

NILU : OR 20/96  
REFERANSE : O-1814  
DATO : MARS 1996  
ISBN : 82-425-0757-0

**Studie om  
forskningsprosjekt  
vedrørende utslipp fra  
fly i øvre luftlag**

**Anne Gunn Kraabøl og Frode Stordal**

---

# Innhold

	Side
<b>Sammendrag .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Innledning .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Bakgrunn.....</b>	<b>5</b>
<b>3. The Impact of NO<sub>x</sub> Emissions from Aircraft Upon the Atmosphere at Flight altitudes 8-15 km (AERONOX) .....</b>	<b>6</b>
3.1 Formål.....	7
3.2 Utslipp fra flymotorer (SP1).....	7
3.3 Fysikk og kjemi i luftstrømninger etter flyet (SP2).....	8
3.4 Globale atmosfæresimuleringer (SP3) .....	9
3.5 Usikkerheter .....	11
<b>4. Measurement of ozone and water vapour on Airbus In-service Aircraft: The MOZAIC- program .....</b>	<b>12</b>
<b>5. Measurement of Trace Species in the Exhaust of Aero-engines (AEROTRACE) .....</b>	<b>13</b>
<b>6. Stratosphere and Troposphere Experiment by Aircraft Measurement (STREAM).....</b>	<b>13</b>
<b>7. Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT).....</b>	<b>14</b>
<b>8. Atmospheric Effects of Aviation Project (AEAP).....</b>	<b>16</b>
8.1 Formål.....	16
8.2 Foreløpige resultater og videre forskning .....	17
8.2.1 The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft (AESA) .....	17
8.3 The Subsonic Assessment (SASS).....	19
<b>9. Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT-2) .....</b>	<b>20</b>
<b>10. Modelling of the impact of ozone and other chemical compounds in the atmosphere from airplane emissions (AEROCHEM).....</b>	<b>21</b>
<b>11. Formation Processes and Radiative Properties of Particles in Aircraft Wakes (AEROCONTRAIL).....</b>	<b>22</b>
<b>Vedlegg A Tabeller og figurer .....</b>	<b>23</b>
<b>Vedlegg B Forkortelser og forklaringer .....</b>	<b>26</b>

## Sammendrag

*Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag fra Luftfartsverket utført en studie over nylig avsluttede, pågående og planlagte forsknings-prosjekter vedrørende effekter av utslipp fra fly i øvre troposfære og nedre og midlere stratosfære.*

Utslipp av NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O og CO<sub>2</sub> fra subsoniske fly med cruisehøyde i øvre troposfære (8-12 km) kan bidra til en økning i ozon, CO<sub>2</sub> og skydannelse i denne høyden. Dette kan igjen føre til en økt drivhuseffekt. Utslipp av NO<sub>x</sub> og H<sub>2</sub>O fra planlagte supersoniske fly med cruisehøyde i nedre og midlere stratosfære kan bidra til en nedbrytning av ozon. Når effekter fra supersoniske fly studeres er det viktig å ta i betraktning heterogene reaksjoner på partikler eller i såkalte Polare Stratosfære Skyer (PSC-skyer). Disse reaksjonene øker andelen av ozonødeleggende klor i stratosfæren. NO<sub>x</sub>-utslippet fra supersoniske fly kan reagere med dette klorete og danne kjemiske komponenter som ikke inngår i ozonnedbrytning. I den senere tid er det imidlertid reist spørsmål om hvorvidt utslipp av CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> og sotpartikler også kan bidra til å øke andelen partikler og såkalte PSC-skyer. Dette kan forårsake en høyere aktivitet av heterogene reaksjoner som igjen kan øke andelen av ozonødeleggende klor i stratosfæren.

Flere avsluttede, pågående og planlagte prosjekter både i Europa og USA vedrører effekter av utslipp både fra subsoniske og supersoniske fly. I Europa er en vesentlig del av forskningen finansiert gjennom EU, og den er organisert i prosjekter. I USA er all forskningen samlet i et stort forskningsprogram. Prosjektene omtalt i denne rapporten er:

### *Ferdigstilte i 1995:*

- The Impact Of NO<sub>x</sub> Emissions from Aircraft upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km (AERONOX) (EU).

### *Pågående pr. 1995:*

- Measurement of Ozone and Water Vapour on Airbus In-service Aircraft: The MOZAIC-program (EU).
- Measurement of Trace Species in the Exhaust of Aero-engines (AEROTRACE) (EU).
- Stratosphere and Troposphere Experiment by Aircraft Measurement (STREAM) (EU).
- Pollution of Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT) (EU).
- Atmospheric Effects of Aviation Project (AEAP) (USA).

### *Planlagte prosjekter med start i 1996:*

- POLINAT-2 (EU).
- Modelling of the Impact on Ozone and other Chemical Compounds in the Atmosphere from Airplane Emissions (AEROCHEM) (EU).

- Formation Processes and Radiative Properties of Particles in Aircraft Wakes (AEROCONTRAIL) (EU).

I denne rapporten er prosjektenes formål, arbeidsmetoder og resultater beskrevet. Såvidt vi kjenner til er det bare AERONOX-prosjektet og AEAP-programmet hvor endelige eller foreløpig resultater var rapportert pr. utgangen av 1995.

I de ferdigstilte og pågående prosjektene er det særlig lagt vekt på å kartlegge utslippet av  $\text{NO}_x$  fra subsoniske fly, studere romlig spredning og estimere dets innvirkning på ozon både ved hjelp av numeriske atmosfæremodeller og ved observasjoner. Prosjektene som tar for seg mulige effekter av et fremtidig utslipp fra supersoniske fly har lagt vekt på å studere  $\text{NO}_x$ -utslippets nedbrytning av ozon. I den senere tid er det også fokusert på hvordan flyutslippene direkte eller til indirekte kan påvirke andelen av ozonnedbrytende klor i stratosfæren.

I AERONOX-prosjektet ble numeriske atmosfæremodeller benyttet til å studere effekter av  $\text{NO}_x$ -utslipp fra subsoniske fly. Et hovedresultat fra disse studiene var at  $\text{NO}_x$ -utslipp i de sterkt trafikkerte flykorridorene over Nord-Amerika, Nord-Atlanteren og Europa ble transportert østover og ned mot bakken om sommeren. Om vinteren er den nedoverrettede transporten mindre, mens det er en sterkere vind fra vest. Dette medførte en større østlig spredning av flyutslippet om vinteren sammenlignet med sommeren. Resultatene viser også at bare en liten andel av flyutslippet ble transportert til stratosfæren eller til den sydlige halvkule. Innenfor området 30-60 N i høydeintervallet fra ca. 9-12 km, utgjorde bidraget fra flyutslippet hhv. 40-67% og 25% av den totale  $\text{NO}_x$  konsentrasjonen om vinteren og om sommeren. Den modellerte ozonøkningen p.g.a.  $\text{NO}_x$ -utslipp i dette høydeområdet ble estimert til mellom 2% og 9%.

Et underprosjekt av AEAP-programmet studerte effekter av utslipp fra supersoniske fly. Basert på markedsundersøkelser er det antatt en flåte på mellom 500 til 594 fly. Pr. i dag er det enda ikke tatt noen politisk avgjørelse på tillatt antall og høydeintervall der slike fly kan fly stratosfæren. Det er også knyttet usikkerheter til hvor mye  $\text{NO}_x$  som slippes ut pr. kg forbrent drivstoff. Dette er for en stor del avhengig av utviklingen i motorteknologi. Innvirkningen på ozon er derfor studert ut ifra ulike antagelse om cruisehøyder og utslippsindekser av  $\text{NO}_x$ . Modellresultater viser at samme mengde  $\text{NO}_x$ -utslipp medførte en større ozonreduksjon jo høyere opp i stratosfæren utslippet fant sted. I nedre stratosfære kan ikke nettoeffekten av utslippene studeres uten å inkludere heterogenkjemi i skyer og på partikler. Studier viser at innvirkningen av  $\text{NO}_x$ -utslippet på ozon ble mindre når heterogenkjemi inkluderes i de numeriske atmosfæremodellene. Dette er fordi en del av  $\text{NO}_x$ -utslippet reagerer med kloreten som dannes fra heterogene reaksjoner.

Fortsatt er det store usikkerheter m.h.p. klimatiske effekter av subsonisk flyutslipp. Dette gjelder både de klimatiske effektene av økte  $\text{O}_3$ - og  $\text{CO}_2$ - nivå, og økt skydannelse i øvre troposfære. Det er dessuten knyttet usikkerheter til i hvor stor grad utslipp av  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  og partikler fører til en økt skydannelse i troposfæren.

Det er også ukjent i hvilket omfang utslipp fra supersoniske fly kan medføre en økt andel av PSC-skyer i nedre stratosfære. Noen av problemstillingene nevnt ovenfor vil studeres nærmere i de planlagte europeiske prosjektene AEROCHEM, AEROCONTRAIL og POLINAT-2 og det amerikanske AEAP-programmet.

# Studie om forskningsprosjekt vedrørende utslipp fra fly i øvre luftlag

## 1. Innledning

Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag fra Luftfartsverket utført en studie over nylig avsluttede, pågående og planlagte forskningsprosjekter vedrørende effekter av utslipp fra fly i øvre troposfære og nedre og midlere stratosfære. Luftfartsverket ønsket oversikt over forskningsarbeider i Europa og på andre kontinenter som var utført innenfor dette området, status over de store usikkerhetsmomentene og planlagte forskningsprosjekter i fremtiden.

## 2. Bakgrunn

I løpet av de siste 30 år har det vært en kraftig økning i den globale flytrafikken. Flytrafikkens samlede energiforbruk har økt med ca. 75% i løpet av de siste 20 år, og er forventet å øke med 100-200% de neste 30 år. Flyeksosen inneholder bl.a. nitrogenoksider ( $\text{NO}_x$ ), hydrokarboner (HC), karbonoksider ( $\text{CO}_x$ ), svoveldioksyd ( $\text{SO}_2$ ) og sotpartikler. Dette er komponenter som endrer den kjemiske fordelingen i atmosfæren. Effektene av de kjemiske endringene er avhengig av i hvilken høyde flyutslippene finner sted.  $\text{NO}_x$ -,  $\text{H}_2\text{O}$ -, og  $\text{CO}_2$ -utslipp fra subsoniske fly, cruisehøyde fra 8 til 12 km., øker ozon,  $\text{CO}_2$  og skydannelsen i øvre troposfære. Dette kan igjen bidra til en økt drivhuseffekt. I hvilken grad  $\text{NO}_x$ -utslipp fra fly bidrar til ozonproduksjon i denne høyden er avhengig av bakgrunnsnivået av  $\text{NO}_x$ .  $\text{NO}_x$ -utslippet fra fly i områder med lavt bakgrunnsnivå medfører høyere ozonøkning i forhold til utslipp over forurensede områder. Det er imidlertid knyttet store usikkerheter til både den romlige fordelingen og sesongvariasjoner av  $\text{NO}_x$  i øvre troposfære.

I stratosfæren foregår en katalytisk nedbrytning av ozon hvor  $\text{NO}_x$ , hydrogenoksider ( $\text{HO}_x$ ) og kloroksider ( $\text{ClO}_x$ ) virker som katalysatorer. Disse forbindelsene omtales ofte som aktive komponenter. Utslipp av  $\text{NO}_x$  og  $\text{H}_2\text{O}$  fra planlagte supersoniske fly, med cruisehøyde i nedre og midlere stratosfære, vil øke ozonnedbrytningen via  $\text{HO}_x$ - og  $\text{NO}_x$ -syklusen. Imidlertid vil også  $\text{NO}_x$ -utslipp dempe ozonnedbrytningen ved å konvertere  $\text{ClO}_x$  og  $\text{HO}_x$  til de mer stabile produktene  $\text{ClONO}_2$  og  $\text{HNO}_3$ . Dette er såkalte inaktive komponenter som ikke deltar i ozonnedbrytning.

I den senere tid er det fokusert på effekter av flyutslipp i forbindelse med heterogene kjemiske reaksjoner på overflaten av sulfatpartikler- og i Polare Stratosfære Skyer (PSC-skyer). Utslipp av  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  og sotpartikler kan øke muligheten for dannelse av slike partikler i atmosfæren, og på denne måte øke aktiviteten av heterogene reaksjoner. En økning av  $\text{CO}_2$ -nivået p.g.a. flyutslipp kan bidra til en temperaturnedgang i nedre stratosfære, og dermed øke muligheten for PSC-dannelse. En intensivering av heterogene reaksjoner i atmosfæren vil øke andelen av  $\text{ClO}_x$  og dermed påvirke forholdet mellom kjemisk aktive og inaktive

klorkomponenter. Gjennom disse reaksjonene vil  $\text{NO}_x$  indirekte konverteres til  $\text{HNO}_3$ . Dette reduserer muligheten for å konvertere  $\text{ClO}$  til  $\text{ClONO}_2$ , og ozonnedbrytningen via  $\text{ClO}_x$ -syklusen blir dermed økt.

For å studere virkninger av flyutslippet på ozon og klima må flere atmosfæriske prosesser tas i betraktning. I den senere tid er det både gjennomført, satt i gang og planlagt større forskningsprosjekter som involverer en rekke forskere med ulike kompetanseområder innenfor dette forskningsfeltet. I de neste kapitlene vil vi beskrive disse forskningsprosjektene med hovedvekt på deres formål, arbeidsmetoder og konklusjoner fra de avsluttede prosjektene.

### 3. The Impact of $\text{NO}_x$ Emissions from Aircraft Upon the Atmosphere at Flight altitudes 8-15 km (AERONOX)

Koordinator: Prof. Ulrich Schumann  
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Physik der Atmosphäre

#### **Deltagere:**

##### *Norge:*

Universitetet i Bergen (UiB)  
Nansen Senteret  
Universitetet i Oslo (UiO)  
Norsk Institutt for Luftforskning (NILU)

##### *Tyskland:*

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR),  
Institut für Physik der Atmosphäre,  
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR),  
Institut für Antriebstechnik,  
Forschungszentrum Jülich (KFA)  
Gesamthochschule Wuppertal, Bergische Universität (UWUPP)  
Motoren- und Turbinen-Union München, Deutsche Aerospace (MTU)

##### *England:*

Atomic Energy Authority of the United Kingdom,  
Environmental Assessment Department, Consultancy Services (AEA)  
British Aerospace  
Defence Research Agency, Aerospace Division. (DRA)  
Rolls-Royce

---

##### *Frankrike:*

Sentre Nationale de la Recherche Scientifique, Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, Orleans (LCSR)  
Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)  
Société Nationale d'Etudes et de Construction de Moteur d'Aviation, Centre de Villa roche (SNECMA)

Université Lois Pasteur, Strasbourg, Laboratoire de Physico Chimie de l'Atmosphère (ULPS)

*Nederland:*

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI),

*Budsjett: 1500 kECU + nasjonale bidrag*

### 3.1 Formål

AERONOX er et EU-prosjekt som startet i 1992 og ble avsluttet i 1995. Prosjektet hadde som formål å studere  $\text{NO}_x$ -utslipp fra flymotorer og omfanget av global flytrafikk i cruisehøyden 8-12 km, den resulterende økning i  $\text{NO}_x$ -konsentrasjonen og effekter på atmosfærens kjemiske sammensetning. Det var særlig lagt vekt på å studere effekter på ozondannelsen i øvre troposfære.

Prosjektet var delt inn i tre underprosjekter:

*Subprosjekt 1 (SP1):* Hvor høye er utslippene av  $\text{NO}_x$  gjennom hele flysyklusen opptil 15 km's høyde?

*Subprosjekt 2 (SP2):* Hvordan er den kjemiske fordelingen i flyeksosen når den er spredt til en skala som kan beskrives av globale modeller?

*Subprosjekt 3 (SP3):* Hvordan blir  $\text{NO}_x$ -utslippene fordelt til global skala, hvor mye øker  $\text{NO}_x$  konsentrasjonen og hvilke konsekvenser har dette for fotokjemien i atmosfæren?

Abatement Of Nuisances Caused by Air Transport (ANCAT), en teknisk komite under European Civil Aviation Conference (ECAC), hadde som formål å samle data for sivilt og militært forbruk av flydrivstoff. Informasjonen fra denne gruppen ble kombinert med utslippsindekser for  $\text{NO}_x$  fra SP1, og dannet grunnlag for en global database for  $\text{NO}_x$ -utslipp fra flytrafikk i perioden 1991/92. (Utslippsindeksen angir hvor mange gram  $\text{NO}_2$  som slippes ut pr. kg forbrukt drivstoff, denne omtales ofte som EI). Denne databasen ble benyttet i AERONOX-prosjektet i både SP2 og SP3. Videre var det prosjektets intensjon at resultater fra SP1 skulle benyttes i SP2. Resultater fra SP2 ble også benyttet til arbeid under SP3. Figur 1 viser prosjektets oppbygning og utveksling av informasjon mellom de ulike underprosjektene. I de neste kapitler beskrives arbeidsmetoder og resultater fra de ulike underprosjektene.

### 3.2 Utslipp fra flymotorer (SP1)

*Arbeidsmetoder:*

Det er tidligere utviklet en rekke ligninger som beskriver  $\text{NO}_x$ -utslippet fra flymotorer. Disse estimerer utslippet som funksjon av bl.a. lufttemperatur, luftens trykk og fuktighet, flyhastighet og ulike flymotorparametere (f.eks. brenselforbruk). I dette underprosjektet ble  $\text{NO}_x$ -utslippet beregnet med en rekke ligninger. Hensikten var å forbedre disse og studere spredningen i resultatene. I tillegg ble det foretatt målinger av bl.a.  $\text{NO}_x$  i flyeksos fra to ulike flymotorer i høyde-testkammerer. Formålet var å studere hvordan utslippet varierte for ulike cruise-forhold. Målinger ble også foretatt når trykk, temperatur, mengden av luft som blandes med drivstoffet og drivstoff-forbruk varierte. Hensikten var å utvikle nye



ligninger for beregning av  $\text{NO}_x$ -utslippet. Det ble også foretatt målinger av utslippsgassene  $\text{CH}_4$  og  $\text{N}_2\text{O}$ . Dette er drivhusgasser, og en eventuell økning p.g.a. flyutslipp kan påvirke klimaet.

#### *Hovedresultater:*

Ligningene som beskriver  $\text{NO}_x$ -utslipp fra flymotorer i cruisehøyden ble forbedret. Det beregnede  $\text{NO}_x$ -utslippet varierer innenfor et intervall på  $\pm 18\%$ .

For første gang ble det foretatt målinger i høyde-testkammere for cruiseforhold. De nye ligningene som ble utviklet var basert på observerte  $\text{NO}_x$ -verdier for ulike høyder og forhold. Ligningene viste seg å være i god overensstemmelse med de eksisterende. Det global flyutslippet beregnet med disse, har en usikkerhet mindre enn  $\pm 15\text{-}20\%$ .

Utslppsindeksene for  $\text{NO}_x$  i cruisefasen var høyere sammenliknet med tidligere verdier beregnet av NASA og Warren Spring Laboratory.

Studiene viste også at  $\text{NO}_x$ -utslippet øker med ca 12% når det benyttes en luftfuktighet som er typisk for cruisehøyden i forhold til verdier for havoverflaten.

Målingene viste at lufttrafikken ikke bidrar vesentlig til det globale budsjettet av  $\text{N}_2\text{O}$  og  $\text{CH}_4$ .

Databasen for  $\text{NO}_x$ -utslipp utviklet i samarbeid med ANCAT-gruppen viste et samlet utslipp på 2.78 Tg( $\text{NO}_2$ )/år. Ca 92% av dette var over den nordlige halvkule, hvorav 40% var over Nord Amerika, 25% over Europa og 10% over Asia. 65% av alt utslippet er i høydeintervallet fra 11-13 km.

### **3.3 Fysikk og kjemi i luftstrømninger etter flyet (SP2)**

#### *Arbeidsmetoder:*

Hvordan de kjemiske komponentene i flyutslippene endres med tiden avhenger av temperaturen og kjemiske prosesser i flyeksosen, samt hvordan denne blandes med omgivelsene. Flyets bevegelser og utslipp av varm eksos induserer strømninger og turbulens i luften det passerer. Dette påvirker igjen hvordan flyeksosen sprer seg med tiden. Bak hvert fly dannes det et "kjølvann" som kan beskrives i ulike regimer. I jet-regimet, som er betegnende for luftstrømmen i ca 30 m bak flyet, dannes det ofte en sirkulære luftstrøm etter hver flymotor. Etter ca 30 m kan disse luftstrømmene påvirkes av strømninger som dannes etter vingene på flyet (sekundær-strømninger). Luftstrømningene fra 30 m til ca 1 km bak flyet betegnes som virvel-regimet. Utslippene 1 km bak flymotorene er ca 4 s gamle.

I dette underprosjektet ble det benyttet en rekke numeriske modeller som simulerer bl.a. termodynamikk og turbulens i jet-regimet, fluiddynamikk i virvel-regimet, samt modeller som beskriver partikkelvekst og gassfasekjemi i begge regimer. I tillegg ble det også foretatt en del laboratorieforsøk som studerte gass/sot-interaksjoner og heterogenkjemi på partikler.

### *Hovedresultater:*

Dynamikkstudiene viste at turbulens i jet-regimet spiller en nøkkelrolle for spredningen av flyutslippet. I denne fasen ble det modellert temperaturfluktasjoner på over 100 K. Sekundærstrømningene fører til en ytterligere blanding med den omkringliggende luft, og temperaturen i flyeksosen kan sammenlignes med omgivelsene. Det var av stor interesse å studere hvorvidt  $\text{NO}_x$  ble konvertert til de inaktive komponentene  $\text{HNO}_3$  og  $\text{HNO}_2$ . Resultatene viste at det er nivået av OH som er bestemmende for hvor mye  $\text{NO}_x$  som konverteres til disse komponentene. Det er imidlertid usikkert hvor høye OH-utslippene er fra flymotorene. OH-nivået sank raskt i løpet av jet-regimet, slik at et kjemisk tap av  $\text{NO}_x$  er ventet å finne sted nesten umiddelbart etter flyutslippet. Modellresultatene viste imidlertid at bare noen få prosent av  $\text{NO}_x$  ble konvertert til  $\text{HNO}_3$  og  $\text{HNO}_2$ , selv med høye verdier av OH. Etter ca. 4 s var flyeksosen godt blandet med luft fra omgivelsene. De fleste utslippskomponentene var nå sammenlignbare med nivået i bakgrunnslufta.  $\text{NO}_x$ -konsentrasjonen var imidlertid opptil 100 ganger større enn bakgrunnsnivået.

Et av hovedformålene var også å studere dannelsen av is- og sulfatpartikler. På overflatene av disse partiklene kan det forekomme heterogene reaksjoner som indirekte overføre  $\text{NO}_x$  til  $\text{HNO}_3$ . Eventuelle kondensasjonsstriper som dannes etter flyet kan virke som skyer, og dermed øke drivhuseffekten. Resultatene viste at dannelsen av ispartikler skjer i jet-regimet. Dannelsen var avhengig av temperaturen og hvor hurtig utslippet ble blandet med omkringliggende luft. Mesteparten av sulfatpartiklene ble også dannet i denne fasen. Andelen økte svakt i løpet av 4 s. Det ble imidlertid ikke påvist en nevneverdig redusering av  $\text{NO}_x$  p.g.a. dannelsen av disse partiklene.

En hovedkonklusjon fra dette arbeidet var at utslippskomponentene fra flymotoren ikke endret seg nevneverdig p.g.a. kjemiske reaksjoner i løpet av 4 s. Imidlertid finnes det ingen målinger i så unge utslipp som kan verifisere resultatene. I løpet av denne tidsperioden er utslippet ennå ikke spredt til global skala. Det er derfor også nødvendig å studere kjemi og spredning på en lengre tidsskala.

### **3.4 Globale atmosfæresimuleringer (SP3)**

#### *Arbeidsmetoder:*

Pr. i dag finnes det ikke et modelverktøy som har en detaljert tre-dimensjonal beskrivelse av termodynamikk, dynamikk og kjemi. Disse modelltypene er under utvikling, men vil pr. i dag kreve for stor regnekraft. Modellene som er utviklet har derfor ulike kompetanseområder, hvor en del av atmosfærens prosesser er mer detaljert beskrevet enn andre.

En rekke ulike globale atmosfæremodeller ble benyttet i dette underprosjektet. Noen av modellene var to-dimensjonal (2-D). Atmosfæren blir beskrevet i f.eks. breddegrad versus høyde. Fordelen med disse modelltypene er at de krever mindre regnekraft i forhold til 3-D modeller, og at et detaljert skjema som beskriver atmosfærens kjemi kan inkluderes. Ulempen er at resultatene bare viser et middel for hver breddegrad (eller et lengdegradsutsnitt).

Ulike typer 3-D modeller var også inkludert i prosjektet. En del av disse modellene benyttet et 3-D vindfelt som ofte angir et middel over en tidsperiode. I disse modellene kan et mer detaljert kjemiskjema inkluderes. Andre 3-D modeller beregnet selv et vindfelt etter likninger som beskriver den generelle dynamikken i atmosfæren. I disse modelltypene er det bare inkludert et enkelt kjemiskjema som kun beskriver de viktigste ligninger for  $\text{NO}_x$ - og ozonkjemi.

Det ble også benyttet en trajektorie/kjemi-modell. Denne modellen beskriver kjemien i luftpakker som beveger seg langs bestemte baner. Disse banene er beregnet for en periode på 10 dager på grunnlag av vind-data. Denne modelltypen krever liten regnekraft, slik at kjemien i luftpakker langs mange trajektoriebaner kan beregnes i stor detalj.

Alle modellene benyttet ANCAT-databasen for globale  $\text{NO}_x$ -utslipp fra fly. Ulike modell- eksperimenter ble utfører, alle med den hensikt å studere hovedformålet for SP3. Resultatene fra de ulike modelltypene ble deretter sammenlignet med sikte på å finne gjennomgående trender, og om det var stor spredning i resultatene.

#### *Hovedresultater:*

##### $\text{NO}_x$ :

$\text{NO}_x$ -utslippet i de sterkt trafikkerte flykorridorene over Nord-Amerika, Nord-Atlanteren og Europa ble transportert østover og nedover om sommeren. Om vinteren er det gjennomgående en sterkere vind fra vest, og spredningen av flyutslippet var større sammenlignet med spredningen om sommeren. Om sommeren var det en sterkere nedoverrettet transport av utslippet. Resultatene viser også at bare en liten andel av flyutslippet ble transportert til stratosfæren og til den sydlige halvkule.

Den maksimale økningen av  $\text{NO}_x$  p.g.a. flyutslipp er i cruisehøyden. Modellresultatene viste gjennomgående like trekk for hvor mye flyutslippet bidrar til  $\text{NO}_x$ -konsentrasjonen i øvre troposfære. Tabell 1 viser et sonalt midlet estimat for hvor mye ulike kilder bidrar til  $\text{NO}_x$ -nivået mellom  $30^\circ\text{N}$  -  $60^\circ\text{N}$  i høyden 200-300 hPa (ca. 8-12 km). Om vinteren er bidraget fra flyutslipp høyest, med fra 40-67%. Om sommeren er bidraget fra bakken og lynaktivitet høyere.

Tabell 2 viser den relative endringen i en del kjemiske komponenter p.g.a. flyutslipp for samme området som beskrevet ovenfor.  $\text{NO}_x$  økte med 53% om vinteren og 34% om sommeren. Bakgrunnsverdien av  $\text{NO}_x$  er høyere om sommeren, og den relative økningen blir derfor mindre. Samtidig er også den fotokjemiske aktiviteten sterkere, og en større andel av  $\text{NO}_x$ -utslippet vil konverteres til  $\text{HNO}_3$ . Tabellen viser resultater beregnet med en av 2-D modellene, men økningen av  $\text{NO}_x$  beregnet med andre modelltyper er sammenlignbare med resultatene vist i tabellen. 3-D resultater viste at økningen i  $\text{NO}_x$  varierer sonalt. Lokale økninger på opptil 60% om vinteren og 40% om sommeren ble modellert nedstrøms de mest trafikkerte flykorridorene over Nord-Atlanteren.

ozon:

For ozon var det en sterkere spredning i resultatene. Et gjennomgående trekk var at  $\text{NO}_x$ -utslippet bidrar til en ozonøkning, og at denne er høyest i områdene med mest flytrafikk. Den midlere sonale ozonøkningen var fra 2 til 9% på midlere bredder i høyden 200 hPa. (ca. 11-12 km). Resultatene fra 3-D modeller viste en maksimal lokal ozonøkning på opptil 10%. Spredning i modellresultatene skyldes bl.a. at ulike fordelinger av  $\text{NO}_x$  i bakgrunnsatmosfæren ble benyttet. Det er også ulikheter i beskrivelse av kjemiske og dynamiske prosesser.

Kjemien som styrer ozonproduksjonen er ikke-lineær. Studiene viste at en dobling av flyutslippet ikke fører dobling i ozonøkningen, men en økning som er mindre. Sensitivitetskjøringer viste også at ozonproduksjonsraten pr. enhet  $\text{NO}_x$ -utslipp kan variere fra 1 til 40 avhengig av  $\text{NO}_x$ -nivået i bakgrunnsatmosfæren. Over sterkt forurensede områder, som over Europa og Nord Amerika, var denne ozonproduksjonsraten lav. Et annet viktig gjennomgående resultat var at  $\text{NO}_x$ -utslippene fra subsoniske fly ikke bidrar vesentlig til ozonreduksjon i nedre stratosfære.

**3.5 Usikkerheter**

Selv om resultater fra AERONOX-prosjektet økte forståelsen av hvordan flyutslippet påvirker den kjemiske sammensetningen av atmosfæren, konkluderes det med at det fortsatt er mange usikkerheter. Disse ble formulert som spørsmål, og gruppert i emner som utslipp, transport og kjemi, klima og verifisering av resultater.

*Utslipp:*

Hvor stor nøyaktighet er det for utslipp av  $\text{H}_2\text{O}$ , OH, S, CO og HC fra fly?

Hvor avhengig er  $\text{NO}_x$ -utslippet av flymotorens konstruksjon?

Hvor høye er døgn- og sesongvariasjoner i utslippene, og hvordan blir utslippstrenden i fremtiden?

Hva er utslippsratene av  $\text{NO}_x$  fra andre kilder enn flyutslipp? Det er særlig stor usikkerhet når det gjelder bidraget fra lyn.

*Transport og kjemi:*

Er overgangen av  $\text{NO}_x$  til andre komponenter neglisjerbar i jet/virvel-regimene? Hva skjer med flyutslippet etter 4s og til det er spredt til global skala?

Hva er bakgrunnskonsentrasjonen av  $\text{NO}_x$ , OH og ozon i midlere og øvre troposfære?

Hvordan er transportmekanismene mot tropopausen for f.eks.  $\text{NO}_x$  og ozon fra bakkeutslipp og stratosfæriske kilder?

Kan det bekreftes at utslipp fra subsoniske fly ikke blir transportert til midlere stratosfære og fører til økt ozonnedbrytning? Hva er innvirkningen av en fremtidig flåte av supersoniske fly med cruisehøyde i stratosfæren?

Hvordan er den romlige fordelingen i endringer av drivhusgasser forårsaket av flyutslipp?

*Klima:*

Hvordan og hvor ofte dannes det kondensstriper etter flyene, og påvirker dette kjemien i flyeksosen til den når global skala?

Hvordan påvirker kondensstripene stråling og klima?

Hvordan påvirker endringer i atmosfærens kjemi stråling og klima?

Hvilke kjemiske tilbakekoblingsmekanismer kan forventes p.g.a. klimatiske endringer, og omvendt?

*Verifikasjon:*

Er det mulig å verifisere transport og kjemiske endringer i flyutslippet fra lokal til global skala for spesielle tilfeller og klimatologi?

Hvor store er usikkerhetene i de modellerte endringene i kjemiske komponenter p.g.a. flyutslipp?

Kan resultatene sammenlignes med observerte verdier og tidstrender?

Finnes det pr. i dag detaljerte nok klimamodeller til å studere sammenhengen mellom endringen i kortlevende komponenter og klima?

En del av spørsmålene ovenfor er temaer i pågående og planlagte prosjekter.

#### **4. Measurement of ozone and water vapour on Airbus In-service Aircraft: The MOZAIC- program**

Koordinator: Alain Marengo, CNRS. (Ingen norsk deltagelse).

MOZAIC er et storskala program for å kartlegge ozon ( $O_3$ ) og  $H_2O$  i atmosfæren. Programmet finansieres dels av fransk flyindustri og dels gjennom EUs forskningsprogram. Det blir foretatt målinger v.h.a. instrumenter montert på 5 passasjerfly. Målingene startet i juli-94, og over 700 flygninger er foretatt. I slutten av 1994 var flygningene fordelt som følgende: 38% over Europa, 27% over Nord-Amerika, 29% over syd-Amerika og 6% over Asia.

Ved å studere forholdet mellom  $O_3$  og  $H_2O$  i cruisehøyden er det mulig å identifisere stratosfæriske luftmasser eller forurenset bakkeluft. Dette er nyttig for å estimere bidraget av f.eks. en ozonøkning p.g.a. flyutslipp i forhold til bidraget fra andre kilder.

Det er planlagt å presentere en mulig 2-D og 3-D fordeling av de observerte  $O_3$  og  $H_2O$  verdiene på global, regional og meridional skala. For å verifisere numeriske atmosfæremodeller, er det nyttig å sammenligne modellerte fordelinger og tidstrender med tilsvarende observerte verdier. Disse dataene er nyttige for ytterligere å bedre kvaliteten på m.h.p. modellerte kjemiske effekter p.g.a. flyutslipp. Bakgrunnsatmosfærens kjemiske sammensetning er av stor betydning for virkninger av disse forurensningsutslippene.

I fremtiden er det også planlagt å måle odd-nitrogen (NO<sub>x</sub>), CO og PAN. Særlig NO<sub>x</sub>-målingene vil bedre estimatene av flyutslippets innvirkning på ozon. Bakgrunnsverdien av denne komponenten er dårlig kjent, men innvirker samtidig mye på resultatene.

## 5. Measurement of Trace Species in the Exhaust of Aero-engines (AEROTRACE)

Koordinator: R.V. Cottington, DRA.

### Deltagere:

*Tyskland:* DLR, DRA, MTU, BU-GH Wuppertal.

*Estland:* INTA

*England:* Rolls Royce

*Frankrike:* SNECMA, ONERA,

(Ingen norsk deltagelse)

*Budsjett: 1525 kECU (totale kostnader)*

AEROTRACE er et EU-prosjekt som ble startet 1. desember 1994, og blir avsluttet 1. desember 1996. Dette er en videreføring av arbeidet gjort under SP1 i AERONOX- prosjektet. Hovedformålet er å gi kvantitative data for utslipp av NO<sub>x</sub>, HC og partikler i hele flysyklusen og for ulike motortyper. Dataene vil være nyttige til bruk i globale atmosfæremodeller. Resultatene fra dette arbeidet kan også påvirke debatten for regulering av flyutslippet.

Prosjektets formål kan grupperes i tre hovedemner:

- 1) Å identifisere og tilpasse teknikker for prøvetaking og målinger av sporgasser i eksos fra flymotorer.
- 2) Å vurdere endringen i utslippskomponentene for ulike motordriftbetingelser som påvirker temperatur, trykk og luft/drivstoff forholdet i forbrenningskammeret.
- 3) Å bruke disse dataene for å utvide utslippsdatabasen utviklet under AERONOX.

## 6. Stratosphere and Troposphere Experiment by Aircraft Measurement (STREAM)

Koordinator: Prof. Jos Lelieveld, University of Wageningen.

### Deltagere:

*Tyskland:*

Max-Planck-Institute (MPI) for Chemistry

MPI for Nuclear Physics

University of Wageningen

*Sverige:* University of Stockholm

*Nederland:* KNMI og Technical University of Delft

(Ingen norsk deltagelse)

Prosjektet startet i 1991 og har vært økonomisk støttet av EU siden 1994. I dette prosjektet måles en rekke kjemiske komponenter i øvre troposfære og nedre stratosfære.

Hovedformålene med prosjektet er:

- 1) Å bidra til forståelse av dynamiske prosesser som beskriver utveksling mellom troposfære og stratosfære.
- 2) Å studerer hvordan nivået av nitrogenoksider innvirker på den lokale produksjon/reduksjon av ozon.
- 3) Å identifisere innvirkningen av flyutslipp på kjemien i øvre troposfære og nedre stratosfære v.h.a. målinger av ozon,  $\text{NO}_y$ , aerosoler, cirrusskyer, CO og HC.

Det blir også benyttet numeriske atmosfæremodeller for å studere emnene beskrevet ovenfor.

## 7. Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT)

Koordinator: Prof. Ulrich Schuman (DLR).

### Deltagere:

Tyskland: DLR, MPI

Frankrike: Laboratoire de Meteorologie (LMD)

Nederland: KNMI

England: Environment and Energi (AEA)

Norge: NILU, UiB, UiO

USA: University of Missouri-Rolla (UMR)

*Budsjett: 725 kECU + nasjonale bidrag.*

POLINAT er et EU-prosjekt som startet i 1993 og varer ut 1995. Programmet har som hovedformål å bestemme sammensetning, romlig og tidsmessig fordeling og omdannelse av forurensning fra subsoniske flyutslipp i cruisehøyden. Dette blir studert innenfor den østlige delen av den nordatlantiske flykorridoren. Hovedvekten blir lagt på fordelingen av  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  og  $\text{H}_2\text{O}$ , samt deres effekt på ozon og andre reaksjonsprodukter (inkludert partikler).

Studiene dekker to romlige skalaer. Flyeksosen vil bli modellert fra noen minutter til flere timer etter utslippet. Det vil i tillegg bli benyttet 2-D og 3-D modeller som beskriver områder dekket av de mest trafikkerte flykorridorene.

Prosjektet søker å finne svar på følgende spørsmål:

- 1) Er effekten av flyutslippet på atmosfærekjemi i nærheten av den nordatlantiske flykorridor så høy som tidligere modellert?

Mellom 50-60 °N krysser rundt 250-300 vestgående fly lengdegraden 10°V i ca 9-12 km høyde i tidsperioden 9 til 18 UT. Mellom 3 og 10 UT blir samme området krysset av en tilsvarende antall østgående fly. Det er beregnet at

flyutslippet i den nordatlantiske flykorridoren mer enn doubler  $\text{NO}_x$ -konsentrasjonen, selv om det blandes jevnt i hele korridoren. Dette fører til en beregnet ozonøkning på mellom 10% og 30% i dette området. Pr. 1993 var det ennå ikke foretatt målinger som kunne benyttes til å verifisere slike modellerte ozonendringer.

- 2) Er forurensning fra flytrafikk mulig å måle, og skille fra samme type forurensning fra andre kilder?

Økningen i  $\text{NO}_x$ , men også  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  og partikler skulle være målbart og mulig å skille fra bakgrunnsverdier, særlig når det måles i unge eksosutslipp fra fly. Over Nord-Atlanteren er flyutslippene den eneste direkte kilde til forurensning. Foreløpige resultater viser at denne forurensningen er mulig å skille fra f.eks. bakkeforurensning fra det nordamerikanske kontinent.

- 3) Hvordan er endres den kjemiske sammensetningen i flyeksosen før den blir spredt til global skala?

Noe av  $\text{NO}_x$ - og  $\text{SO}_2$ -utslippet kan bli oksidert til mindre aktive nitrogenkomponenter og til svovelsyre før eksosen spres til en skala typisk for atmosfæremodeller.

- 4) Hvor lang tid tar det før flyeksosen er blandet med omgivelsene, og hvilken romlig skala har eksosen spredt seg til ?

Flyeksosen vil spre seg avhengig av de meteorologiske forholdene i atmosfæren. I situasjoner med kraftig turbulens vil eksosen blandes hurtigere med omgivelsene sammenlignet med utslipp i stabile situasjoner. Det er foreløpig ikke godt nok kjent hvordan denne blandingen skal estimeres.

- 5) Hvor stor er effekten på ozon i flykorridorene, og nedstrøms disse?

I flyeksosen fører et høyt  $\text{NO}$ -nivå til tap av  $\text{O}_3$  gjennom reaksjonen:  $\text{NO} + \text{O}_3 \Rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ . Nedstrøms flykorridorene er det imidlertid forventet en ozonøkning. Det er interessant å studere på hvilke tidsskalaer ozonproduksjonen dominerer.

- 6) Hvor ulikt er bidrag og effekter av flyutslipp i øvre troposfære og i nedre stratosfære?

Fra analyser av flytrafikk og meteorologiske observasjoner er det forventet at på årsbasis forekommer ca. halvparten av flygningene i den nordatlantiske flykorridor i lavere stratosfære, og den andre halvdel i øvre stratosfære. Bakgrunnskonsentrasjonene av  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  og aerosoler endrer seg mye med høyden, spesielt i området rundt tropopausen. Dette vil innvirke på hvilken effekt et tilleggsutslipp fra fly har på atmosfærekjemien. Er det målbare forskjeller i flyutslipp om natten versus utslipp om dagen?



- 7) Er det målbare forskjeller i den kjemiske sammensetningen i flyutslippet om natten sammenlignet med dagen?

For fly som flyr mot øst, vil flesteparten av flygningene gå 4 til 8 timer om natten. Dette kan påvirke den kjemiske endringen i flyutslippet. Det er bl.a. forventet at den heterogene kjemien som konvertere  $\text{NO}_x$  til  $\text{HNO}_3$  er mer effektiv om natten.

Prosjektet er delt i to hovedaktiviteter:

#### *Målinger:*

Formålet er å bidra med data for hvordan utslipp fra fly fordeler seg innenfor og utenfor den østlige del av den nordatlantiske flykorridor. Målekampanjer er blitt gjennomført i november 1994 og i juni 1995. Et forskningsfly foretok målinger av  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , partikler samt meteorologiske parametere.

#### *Modellering:*

Værvarsler under målekampanjene ble utarbeidet. Dette for å gi et fullstendig bilde av vær-situasjoner under kampanjene. På grunnlag av disse studiene er det også mulig å analysere hvor lufta som det ble målt i har sin opprinnelse, (f.eks. forurenset luft fra bakken).

I periodene for målekampanjene ble det samlet inn detaljerte data for flytrafikk over Nord-Atlanteren. Dette ble bl.a. benyttet i modellberegninger for å studere kjemisk konverteringen av  $\text{NO}_x$  og innvirkning på ozon i dette området. I tillegg ble det også benyttet modeller som studerte spredning av flyutslippet og kjemien i flyeksosen opptil flere timer etter utslippet. Fra dette prosjektet foreligger ikke endelig rapport. Denne vil bli ferdig i begynnelsen av 1996.

## **8. Atmospheric Effects of Aviation Project (AEAP)**

### **8.1 Formål**

NASA's Atmospheric Effects of Aviation Project har som formål å kunne gi en forskningsbasert vurdering av effekten av både subsoniske og supersoniske flyutslipp på atmosfæren. Dette er ment som et grunnlag for fremtidige avgjørelser angående bestemmelser for utslipp fra fly. Dette prosjektet startet i 1990 med "the Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft" (AESA) som er en del av NASA's High Speed Research Program. Siden 1994 har prosjektet vært utvidet med "The Subsonic Assessment" (SASS), som er en del av NASA's Advanced Subsonic Technology Program. Prosjektet vil bli ferdigstilt i 2001.

---

AEAP søker svar på følgende spørsmål:

- 1) Hva er dagens og fremtidens utslipp fra fly?
- 2) Hvilke kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren kan bli påvirket av flyutslipp?

- 3) Er observasjoner i atmosfæren konsistente med dagens forståelse av aktuell kjemi og fysikk relatert til forskning på flyutslipp?
- 4) Hva er de beregnede ozonendringer og klimatiske påvirkninger p.g.a. flyutslipp?
- 5) Hvor stor er usikkerheten i beregningene?

For å besvare spørsmålene ovenfor er prosjektet delt inn i 6 forskningsfelter:

*Utslippsbeskrivelse:*

Formålet er å gi en beskrivelse av utslipp fra dagens og fremtidens flymotorer.

*Interaksjoner nær utslippene:*

Formålet er å beskrive fluidynamikk og kjemiske prosesser umiddelbart etter flyutslippet.

*Realistiske utslipps-scenarioer:*

Formålet er å utvikle og opprettholde 3-D databaser som representerer flyutslipp langs realistiske flyruter. Dette vil bli gjort for tidligere, nåværende og fremtidig flytrafikk.

*Laboratoriestudier:*

Formålet er å bidra til forståelse av atmosfæriske prosesser som er relevante for forståelsen av effekter p.g.a. flyutslipp.

*Atmosfæriske observasjoner:*

Formålet er å måle kjemiske og fysiske atmosfæriske egenskaper relevante for forskning på effekter av flyutslipp.

*Global modellering:*

Formålet er å forutsi kjemiske og fysiske effekter av p.g.a. flyutslipp på global skala.

## **8.2 Foreløpige resultater og videre forskning**

### **8.2.1 *The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft (AESA)***

AESA har ansvar for å vurdere effekten av en mulig flåte av hurtiggående fly med cruisehøyde i stratosfæren fra 15-25 km, såkalt High-Speed-Civil-Traffic (HSCT). Disse studiene har pågått siden 1990 og følgende institusjoner deltar i programmet:

*USA:*

NCAR, NASA/Goddard Space Flight Center, AER, Inc., University of California, Goddard Institute for Space Studies, NASA/Langley Research Center, NASA/Ames Research Center, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Continuum Dynamics, Inc., North West Research Associates, Inc., University of Missouri-Rolla, Aerodyne Research, Inc., University of Washington, Pennsylvania State University, Physical Science, Inc., SRI International, NASA/Jet Propulsion Laboratory, University of Colorado,

NOAA Environmental Research Lab, NOAA Aeronomy Lab, San Jose State University, University of Wisconsin, Aurora Flight Science Corp., University of Denver, Harvard University.

*England:*

University of Edinburgh, University of Cambridge.

*Norge:*

University of Oslo (Ivar S.A. Isaksen).

*Italia:*

Università degli Studi L'Aquila.

*Australia:*

CSIRO.

*Russland:*

Central Aerological Obs.

Basert på markedsundersøkelser og realistiske fremtidige flyruter er det beregnet en database for utslipp av NO<sub>x</sub>, HC, CO og H<sub>2</sub>O for både subsoniske og supersoniske fly for år 2015. Utslippsdataene er basert på at 387 000 passasjerer vil transporteres med HSCT pr døgn. Dette krever en flåte med 500 supersoniske fly hvis cruisehøyden legges til 24 km, mens det kreves 594 fly hvis denne reduseres til 16 km. I disse utslippsscenarioene er det antatt at flåten av subsoniske fly er noe redusert i forhold til dagens flåte. Disse scenarioene er benyttet for å modellere effekter av flyutslippet.

I dette programmet blir det lagt stor vekt på sammenlignende beskrivelse av dynamikk, kjemi og stråling i de ulike numeriske modellene som benyttes. Resultatene fra modellene blir også sammenlignet med observasjoner fra laboratoriestudier og målinger i atmosfæren. Hensikten er å forbedre modellene, og dermed redusere spredningen i resultatene.

Det er blitt foretatt modellberegninger med flere 2-D modeller for å studere innvirkningen på ozon pga. utslippet fra den supersoniske flyflåten beskrevet ovenfor. Dette er blitt gjort for ulike scenarier hvor bl.a. cruise høyden og utslipp av NO<sub>x</sub> varierer. Resultatene viste at for samme utslipp av NO<sub>x</sub> blir innvirkningen på ozonreduksjonen sterkere når cruisehøyden økte fra 16 km til 24 km. Resultatene er også avhengig hvor mye NO<sub>x</sub> som slippes ut fra motorene. Med en cruisehøyde på 24 km ble ozonkolonnen fra 40 °N -50 °N redusert med mindre enn 1% for en EI på 5, mens reduksjonen var 2-3% med en EI på 15. Basert på laboratorie- og teoretiske studier er det imidlertid stor tro på at det skal være realistisk å utvikle en flymotor med utslippstall ned mot EI 5 i begynnelsen av neste århundre. Hvis en slik motorteknologi blir benyttet i flåten av HSCT, er det forventet at innvirkningen på ozon blir liten.

Fra AESA-arbeidet er det også rapportert om at et økende antall laboratorieforsøk og atmosfæriske observasjoner viser at den kjemiske fordelingen i nedre del av stratosfæren også er sterkt influert av heterogenkjemi. Dette impliserer at en større andel av  $\text{NO}_x$ -utslippet fra fly vil konverteres til inaktive komponenter. Modellresultater viser også at effekten på ozon blir mindre når heterogenkjemi inkluderes. Dette reiste igjen nye spørsmål i forskningsarbeidet som:

Hvordan er den geografiske og årlige fordeling av partikler i atmosfæren?

Hvordan dannes og tapes disse partiklene?

Bidrar flyutslippet direkte eller indirekte til at nivået av disse partiklene øker i atmosfæren?

For å svare på punktene ovenfor er det både utført og planlagt laboratorieforsøk, målekampanjer og modellberegninger. I tillegg vil det også forskes videre på spredning av og kjemi i flyeksosen, samt flyutslippets effekter på klimaet. Forskningsområdene nevnt ovenfor inngår i AESA- fase 1 programmet. Dette arbeidet er planlagt avsluttet i september 1995. En foreløpig vurderingsrapport fra dette arbeidet foreligger derfor ikke pr. i dag.

Til tross for omfattende forskning utført innenfor AESA-programmet fra 1990-1995, vil det fortsatt være områder med store usikkerhetsmomenter. I dette programmet vil det bl.a. forskes videre på potensielle klimatiske effekter av flyutslippet og transportater for flyeksosen før den er spredt til global skala. Det blir også lagt vekt på å videreutvikle 3-D modeller, samt å utføre målekampanjer i områder eller årstider hvor det tidligere er foretatt lite målinger.

### **8.3 The Subsonic Assessment (SASS)**

SASS-programmet vil studere kjemiske og klimatiske effekter p.g.a. av utslipp fra subsoniske fly. Hovedspørsmålene som blir stilt er:

Hvor lang levetid har  $\text{NO}_x$ -utslipp fra fly i den lavere stratosfære?

Hvordan er transporten av utslippet mellom troposfære og stratosfære, og omvendt?

Hva er bidraget fra flyutslipp til  $\text{NO}_x$ -budsjettet i øvre troposfære sammenlignet med bidrag fra stratosfæren, lynaktivitet og utslipp fra bakken?

Hvilken effekt har dannelsen av kondensstriper på jordens strålingsbudsjett?

Har flyutslipp innvirkning på skydannelse?

Har utslippet av sot og sulfat innvirkning på strålingsbalansen?

## 9. Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT-2)

Koordinator: Prof. U. Schumann, DLR.

### Deltagere:

Tyskland: DLR, MPI

Nederland: KNMI

Frankrike: CNRS

Norge: NILU, UiB, UiO

England: AEA og UK Meteorological Office

Sveits: Eidgenössische Technische Hochschule. Atmosphärenphysik

USA: University of Missouri-Rolla

*Budsjett: 760 kECU + nasjonale bidrag*

Dette prosjektet vil videreføre arbeidet gjort under det pågående POLINAT-prosjektet, og er finansiert av EU. Det er planlagt å starte januar 1996 med varighet ut 1998. Prosjektet søker svar på følgende spørsmål:

- 1) Hvor stor er nord-syd utstrekningen av den nordatlantiske flykorridoren og hvor høye er gradientene som avgrenser korridoren. Er det en middelgradient i forekomsten av luftforurensninger på langs av korridoren?
- 2) Til hvilken høyde over cruisehøyden blir utslippene i de mest trafikkerte flykorridorene transportert? Hva er oppholdstiden for utslippene i nedre stratosfære?
- 3) Hvor stort er bidraget fra flytrafikk i forhold til bakkeutslipp? Hvor viktig er utvasking, homogen- og heterogenkjemi i løpet i den tiden bakkeutslippene transporteres oppover?
- 4) Hvor ofte dannes det kondensstriper som strekker seg over store områder?
- 5) Hvordan er spredning og kjemisk konvertering i multiple eksosplumer som oppstår når flere fly krysser samme luftrom?
- 6) Hvilke effekter har flyutslippet på dannelsen av ozon og andre kjemiske komponenter?

Som det pågående POLINAT-prosjektet vil også dette omfatte både målinger og modellering.

I dette prosjektet vil det bli målt på tvers av flykorridorer og på langs (Figur 2). I de to foregående målekampanjene ble det målt innenfor et mer begrenset område. I tillegg vil det også bli foretatt målinger opp til 13 km høyde, altså over den typiske cruisehøyden. Disse målingene kan særlig gi svar på spørsmål 1, 2 og 3 ovenfor. I løpet av det pågående prosjektet har de numeriske modellene som benyttes blitt forbedret. For POLINAT2-prosjektet blir det derfor mulig å gi bedre estimater for spørsmålene ovenfor.

## 10. Modelling of the impact of ozone and other chemical compounds in the atmosphere from airplane emissions (AEROCHEM)

Koordinator: Prof. Ivar S.A. Isaksen, UiO.

### Deltagere:

*Norge:* UiO, UiB, NILU

*Tyskland:* DLR, MPI

*England:* Department of Chemistry, University of Cambridge

*Frankrike:* ONERA, Météo-France

*Italia:* Università degli studi-L'Aquila

*Budsjett:* 500 kECU + nasjonale bidrag

AEROCHEM er et EU-prosjekt som starter i januar 1996 og har 2 års varighet. Et hovedformål for dette prosjektet er å studere effekter av fortidens, dagens og fremtidens flyutslipp på ozon i øvre troposfære og nedre stratosfære. I den senere tid har det vært observert et stadig økende ozonnivå i den øvre troposfære på midlere bredder på nordlige halvkule.

Et hovedspørsmål i dette prosjektet er:

Er hele eller deler av denne ozonøkning en følge av et stadig økende  $\text{NO}_x$ -utslipp fra fly?

For å kunne svare på dette må man ha en bedre forståelse av prosesser som bestemmer ozonfordelingen i denne høyden.

Andre viktige forskningsområder blir derfor:

Stratosfærisk/troposfærisk utveksling av ozon og  $\text{NO}_x$ , konvektiv transport av ozon,  $\text{NO}_x$ , HC og CO fra bakken og produksjon av  $\text{NO}_x$  fra lyn.

Effekter av et fremtidig flyutslipp på ozon vil bli studert i forbindelse med heterogene reaksjoner på partikler i atmosfæren. Dette er et forskningsområde hvor det fortsatt er store usikkerheter.

Når usikkerhetsmomentene beskrevet ovenfor er bedre forstått og beskrevet i numeriske modeller vil følgende spørsmål studeres:

Hvor mye vil fremtidige ozonnivåer bli påvirket av flyutslipp?

For å studere punktene beskrevet ovenfor vil det hovedsakelig benyttes 3-D modeller med en god beskrivelse av ozonkjemi. I tillegg vil en 2-D modell benyttes til å beregne langtidseffekter av flyutslipp.

## 11. Formation Processes and Radiative Properties of Particles in Aircraft Wakes (AEROCONTRAIL)

Koordinator: Dr. P. Mirabel, CNRS.

### Deltagere:

*Frankrike:* CNRS, ONERA, Universite Pascal (UBP-LaMP)

*Tyskland:* Fraunhofer Institute (FGH-IFU), DLR

*Sverige:* University of Stockholm (SU-MISU)

(Ingen norsk deltagelse)

AEROCONTRAIL er et EU-prosjekt som er planlagt startet i januar 1996 og har 2 års varighet. Prosjektets hovedformål er å bedre forståelsen av hvordan flyutslippet påvirker partikkel- og skydannelse, og hvordan dette igjen påvirker klimaet. Dannelsen av partikler og kondensstriper i "kjølvannet" etter subsoniske fly vil bli studert.

Prosjektets mål er å bedre forståelsen av:

- Endringer i kondensstripenes mikrofysiske og optiske egenskaper avhengig av meteorologiske forhold.
- Sammenhengen mellom dannelsen og varigheten av kondensstriper avhengig av meteorologiske forhold.
- Fysiske prosesser som bestemmer dannelse av partikler, kondensstriper og skyer.
- Vekselvirkninger mellom dannelse av partikler, kondensstriper og skyer.

En økt forståelse av punktene nevnt ovenfor vil bedre estimater for hvordan kondensstripene påvirker klimaet. Prosjektet omfatter laboratoriestudier, feltmålinger og modellberegninger.

# **Vedlegg A**

## **Tabeller og figurer**

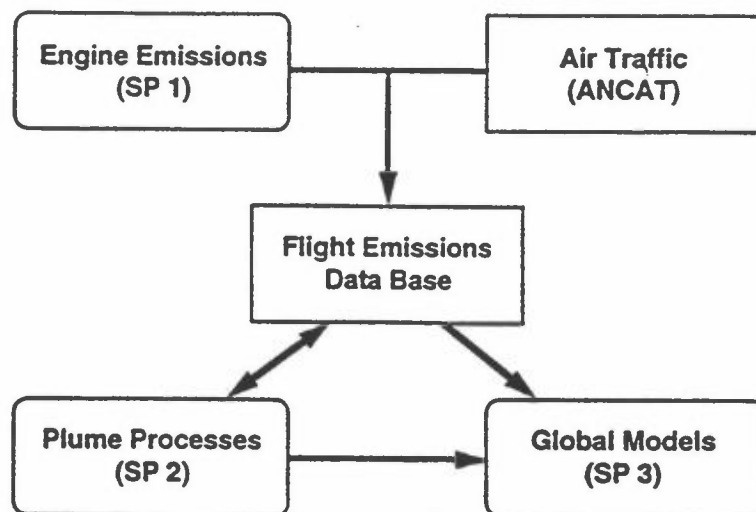


Tabell 1: Bidraget fra ulike  $\text{NO}_x$ -kilder til  $\text{NO}_x$ -nivået mellom 30 N-60 N i høyden 200-300 hPa (ca. 9-12 km.). (Tallene er basert på modellresultater.)

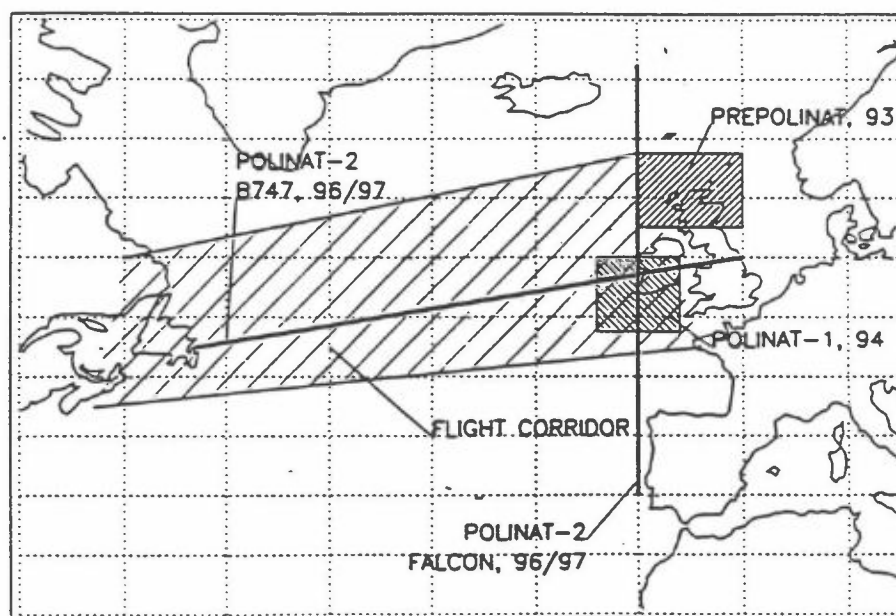
	January	July
Surface sources	23-28%	54-57%
Lightning	2-5%	15-17%
Stratospheric sources	< 35%	1-7%
Aircraft emissions	40-67%	25%

Tabell 2: Beregnet maksimum i den relative midlere sonale endringen p.g.a. flyutslipp for en del kjemiske komponenter på nordlige bredder i 200 hPa (ca. 12 km.).

Constituent	January	July
$\text{NO}_x$	53%	34%
$\text{O}_3$	4%	9%
$\text{HNO}_3$	28%	32%
OH	32%	18%



Figur 1: Informasjonsstrømmen mellom de ulike underprosjektene i AERONOX.



Figur 2: Måleområder for de ulike POLINAT-kampanjene.

## **Vedlegg B**

### **Forkortelser og forklaringer**

## Forkortelser

AERONOX:	The Impact Of NO <sub>x</sub> Emissions from Aircraft upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km
AEA:	Environmental Assessment Department, Consultancy Services
AEA:	Environment and Energi
AEAP AEAP:	Atmospheric Effects of Aviation Project Atmospheric Effects of Aviation Project
AEROCHEM:	Modelling of the Impact on Ozone and other Chemical Compounds in the Atmosphere from Airplane Emissions
AEROCONTRAIL:	Formation Processes and Radiative Properties of Particles in Aircraft Wakes
AEROTRACE	Measurement of Trace Species in the Exhaust of Aero-engines
AESA:	The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft (del av AEAP)
ANCAT:	Abatement Of Nuisances Caused by Air Transport
ClO <sub>x</sub> :	Kloroksider
CO <sub>x</sub> :	Karbonoksider
DLR:	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR)
DRA:	Defence Researsc Agency, Aerospace Division.
ECAC:	European Civil Aviation Conference
EI:	Utslippsindeksen angir hvor mange gram NO <sub>2</sub> som slippes ut pr. kg forbrukt drivstoff
HC:	Hydrokarboner
HIO <sub>x</sub> :	Hydrogenoksider
KFA:	Kern Forschungs Anlage, Forschungszentrum Jülich
KNMI:	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

LCSR:	Centre Nationale de la Recherche Scientifique, Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, Orleans
LMD:	Laboratoire de Meteorologie (LMD)
MPI:	Max-Planck-Institute
MTU:	Motoren- und Turbinen-Union München, Deutsche Aerospace
NILU:	Norsk institutt for luftforskning
NO <sub>x</sub> :	Nitrogenoksider
ONERA:	Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
POLINAT:	Pollution of Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor
PSC:	Polare Stratosfære Sky
SASS:	The Subsonic Assessment (del av AEAP)
SNECMA:	Société Nationale d'Etudes et de Construction de Moteur d'Aviation, Centre de Villa roche
SO <sub>2</sub> :	Svoveldioksid
STREAM:	Stratosphere and Troposphere Experiment by Aircraft Measurement
UiB:	Universitetet i Bergen
UiO:	Universitetet i Oslo
ULPS:	Université Lois Pasteur, Strasbourg, Laboratoire de Physico Chimie de l'Atmosphère
UMR:	University of Missouri-Rolla
UWUPP:	Gesamthochschule Wuppertal, Bergische Universität

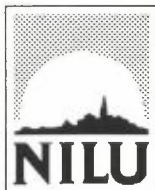
## Forklaringer

PSC-skyer: Skyer av partikler som består av en blanding av is og salpetersyre ( $\text{HNO}_3$ ) eller av ren is.

$\text{NO}_y$ : Summen av kjemiske komponenter i atmosfæren som inneholder odde-nitrogen ( $\text{NO}_y = \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{HNO}_3 + \dots$ ).

PAN: Betegnelse for kjemisk komponent som dannes i reaksjon mellom  $\text{NO}_x$  og nedbrytningsprodukter fra hydrokarboner (HC). Denne reaksjonen binder opp  $\text{NO}_x$  som ellers kunne bidra til ozonproduksjon. PAN betegnes derfor som en reservoarkomponent.

UT: Betegnelse for universaltid, dvs. hva klokken er på null-meridianen. (Tidligere kalt Greenwich-time.)



## Norsk institutt for luftforskning (NILU)

Postboks 100, N-2007 Kjeller

RAPPORTTYPE OPPDRAKSRAFFORT	RAPPORT NR. OR 20/96	ISBN-82-425-0757-0	
DATO 22/3 96	ANSV. SIGN. P.B.	ANT. SIDER 29	PRIS NOK 45,-
TITTEL Studie om forskningsprosjekt vedrørende utslipp fra fly i øvre luftlag		PROSJEKTLEDER F. Stordal	
		NILU PROSJEKT NR. O-1814	
FORFATTER(E) Anne Gunn Kraabøl og Frode Stordal		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAKSGIVERS REF.	
OPPDRAKSGIVER Luftfartsverket Postboks 8124 0032 OSLO			
STIKKORD flyutslipp	effekter	NO <sub>x</sub> -utslipp	
REFERAT Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag fra Luftfartsverket utført en studie over nylig avsluttede, pågående og planlagte forsknings-prosjekter vedrørende effekter av utslipp fra fly i øvre troposfære og nedre og midlere stratosfære.			
TITLE Study on research projects concerning aircraft emissions in the upper troposphere and lower stratosphere			
ABSTRACT			

\* Kategorier: A Åpen - kan bestilles fra NILU  
B Begrenset distribusjon  
C Kan ikke utleveres