenssporen kunnen deze een negatieve of positieve stralingsforcering hebben, naar gelang ze de kortgolvlige ultraviolette straling van de zon beter doorlaten en de langgolvlige infrarode straling vanuit het onderste deel van de atmosfeer reflecteren.

Figuur 4 laat de stralingsforcering zien van de in figuur 3 gegeven ozonverandering. Opvallend hierbij is dat er sprake is van een verschuiving van de maximum verstoring naar het zuiden en het optreden van een duidelijk maximum boven het Middellandse Zee-gebied. Dit is een gevolg van de hogere instraling door de zon en de hogere oppervlakte temperatuur zuidwaarts, alsmede van lokale variaties in de albedo (de hoeveelheid door het aardoppervlak teruggekaatste zonnestraling). Aan de berekening van de klimaat effecten kleven nog veel onzekerheden, hetgeen onder meer blijkt uit het grote bereik dat aangegeven is voor de getallen in tabel 1.

Toekomst

De voor de toekomst uitgezette onderzoekslijn is gericht op het verminderen van onzekerheden en het opvullen van hiaten binnen Nederlandse en Europese onderzoeksverbanden. Het gaat daarbij dan vooral om het

verminderen van de onzekerheden bij de klimaat effecten, de effecten in de troposfeer en stratosfeer, in stratosfeer-troposfeer uitwisseling etc. Ook de validatie van de gebruikte modellen door middel van metingen zal meer aandacht krijgen. Binnen het Ministerie van Verkeer en Waterstaat wordt door Rijks Luchtvaart Dienst en het KNMI samengewerkt aan een integraal rekenmodel om zowel de economische als milieugevolgen van eventuele maatregelen door te rekenen binnen het AERO-project.

Binnen het Airforce project wordt samengewerkt met RIVM en LUW in het onderzoek naar de milieu-effecten van vliegtuigemissies.

Literatuur

1. **AERONOX, 1995**
The Impact of NOx Emissions from Aircraft upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km. Final report to CEC, Contract EV5V-CT91-0044
2. **Polinat, 1996.**
Pollution from aircraft emissions in the North-Atlantic Flight Corridor, Final Report to CEC, Contract EV5V-CT93-0310.
3. **P.F.J. van Velthoven en H. Kelder, 1996**
Estimates of Stratosphere-Troposphere Exchange.
Te verschijnen in J. Geophys. Res.
4. **Beleidsnota Luchtverontreiniging en Luchtvaart (Lulu), 1995**
5. **Velthoven, P.F.J. van, en anderen, 1994**
A comparative study of global 3-D transport of NOx emitted by aircraft. The impact of emissions from aircraft and spacecraft upon the atmosphere, Proc. of an Int. Sci. Colloq. Cologne, Germany, 174-179.
6. **Meijer E. en anderen, 1995**
Milieueffecten van vliegverkeer in de troposfeer en de lage stratosfeer, zie elders in dit nummer.
7. **Wauben, W.M.F., P.F.J. van Velthoven en H. Kelder, 1994**
Chemistry and transport of NOx aircraft emissions in a global 3-D chemical transport model. The impact of emissions from aircraft and spacecraft upon the atmosphere, Proc. of an Int. Sci. Colloq. Cologne, Germany, 241-246. dit nummer.
8. **Fortuin, J.P.F en anderen, 1995**
Greenhouse Effects of Aircraft Emissions as Calculated by a Radiative Transfer Model, Ann. Geophys. 13, 413-418.