

Fredrik Svensson, FOI, Anne Lindskog, IVL

# **Ozonedbrytande ämnen i relation till flygtrafik**

## **– frågor i anslutning till regleringsbrev angående ozon**



källa: <http://www.boeing.com/news/feature/concept/photok61302.html#>

# **Ozonedbrytande ämnen i relation till flygtrafik**

**– frågor i anslutning till regleringsbrev angående ozon**

**Fredrik Svensson, FOI**

**Anne Lindskog, IVL**



<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Avdelningen för Flygteknik FFA 172 90 Stockholm	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0592--SE	<b>Klassificering</b> Underlagsrapport
	<b>Forskningsområde</b> 7. Farkoster	
	<b>Månad, år</b> September 2002	<b>Projektnummer</b> E873119
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 73. Flygfarkostteknik övrigt	
<b>Författare/redaktör</b> Fredrik Svensson, FOI Anne Lindskog, IVL	<b>Projektledare</b> Anette Näs, FOI	
	<b>Godkänd av</b> Anette Näs, FOI	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> LFV	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Fredrik Svensson och Anne Lindskog	
<b>Rapportens titel</b> Ozonnedbrytande ämnen i relation till flygtrafik – frågor i anslutning till regleringsbrevet angående ozon		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p>Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, och IVL Svenska Miljöinstitutet AB har på uppdrag av Luftfartsverket genomfört en litteraturstudie för att klargöra dagens kunskap om hur ozonhalterna förändras i tropopausregionen och på de höjder där ett framtida överljudsflyg förväntas operera, samt vilken betydelse emissionerna från flygtrafiken har i detta sammanhang.</p> <p>Hur utsläppen påverkar atmosfärens sammansättning beror på vid vilken höjd de sker, eftersom sammansättningen av atmosfären varierar med höjden. Dessutom är latitud och årstid av betydelse. Vad beträffar NO<sub>x</sub>-utsläppen från flygtrafiken, kommer de att öka eller minska ozonbildningshastigheten beroende på den omgivande NO<sub>x</sub>-koncentrationen.</p> <p>En uppskattning av en framtida överljudsflottas effekt på ozonhalterna i atmosfären finns redovisad i IPCC-rapporten från 1999. Den största effekten uppnås vid 45°N där, i juli, förändringen i ozonpelaren beräknats till -0,4%. Om bara överljudsflygets emissioner beaktas blir resultatet -1,3%, medan det traditionella flyget ger en förändring på +0,9%. Den generella slutsatsen från IPPC-rapporten är att ozonbildningen i tropopausregionen ökar med NO<sub>x</sub>-emissionen från den traditionella flygtrafiken. Beträffande ett framtida höghöjdsflygs påverkan på den totala ozonpelaren, visar två studier på direkta avvikelser från bedömningarna i IPCC-rapporten. Båda antyder att utsläppen leder till en <b>ökning</b> av ozonpelaren.</p>		
<b>Nyckelord</b> Höghöjdsflygplan, ozon, atmosfär, stratosfär		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 14	
<b>Distribution enligt missiv LFV</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Aeronautics, FFA SE-172 90 Stockholm	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0592--SE	<b>Report type</b> Base data report
	<b>Research area code</b> 7. Vehicles	
	<b>Month year</b> September 2002	<b>Project no.</b> E873119
	<b>Customers code</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Sub area code</b> 73. Air vehicle Technology	
<b>Author/s (editor/s)</b> Fredrik Svensson, FOI Anne Lindskog, IVL	<b>Project manager</b> Anette Näs, FOI	
	<b>Approved by</b> Anette Näs, FOI	
	<b>Sponsoring agency</b> CAA	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Fredrik Svensson and Anne Lindskog	
<b>Report title (In translation)</b> Ozone destructing spicies in relation to air traffic – concerns in connection to the governmental directives regarding ozone		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>The Swedish Defence Research Agency, FOI, and IVL, Swedish Environmental Research Institute have been commissioned by the Swedish Civil Aviation Administration, CAA, to perform a literature review aimed at clarifying the knowledge of today of the changes in ozone concentration in the tropopause region and at altitudes where a possible high speed supersonic aircraft fleet would operate. In addition, effects of aircraft pollutant emissions in this context are discussed.</p> <p>Since the atmosphere's composition varies with altitude, the effects of aircraft pollutant emissions vary depending on the discharge altitude. Besides, the latitude and the season are of importance. One conclusion is that the NO<sub>x</sub> emissions from air traffic will increase or decrease the ozone formation rate depending on the surrounding NO<sub>x</sub> concentration.</p> <p>An assessment of a future high-speed supersonic aircraft fleet's effects on the atmospheric ozone concentration is reported in the IPCC-report of 1999. The largest effect is observed at 45°N, where the change of the ozone column in July is estimated to -0.4%. If only the emissions of the high-speed fleet is considered the result is -1.3%, while the conventional aviation provide a change of +0.9%. The general conclusion from the IPCC report is that the ozone formation increases in the tropopause region due to NO<sub>x</sub> emissions of conventional aviation. Concerning the effect of a future fleet of civil high-speed supersonic aircraft on the total ozone column of a future fleet of civil high-speed supersonic aircraft, two studies point out differences compared to the IPCC report. Both suggest that the emissions would increase the ozone column.</p>		
<b>Keywords</b> High speed supersonic aircraft, ozone, atmosphere, stratosphere		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 14	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

# Ozonnedbrytande ämnen i relation till flygtrafik

## – frågor i anslutning till regleringsbrevet angående ozon

### Bakgrund

Luftfartsverket har genom ett regleringsbrev fått i uppdrag av regeringen att utreda möjligheterna att begränsa utsläpp av ozonnedbrytande ämnen från höghöjdsflyg (i detta fall definierat som flygning över ca 10 kilometers höjd). Värt att nämna är att den flygtrafik som brukar benämnas höghöjdsflyg opererar på höjder mellan 16 och 22 km. Det föreslagna målet innebär att utsläppen av dessa ämnen inte skall öka.

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, och IVL Svenska Miljöinstitutet AB har på uppdrag av Luftfartsverket genomfört en litteraturstudie för att klarlägga vad man idag vet om hur ozonhalterna förändras i tropopausregionen och på de höjder där ett framtida överljudsflyg förväntas operera, samt vilken betydelse emissionen från flygtrafiken har i detta sammanhang. Vi har också försökt identifiera viktiga kunskapsluckor och belysa vilken forskning som för närvarande pågår internationellt.

### Inledning

Flygtrafikens miljöpåverkan presenterades utförligt i "IPCC Special Report: Aviation and the Global Atmosphere", som publicerades 1999 (IPCC, 1999). I denna rapport hävdar man att kväveoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ) från traditionellt flyg har medfört en ökning av ozonkoncentrationen på flyghöjden på de norra mellan-latituderna med 6% (1992) jämfört med en atmosfär utan flyg. Denna ökning av ozon förväntas öka till 13% till år 2050 i referens-scenariet, Fa1 (se Anmärkning nedan), vilket motsvarar en ökning av hela ozonpelaren med 1,2%. Påverkan på ozon i andra regioner är betydligt lägre. Emellertid tenderar utsläppen av vattenånga och svavel i stratosfären att bryta ned ozon och kompenserar på detta sätt delvis ökningen på grund av  $\text{NO}_x$ . I vilken utsträckning detta sker är inte klarlagt än. Flygets påverkan på stratosfärens ozon behöver utvärderas ytterligare. Den största ökningen av ozon på grund av flygemissioner har beräknats ske nära tropopausen, där den naturliga variationen är stor. Det finns inga tydliga bevis för sådana förändringar i gjorda observationer.

Emissioner av  $\text{NO}_x$  från höghöjdsflyg, vattenånga och svaveldioxid bidrar till förändringar av stratosfärens ozon. Hur detta påverkar förändringen i strålningsbalansen beror i hög grad på hur vattenånga och ozon hanteras i modellerna. Introduktionen av civilt överljudsflyg enligt scenario Fa1H (se Anmärkning nedan) leder till en ökad nedbrytning av stratosfärens ozon. Den maximala beräknade effekten uppnås i juli vid  $45^\circ\text{N}$  där ozonpelaren beräknas minska med 0,4% år 2050 jämfört med om inget flyg fanns. Överljudsflyget svarar för en minskning med 1,3%, vilket delvis balanseras av en ökning med 0,9% på grund av det traditionella flyget. Minskningen av ozonpelaren blir större ju högre man flyger. Dessutom kan emissioner från överljudsflyg i norra hemisfärens stratosfär transporteras till södra hemisfären och där bidra till ozonnedbrytning. Det vetenskapliga underlaget för bedömningen anses svagt.

År 2001 publicerades "EUR 19867 European research in the stratosphere 1996-2000", där kapitel 7 handlar om flygets påverkan på atmosfärens sammansättning och klimat (DG Research, 2001). I detta kapitel har man sammanfattat resultaten från IPCC-rapporten. Man tar också upp resultat som kommit fram senare, i relation till de frågor som anses mest angelägna att besvara för att man skall kunna bedöma flygtrafikens påverkan på den globala atmosfären. Frågor rörande ozonpåverkan och framtida höghöjdsflyg behandlas dock ganska summariskt.

I det följande har vi hämtat information från denna och några andra studier.

## Dagens flygtrafik

Även om flygtrafiken bara svarar för en liten del av den totala konsumtionen av fossila bränslen, anses dess påverkan på atmosfärens kemiska sammansättning vara av betydelse, främst på grund av att emissionen sker på hög höjd (IPCC, 1999). Flera olika faktorer påverkar vilka effekter som uppkommer på grund av flygtrafik. Majoriteten (65%) av flygets bränsle förbrukas vid höjder mellan 10 och 13 km, varav merparten förbrukas på 30-55° nord över USA, Europa och norra Atlanten. Vid dessa höjder är överlevnaden av emitterade komponenter betydligt längre än närmare marken. Ungefär 30% av bränslet förbrukas under flygning i lägre stratosfären, och de resulterande utsläppen sprids zonalt och mot söder och norr. För den vertikala spridningen svarar olika utbytesprocesser mellan stratosfären och troposfären. Inerta emissioner kan finnas kvar i den lägre stratosfären under flera veckor till månader. Den geografiska fördelningen av emissionerna är ojämn, med den största koncentrationen i norra hemisfärens mellanlatituder, t ex nordatlantkorridoren.

Utsläppen leder till att koncentrationen av växthusgaser såsom koldioxid, vattenånga, ozon och metan, förändras, samt att bildning av kondensationsstrimmor initieras. Hur utsläppen påverkar atmosfärens sammansättning beror på vid vilken höjd de sker, eftersom sammansättningen av atmosfären varierar med höjden. Dessutom är latitud och årstid av betydelse.

## Ozonbildning

I tropopausregionen bildas ozon genom fotokemisk oxidation av kolmonoxid (CO) och kolväten (HC) katalyserad av kväveoxider (NO<sub>x</sub>) och väteoxidradikaler (HO<sub>x</sub>). Bildningshastigheten beror främst på förekomsten av HO<sub>2</sub> och NO. Förhållandet mellan HO<sub>2</sub> och hydroxylradikalen (OH) minskar vid ökande koncentration av NO, vilket medför att produktionen ökar, i varje fall vid låga NO-koncentrationer upp till ett visst tröskelvärde. Vid högre NO<sub>x</sub>-koncentrationer leder konkurrerande reaktioner till att OH, och därmed ozonproduktionen, minskar. Detta innebär att NO<sub>x</sub>-utsläppen från flygtrafiken kommer att öka eller minska ozonbildningshastigheten beroende på den omgivande NO<sub>x</sub>-koncentrationen (DG Research, 2001). I olika studier har man påvisat hur ozonbildningen påverkas av tillgången på vatten, ozon, CO, HO<sub>x</sub>, aceton och andra gaser som bildar radikaler, vilket ytterligare betonar betydelsen av att känna till atmosfärens sammansättning för att kunna bestämma flygemissionernas betydelse för ozonhalten.

Ett antal olika modeller har använts för att beräkna framtida förändringar i troposfärens totala ozoninnehåll som följd av emissioner från flyg (DG Research, 2001). I simuleringarna har man i allmänhet använt de framtidsscenarioer som finns beskrivna i IPCC-rapporten, vilket ökar möjligheten till tolkning och jämförelse. Ökningen i ozon uppskattades till 2-6 Dobson Units år 2015 på norra halvklotets mellan- och höga latituder under vår och sommar. Resultaten visar också på den stora betydelse dynamiken i stratosfären, speciellt den meridionala transporten, har för hur ozon svarar på NO<sub>x</sub>-utsläppen från flygtrafiken. Det påpekas att de använda modellerna inte tagit hänsyn till omvandlingen av NO<sub>x</sub> till salpetersyra i plymen. Denna omvandling anses minska den storskaliga ozonbildningen med 10-30%. Det anses också att framtida förändringar av atmosfärens innehåll av NO<sub>x</sub> och ozon som följd av flygemissioner dämpas något av en ökad hydrologisk cykel och ökad oxidationskapacitet i atmosfären. Den generella slutsatsen är ändå fortfarande att ozonbildningen i tropopausregionen ökar med NO<sub>x</sub>-emissionen från flygtrafiken (DG Research, 2001).

## Ozonreduktion

Mellan 30 och 40% av emissionen av vattenånga sker i stratosfären där det skulle kunna reducera ozon, antingen direkt genom bildning av hydroxylradikaler, eller indirekt genom bildning av tunna stratosfäriska moln, som bildas över polerna vid extremt låga temperaturer

(PSC). Dessa moln har betydelse för aktiveringen av de halogenföreningar som anses svara för uppkomsten av ozonhålen över polerna. För vanligt flyg är detta dock av mindre betydelse jämfört med andra effekter.

Emissioner från flygplan skulle kunna bidra till en viss reduktion av ozon genom heterogena reaktioner i den lägsta delen av stratosfären, men direkta bevis för detta saknas (DG Research, 2001). En del modellstudier för tropopausregionen har genomförts. Dessa studier antyder att heterogen kemi i synliga cirrusmoln eller t o m icke synliga ismoln skulle kunna initiera en ozonförlust på några procent i hela tropopausregionen, speciellt under sommaren. Antagande stöds till viss del av observationer. Emellertid gäller studierna ozonförlust orsakade av naturliga cirrusmoln. Bevis för att partiklar från flyg skulle påverka ozon i någon betydande omfattning saknas ännu.

För att utsläpp i tropopausregionen skall bidra till ozonnedbrytningen måste de transporteras till högre höjder genom vertikala utbytesprocesser. Inom projektet "Stratosphere Troposphere Experiment by Aircraft Measurements" (STREAM) har man med hjälp av ett flertal mätningar från flygplan av CO, CO<sub>2</sub>, dikväveoxid (N<sub>2</sub>O) och ozon identifierat förekomsten av ett blandningsskikt i den lägsta delen av stratosfären. I mars 1997 genomfördes mätningar under flygningar från Kiruna (68°N, 20°O) på höjder mellan 8 och 13,5 km och i juli 1998 en mätkampanj från Timmins i Kanada, (47°N, 80°V) (Fischer *et al.*, 2000; Hoor *et al.*, 2002).

En utvärdering av vinterkampanjens resultat visar att det finns ett blandningsskikt 2-3 km över den lokala tropopausen, vilket kraftigt påverkar förhållandet mellan de aktuella gaserna i den lägsta delen av stratosfären, och som sannolikt orsakas av isentropisk transport (en transport i ett temperaturområde utan värmeutbyte eller friktionsförluster) tvärs tropopausen vid polarfronten. Ovanför detta skikt observerades halter och halförhållanden som kan anses typiska för opåverkad luft i den lägre stratosfären, i överensstämmelse med andra, tidigare observationer från högre höjder (15-21 km). Speciellt indikerar de låga CO-halterna på ca 20 ppbv att dessa luftmassor domineras av diabatisk nedtransport (d v s orsakad av ett litet temperaturtillskott utan färförändring) från högre skikt i stratosfären. Transport tvärs tropopausen resulterar i ett blandningsskikt karakteriserat av förhöjda halter av CO och totalt reaktivt kväve (NO<sub>y</sub>) samt signifikant förhöjda NO<sub>y</sub>/O<sub>3</sub> kvoter. Denna uppblandning tvärs tropopausen medför att ozonbildningseffektiviteten som följd av NO<sub>x</sub>-utsläpp från flygtrafik reduceras i den lägsta delen av stratosfären.

Under sommaren når luftföroreningarna från troposfären högre upp. Det isentropiska djupet av blandningsskiktet över den lokala tropopausen är också större. Det är högst troligt att frekvent, isentropisk transport tvärs den lokala tropopausen är orsaken. Denna ökade transport av troposfärisk luft till den lägsta delen av stratosfären under sommaren får betydande konsekvenser för fotokemin i området. Transport av förhöjda halter av NO<sub>y</sub> leder till förhöjda NO<sub>y</sub>/O<sub>3</sub> kvoter och därmed en mindre effektiv ozonbildning. Dessutom kan transporten av troposfärisk luft förväntas leda till en ökad fuktighet vilket kan få konsekvenser för OH-koncentrationen i den lägsta delen av stratosfären genom reaktionen mellan vatten och en syreatom.

För att få en komplett bild av hur transporten av troposfärisk luft till den nedersta delen av stratosfären varierar över året, speciellt det isentropiska utbytet tvärs tropopausen, behövs ytterligare mätningar omfattande hela året och fler breddgrader.

Betydelsen av oorganiska bromföreningar (Br<sub>y</sub>) för ozon i den lägre delen av stratosfären i relation till NO<sub>x</sub>-emissioner från flygplan har studerats med hjälp av en kemisk boxmodell (Hendricks *et al.*, 2000). Simuleringarna visar att Br<sub>y</sub>-kemin leder till en effektiv denitrifikation, d v s en reduktion av salpetersyra, en aktivering av HO<sub>x</sub> och en betydande nedbrytning av ozon i en opåverkad nedre del av stratosfären. Nedbrytningen är starkt beroende av Br<sub>y</sub>-



koncentrationen, bakgrundskoncentrationen av  $\text{NO}_x$ , samt förekomsten av aerosoler. Å andra sidan visar simuleringarna att  $\text{Br}_y$  har potential att allvarligt påverka de ozonförändringar i den nedersta delen av stratosfären, som är framkallade av  $\text{NO}_x$ -utsläpp från traditionell flygtrafik, genom att gynna ozonbildningen. Emellertid motverkas detta till viss del av denitrifikationen som leder till överlevnadstiden för emitterat  $\text{NO}_x$  minskar. För att kunna kvantifiera betydelsen av  $\text{Br}_y$ -kemin, behövs detaljerade observationer  $\text{Br}_y$ -förekomsten i tropopausregionen.

## Höghöjdsflyg

### Flygplan och flygtrafik

Utvecklingen av en andra generationens civilt överljudsflygplan (supersonic aircraft) har diskuterats under många år. För att minimera bränsleförbrukningen skall ett sådant flygplan operera på betydligt högre höjd än ett traditionellt plan - mellan 16 och 22 km - d v s i den lägre stratosfären. Att flyga nära ljudets hastighet eller fortare bidrar till att motståndet ökar väsentligt, med ökad bränsleförbrukning som följd, vilket medför både ekonomiska och miljömässiga konsekvenser. Generellt sett är bränsleförbrukningen en faktor två högre än för subsoniskt flyg. Att överljudsflygplan dessutom flyger vid betydligt högre höjder, d v s i stratosfären där atmosfären är mycket känslig för påverkan, gör att överljudsflygplan sannolikt kommer att fortsätta vara sämre än underljudsflygplan sett ur ett miljöperspektiv. Vid överljuds fart används turbojetmotorer med litet eller inget fläktförhållande. Detta kan medföra svårigheter att klara kraven för buller nära flygplatser.

Ett storskaligt införande av en civil överljudsflotta har diskuterats under en längre tid, särskilt under 90-talet. I USA genomförde NASA ett forskningsprogram om "High Speed Civil Transport (HSCT)" under åren 1990-1999. Denna typ av flygtrafik skulle transportera ungefär 300 passagerare, 2,4 gånger ljudets hastighet på höjder upp till 20,7 km. Om några planer på civil höghöjdsflygtrafik någonsin kommer förverkligas är i dagsläget oklart.

Vad beträffar kommersiellt flyg är det hittills bara Concorde, som flygs av British Airways och Air France, som har opererats på riktigt höga höjder. Vid marschflykt flyger Concorde med drygt dubbla ljudhastigheten på en höjd av ungefär 18 km. Sedan den togs i bruk första gången i mars 1969 har 13 flygplan varit i bruk fram till juli 2000 då en allvarlig olycka inträffade. Efter att flygplansflottan har förbättrats ur säkerhetssynpunkt har trafiken nyligen återupptagits.

I mars 2001 lanserade Boeing ett nytt flygkoncept – The Sonic Cruiser – ett långdistansflygplan med plats för 200-250 passagerare. Se bild nedan. Flygplanskonfigurationen skiljer sig delvis från den traditionella, men de kanske största nyheterna är att det skall färdas fortare och på högre höjd än konventionella flygplan. Enligt de uppgifter som finns angivna (Boeing, 2002) är det tänkt att Sonic Cruiser under marschflykt skall färdas på höjder över 13 km med knappa ljudhastigheten (Mach 0,95-0,98). Att bedöma om detta flygplan kommer byggas och tas i bruk är svårt; om det finns någon marknad för denna typ av flygplan återstår att se.



Källa: Boeing, 2002

### Effekter på atmosfären

Den del av stratosfären där höghöjdsflyg opererar karaktäriseras av en stabilare skiktning av luftlagren jämfört med förhållandena på lägre höjd. Detta innebär en långsammare borttransport och därmed längre uppehållstid och effektivare ackumulation av komponenter som emitteras från flygplan. Det finns därför skäl att undersöka vilka miljöeffekter etablerandet av en höghöjdsflygflotta skulle kunna föra med sig.

En uppskattning av en framtida överljudsflottas effekt på ozonhalterna i atmosfären finns redovisad i ICCP-rapporten 1999 (se under Inledning ovan). Effekten beror på flyghöjden. Ju högre man flyger desto större blir minskningen i ozonhalt och vice versa. Flygning nära tropopausen kan t o m leda till en ökning av ozonhalten. Emissioner på norra halvklotet, NH, kan dessutom transporteras till södra halvklotet, SH, och där bidra till en minskning av ozonhalten. Stora skillnader i beräknad ozonförändring i den mellersta stratosfären förelåg mellan de olika modellerna som användes för bedömningen (upp till  $\pm 50$  ppb). Någon djupare analys av vad denna differens kunde bero på gjordes inte.

Samma år (1999) genomfördes en kurs i Bergen, Astaire (Atmospheric effects of aircraft emissions in the upper troposphere and lower stratosphere), där ICCP-rapporten och andra forskningsresultat redovisades. Pitari presenterade en översiktlig sammanfattning av resultat från ett antal modellsimuleringar (Pitari, 2001), från vilket följande slutsatser hämtats:

- Ökningen av vatten och SSA-SAD (stratosfäriska sulfataerosolers ytdensitet), som följd av överljudsflyg, har den största kemiska effekten på ozon.
- Heterogena reaktioner på SSA och PSC har en nyckelroll för de kemiska effekterna av överljudsflyg.
- Att minska  $\text{NO}_x$ -emissionsindex under 15 g/kg tycks inte ha någon kritisk betydelse, i varje fall inte i jämförelse med de kemiska effekterna av emissioner av vatten och svaveldioxid.
- Emission av sotpartiklar har ingen signifikant direkt effekt på stratosfärkemin.
- Betydelsen av förändrad strålning för cirkulationen av vatten från överljudsflyg i stratosfären behöver undersökas ytterligare. Det finns en potential för signifikanta förändringar i ozontransport tvärs tropopausen. Preliminära beräkningar visar att den därtill hörande störningen av ozon i lägre stratosfären är större än den kemiskt producerade.

- Hittills har man vid beräkningarna för uppskattning av den framtida, stratosfäriska flygtrafikens påverkan på ozon vanligtvis använt dagens bakgrundsatmosfär. Ytterligare studier behöver genomföras för att man skall förstå hur effekten av emissioner från överljudsflyg kommer att modifieras av framtida klimatförändringar.

Senare har ytterligare ett antal studier publicerats.

I den Nordatlantiska flygkorridoren passerar ca 800 traditionella flygplan per dygn (1997). Under antagandet att en planerad överljudsflotta skulle vara av samma storleksordning, kan, vid den låga partikelkoncentration som föreligger i den lägre stratosfären, påverkan från denna överljudstrafik, uttryckt som den relativa ökningen av den totala partikelytan, bli betydande, >10% (Kärcher, 2001). Denna påverkan är av stor betydelse för förändringar av ozonförekomsten genom heterogena, kemiska reaktioner.

Emissioner från ett civilt höghöjdsflyg skulle kunna påverka bildning av och egenskaper hos moln i stratosfären över polarregionerna, PSC. PSC-partiklar spelar en avgörande roll för den kemiska nedbrytningen av ozon i polarregionerna. Partiklarna påverkar på två sätt. För det första omvandlas inaktiva halogenkomponenter till potentiella ozonnedbrytande radikaler genom kemiska reaktioner på molnpartikelytan. För det andra kan molnpartiklar irreversibelt ta bort reaktivt kväve (och vattenånga) genom gravimetrisk sedimentering, vilket kan förlänga ozonnedbrytningen (WMO, 1999).

Inom ramen för AERO-CHEM II har man använt mikrofysisk modellering för att studera hur förhöjda halter av  $\text{HNO}_3$  och vatten, som resultat av emissioner enligt flygtrafikscenarierna för år 2015 (IPCC, 1999), påverkar egenskaperna hos PSC (Larsen et al., 2000). Modellstudien visar att emissioner från det projekterade låghöjdsflyget har en begränsad påverkan på förekomst och ytdensitet av PSC. Emissioner från höghöjdsflyg kan däremot medföra att koncentrationen av  $\text{HNO}_3$  och vatten ökar med 5-10%, vilket direkt påverkar de termodynamiska tröskeltemperaturerna för förekomst av salpetersyra-trihydrat (NAT), underkyld trekomponentlösning (STS), bestående av salpetersyra, svavelsyra och vatten, samt is i stratosfären över Arktis. Detta kan orsaka att frekvensen av tillfällen med temperaturer under dessa tröskelvärden kan öka med 2-5% och ge upphov till en ökning av volymen för PSC bestående av STS (typ 1b) med ca 10%.

Mer detaljerade modellsimuleringar resulterade i mer uttalade effekter av överljudsflyg. Den ökade koncentrationen av vattenånga medför en högre fryspunkt för is i partiklarna i STS-PSC, vilka krävs för bildning av fasta partiklar i PSC. Även om ytan av dessa fasta partiklar är liten jämfört med vätskeaerosolerna i STS-PSC, har de stor betydelse eftersom bara dessa kan svara för en betydande denitrifikation och dehydrering av den Arktiska stratosfären. Beräkningar visar att den bildning av fasta PSC partiklar som induceras av emissionerna från den projekterade överljudsflottan kan öka denitrifikationshastigheten med ca 38% och till och med leda till en större relativ ökning i dehydrering. Det bör påpekas att beräkningen baseras på förhållandena vintern 1989/90, som var relativt kall.

Klimatmodellberäkningar (Shindell et al., 1998) har förutspått att temperaturen i december-januari i stratosfären över NH kan sjunka med 3-10 K åren 2010-2019, som resultat av ökade koncentrationer av växthusgaser, mindre frekvent stratosfärisk uppvärmning samt ozonnedbrytning. Modellberäkningar där alla temperaturer sänkts med 3K visar att bildningen av fasta PSC partiklar är känsligare för denna ändring i temperaturförhållandena, jämfört med den av flyget förorsakade ökningen i vattenförekomst, vilken bara ökar fryspunktstemperaturerna med storleksordningen 0,2-0,4K. Båda fenomenen verkar dock i samma riktning och påverkar framförallt bildningen av fasta PSC partiklar, vilket kan leda till ökad denitrifikation och möjlig dehydrering (Larsen et al., 2000).

Flygmätningar av totalt reaktivt kväve och PSC-partiklar har genomförts inom ramen för ASHOE/MAESA (DeNegro et al., 1997). Resultaten visar att en betydande andel av bakgrundspartiklarna deltar i tillväxten av PSC. Den modellerade storleksfördelningen av STS vid temperaturer under 191K överensstämmer relativt väl med den uppmätta storleksfördelningen av PSC partiklar. Jämfört med NAT uppvisar volymen av STS-aerosolerna en större respons för påverkan av vatten,  $\text{HNO}_3$  och  $\text{H}_2\text{SO}_4$  från en projekterad överljudsflotta. Förekomsten av STS-aerosoler i stratosfären över polarområdena förstärker behovet av att utöka behandlingen av PSC i studier av ozonförluster, både för att bättre förstå de nuvarande förhållandena och för att kunna förutse påverkan från överljudsflyg.

Ett stort antal olika modeller har under åren använts för att uppskatta effekterna av en framtida överljudsflygtrafik. Inom NASA-projektet "Atmospheric Effects of Aviation" har man använt en tredimensionell kemisk transportmodell för att studera effekten på stratosfärens ozon som följd av emissioner från en framtida flygplansflotta, där 500 enheter ersatts med överljudsplan (Kinnison et al., 2001). Modellen indikerar en förändring i totalozon på +0,25 över norra halvklotet och +0,05% över södra. Denna förändring är resultatet av en balans mellan en lokal ökning av ozon i området upp till ca 22-25 km (beroende på latituden), med ett maximum på ca 20 ppb på 20 km, och en minskning i skiktet över ca 22-25 km med 40-50 ppb. Resultatet uppvisar en positiv avvikelse jämfört med genomsnittet enligt IPCC. I rapporten diskuteras modellens känslighet för olika parametrar, vilka felkällor som finns och hur dessa skulle kunna förklara avvikelserna. Man betonar bl a vikten av att modellen kan efterlikna atmosfärens sammansättning avseende vatten och ozon.

En tredimensionell stratosfärkemisk transportmodell, SLIMCAT, har använts för att undersöka en potentiell påverkan på atmosfären år 2015 av en framtida överljudsflygtrafik (Rogers et al., 2000). I simuleringarna har man använt samma scenarier som i IPCC-rapporten (1999, kapitel 4). Syftet med studien var att uppskatta betydelsen av varierande meteorologiska förhållanden för simulerade störningar av ozon. Meteorologiska analyser för åren 1992-1998 användes. SLIMCAT-resultaten visar att mellanårsvariationen i den beräknade ozonstörningen kopplad till överljudsflyg är av liknande storleksordning som differensen i resultat från modellsimuleringarna i IPCC-rapporten (se ovan). En detaljerad analys pekar ut betydelsen av den dynamiska cirkulationen i bakgrunden. Flygets påverkan på ozon är mest uttalad under perioder med starka vertikala upptransporter i den tropiska stratosfären. Detta påverkar sedan ozonet i den lägre stratosfären genom den radiativa självläkningseffekten. Resultaten belyser vikten av att beakta de meteorologiska förhållandena när man skall uppskatta effekten av flygtrafik. Speciellt viktigt är det att man beaktar den storskaliga dynamiska variabilitetens möjliga betydelse när man kvantifierar flygets påverkan på den kemiska sammansättningen av atmosfären.

Pitari och Mancini (2002a) har studerat klimatpåverkan från att framtida överljudsflyg och hur vattenånga och ozonåterkoppling påverkar cirkulationen i atmosfären. Om man i modellsimuleringarna tar hänsyn till de förändringar i den stratosfäriska cirkulationen som förändrade halter av vattenånga och ozon medför, förändras bilden av höghöjdsflygets påverkan på ozonhalten betydligt, jämfört med vad som anges i IPCC-rapporten, se tabell 1. Resultaten antyder att ozonförändringar som följd av ändrad dynamik är betydligt större än kemiskt orsakade förändringar. Istället för en mindre minskning på 0.1-0.2% av ozon i NH, erhålls en ökning på 1-2%. Nettoökningen av ozon är en följd av ökande nedtransport på mellanlatituderna i anslutning till Brewer-Dobson cirkulationen, vilket flyttar mer ozon närmare tropopausregionen, där den kemiska livslängden är längre än högre upp. I NH blir minskningen något större på höjder över 20 km, men detta kompenseras av en större ökning i tropopausregionen och därunder. En detaljerad analys av ozonförändringar kommer att publiceras separat (Pitari and Mancini 2002b).

**Tabell 1.** Beräknade förändringar i ozonkolonnen, globalt och runt 45°N, som följd av emissioner från ett framtida överljudsflyg (Pitari and Mancini, 2002a).

$\Delta O_3$	Experiment	500 plan	1000 plan
Globalt	Bestämd cirkulation (FC) <sup>1</sup>	+0,05	-0,02
Globalt	Återkoppling (RF) <sup>2</sup>	+0,62	+0,75
45°N	Bestämd cirkulation	-0,15	-0,17
45°N	Återkoppling	+1,85	+2,22

1) Fixed Circulation; 2) Radiative Feedback.

## Sammanfattning och kunskapsluckor

De forskningsresultat som publicerats efter IPCC 1999 handlar i stor utsträckning om andra effekter av flygemissioner än förändringar i ozonhalten. En del av rapporterna kan anses ge indirekta bidrag till en bedömning av problemet, genom att öka kunskapen om atmosfärens sammansättning och betydelsen av den storskaliga dynamiken. Det föreligger dock fortfarande betydande osäkerheter i olika uppskattningar av hur utsläpp från flyg på höga höjder påverkar ozon, främst kanske för att man ännu inte hunnit tillämpa den information som kommit fram under de senaste åren. Den generella slutsatsen är därför ändå fortfarande att ozonbildningen i tropopausregionen ökar med NO<sub>x</sub>-emissionen från den traditionella flygtrafiken.

Beträffande ett framtida höghöjdsflygs påverkan på den totala ozonpelaren, visar två studier på direkta avvikelser från bedömningarna i IPCC-rapporten. Båda antyder att utsläppen leder till en **ökning** av ozonpelaren.

Flera arbeten poängterar betydelsen av kunskap om atmosfärens kemiska sammansättning och de varierande meteorologiska bakgrundsförhållandena i varje försök att uppskatta hur flygtrafiken påverkar ozon i atmosfären. Den förra kräver tillgång till observationer, både från satelliter, från flygplan med stor vertikal räckvidd och från markbaserade instrument (remote sensing). Traditionella observationer är väsentliga för assimileringen av satellitdata, och det finns forskare som varnar för en övertro på vad satelliterna kan erbjuda. Vi vet t ex att molnighet stör ozonobservationerna från SAGE II (Wang et al, 1998). Ändå är användandet av satellitbaserade sensorer den enda möjligheten att få en global bild av atmosfärens sammansättning och förändring under lång tid. Både i Europa, bl a inom det tyska AFO-2000 programmet, och i USA pågår en bred aktivitet på området, vilket på sikt bör förbättra våra kunskaper.

Närvaron av STS-aerosoler i stratosfären över polerna förstärker behovet av att bredda behandlingen av PSC i studier avseende ozonförluster över polerna, både för att förstå de nuvarande förhållandena i stratosfären och för att kunna uppskatta effekten av ett eventuellt höghöjdsflyg.

Bromföreningarnas kemi har stor betydelse för hur stor påverkan flygtrafikens utsläpp medför. Här krävs ett ökat antal detaljerade observationer av förekomsten av oorganiska bromföreningar i tropopaus regionen, och sådana observationer med hjälp av fjärranalysteknik har initierats inom det tyska AFO-2000.

Uppgifter om de meteorologiska förhållandena finns att tillgå. Problemet kan vara att ta in informationen i modellerna, som också måste innehålla detaljerad information om homogena och heterogena kemiska reaktionsförlopp.

## Referenser

Boeing (2002) Internetsida: <http://www.boeing.com/news/feature/concept/flash.html>, besökt 4/9 2002.

Del Negro, L.A., *et al.* (1997) Evaluating the role of NAT, NAD, and liquid H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O/HNO<sub>3</sub> solutions in Antarctic polar stratospheric cloud aerosol: Observations and implications. *J Geophys. Res.*, **102**, 13 255-13 282.

European research in the stratosphere 1996-2000. (2001) DG Research EUR 19867.

Fischer, H., Wienhold, F.G., Hoor, P., Bujok, O., Schiller, C., Siegmund, P., Ambaum, M., Scheeren, H.A. and Lelieveld, J. (2000) Tracer correlations in the northern high latitude lowermost stratosphere: Influence of cross-topopause mass exchange, *Geoph. Res. Lett.*, **27**, 97-100.

Hendricks, J., Lippert, E., Petry, H., and Ebel, A. (2000) Implications of subsonic aircraft NO<sub>x</sub> emissions for the chemistry of the lowermost stratosphere: Model studies on the role of bromine. *J Geophys. Res.*, **105**, 6745-6759.

Hoor, P., Fischer, H., Lange, L., and Lelieveld, J. (2002) Seasonal variations of a mixing layer in the lowermost stratosphere as identified by the CO-O<sub>3</sub> correlation from in situ measurements. *J Geophys. Res.*, **107**, D5, 1029.

IPCC (1999) Special Report: *Aviation and the Global Atmosphere*, Penner J.E., Lister D.J., Griggs D.J., Dokken D.J. and McFarland M. (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 373 pp.

Kinnison, D.E. *et al.* (2001) The global modeling Initiative assessment model: Application to high-speed civil transport perturbation. *J Geophys. Res.*, **106**, 1693-1711.

Larsen, N., Knudsen, M. B., Gauss, M. Pitari, G. (2000) Effects from high-speed civil traffic aircraft emissions on polar stratospheric clouds. Danish Meteorological Institute, Scientific report 00-09.

Pitari, G. (2001) Modeling of stratospheric impact of supersonic transport, in *Astaire, Atmospheric effects of aircraft emissions in the upper troposphere and lower stratosphere*, Proceedings of the EC advanced study course Bergen, Norway, 22 to 31 August 1999. EUR 19845.

Pitari, G., and Mancini, E. (2002a) Climatic impact of future supersonic aircraft: role of water vapour and ozone feedback on circulation. *Meteorol. Z.* **11**, 215-223.

Pitari, G., and Mancini, E. (2002b) Impact of future supersonic aircraft on the distribution of stratospheric tracers: Chemical and dynamical perturbations. Manuskript för publicering.

Rogers, H.L., Chipperfield, M.P., Bekki, S., and Pyle, J.A. (2000) The effects of future supersonic aircraft on stratospheric chemistry modeled with varying meteorology. *J Geophys. Res.*, **105**, 29 359-29 367.

Wang, P-H., Cunnhold, D.M., Zawodny, J.M., Pierce, R.B., Olson, J.R., Kent, G.S., and Skeens, K.M. (1998) Seasonal ozone variations in the isentropic layer between 330 and 380 K as observed by SAGE II: Implications of extratropical cross-tropopause transport. *J Geophys. Res.*, **103**, 28 647-28 659.

## **Anmärkningar**

**Fa1**, referensscenario utvecklat av ICAO Forecasting and Economic Support Group (FESG); förutsätter medelgod ekonomisk tillväxt från IPCC 1992 och teknologi för både förbättrad bränsleeffektivitet och NO<sub>x</sub>-reduktion.

**Fa1H**, samma förutsättningar som för Fa1, men där en del av flygflottan har ersatts med överljudsflyg.