

Danmarks Klimacenter

DMI, Trafikministeriet



LUFTFART OG DEN GLOBALE ATMOSFÆRE



Danmarks Meteorologiske Instituts oversættelse af
IPCC's særrapport

AVIATION AND THE GLOBAL ATMOSPHERE
Summary for Policymakers

Rapport 99-3

Luftfart og den globale atmosfære

Danmarks Klimacenter, Rapport 99-3

Redaktion: Anne Mette Jørgensen

Oversættelse: Margit Bendtsen, Niels Larsen, Bente Skov Knudsen

ISSN: 1398-490-X

ISSN: 1399-1957 (Online)

ISBN: 87-7478-393-9

© IPCC og Danmarks Meteorologiske Institut, 1999

Danmarks Meteorologiske Institut

Lyngbyvej 100

2100 København Ø

Telefon: 3915 7500

Telefax: 3927 1080

www.dmi.dk

Det er tilladt at kopiere og uddrage fra rapporten, når det sker med DMI-kildeangivelse.

Foto på omslaget: Mort/Tony Stone



**INTERGOVERNMENTAL PANEL
ON
CLIMATE CHANGE**



DANMARKS METEOROLOGISKE INSTITUTS
oversættelse af

AVIATION AND THE GLOBAL ATMOSPHERE
SUMMARY FOR POLICYMAKERS

Resumé af en særreport udarbejdet af IPCC's arbejdsgrupper I & III

Resuméet er godkendt i detaljer på en fælles konference mellem IPCC's arbejdsgrupper I og III (San José, Costa Rica • 12.-14. april 1999) og giver en fremstilling af IPCC's enige og godkendte udtalelse vedrørende den nuværende viden om luftfarten og den globale atmosfære.

Baseret på et udkast skrevet af:

David H. Lister, Joyce E. Penner, David J. Griggs, John T. Houghton, Daniel L. Albritton, John Begin, Gerard Bekebrede, John Crayston, Ogunlade Davidson, Richard G. Derwent, David J. Dokken, Julie Ellis, David W. Fahey, John E. Frederick, Randall Friedl, Neil Harris, Stephen C. Henderson, John F. Hennigan, Ivar Isaksen, Charles H. Jackman, Jerry Lewis, Mack McFarland, Bert Metz, John Montgomery, Richard W. Niedzwiecki, Michael Prather, Keith R. Ryan, Nelson Sabogal, Robert Sausen, Ulrich Schumann, Hugh J. Somerville, N. Sundararaman, Ding Yihui, Upali K. Wickrama, Howard L. Wesoky



Forord

Igennem de seneste år har fremtidens klima og menneskets påvirkning af den globale atmosfære tiltrukket sig betydelig interesse i den danske befolkning, og derfor er der behov for en løbende formidling af viden og resultater på området.

Samlede vurderinger af den internationale videnskabelige litteratur vedrørende klima og klimaændringer foretages af FN's klimapanel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC udsendte sin anden store vurderingsrapport i 1996, og DMI udgav samme år bogen *Fremtidens klima* (ISBN 87-7478-339-4), som er en dansk oversættelse af Resumé for Beslutningstagere og Teknisk Resumé af rapporten fra den videnskabelige arbejdsgruppe I.

IPCC har i sommeren 1999 udsendt en særreport *Aviation and the Global Atmosphere* om luftfartens påvirkning af atmosfæren globalt. Rapporten fokuserer på flyvningens virkning på klimaet og atmosfærens ozonindhold. Den konkluderer, at klimapåvirkningen fra fly i 1992 udgjorde ca. 3,5% af den totale påvirkning fra menneskeskabte aktiviteter, og at andelen vil vokse til mellem 4 og 17% i 2050 for IPCC's mellemste scenario for udslip af drivhusgasser. Klimaeffekten af en mulig ny generation af overlydsfly, som vil flyve 7-8 km højere oppe end de almindelige fly, anslås at være en faktor fem større end effekten af de fly, som overlydsflyene vil erstatte. I rapporten anføres, at der er en række muligheder for at minimere virkningen af flyvningen på klima og ozonlag, herunder ændringer i fly- og motorteknologi, brændstof og operationel praksis samt regulerings- og økonomiske virkemidler. Rapporten blev godkendt på IPCC's plenarmøde i Costa Rica i april 1999. Den er udarbejdet af IPCC i samarbejde med det videnskabelige ozonpanel under Montrealprotokollen efter anmodning fra den internationale civile flyvnings organisation ICAO. Som noget nyt i IPCC-sammenhæng har også tekniske eksperter fra flyindustrien deltaget i arbejdet sammen med de meteorologiske eksperter.

DMI har i denne rapport fra Danmarks Klimacenter oversat rapportens Resumé for Beslutningstagere. Hele rapporten *Aviation and the Global Atmosphere* findes i en engelsk udgave, som kan købes i boghandelen (Cambridge University Press, ISBN 0 521 66404 7). Rapporten behandler komplicerede tekniske emner i et sprog præget af lange sætninger med forbehold og indskud. I oversættelsen af resuméet har vi tilstræbt at give en så præcis som muligt oversættelse af den engelske tekst, men samtidig har vi delt sætninger op for at gøre teksten mere læsevenlig.

DMI takker IPCC's sekretariat ved World Meteorological Organization i Geneve for tilladelse til at udgive oversættelsen og de tekniske støtteenheder for IPCC-arbejdsgrupperne I og III i henholdsvis Storbritannien og Nederlandene for levering af figurene.

Anne Mette K. Jørgensen
Forskningschef samt
leder af den danske IPCC-delegation.

Indhold

1. Introduktion	1
2. Hvordan påvirker luftfarten klima og ozon?	1
3. Hvordan forventes luftfartens emissioner at vokse i fremtiden?	4
4. Hvad er den nuværende og fremtidige effekt af underlydsflyvning på strålingspåvirkningen og UV-stråling?	5
4.1. Kuldioxid	5
4.2. Ozon	6
4.3. Metan	6
4.4. Vanddamp	6
4.5. Contrails	7
4.6. Cirruskyer	7
4.7. Sulfat- og sodaerosoler	8
4.8. Hvad er de samlede klimapåvirkninger fra underlydsfly?	8
4.9. Hvad er den samlede effekt fra underlydsfly på UV-B?	9
5. Hvad er den nuværende og fremtidige effekt af overlydsflyvning på strålingspåvirkningen og UV-stråling?	9
6. Hvilke muligheder er der for at reducere emissioner og påvirkninger?	11
6.1. Teknologiske muligheder for fly og flymotorer	11
6.2. Brændstofmuligheder	12
6.3. Operationelle muligheder	12
6.4. Regulering, økonomi og andre muligheder	12
7. Emner for fremtiden	13

FN's klimapanel IPCC og den danske deltagelse	15
Danmarks Klimacenter	16

1. Introduktion

Denne rapport vurderer flyvningens indvirkning på klimaet og atmosfærens ozonindhold, og er den første IPCC rapport, der behandler en specifik industriel subsektor. Rapporten blev udarbejdet af IPCC i samarbejde med the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, som svar på en anmodning fra International Civil Aviation Organization (ICAO)¹ på grund af den mulige effekt fra luftfartens emissioner. Disse er de mest fremherskende menneskeskabte emissioner, som afgives direkte til den øvre troposfære og nedre stratosfære.

Luftfarten har gennemgået en hurtig udvikling i takt med, at verdensøkonomien er vokset. Passagertrafikken (udtrykt som indtægtsgivende passagerkilometer²) er siden 1960 vokset med næsten 9% om året, 2,4 gange det gennemsnitlige bruttonationalprodukt (BNP) vækstrate. Godstrafikken, af hvilken ca. 80% udføres af passagerfly, er også steget i samme periode. Vækstraten for passagertrafik er aftaget til ca. 5% i 1997 i takt med, at luftfart er blevet mere almindelig. Den samlede flyvnings emissioner er øget, fordi den stigende efterspørgsel på flytransport har overskredet reduktionen i specifikke emissioner³ fra de løbende forbedringer af teknologi og operationelle procedurer. Antager man en efterspørgsel uden begrænsende indgreb, forventes passagertrafikken at stige med større hast end BNP i den periode, som rapporten omhandler.

¹ICAO er de Forenede Nationers særorganisation, som har globalt ansvar for opstilling af standarder, anbefalinger af praksis og vejledning om forskellige aspekter af international luftfart, herunder miljøbeskyttelse.

²Indtægtsgivende passagerkilometer er en målemetode for kommerciel flyvning: en betalende passager fløjet 1 km.

³Specifikke emissioner er emissioner pr. enhed fløjet trafik, f.eks. pr. indtægtsgivende passagerkilometer.

I denne rapport undersøges effekterne af dels den nuværende flytrafik og dels en række af vækstfremskrivninger for en flytrafik uden begrænsende indgreb (som inkluderer passagerer, gods og militær), herunder de mulige følger af en anden-generations kommercielle overlydsfly. Rapporten beskriver også den nuværende flyteknologi, operationelle procedurer og mulighederne for at formindske flyvningens fremtidige indvirkning på den globale atmosfære. Rapporten behandler ikke de lokale miljømæssige virkninger af flymotoremissioner eller anden indirekte miljøpåvirkning fra flyoperationer såsom energiforbrug ved transport på jorden ved lufthavne.

2. Hvordan påvirker luftfarten klima og ozon?

Fly slipper gasser og partikler ud direkte i den øvre troposfære og nedre stratosfære, hvor de har en indvirkning på atmosfærens sammensætning. Disse gasser og partikler ændrer koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren, herunder kuldioxid (CO₂), ozon (O₃) og metan (CH₄), udløser dannelse af kondensationsstriber (contrails) og kan øge cirruskydækket - faktorer, som alle sammen bidrager til klimaændringer (se box 1).

De væsentligste emissioner fra fly består af drivhusgasserne kuldioxid og vanddamp (H₂O). Andre større emissioner er kvælstofoxid (NO) og kvælstofdioxid (NO₂) (som tilsammen betegnes NO_x), svovloxider (SO_x) og sod. Den totale mængde afbrændt flybrændstof og de totale emissioner af kuldioxid, NO_x og vanddamp fra fly er velkendte i forhold til andre parametre, som har betydning for denne rapport's vurderinger.

Boks 1. Videnskaben om klimaændringer

Nogle af hovedkonklusionerne i "Summary for Policymakers of Working Group I of the IPCC Second Assessment Report", der blev publiceret i 1995⁴, og som drejer sig om effekterne af alle menneskeskabte udslip på klimaændringer, er som følger:

- Stigninger i drivhusgaskoncentrationer siden begyndelsen af industrialiseringen (d.v.s. siden ca. 1750) har ført til en positiv strålingspåvirkning af klimaet med en tendens til at opvarme Jordens overflade og bevirke andre klimaændringer.
- Atmosfærens koncentrationer af drivhusgasser, bl.a. kuldioxid, metan og lattergas (N₂O), er steget signifikant: med henholdsvis ca. 30%, 145% og 15% (værdier for 1992). Væksten kan for en stor del tilskrives menneskets aktiviteter, hovedsagelig afbrænding af fossile brændsler, ændret arealudnyttelse og landbrug.
- Mange drivhusgasser forbliver i atmosfæren i lang tid (for kuldioxids og lattergas' vedkommende i mange årtier til århundreder). Hvis kuldioxid-emissionerne fortsætter på nuværende niveau (1994) vil resultatet være en næsten konstant vækst i atmosfærens koncentrationer i mindst to hundrede år og indholdet vil nå ca. 500 ppmv (op mod det dobbelte af den førindustrielle koncentration på 280 ppmv) ved slutningen af det 21. århundrede.
- Troposfæriske aerosoler, der opstår som følge af forbrænding af fossile brændstoffer, afbrænding af biomasse og andre kilder, har ført til en negativ strålingspåvirkning, som kan have både kontinental og hemisfærisk effekt på klimamønstrene, selv om den er koncentreret i særlige regioner og subkontinentale områder. I modsætning til drivhusgasser med lang levetid har menneskeskabte aerosoler en meget kort levetid i atmosfæren; derfor indstiller deres strålingspåvirkning sig hurtigt, afhængigt af stigninger og fald i emissionerne.
- Vores mulighed for at kvantificere menneskets indflydelse på det globale klima ud fra observerede klimaoptegnelser er i øjeblikket begrænset, fordi det forventede signal endnu kun er ved at træde frem fra baggrundstøjen af naturlig variabilitet, og fordi der er usikkerhed i visse nøglefaktorer. Disse omfatter størrelsen og mønstrene i naturlig variabilitet på lang tidsskala og effekten af den tidlige udvikling fra ændringerne i koncentrationerne af drivhusgasser og aerosoler samt ændringer i landoverfladen. Ikke desto mindre peger en samlet vurdering på, at der er en skelnelig menneskelig indflydelse på det globale klima.
- IPCC har udviklet en række scenarier, IS92a-f for fremtidige emissioner af drivhusgasser og luftarter, der danner aerosoler, baseret på antagelser om befolkningstal og økonomisk vækst, udnyttelse af landjorden, teknologiske ændringer samt tilgængelighed af energikilder og brændstofblandinger gennem perioden 1990 til 2100. Med kendskab til det globale kulstofkredsløb og til atmosfærekemi kan disse emissioner bruges til at fremskrive atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler og forstyrrelserne i den naturlige strålingspåvirkning. Klimamodeller kan derefter bruges til at opstille projektioner af fremtidens klima.
- Skøn over stigningen i den globale gennemsnitlige lufttemperatur ved jordoverfladen i 2100 i forhold til 1990 ligger i IS92 scenarierne fra 1 til 3,5°C. I alle scenarier vil den gennemsnitlige opvarmning sandsynligvis være større, end man har set i de sidste 10.000 år. Regionale temperaturændringer kan være væsentligt forskellige fra det globale middel, og de faktiske årlige til dekadiske ændringer vil indeholde betydelig naturlig variabilitet. En generel opvarmning forventes at føre til en stigning i forekomsten af ekstremt varme dage og et fald i forekomsten af ekstremt kolde dage.

⁴ Dansk oversættelse: *Fremtidens Klima 1996*, DMI, København 1996.

- Det gennemsnitlige vandstands niveau forventes at stige som resultat af varmeudvidelse i oceanerne og smeltende gletchere og iskapper. Skøn over stigningen i vandstands niveauet i 2100 i forhold til 1990 i IS92 scenarierne ligger mellem 15 og 95 cm.
- Højere temperaturer vil føre til et kraftigere hydrologisk kredsløb; dette fører til mulighed for flere alvorlige tørkeperioder og/eller oversvømmelser i nogle områder og mindre alvorlige tørker og/eller oversvømmelser andre steder. Adskillige modeller indikerer en øget nedbørsintensitet, hvilket rummer mulighed for mere ekstreme regneepisoder.

Klimapåvirkningerne fra gasser og partikler, der udledes og dannes som et resultat af luftfarten, er vanskeligere at kvantificere end selve udledningerne; imidlertid kan de sammenlignes med hinanden og med klimapåvirkninger fra andre sektorer ved at bruge begrebet strålingspåvirkning⁵. Idet kuldioxid har en lang atmosfærisk levetid (≈ 100 år) og derfor bliver blandet grundigt op i atmosfæren, kan man ikke skelne mellem effekten af flyemissioner og den samme mængde udslip fra en hvilken som helst anden kilde. De andre gasser (f.eks. NO_x , SO_x og vanddamp) og partikler har en kortere atmosfærisk levetid og forbliver koncentreret nær flyruter hovedsagelig på de nordlige mellembreddegrader. Disse emissioner kan føre til strålingspåvirkning, som forekommer regionalt nær flyruter for nogle af komponenterne (f.eks. ozon og contrails) i modsætning til emissioner som bliver blandet globalt (f.eks. kuldioxid og metan).

Den globale gennemsnitlige klimaændring svarer godt til den globale gennemsnitlige strålingspåvirkning, eksempelvis når man vurderer luftfartens bidrag til stigningen i den globale middeltemperatur eller -vandstand. Imidlertid kan den regionale klimareaktion være forskellig fra den reaktion, der stammer fra en global middelstrålingspåvirkning,

fordi nogle af luftfartens nøglebidrag til strålingspåvirkningen hovedsagelig er lokaliseret i de nordlige mellembreddegrader. Luftfartens virkning på det regionale klima kan være betydningsfuld, men er ikke blevet vurderet i denne rapport.

Ozon er en drivhusgas. Den beskytter desuden Jordens overflade mod den skadelige ultraviolette (UV) stråling og er en almindelig luftforureningskomponent. Flyudslip af NO_x indgår i ozonkemien. Underlydsfly bevæger sig i den øvre troposfære og nedre stratosfære (i højder på ca. 9-13 km), medens overlydsfly krydser adskillige kilometer højere (omkring 17-20 km) i stratosfæren. Ozon i den øvre troposfære og nedre stratosfære forventes at stige som følge af NO_x -stigninger, og metan forventes at falde. I større højder vil stigninger i NO_x føre til fald i det stratosfæriske ozonlag. Levetiden af forløberen for ozondannelse (NO_x) i disse områder stiger med højden, og derfor afhænger luftfartens perturbationer i ozonen af højden af NO_x -tilførsler og varierer fra regional skala i troposfæren til global skala i stratosfæren.

Vanddamp, SO_x (som danner sulfatpartikler) og sod⁶ spiller både en direkte og en indirekte rolle i klimaændringer og ozonkemi.

⁵ Strålingspåvirkningen er et mål for vigtigheden af en potentiel klimaændrende mekanisme. Strålingspåvirkningen er en perturbation eller ændring i energibalancen i Jord-atmosfære-systemet (i W/m^2). Klimasystemet reagerer på strålingspåvirkningen ved at forsøge at genetablere energibalancen. En positiv strålingspåvirkning vil resultere i en netto-opvarmning, mens en negativ strålingspåvirkning vil resultere i en afkøling.

⁶ Luftbårne sulfatpartikler og sodpartikler er begge eksempler på aerosoler. Aerosoler er mikroskopiske partikler, der svæver i luften.

3. Hvordan forventes luftfartens emissioner at vokse i fremtiden?

Global passagertrafik med fly, målt som indtægtsgivende passager-km, forventes at stige med omkring 5% om året mellem 1990 og 2015, mens det totale forbrug af flybrændstof - inklusive passager-, fragt- og militærflyvning⁷ forventes at stige med 3% om året i løbet af samme periode, idet forskellen hovedsageligt skyldes forbedret flyeffektivitet. Fremskrivninger ud over denne tidsperiode er mere usikre, hvorfor en række af fremtidige ikke-begrænsende emissionsscenerier bliver undersøgt i denne rapport (se tabel 1 og figur 1). Alle disse scenarier antager, at

teknologiske forbedringer, der fører til reduktion i emissionerne pr. indtægtsgivende passager-km, vil fortsætte i fremtiden og at optimal brug af disponibelt luftrum (f.eks. ideel lufttrafikledelse) er nået i 2050. Hvis disse forbedringer ikke opnås vil brændstofforbrug og emissioner blive højere. Det antages endvidere, at antallet af fly, ligesom antallet af lufthavne og dertil hørende infrastruktur, vil fortsætte med at vokse og ikke begrænse væksten i efterspørgslen på flytransport. Hvis infrastrukturen ikke var til stede, ville den vækst i trafikken, som afspejles i denne rapport, ikke blive til virkelighed.

Tabel 1 : Resumé af fremtidige globale flyscenarier, anvendt i denne rapport.

Navn på scenario	Gnms.årlig vækst i trafikken (1990-2050) ¹	Gnms.årlig vækstrate for afbrændt brændstof (1990-2050) ²	Gnms.årlig økonomisk værkstrate	Gnms.årlig vækst i befolkningstal	Trafikandel (2050/1990)	Andel af afbrændt brændstof (2050/1990)	Noter
Fa1	3,1%	1,7%	2,9% 1990-2025 2,3% 1990-2100	1,4% 1990-2025 0,7% 1990-2100	6,4	2,7	Referencescenario udarbejdet af ICAO Forecasting and Economic Support Group (FESG); middel økonomisk vækst fra IPCC (1992); teknologi for både forbedring af brændstofudnyttelse og NO _x - reduktion
Fa1H	3,1%	2,0%	2,9% 1990-2025 2,3% 1990-2100	1,4% 1990-2025 0,7% 1990-2100	6,4	3,3	Fa1 trafik- og teknologiscenario med en flåde af overlydsfly, der erstatter dele af underlydsflyflåden
Fa2	3,1%	1,7%	2,9% 1990-2025 2,3% 1990-2100	1,4% 1990-2025 0,7% 1990-2100	6,4	2,7	Fa1 trafikscenarier; teknologi med større vægt på NO _x -reduktion, men lidt mindre forbedring af brændstofudnyttelse.
Fc1	2,2%	0,8%	2,0% 1990-2025 1,2% 1990-2100	1,1% 1990-2025 0,2% 1990-2100	3,6	1,6	FESG lavvækstscenarier; teknologi som i Fa1 scenarieret.
Fe1	3,9%	2,5%	3,5% 1990-2025 3,0% 1990-2100	1,4% 1990-2025 0,7% 1990-2100	10,1	4,4	FESG højvækstscenarier; teknologi som i Fa1 scenarieret
Eab	4,0%	3,2%			10,7	6,6	Trafikvækstscenarier baseret på IS92a udarbejdet af Environmental Defense Fund (EDF); teknologi for meget lavt NO _x forudsættes
Edh	4,7%	3,8%			15,5	9,4	Høj trafikvækst EDF scenarier; teknologi for meget lavt NO _x

⁷ Den historiske fordeling af afbrændt flybrændstof for civil (passager og fragt) og militær flyvning var henholdsvis 64% og 36% i 1976 og henholdsvis 82% og 18% i 1992. Disse forventes at ændres til henholdsvis 93% og 7% i 2015 og til henholdsvis 97% og 3% i 2050.

Luftfart og den globale atmosfære

							forudsættes
--	--	--	--	--	--	--	-------------

¹Trafik målt som indtægtsgivende passager-km

²Al lufttrafik (passager, gods og militær)

IPCC (1992)⁸ udviklede en række scenarier, IS92a-f for fremtidige emissioner af drivhusgasser og aerosoldannende gasser baseret på antagelser om befolkningstilvækst og økonomisk vækst, anvendelse af landjorden, teknologiske forandringer samt tilgængelighed af energi og brændstofblandinger gennem perioden 1990-2100. Scenario IS92a er et middel-emissionsscenario. Scenarier for fremtidige emissioner er ikke forudsigelser for fremtiden. De er ifølge sagens natur usikre, fordi de er baseret på forskellige formodninger om fremtiden, og jo længere tidshorisont desto mere usikre bliver disse scenarier. De flyemissionsscenarier, der er udarbejdet her, bruger de antagelser om økonomisk vækst og befolkningstal, der blev fundet i IS92 scenarierne (se tabel 1 og figur 1). I de følgende afsnit bruges scenario Fa1 til at illustrere den mulige effekt fra fly og kaldes referencescenariet. Dets antagelser er kædet sammen med dem fra IS92a. De andre flyemissionsscenarier blev opbygget på grundlag af en række økonomiske og befolkningsmæssige fremskrivninger fra IS92a-e. Disse scenarier repræsenterer en række af mulige vækstrater inden for luftfart og skaber grundlag for sensitivitetsanalyser til klimamodellering. Dog antages det høje vækst-scenario Edh at være mindre sandsynligt, og det lave vækstszenario Fc1 vil sandsynligvis blive overskredet, under forudsætning af industriens nuværende stadi og planlagte udvikling.

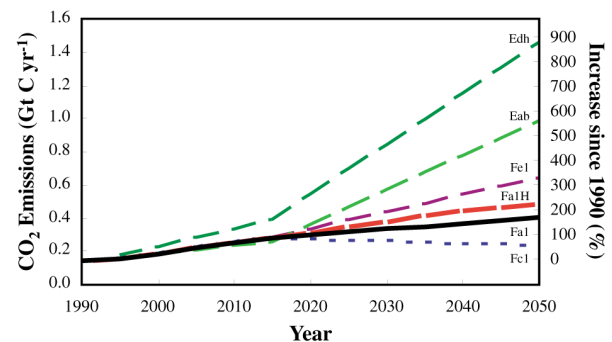
4. Hvad er den nuværende og fremtidige effekt fra underlydsflyvning på strålingspåvirkningen og UV-stråling?

I fig. 2 og 3 gives et resumé af de strålingseffekter, der er resultaterne af flymotoremissioner. Som vist i fig. 2 er usikkerheder forbundet med adskillige af disse effekter stor.

⁸ IPCC, 1992: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* [Houghton, J.T., B. A. Callander, and S.K. Varney (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 pp.

4.1 Kuldioxid

Udslippet af kuldioxid fra fly var 0,14 Gt C/år i 1992. Det er omkring 2% af de samlede menneskeskabte kuldioxidemissioner i 1992 eller omkring 13% af kuldioxidemissioner fra alle transportformer. Rækken af scenarier behandlet her forudsiger, at udslippet af kuldioxid fra fly vil fortsætte med at vokse og blive 0,23-1,45 Gt C/år i 2050. I referencescenariet (Fa1) vil dette udslip vokse trefoldigt i 2050 til 0,40 Gt C/år eller 3% af den forventede totale menneskeskabte kuldioxidemission i relation til middel-IPCC-emissionsscenariet (IS92a). I rækken af scenarier vil omfanget af stigningen i kuldi-oxidemissioner i 2050 være 1,6 til 10 gange værdien i 1992.



Figur 1: Totale kuldioxidudslip i seks forskellige scenarier for flyenes brændstofforbrug. Emissioner angives i Gt C [eller milliard (10⁹) tons kul] pr. år. For at omregne Gt C til Gt CO₂ ganges med 3,67. Skalaen på højre akse viser den procentuelle vækst fra 1990 til 2050. Flyemissioner af kuldioxid svarer til 2,4% af det samlede kuldioxidudslip fra fossile brændstoffer i 1992 eller 2% af den samlede menneskeskabte kuldioxidemission. (Note: Fa2 er ikke indtegnet, fordi forskellen fra scenario Fa1 ikke kan skelnes på figuren).

Koncentrationerne af og strålingspåvirkningen fra kuldioxid er i dag et resultat af udslip gennem de sidste ca. 100 år. Den koncentration af kuldioxid, der kan tilskrives luftfarten i 1992-atmosfæren, er 1 ppmv, lidt mere end 1% af den totale menneskeskabte stigning. Denne procentdel er lavere end procentdelen for emissioner (2%), fordi

flyemissioner kun har fundet sted i de sidste 50 år. For rækken af scenarier i fig. 1 forventes ophobningen af atmosfærisk kuldioxid forårsaget af fly at stige til 5-13 ppmv over de næste 50 år. I referencescenariet (Fa1) udgør det 4% af den mængde, der stammer fra alle menneskelige aktiviteter, hvis vi tager udgangspunkt i middel-IPCC-scenariet (IS92a).

4.2 Ozon

Udslip af NO_x fra underlydsfly i 1992 skønnes at have øget ozonkoncentrationerne i flyvehøjderne på de nordlige mellembreddegrader med op til 6% sammenlignet med en atmosfære uden flyudslip. Denne forøgelse i ozonen forudsiges at stige til ca. 13% i 2050 i referencescenariet (Fa1). Påvirkningen af ozonkoncentrationerne i andre dele af verden er betydeligt mindre. Stigningen vil, gennemsnitligt, tendere mod en opvarmning af Jordens overflade.

Flyudslip af NO_x i den øvre troposfære er her mere effektive til dannelselse af ozon end en tilsvarende mængde udslip ved jordoverfladen. Ligeledes fremkalder en forøgelse af ozon i den øvre troposfære en større stigning i strålingspåvirkningen end ozonforøgelser i lavere højder. På grund af disse stigninger forventes den beregnede totale ozonsøjle på de nordlige mellembreddegrader at vokse med omtrent 0,4% og 1,2% i henholdsvis 1992 og 2050. Imidlertid har flyudslip af svovl og vand i stratosfæren en tendens til at nedbryde ozon, hvorved den delvist modvirker ozonforøgelsen forårsaget af NO_x. I hvor høj grad dette vil ske, er endnu ikke kvantificeret. Derfor kræver påvirkningen på stratosfærisk ozon fra underlydsflyenes emissioner en yderligere evaluering. Den største stigning i ozonkoncentrationen forårsaget af flyemissioner er beregnet til at forekomme nær tropopausen, hvor den naturlige variabilitet er høj. I øjeblikket er sådanne ændringer ikke tydelige ud fra observationer.

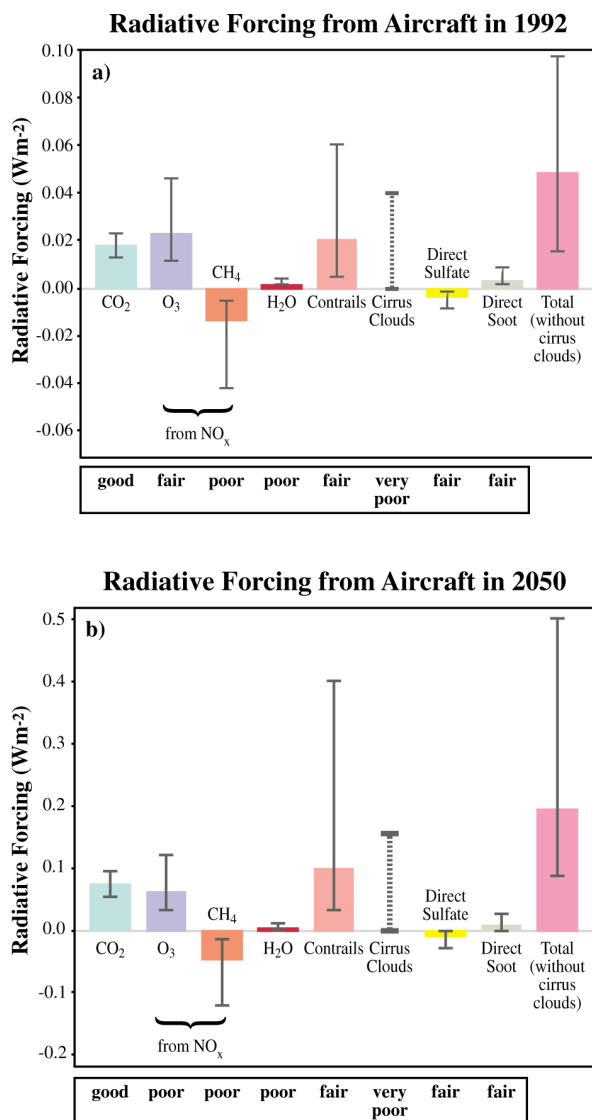
4.3 Metan

Udover at bidrage til stigningen i troposfæriske ozonkoncentrationer forventes NO_x-emissioner fra fly at formindske koncentrationen af metan, som også er en drivhusgas. Disse reduktioner i metan tenderer til at afkøle Jordens overflade. Metankoncentrationen i 1992 anslås her til at være ca. 2% mindre end i en atmosfære uden fly. Denne fly-inducerede reduktion af metankoncentration er meget mindre end den observerede totale 2,5 folds stigning siden førindustriel tid. Usikkerheden omkring metanens opståen og forsvinden udelukker en undersøgelse af luftfartens påvirkning på metankoncentrationerne med atmosfæriske observationer. I referencescenariet (Fa1) vil metan blive ca. 5% mindre end den, der beregnes for en atmosfære i 2050 uden luftfart.

Ændringer i troposfærisk ozon sker hovedsagelig på den nordlige halvkugle, mens ændringer i metan har globalt omfang. Det vil sige, at selvom den globale gennemsnitlige strålingspåvirkning er af samme størrelsesorden men med modsat fortegn, er den geografiske struktur af påvirkningerne fra ozon og metan forskellig, således at de samlede regionale strålingseffekter ikke udlignes.

4.4 Vanddamp

De fleste udledninger af vanddamp fra underlydsfly frigøres i troposfæren, hvor de hurtigt fjernes i form af nedbør i løbet af 1-2 uger. En mindre brøkdel af vanddampemissionerne frigøres i den nedre stratosfære, hvor den kan opbygges til større koncentrationer. Fordi vanddamp er en drivhusgas, tenderer disse forøgelser til en opvarmning af Jordens overflade, selvom denne påvirkning er mindre for underlydsflyenes vedkommende end påvirkningen fra andre flyemissioner som f.eks. kuldioxid og NO_x.



Figur 2: Beregninger af den globale og årlige gennemsnitlige strålingspåvirkning (Wm^{-2}) (se fodnote 4) fra underlydsflyemissioner i 1992 (2a) og i 2050 scenario Fa1 (2b). Skalaen i figur 2b er ca. 4 gange større end skalaen i 2a. Søjlerne indikerer det bedste skøn over påvirkningen, mens linien forbundet med hver søjle er en to-tredjedels usikkerhedsmargin udarbejdet ved at bruge den bedste viden og modeller, der er til rådighed på nuværende tidspunkt. (To-tredjedels usikkerhedsmargin betyder, at der er 67% sandsynlighed for, at den sande værdi falder inden for grænserne). Den til rådighed værende information om cirrusskyer er ikke tiltrækkelig til at vurdere enten et bedste skøn eller en usikkerhedsmargin; den stiplede linie indikerer rækkevidden af mulige bedste skøn. Skønnet for den samlede påvirkning omfatter ikke effekten af ændringer i cirrusskydækket. Usikkerhedsvurderingen af den samlede strålingspåvirkning (uden øget cirrus) er beregnet som kvadratroden af summerne af kvadraterne af den øvre og nedre grænse for hver enkelt komponent. Evalueringen under grafen (“god” (good), “rimelig” (fair), “dårlig”

(poor), “meget dårlig” (very poor)) er en relativ vurdering forbundet med hver komponent og indikerer niveauet for videnskabelig forståelse. Den er baseret på mængden af de beviser, der er til rådighed for at understøtte det bedste skøn og dets usikkerhed, graden af konsensus i den videnskabelige litteratur og analysens omfang. Denne evaluering er adskilt fra vurderingen af usikkerhedsmarginen, som er vist med linier forbundet til hver enkelt søjle. Denne præsentationsmetode er forskellig og mere meningsfuld end det konfidensniveau, der præsenteres i lignende grafer i Climate Change 1995: The Science of Climate Change; Fremtidens Klima 1996.

4.5 Contrails

I 1992 forventes linieformede contrails fra fly at dække ca. 0,1% af Jordens overflade på en årlig gennemsnitlig basis med større regionale værdier. Contrails har en tendens til at opvarme Jordens overflade i lighed med tynde, høje skyer. Contrail-dækningen er fremskrevet til at stige til 0,5% i 2050 i referencescenariet (Fa1), i et omfang, der er hurtigere end stigningsgraden for luftfartens brændstofforbrug. Denne hurtigere vækst i contrail-dækket forventes, fordi lufttrafikken hovedsagelig vil stige i den øvre troposfære hvor contrails fortrinsvis dannes, men også som et resultat af forbedringer i flyenes udnyttelse af brændstof. Contrails udløses af den vanddamp, som flyene udsender, og deres optiske egenskaber afhænger af de partikler, der udsendes eller dannes i udstødningen fra flyene samt af de omgivende atmosfæriske forhold. Contrails strålingseffekt afhænger af deres optiske egenskaber og globale dækning, faktorer som begge er usikre. Contrails er fra satellitter observeret som linieformede skyer over tungt belastede trafikområder og dækkede i gennemsnit ca. 0,5% af området over Centraleuropa i 1996 og 1997.

4.6 Cirrusskyer

Vidtstrakte cirrusskyer er blevet set at udvikle sig efter dannelsen af vedvarende contrails. Stigning i cirrusskydækket (ud over det, der identificeres som linieformede contrails) er i et begrænset antal undersøgelser påvist at have en positiv sammenhæng med flyudslip. Ca. 30% af

Jorden er dækket af cirrusskyer. I gennemsnit vil en stigning i cirrusskydækket bidrage til en opvarmning af Jordens overflade. Et skøn over cirrusskydækket, forårsaget af fly i slutningen af 1990'ere, ligger fra 0 til 0,2% af Jordens overflade. For Fa1 scenariet kan dette muligvis stige med en faktor på 4 (0 til 0,8%) omkring 2050; imidlertid er mekanismerne forbundet med stigningen i cirrusdækket ikke tilstrækkeligt forstået og kræver yderligere undersøgelser.

4.7 Sulfat- og sodaerosoler

Koncentrationerne i aerosolmassen i 1992 forårsaget af fly er lille sammenlignet med dem, der stammer fra kilder ved jordoverfladen. Selvom aerosol-opbygningen vil stige med forbruget af flybrændstof, antages aerosolmassekonzentrationerne fra fly i 2050 at blive små sammenlignet med kilder ved jordoverfladen. Stigninger i sod har en tendens til at opvarme, mens stigninger i sulfataerosoler har en tendens til at afkøle Jordens overflade. Den direkte strålingspåvirkning fra flyenes udslip af sulfat- og sodaerosoler er lille sammenlignet med strålingspåvirkningen fra andre flyemissioner. Da aerosolerne påvirker skydannelsen, kan opbygningen af aerosoler fra fly spille en rolle i form af en forøget skydannelse og ændre skyernes strålingsegenskaber.

4.8 Hvad er de samlede klimapåvirkninger fra underlydsfly?

Klimapåvirkningen fra forskellige menneskeskabte udledninger kan sammenlignes ved at bruge begrebet strålingspåvirkning. Det bedste skøn over strålingspåvirkningen fra fly i 1992 er $0,05 \text{ Wm}^{-2}$ eller ca. 3,5% af den totale strålingspåvirkning fra samtlige menneskeskabte aktiviteter. I referencescenariet (Fa1) er strålingspåvirkningen fra fly i 2050 $0,19 \text{ Wm}^{-2}$ eller 5% af strålingspåvirkningen i middelscenariet IS92a (3,8 gange værdien i 1992). Ifølge rækken af scenarier, som er behandlet her, forventes strålingspåvirkningen

at vokse til mellem $0,13 \text{ Wm}^{-2}$ og $0,56 \text{ Wm}^{-2}$ i 2050, hvilket er mellem en faktor 1,5 gange mindre og en faktor 3 gange større end tilfældet var for Fa1 og fra 2,6 til 11 gange værdien i 1992. Disse skøn over påvirkningen kombinerer effekterne fra ændringer i koncentrationen af kuldioxid, ozon, metan, vanddamp, linieformede contrails og aerosoler, men omfatter ikke mulige ændringer i cirrusskyer.

De globale gennemsnitsværdier for strålingspåvirkningen fra forskellige komponenter i 1992 og 2050 under referencescenariet (Fa1) er vist i figur 2. Figur 2 indikerer de bedste skøn over påvirkningen fra hver enkelt komponent med en usikkerhedsmargin på to-tredjedele⁹. Disse usikkerhedsmarginer stammer fra videnskabelig ekspertbedømmelse og kan også indeholde objektive statistiske modeller. Usikkerhedsmarginen for den konstaterede strålingspåvirkning kombinerer usikkerheden i beregningen af atmosfærisk ændring fra drivhusgasser og aerosoler med usikkerhedsmarginen i beregningen af strålingspåvirkningen. Med hensyn til yderligere dannelse af cirrusskyer kan kun gives en række bedste skøn; disse er ikke medregnet i den totale strålingspåvirkning.

Status for den videnskabelige forståelse er evalueret for hver komponent. Forståelsen har ikke samme pålidelighedsniveau, som er blevet udtrykt i tidligere IPCC-dokumenter. Denne evaluering er forskellig fra usikkerhedsmarginen og er en relativ vurdering af den videnskabelige forståelse for hver komponent. Evalueringen er baseret på mængden af beviser, der støtter det bedste skøn og dets usikkerhed, graden af konsensus i den videnskabelige litteratur og analysens omfang. Den totale strålingspåvirkning under hvert af de seks

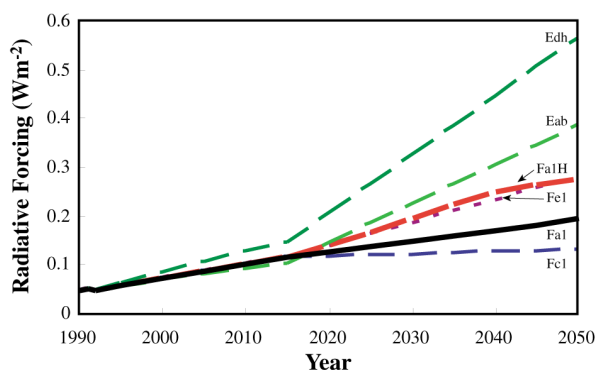
⁹ To-tredjedels usikkerhedsmargin betyder, at der er 67% sandsynlighed for, at den sande værdi vil falde inden for grænserne.

scenarier for vækst-en i luftfart er vist i figur 3 for perioden 1990 til 2050.

Den totale strålingspåvirkning forårsaget af luftfarten (uden påvirkning fra øget cirrus) ligger formentlig inden for området fra 0,01 til 0,1 Wm^{-2} i 1992 med størst usikkerhed vedrørende contrails og metan. Følgelig kan den totale strålingspåvirkning være omkring 2 gange større eller 5 gange mindre end det bedste skøn. For hvert af scenarierne i 2050 er usikkerhedsmarginen for strålingspåvirkningen lidt større end for 1992, men den største variation af den fremskrevne strålingspåvirkning kommer fra forskellene i scenarierne.

I hele perioden fra 1992 til 2050 er den totale strålingspåvirkning fra fly (eksklusiv påvirkningen fra ændringer i cirruskyer) for alle scenarier i denne rapport 2 til 4 gange større end påvirkningen fra flyenes kuldioxidemissioner alene. Den samlede strålingspåvirkning for summen af menneskelig aktivitet anslås til at være højst 1,5 gange større end for kuldioxid alene.

NO_x -emissionerne forårsager ændringer i metan og ozon og skønnes at have en indflydelse på strålingspåvirkningen af samme størrelsesorden men med modsat fortegn. Imidlertid, som anført ovenfor, er den geografiske fordeling af flyenes ozonpåvirkning langt mere regional end flyenes metan-påvirkning.



Figur 3: Estimer for den globale og årlige gennemsnitlige samlede strålingspåvirkning (uden cirruskyer) forbundet med flyemissioner i hvert af de

seks scenarier for væksten i luftfarten i perioden 1990 til 2050. (Fa2 er ikke indtegnet, fordi forskellen fra scenario Fa1 ikke kan skelnes på grafen).

Luftfartens påvirkning af klimaet skal lægges til andre påvirkninger forårsaget af andre menneskeskabte udslip af drivhusgasser og partikler og skal lægges til den naturlige variabilitet. Strålingspåvirkningen fra luftfart er ca. 3,5% af den totale strålingspåvirkning i 1992. Det har ikke været muligt at udskille luftfartens indflydelse (eller nogen anden sektor med lignende strålingspåvirkning) på de globale klimaændringer fra alle de andre menneskeskabte aktiviteter. Luftfarten bidrager til globale forandringer i nogenlunde samme forhold som dens bidrag til strålingspåvirkningen

4.9 Hvad er den samlede effekt fra underlydsfly på UV-B?

Ozon, hvoraf det meste befinder sig i stratosfæren, yder et beskyttende skjold mod Solens ultraviolette stråling. Den erytheme dosishastighed, defineret som UV-bestråling vægtes i forhold til hvor effektivt den forårsager solskoldning, skønnes i 1992 at være aftaget med ca. 0,5% ved 45°N i juli måned som følge af luftfart. Til sammenligning er den beregnede stigning i erythemdosishastighed, forårsaget af observeret ozonnedbrydning, ca. 4% i løbet af perioden 1970 til 1992 ved 45°N i juli måned¹⁰. Nettoeffekten for underlydsfly ser ud til at blive en stigning i ozonsøjlen og et fald i UV-stråling, hvilket hovedsagelig skyldes NO_x -emissioner fra fly. Langt mindre ændringer i UV-stråling forbindes med fly-contrails, aerosoler og deraf følgende skydække. På den sydlige halvkugle er den beregnede effekt af flyemissioner på erythemdosishastigheden ca. 4 gange lavere end på den nordlige halvkugle.

¹⁰ Denne værdi er baseret på satellitobservationer og modelberegninger. Se WMO, 1999: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*. Report No. 44, Global Ozone Research and Monitoring Project, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 732 pp.

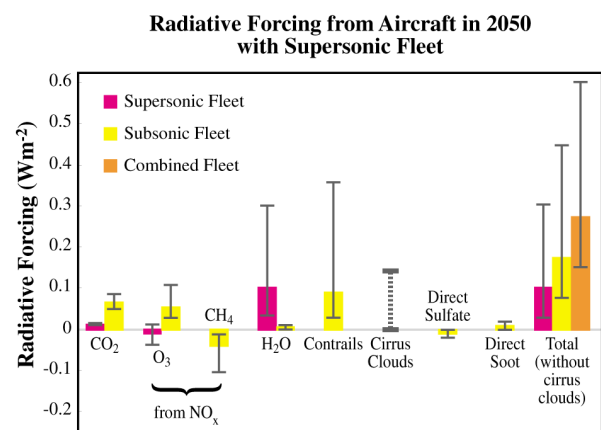
I referencescenariet (Fa1) er ændringen i erythemdosishastighed ved 45°N i juli 2050 sammenlignet med en simulering uden fly -1,3% (med en to-tredjedels usikkerhedsmargin fra -0,7 til -2,6%). Til sammenligning er den beregnede ændring i erythemdosishastighed, forårsaget af ændringer i koncentrationerne af sporstoffer, som ikke hidrører fra fly, ca. -3% i perioden fra 1970 til 2050 ved 45°N, et fald som skyldes nettoresultatet af to modsatrettede effekter: (1) den ufuldstændige gendannelse af stratosfærisk ozon til 1970-niveau på grund af vedvarende langlivede halogenforbindelser, og (2) stigninger i anslåede overfladeemissioner fra kortlivede forureningskomponenter, som producerer ozon i troposfæren.

5. Hvad er den nuværende og den fremtidige effekt af overlydsflyning på strålingspåvirkningen og UV-stråling?

En mulighed fremover er at udvikle en anden-generations flåde af supersoniske civile højhastighedstransportfly; der er dog betydelig uvished, om en sådan flåde overhovedet vil blive udviklet. Disse overlydsfly er projekteret til at flyve i en højde på ca. 19 km, ca. 8 km højere end underlydsfly, og til at udlede kuldioxid, vanddamp, NO_x, SO_x og sod i stratosfæren. NO_x-, vanddamp- og SO_x-emissioner fra overlydsfly bidrager alle til ændringer i den stratosfæriske ozon. Strålingspåvirkningen fra civile overlydsfly er anslået til at blive omkring 5 gange større end strålingspåvirkningen fra de udskiftede underlydsfly i Fa1H-scenariet. Den beregnede strålingspåvirkning fra overlydsfly afhænger af beregningen af vanddamp og ozon i modellerne. Denne effekt er vanskelig at simulere i nuværende modeller og er derfor højst usikker.

Scenario Fa1H behandler tilføjelsen af en civil overlydsflyflåde, som antages at operere i år 2015 og vokse til et maximum på 1.000 fly i år 2040. Til

sammenligning bestod den civile underlydsflyflåde af ca. 12.000 fly i slutningen af 1997. I dette scenario er flyene udviklet til at flyve ved Mach 2,4 (d.v.s. 2,4 gange lydets hastighed), og ny teknologi antages at bevirke emissioner på 5 g NO₂ pr. kg brændstof (lavere end dagens civile overlydsfly, som har emissioner på ca. 22 g NO₂ pr. kg brændstof). Disse overlydsfly antages at erstatte dele af underlydsflyflåden (11% i forhold til emissioner i scenario Fa1). Overlydsfly bruger mere end dobbelt så meget brændstof pr. passagerkilometer i forhold til underlydsfly. Ved år 2050 er den kombinerede flåde (scenario Fa1H) fremskrevet til at forøge med yderligere 0,08 Wm⁻² (42%) til de 0,19 Wm⁻² strålingspåvirkning i scenario Fa1 (se figur 4). Det meste af denne ekstra strålingspåvirkning skyldes akkumulering af stratosfærisk vanddamp.



Figur 4: Den estimerede globale og årlige gennemsnitlige strålingspåvirkning fra en kombineret flåde af underlyds- og overlydsfly (i Wm⁻²) i 2050 forårsaget af ændringer i drivhusgasser, aerosoler og contrails under scenario Fa1H. I dette scenario antages overlydsfly at erstatte dele af flåden af underlydsfly (udtrykt som 11% af emissionerne i scenario Fa1). Søjlerne viser det bedste skøn over strålingspåvirkningen, mens linierne forbundet med hver søjle er en to-tredjedels usikkerhedsmargin udarbejdet ved at bruge den på nuværende tidspunkt til rådighed værende bedste viden og modeller. (To-tredjedels usikkerhedsmarginen betyder, at der er 67% sandsynlighed for, at den sande værdi falder inden for grænserne). Den til rådighed værende information om cirruskyer er utilstrækkelig til at bestemme et bedste skøn eller en usikkerhedsmargin; den stiplede linie indikerer rækkevidden af mulige bedste skøn. Estimatet for den totale strålingspåvirkning omfatter ikke virkningen

af ændringer i cirruskydækket. Usikkerhedsestimater for den samlede strålingspåvirkning (uden øget cirrus) er beregnet som kvadratroden af summerne af kvadraterne i den øvre og nedre grænse. Niveauet for videnskabelig forståelse for overlydskomponenterne er for kuldioxid "god", ozon "dårlig" og vanddamp "dårlig".

Virkningerne ved introduktionen af en civil overlydsflyflåde til dannelse af en kombineret flåde (Fa1H) vil også være en reduktion af stratosfærisk ozon og en stigning i erythemdosishastigheden. Den maksimale beregnede effekt findes ved 45°N, hvor ændringen i juli måneds ozonsøjle i 2050 er -0,4% med den kombinerede underlyds- og overlydsflyflåde i forhold til ingen fly. Effekten af overlydsflykomponenten på ozonsøjlen er -1,3%, mens underlydsflykomponenten er +0,9%.

Den kombinerede flåde vil ændre erythemdosishastigheden ved 45°N i juli med +0,3% sammenlignet med en atmosfære i 2050 uden fly. En to-tredjedels usikkerhedsmargin for den kombinerede flåde er fra -1,7 til 3,3%. Dette kan sammenlignes med den formodede ændring på -1,3% i Fa1. Flyver man højere, fører det til et større fald i ozonsøjlen, mens en lavere flyhøjde fører til et mindre fald i ozon-søjlen og kan for fly i den nederste stratosfære endog resultere i en stigning i ozonsøjlen. Hertil kommer, at emissioner fra overlydsfly i den nordlige halvkugles stratosfære kan blive transporteret til den sydlige halvkugle og her forårsage ozonnedbrydning.

6. Hvilke muligheder er der for at reducere emissioner og påvirkninger?

Der findes en række muligheder for at reducere påvirkningen fra flyemissioner, herunder ændringer i fly- og motorteknologi, brændstof, operationel praksis og regulerende og økonomiske midler. Disse kan implementeres af den offentlige og/eller private sektor enten alene eller i kombination. Væsentlige forbedringer inden for fly- og motorteknologi og forbedringer i luftrafikledelse, som beskrevet i denne

rapport, er allerede indarbejdet i de flyemissionsscenarier, der bruges til beregninger af klimaændringer. Andre operationelle muligheder, som muligvis kan reducere emissionerne, samt alternativt brændstof er ikke inddraget i scenarierne. Yderligere teknologiske fremskridt kan muligvis bevirke yderligere reduktioner af brændstofforbrug og emissioner. I praksis forventes nogle af forbedringerne at finde sted af kommercielle årsager. Tidspunktet og omfanget af reguleringer, økonomi og andre muligheder for indgreb kan påvirke tilblivelsen af forbedringer og påvirke efterspørgslen på flytransport. Afværgende foranstaltninger for effekten af vanddamp og skydække er endnu ikke fuldt belyst.

Sikkerhed samt operationel og miljømæssig drift og omkostninger er de dominerede faktorer, som flyselskaberne må inddrage, når de overvejer nye flyindkøb eller mulige ændringer i teknik og drift. Den typiske forventede levetid for et fly er 25 til 35 år. Disse faktorer skal inddrages, når man vurderer omfanget af hvilke typer teknologiske fremskridt og politiske valg relateret til teknologi, der kan reducere flyemissioner.

6.1 Teknologiske muligheder for fly og flymotorer

Teknologiske fremskridt har væsentligt reduceret de fleste emissioner pr. passager-km. Imidlertid er der mulighed for yderligere forbedringer. Enhver teknologisk ændring må tage hensyn til balancen mellem en række miljømæssige påvirkninger.

De underlydsfly, der fremstilles i dag, er ca. 70% bedre til at udnytte brændstoffet pr. passager-km end for 40 år siden. Hovedparten af denne gevinst er nået gennem motorforbedringer og resten fra forbedringer i flyskrogens udformning. En 20% forbedring i brændstofudnyttelse forventes frem mod år 2015, og en 40-50% forbedring forventes omkring

2050 sammenlignet med de fly, der fremstilles i dag. 2050-scenariet, udarbejdet til denne rapport, inkorporerer denne forbedring i brændstof-effektivitet i estimatet for brændstofforbrug og emissioner. Effektivitetsforbedringer i motorer reducerer det specifikke brændstofforbrug samt de fleste typer emissioner; imidlertid kan contrails forøges, og uden fremskridt inden for forbrændingsteknologi kan NO_x-emissioner også stige.

Fremtidig design af motor og flyskrog indebærer en kompleks beslutningsproces og en afbalancering i overvejelserne omkring mange faktorer (f.eks. kuldioxidemissioner, NO_x-emissioner ved jordoverfladen, NO_x-emissioner i højden, vanddampemissioner, contrails/cirrusproduktion og støj). Disse forhold er ikke blevet tilstrækkeligt karakteriseret eller kvantificeret i denne rapport.

Internationalt er store forskningsprogrammer om motorer i gang med det mål at reducere emissioner af NO_x i landings- og take-off cyklus (LTO) med op til 70% af dagens reguleringsstandarder samtidig med en bedre udnyttelse af brændstof med op til 8-10% omkring år 2010 i forhold til de fleste af de motorer, der produceres idag. Reduktion af NO_x-emissioner kan også nås under flyvning, dog ikke nødvendigvis i samme omfang som for LTO. Hvis vi antager, at målene kan indfries, vil overførslen af denne teknologi til et betydeligt antal nye producerede fly tage lang tid - typisk et årti. Forskningsprogrammer omkring NO_x-emissioner fra overlydsfly er også i gang.

6.2 Brændstofmuligheder

Tilsyneladende er der ingen praktiske alternativer til kerosen-baserede brændstoffer i kommercielle fly i de næste mange årtier. Hvis man reducerer svovlindholdet i kerosen kan man reducere SO_x-emissioner og dannelsen af svovlpartikler.

Jetfly kræver brændstof med høj energitæthed især for langdistanceflyvninger. Andre brændstofmuligheder, eksempelvis brint, kan være gennemførlige på langt sigt, men vil kræve nye flymodeller og ny infrastruktur til forsyning. Brintbrændstof vil eliminere kuldioxidemissioner fra fly, men vil øge emissionerne af vanddamp. De samlede miljømæssige påvirkninger og den miljømæssige bæredygtighed ved produktion af brint eller andre alternative brændstoffer er endnu ikke blevet undersøgt.

Dannelsen af svovlpartikler fra flyemissioner afhænger af egenskaber ved motorer og udstødning, men kan reduceres, hvis brændstoffets svovlindhold nedsættes. Der eksisterer teknologi til at fjerne praktisk talt al svovl fra brændstoffet, men det indebærer samtidig en reduktion af brændstoffets smøreevne.

6.3 Operationelle muligheder

Forbedringer i lufttrafikledelse (Air Traffic Management [ATM]) og andre operationelle procedurer kan reducere brændstofforbruget med mellem 8 og 18%. Størstedelen (6-12%) af disse reduktioner kommer fra ATM-forbedringer, som antages at være fuldt implementeret i løbet af de næste 20 år. Alle motoremissioner vil blive reduceret som konsekvens heraf. I alle fly-emissionsscenarier behandlet i denne rapport er reduktioner fra ATM-forbedringer inddraget. Omfanget af gennemførelsen af en forbedret ATM vil afhænge af vedtagelsen af de nødvendige institutionelle aftaler på internationalt niveau.

ATM-systemer bruges til vejledning, adskillelse, koordination og kontrol af flybevægelser. Eksisterende nationale og internationale ATM-systemer har begrænsninger, hvilket f.eks. resulterer i "holding" (luftfartøjer, der cirkler i et fastlagt ventemønster, medens de venter på landingstilladelse), uhensigtsmæssig ruteføring samt

ikke-optimale flyveprofiler. Disse begrænsninger resulterer i unødvendigt brændstofforbrug og øger dermed emissionerne.

For den nuværende flyflåde og drift kunne en forbedring af de ovennævnte begrænsninger i ATM-systemerne reducere brændstofforbruget med mellem 6 og 12%. Det forventes, at forbedringer, der er nødvendige for disse reduktioner i brændstofforbruget, vil være fuldt implementeret i løbet af de næste 20 år under forudsætning af, at de nødvendige institutionelle og regulerende aftaler er bragt på plads i rette tid. Scenarierne udviklet i denne rapport antager en betimelig implementering af disse ATM-forbedringer i deres vurderinger af brændstofforbruget.

Andre operationelle midler til at reducere mængden af brændstofforbrug pr. passager-km omfatter stigning i last-faktorer (flere passagerer eller mere fragt på et givet fly), eliminering af unødvendig vægt, optimering af flyhastighed, begrænsninger i brugen af hjælpeaggregater (f.eks. til opvarmning og ventilation) og reduktion af flyenes kørsel i lufthavne. De potentielle forbedringer i disse operationelle midler kan reducere brændstofforbruget og emissionerne med 2-6%.

Forbedret operationel effektivitet kan resultere i at tiltrække yderligere flytrafik, selvom der ikke er fundet undersøgelser, som giver bevis for eksistensen af denne effekt.

6.4 Regulering, økonomi og andre muligheder
Selvom forbedringer i fly- og motorteknologi og effektivisering af ATM-systemet vil give miljøforbedringer, vil disse ikke i fuldt omfang opveje virkningerne af de stigende emissioner, der er et re-sultat af den forventede stigning i flytrafikken. Politiske beslutninger med henblik på at reducere emissionerne yderligere omfatter mere stringente reguleringer af flymotorernes

emissioner, fjernelse af subsidier og præmieringer, som har negative miljøkonsekvenser, markedsbaserede valg som f.eks. miljøafgifter (afgifter og skatter) og emissionshandel, frivillige aftaler, forskningsprogrammer og erstatning af fly med jernbane og bus. De fleste af disse muligheder vil lede til stigning i luftfartsselskabsudgifter og billetpriser. Nogle af disse fremgangsmåder er endnu ikke fuldt undersøgt eller testet i fly, og udfaldet er uvist.

Moteremissionscertificering er et redskab til at reducere specifikke emissioner.

Luftfartsmyndigheder bruger ofte dette middel til at regulere emissioner af kulilte, kulbrinter, NO_x og røg. International Civil Aviation Organization (ICAO) har påbegyndt arbejdet med at vurdere behovet for standarder for flyemissioner i marchhøjde for at supplere eksisterende LTO-standarder for NO_x og andre emissioner.

Markedsbaserede løsninger såsom miljøafgifter (afgifter og skatter) og emissionshandel giver mulighed for at stimulere teknologiske fornyelser og forbedringer af effektiviteten og kan reducere efterspørgslen på flyrejser. Mange af disse muligheder er ikke fuldt undersøgt eller afprøvet for luftfart, og udfaldet er usikkert.

Miljøafgifter (afgifter og skatter) kan være en måde at reducere stigningen i flyemissioner ved yderligere at stimulere udviklingen og brugen af mere effektive fly og ved at reducere stigningen i efterspørgslen for flytransport. Studier viser, at afgifter skal aftales i et internationalt forum for at blive miljømæssigt effektive.

En anden fremgangsmåde, der kunne overvejes med henblik på at afbøde virkningerne af flyemissioner, er emissionshandel, en markedsbaseret tilgang som giver deltagerne mulighed for i fællesskab at minimere omkostninger ved at reducere

emissionerne. Emissionshandel er ikke testet for fly, selvom det har været brugt for svovldioxid (SO₂) i USA og er mulig for ozonnedbrydende stoffer i Montreal Protokollen. Denne fremgangsmåde er en af mekanismerne i Kyoto Protokollen, hvor den henvender sig til Annex B Parter.

Frivillige aftaler bliver også løbende udforsket som en måde at opnå reduktioner i emissionerne fra flysektoren. Sådanne aftaler har været brugt i andre sektorer for at reducere drivhusgasemissioner eller fremme deres optag/nedbrydning.

Muligheder, der også kan overvejes, er fjernelse af subsidier eller præmieringer, der kan have negative miljøkonsekvenser, samt forskningsprogrammer.

Erstatning med jernbane og bus kan resultere i reduktion af kuldioxidemissioner pr. passager-km. Omfanget af en sådan reduktion er begrænset til kortdistanceruter med høj trafiktæthed, der kan have bus- eller jernbaneforbindelse. Overslag viser, at op til 10% af de rejsende i Europa kan overføres fra luftfart til højhastighedstog. Yderligere analyser, som omfatter en afvejning mellem en bred række af miljømæssige effekter (f.eks. støjgener, lokal luftkvalitet og globale atmosfæriske effekter), er nødvendige for at udforske erstatningspotentialer.

7. Emner for fremtiden

Denne rapport har vurderet de potentielle klima- og ozonforandringer, forårsaget af luftfart, indtil år 2050 under forskellige scenarier. Den påpeger, at effekten af nogle typer flyemissioner er godt forstået. Den afslører også, at virkningen af andre emissioner ikke er velkendte på grund af videnskabelig usikkerhed. Der har været en støt forbedring i karakteriseringen af de potentielle påvirkninger fra menneskelig aktivitet, herunder flytrafikkens påvirkning af den globale atmosfære. Rapporten har også undersøgt teknologiske fremskridt, forbedringer i infrastruktur, lovgivning og

markedsbaserede tiltag med henblik på at reducere flyemissioner. Yderligere arbejde er nødvendigt for at reducere den videnskabelige usikkerhed og andre usikkerhedsfaktorer for bedre at forstå mulighederne for at reducere emissioner, for bedre at kunne informere beslutningstagere, og for at forbedre forståelsen af de samfundsmæssige og økonomiske problemer, der knytter sig til efterspørgslen på flytransport.

Der er en række nøgleområder med videnskabelig usikkerhed, som begrænser vores mulighed for at fremskrive flytrafikkens påvirkning på klima og ozon:

- Indflydelsen fra contrails og aerosoler på cirrusskyer
- NO_x's rolle i ændring af ozon- og metankoncentrationer
- Aerosolers muligheder for at ændre kemiske processer
- Transporten af atmosfæriske gasser og partikler i den øvre troposfære/nedre stratosfære
- Klimaets reaktion på regional strålingspåvirkning og stratosfæriske perturbationer.

Der er en række nøgleforhold af samfundsmæssig og teknologisk art, som kræver bedre definition, herunder bl.a. følgende:

- Karakterisering af kravene til kommerciel flyservice, herunder begrænsninger for lufthavne og lufthavnsinfrastruktur og en tilknyttet teknologisk ændring
- Metoder til at vurdere eksterne omkostninger og de miljømæssige gevinster ved regulerende og markedsbaserede valg
- Vurdering af makroøkonomiske effekter fra de emissionsreduktioner i flyindustrien, der skyldes afdæmpende initiativer
- Teknologisk formåen og operationelle procedurer med henblik på at reducere emissioner, der fører til dannelse af contrails og øget skydække
- Forståelsen af den økonomiske og miljømæssige effekt ved at imødekomme potentielle stabiliseringsscenerier (for atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasser), herunder at tage skridt til at reducere emissioner fra fly og til også at inddrage spørgsmål såsom den relative miljømæssige påvirkning af forskellige transportformer.

FN'S KLIMAPANEL OG DEN DANSKE DELTAGELSE

IPCC blev oprettet i 1988 af FN's særorganisationer for meteorologi (WMO) og miljø (UNEP) som opfølgning på Brundtland-rapporten "Vores fælles fremtid". Panelet fik til opgave med passende mellemrum at sammenstille og vurdere den videnskabelige litteratur om klimaændringer, deres virkninger, samfundsøkonomiske aspekter samt muligheder for en tilpasning til eller afdæmpning af klimaændringer.

Siden FN's klimakonvention UNFCCC trådte i kraft i 1994, har IPCC desuden ydet teknisk og videnskabelig rådgivning til klimakonventionens organer.

IPCC er etableret med et sekretariat ved WMO i Geneve, og arbejdet er organiseret i tre arbejdsgrupper. Den overordnede koordinering sker i IPCC's plenarforsamling og i IPCC-Bureauet, der består af formanden Dr. Robert Watson, fem viceformænd og de tre arbejdsgruppers bureauer, for tiden i alt 30 personer. Der lægges stor vægt på en ligelig repræsentation mellem I-lande, udviklingslande og lande i økonomisk overgang.

IPCC udsendte sin første vurderingsrapport i 1990. Den anden kom i 1995/96, og her var én af konklusionerne de meget diskuterede sætninger: "Klimaet har ændret sig i de seneste hundrede år" og "Vurderet samlet antyder ændringerne en skelnelig menneskelig påvirkning af det globale klima."

IPCC's tredje vurderingsrapport, som ventes udsendt i 2001, omfatter rapporter fra de tre arbejdsgrupper:

- Videnskabelig vurdering af klimasystemet (Arbejdsgruppe I)
- Regional vurdering af virkninger af klimaændringer samt muligheder for tilpasning (Arbejdsgruppe II)
- Videnskabelig, teknisk, miljømæssig, økonomisk og samfundsmæssig vurdering af muligheder for at begrænse/afdæmpe klimaændringer (Arbejdsgruppe III).

Desuden planlægges udarbejdet en såkaldt synteserapport, som skal indeholde en syntese og integration af informationerne i de tre arbejdsgrupperrapporter til brug for de politiske beslutningstagere.

Mere information om IPCC kan ses på www.ipcc.ch.

I Danmark koordineres IPCC-arbejdet af DMI og Energistyrelsen. DMI's kontaktperson er divisionschef Anne Mette K. Jørgensen.

DANMARKS KLIMACENTER

Danmarks Klimacenter blev oprettet ved Danmarks Meteorologiske Institut i 1998. Centrets hovedformål er at kortlægge den sandsynlige klimaudvikling i det 21. århundrede - globalt og i Danmark - herunder fremtidige klimaændringers indflydelse på de danske, grønlandske og færøske samfund.

Klimacentrets aktiviteter omfatter udvikling af nye og forbedrede metoder til satellitbaseret klimaovervågning, studier af klimaprocesser (inklusive sol-klima relationer, drivhuseffekt, ozonens rolle og luft/hav/havis vekselvirkning), udvikling af globale og regionale klimamodeller, sæsonprognoser samt udarbejdelse af globale og regionale klimascenarier til effektstudier.

Klimacentret er organiseret med et sekretariat i DMI's Forsknings- og udviklingsafdeling og koordineres af forskningschefen.

Klimacentret har etableret Dansk Klimaforum, som er et forum til udveksling af resultater og viden og til drøftelse af klimaspørgsmål. I Klimaforum afholdes temadage og workshops med deltagelse af klimaforskere og andre, der har interesse i centrets aktiviteter.

Centret udgiver et populært nyhedsbrev, KlimaNyt, som udkommer 4 gange årligt. KlimaNyt kan også ses på www.dmi.dk.

DMI har udført klimaovervågning og forskning siden oprettelsen i 1872 - og oprettelsen af Danmarks Klimacenter har styrket både klimaforskningen på DMI og samarbejdet med forskningsinstitutioner i Danmark og det øvrige Europa.

Tidligere rapporter fra Danmarks Klimacenter:

- Dansk Klimaforum 29. - 30. april 1998. (Åbning af Danmarks Klimacenter, Referater fra workshop, Resumé af præsentationer). *Danmarks Klimacenter, Rapport 98-1.*
- Danish Climate Day 1999. *Climate Centre Report 99-1.*
- Dansk Klimaforum 12. april 1999. Workshop: Klimatisk variabilitet i Nordatlanten på tidsskalaer fra årtier til århundreder. Danmarks Klimacenter, Rapport 99-2.