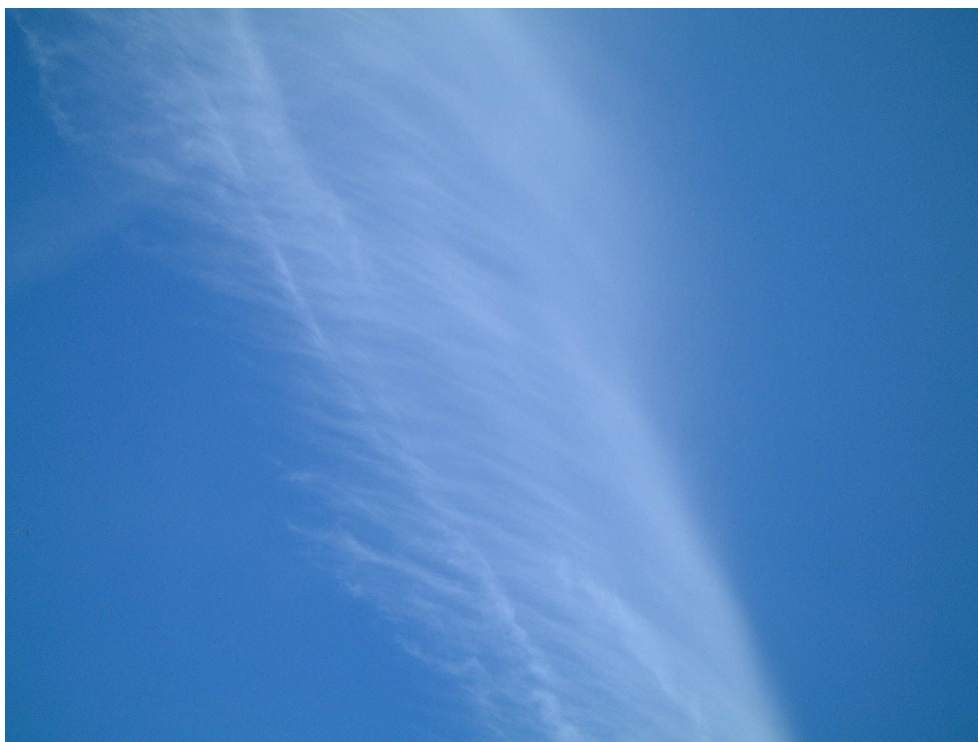


Danmarks Klimacenter rapport 04-04

FLYTRAFIKS INDFLYDELSE PÅ ATMOSFÆREN

Annette Guldborg og Johannes K. Nielsen





Kolofon

Serie titel:

Danmarks Klimacenter rapport 04-04

Titel:

FLYTRAFIKS INDFLYDELSE PÅ ATMOSFÆREN

Undertitel:

Forfatter(e):

Annette Guldborg og Johannes K. Nielsen

Andre bidragydere:

Ansvarlig institution:

Danish Meteorological Institute

Sprog:

Dansk

Emneord:

Flykondensstriber, klimapåvirkning

Url:

www.dmi.dk/dmi/dk04-04

ISSN:

1399-1957

ISBN:

87-7478-508-7

Version:

2004-11-24

Website:

www.dmi.dk

Copyright:

Danmarks Meteorologiske Institut



Indhold

Kolofon	2
Flytrafiks indflydelse på atmosfæren	4
Introduktion	4
Den nuværende viden	4
DMI-resultater	7
Det videre arbejde	8
Referencer	9
Danmarks Klimacenter	10
Tidligere publikationer fra Danmarks Klimacenter	10

Flytrafiks indflydelse på atmosfæren

Introduktion

I 2001 blev trafikpulje-projektet "Civil flytrafiks indflydelse på atmosfæren" påbegyndt på DMI. Projektet havde til formål at afdække usikkerheder med hensyn til flykondensstriber og deraf dannede cirrusskyers indvirkning på den globale drivhuseffekt, som i assessment-rapporten "European Research in the Stratosphere 1996-2000", [EC, 2001], udpeges som områderne, med de største usikkerheder i vurderingen af klimapåvirkningen stammende fra flytrafik.

Trafikpuljeprojektet afsluttes ultimo 2004, og i denne rapport fremlægges de resultater, som er opnået internationalt og de fremskridt, som er blevet gjort fra DMI's side undervejs. Desuden gives der en vurdering af påvirkningen af atmosfæren på grund af emissioner fra fly i form af bidrag til klimapåvirkningen, i det omfang det på nuværende tidspunkt er muligt.

Der udsendes en lang række forskellige stoffer fra fly, når flyenes brændstof forbrændes. Flyudstødningen indeholder blandt andet sodpartikler, drivhusgasserne kuldioxid og vanddamp, samt i mindre mængde forskellige svovl og kvælstofforbindelser. I trafikpuljeprojektet har fokus været på flyenes synlige påvirkning af atmosfæren, nemlig dannelsen af kondensstriber og deres udbredelse til egentlige højtliggende, tynde skyer kaldet cirrusskyer.

Den nuværende viden

Virkningen i dag

Fly udsender vanddamp, og under de rette atmosfæriske betingelser kan vanddampen kondensere, og kondensstriber dannes efter flyene. Kondensstriber kan dannes, hvis det er tilstrækkelig koldt, og hvis luftfugtigheden er tilstrækkelig stor. Der kræves temperaturer på under ca. -39°C og en relativ fugtighed med hensyn til is på over 100 %, for at blivende kondensstriber dannes. Hvis den relative fugtighed er under 100 % kan kondensstriber dannes, men de opløses hurtigt igen [Minnis et al., 2004]. Kravet til de atmosfæriske betingelser betyder, at kondensstriber typisk dannes i 8-12 km's højde.

På grund af vind og turbulens kan kondensstriberne brede sig, så de danner et tyndt skylag, der kan være umuligt at skelne fra lag af naturligt dannede cirrusskyer. En enkelt kondensstribe kan brede sig og dække et areal på flere tusinde km^2 .

Flytrafik kan sandsynligvis også forårsage skydannelse ved hjælp af en anden mekanisme. Fly udsender partikler (aerosoler), der kan fungere som kerner, hvorpå vand kan kondensere. I områder af atmosfæren hvor fly passerer, vil koncentrationen af aerosoler stige, og deres egenskaber vil ændre sig, og der er derfor mulighed for, at cirrusskyer kan dannes i et område, hvor de ellers ikke ville være blevet dannet under naturlige omstændigheder. Denne mekanisme for cirrus-skydannelse, som kaldes "den indirekte effekt", kan teoretisk set være meget betydningsfuld, men dens omfang er endnu ikke fastlagt gennem observationer.

FN's klimapanel IPCC udgav i 1999 særrapporten "Aviation and the global atmosphere", [IPCC, 1999]. I denne rapport angives kondensstriber i 1992 at have dækket 0,1 % af Jordens overflade i årligt gennemsnit med lokale maxima over Vesteuropa og det østlige USA på hhv. 3 % og 5 %. Der er dog en betydelig usikkerhed på disse tal. I [Schumann and Amanatidis, 2001] angives kondensstriberne at dække mellem 0,02 % og 0,3 % af Jordens overflade.

Det er endnu vanskeligere at bestemme det ekstra cirrus-skydække, der dannes på grund af flyvning, idet disse skyer ikke umiddelbart kan skelnes fra naturlige cirruskyer.

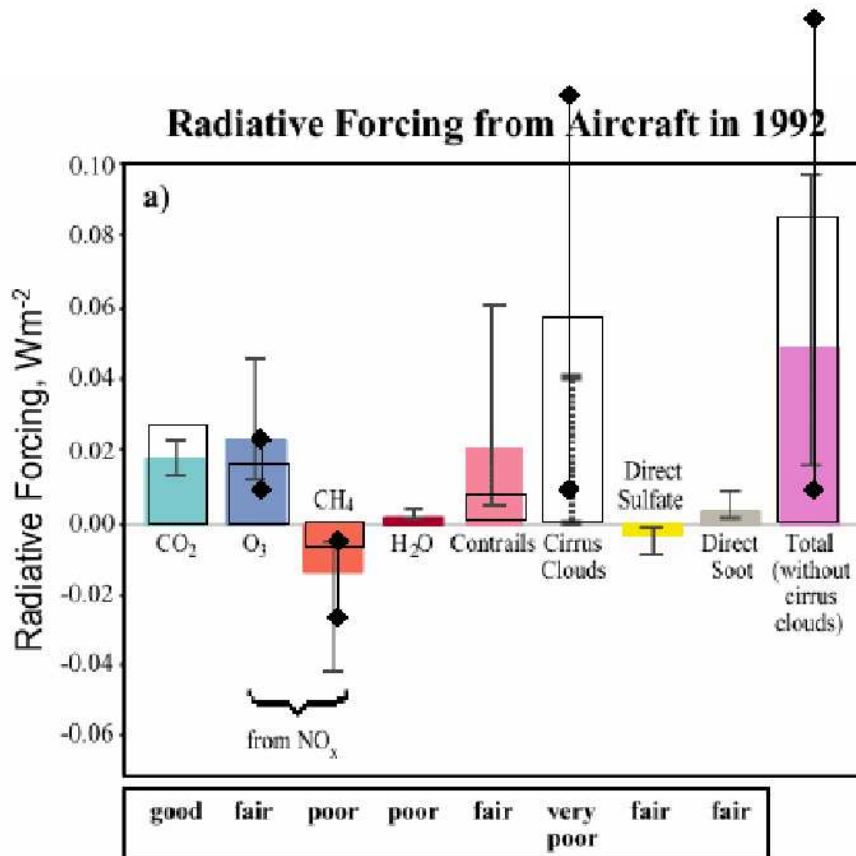
[Mannstein and Schumann, 2004] har ved hjælp af satellitbilleder estimeret det ekstra cirruskydække, der skyldes flytrafik, til at være 10 gange så stort som arealet af de linieformede kondensstriber over Europa. Arealet af linieformede kondensstriber angives til 0,3 % og arealet af flyinduceret cirruskydække til 3 % over Europa. [Minnis et al., 2004] angiver på baggrund af analyser af ændring i cirrus-skydækket, at det flyinducerede cirrus-skydække er 1,8 gange arealet af kondensstriberne over USA.

Kondensstriber og cirruskyer påvirker atmosfærens strålingsbalance, idet disse skyer dels reflekterer sollys og derfor har en afkølede effekt, og dels tilbageholder varmestråling fra Jorden og derfor har en opvarmende effekt (drivhuseffekt). Om natten, hvor der ikke er sollys, virker skyerne udelukkende opvarmende, mens både den opvarmende og afkølede effekt er i spil i dagtimerne.

I IPCC's særrapport fra 1999 [IPCC, 1999] angives den globale nettoeffekt af linieformede kondensstriber på strålingsbalancen, for året 1992, at være $0,02 \text{ W/m}^2$, men med en usikkerhedsfaktor på 3 til 4, dvs. liggende i intervallet $0,005$ til $0,08 \text{ W/m}^2$. Nettoeffekten er positiv, og kondensstriber har derfor en netto opvarmende effekt af Jordens atmosfære. Til sammenligning estimeres den samlede menneskeforårsagede strålingspåvirkning fra (velblandede) drivhusgasser til at have været $2,43 \pm 0,25 \text{ W/m}^2$ sidst i 1990'erne [IPCC, 2001]. Der er efterfølgende stillet spørgsmåltegn ved, om kondensstribernes effekt på strålingsbalancen er så stor som angivet i [IPCC, 1999]. [Marquart et al., 2003] angiver på grundlag af beregninger med en global klimamodel en værdi på $0,0035 \text{ W/m}^2$ for kondensstribernes strålingspåvirkning. Altså et tal der er mere end en faktor 5 mindre end estimatet i IPCC-rapporten [IPCC, 1999]. Den væsentligste årsag til den store forskel på tallene, er den antagelse man har gjort om kondensstribernes optiske dybde, det vil sige hvor gennemskinnelige de er. I IPCC-rapporten er det antaget, at kondensstribernes optiske dybde har en konstant værdi på 0,3, men både nyere beregninger (som i [Marquart et al., 2003]) og målinger [Meyer et al., 2002] viser, at den optiske dybde varierer både geografisk og med årstiden og ofte har en noget lavere værdi end 0,3. Der er derfor overvejende enighed om, at estimatet i [Marquart et al., 2003] (der er bestemt ved brug af varierende optisk dybde) er et mere realistisk bud, på den strålingspåvirkning kondensstriber har, og man angiver nu kondensstribernes effekt på strålingsbalancen til at ligge i intervallet $0,003 - 0,009 \text{ W/m}^2$, [Sausen et al., 2004].

I IPCC-rapporten fra 1999 gives ikke noget bedste estimat af strålingspåvirkningen fra det ekstra cirruskydække, der skyldes flytrafik. På det tidspunkt var usikkerhederne på denne størrelse simpelthen for store til, at man kunne gøre det, og man har derfor kun angivet et usikkerhedsinterval på $0 - 0,04 \text{ W/m}^2$. I dag har man flere undersøgelser at bygge på, og i [Sausen et al., 2004] er angivet et estimat på $0,06 \text{ W/m}^2$ med et usikkerhedsinterval på $0,01 - 0,12 \text{ W/m}^2$. Det vil sige, undersøgelserne tyder på, at det ekstra cirrus-skydække, der skyldes flytrafik, har en meget større betydning for Jordens strålingsbalance end de linieformede kondensstriber. I dag vurderer man altså, at effekten af kondensstriberne er mindre end man skønnede i 1999, mens effekten af det ekstra cirruskydække vurderes større end det gjorde i 1999.

Det skal dog understreges, at der stadig er meget stor usikkerhed på disse tal, og at den viden man har om disse skyers egenskaber er meget mangelfuld. Udover problemerne med bestemmelse af skyernes udbredelse, er den viden man har om partikelegenskaberne i skyerne utilstrækkelig. Det betyder, at det er svært at bestemme skyernes optiske egenskaber, og da disse er af altafgørende betydning for bestemmelsen af skyernes effekt på Jordens strålingsbalance, får man denne store usikkerhed på tallene. I figur 1 vises bidrag til strålingspåvirkningen fra flytrafik. De farvede søjler (og usikkerhedsintervaller med en streg for enderne) viser bidragene, som man skønnede dem i



Figur 1.1: Fra [Sausen et al., 2004]. Forskellige bidrag til strålingspåvirkningen fra flytrafik. Farvede søjler/usikkerhedsintervaller med streg for enderne: 1999-skøn. Hvide søjler/usikkerhedsintervallerne med ruder for enderne: 2003-skøn. Den menneskeskabte strålingspåvirkning fra velblandede drivhusgasser (i året 2000) er estimeret til 2,43+/-0,25 W/m² [IPCC, 2001].

1999, mens de hvide søjler (og usikkerhedsintervallerne med en ruder for enderne) viser de nyeste estimater af bidragene, som de blev præsenteret ved konferencen "Aviation, Atmosphere and Climate" i 2003. Figuren stammer fra den bog, der blev udgivet efter konferencen [Sausen et al., 2004]. Det ses, at man i dag skønner bidragene fra ozon, metan og kondensstriber mindre, end man gjorde i 1999, mens bidragene fra kuldioxid og især cirrusskyer i dag skønnes større. I 1999 vurderede man, at bidragene fra drivhusgassen kuldioxid og kondensstriber var ca. lige store, men i dag vurderes bidraget fra kuldioxid at være omkring dobbelt så stort som bidraget fra kondensstriber.

Næst efter USA er Europa det område med størst flytrafik og er derfor et område med relativ stor udbredelse af kondensstriber og flyinduceret cirrus. [Mannstein and Schumann, 2004] estimerer strålingspåvirkningen fra kondensstriber til at være 0,03 W/m² over Europa - altså næsten 10 gange den globale middelværdi af strålingspåvirkningen. Strålingspåvirkningen fra flyinduceret cirrus skønnes at være mindst 10 gange så stort som bidraget fra kondensstriber, det vil sige mindst 0,3 W/m² over Europa.

Virkningen i fremtiden

Et væsentligt spørgsmål er, hvordan flytrafik vil påvirke atmosfæren i fremtiden. Man forventer en stigning i flytrafikken og en deraf følgende øget udbredelse af kondensstriber og flyinduceret cirrus. Men på den anden side forventer man også et varmere klima i fremtiden, og hvis temperaturen stiger i den øvre del af troposfæren, hvor kondensstriber normalt dannes, vil der dannes færre kondensstriber. [Marquart et al., 2003] har med en global klimamodel lavet beregninger for 2015 og for 2050, hvor der både er taget højde for stigning i flytrafik og for ændring af klimaet. Ifølge deres beregninger er effekten af stigningen i flytrafik større end effekten af et varmere klima, og effekten på strålingsbalancen fra kondensstriber vil derfor være stigende. Strålingspåvirkningen fra kondensstriber bestemmes til $0,0035 \text{ W/m}^2$ i 1992, $0,0094 \text{ W/m}^2$ i 2015 og $0,0148 \text{ W/m}^2$ i 2050. Der er naturligvis betydelig usikkerhed på disse tal, idet der, udover den ovenfor nævnte utilstrækkelighed i den viden man har om kondensstribernes egenskaber, kommer usikkerhed på fremskrivningen af stigningen i flytrafik og ændringen af klimaet. Der eksisterer endnu ingen modelberegninger for fremtiden, som inkluderer udviklingen af kondensstriber til egentlige cirrusskyer.

En mulighed er, at man i fremtiden eventuelt kan regulere flytrafikken med henblik på at mindske klimapåvirkningen gennem dannelse af cirrusskyer, for eksempel ved at justere flyvehøjden efter temperatur og vanddampindhold. Modellsimuleringer tyder på, at en mindskelse af flyvehøjden kan reducere kondensstribedannelsen, [Fichter et al., 2004], men der er mange andre effekter af en ændring i flyvehøjden, som skal underøges, før man kan udtale sig om, hvorvidt det generelt vil være hensigtsmæssigt at anbefale dette. På længere sigt er det tænkeligt, at der kan udvikles operationelle produkter, foreksempel på DMI, som på baggrund af numeriske vejrmodeller fra dag til dag giver anbefalinger om ruteplanlægning til luftfarten, med henblik på at begrænse skydannelsen.

Et muligt fremtidsscenario er, at man overgår til en brintdrevet flyflåde med henblik på at mindske CO_2 - og partikelbelastningen fra fly, og der forskes i den klimatiske effekt af et sådant tiltag [Ponater et al., 2004]. Det vurderes i øjeblikket, at der vil dannes flere kondensstriber fra en hypotetisk brintdrevet flyflåde, idet denne flytype udsender mere vanddamp. Men til gengæld vil disse kondensstriber have en mindre optisk dybde, således at strålingspåvirkningen fra disse kondensstriber vurderes mindre end strålingspåvirkningen fra kondensstriber stammende fra en kerosen-drevet flyflåde [Ponater et al., 2004]. Men også her skal det understreges, at usikkerhederne på disse vurderinger er meget store, bl.a. fordi man ikke har observationer til at understøtte modelberegningerne.

DMI-resultater

Som det fremgår af det ovenstående er der stadig megen usikkerhed i bestemmelsen af flytrafikkens klimapåvirkning igennem øget skydannelse. Men der foregår meget forskningssamarbejde inden for dette område internationalt, og DMI indgår i dette arbejde. Under trafikpuljeprojektet er der på DMI blevet arbejdet inden for to områder [Guldberg and Nielsen, 2004].

Den ene del af DMI's kondensstribeforskning omhandler global klimamodellering. Med en beskrivelse af kondensstribedannelse indbygget i en klimamodel, kan modellen anvendes til at beskrive den geografiske fordeling af kondensstriber, kondensstribernes optiske egenskaber og deres bidrag til strålingspåvirkningen af atmosfæren på global skala. En beskrivelse af kondensstriber, udviklet af [Ponater et al., 2002] til den globale klimamodel ECHAM4, er blevet implementeret i DMI-modellen IFSHAM. Den væsentligste forskel mellem effekten af kondensstriber i IFSHAM og ECHAM4 er, at netto strålingspåvirkningen er en størrelsesorden mindre i IFSHAM end i ECHAM4, og at der er store områder over Europa og USA, hvor netto strålingspåvirkningen er negativ i

IFSHAM. I ECHAM4 er netto strålingspåvirkningen positiv alle steder. Strålingspåvirkningens afhængighed af optiske egenskaber og modellens systematiske fejl er blevet undersøgt.

Den anden del består i at lave detaljerede mikrofysiske (på partikelniveau) simuleringer af udbredelsen af kondensstriber, og efterfølgende dannelse af cirrusskyer. Resultatet fra dette arbejde er forståelse af skypartiklernes egenskaber, som igen bruges som information i de globale simuleringer. Under trafikpuljeprojektet er der blevet udviklet en cirrussky-model, MPC modellen, som indeholder detaljeret beskrivelse af mikrofysiske processer, samtidig med at den indeholder processer på makroskopisk sky-niveau. De makrofysiske processer er for eksempel vindpåvirkning og sedimentation. Modellen er blevet brugt til at simulere flykondensstribers udbredelse, for at finde tilnærmede værdier for ispartikelstørrelse og is-indhold i flykondensstriber. Simuleringerne indikerer, at variabiliteten i ispartikelstørrelse i flykondensstriber er større end antaget i den beskrivelse af kondensstribe dannelse, som er anvendt i [Ponater et al., 2002, Marquart et al., 2003]. Dermed tilføres der yderligere usikkerhed på estimatet af kondensstribers bidrag til strålingsbalancen i [Ponater et al., 2002, Marquart et al., 2003] (se side 7). En nærmere redegørelse for resultaterne af dette arbejde findes i den supplerende (engelsksprogede) videnskabelige rapport [Guldborg and Nielsen, 2004].

Det videre arbejde

På baggrund af den forskning som er foregået på DMI under trafikpulje projektet, er DMI kommet med i et stort anlagt europæisk projekt, QUANTIFY ("Quantifying the Climate Impact of Global and European Transport Systems", under EU's 6. rammeprogram for forskning og teknologisk udvikling. Som navnet antyder, har projektet som formål at afdække klimabelastningen af transportsektoren som helhed. QUANTIFY, som er direkte adresseret til beslutningstagere, skal løbe over en 5-årig periode, begyndende i 2005. Inden for dette projekt vil DMI deltage i arbejdet med to emner, der i dag er behæftet med stor usikkerhed: 1) Udbredelsen af kondensstriber til egentlige cirrusskyer og betydningen af disse for Jordens klima og 2) den "indirekte effekt"; vil den fortsatte partikelemission fra flytrafik ændre forekomsten og strålingsegenskaberne af "naturligt" dannede cirrusskyer, således at deres bidrag til klimapåvirkningen ændres? Manglende viden om cirrusskyer afledt af kondensstriber og den indirekte effekt er hovedårsagen til, at det i øjeblikket ikke er muligt at fastslå, hvor stor klimapåvirkning flyvning giver anledning til [Sausen et al., 2004].

Det vurderes fra DMI's side, at det med usikkerhederne i den nuværende viden på området er for tidligt at komme med anbefalinger om reguleringer af flytrafikken med henblik på at reducere skydannelsen. Det er sandsynligt, at der vil komme anbefalinger fra europæisk side omkring år 2010, hvor QUANTIFY afsluttes.

Referencer

- [EC, 2001] EC (2001). *European Research in the stratosphere 1996-2000*, volume 19867 of *Energy, environment and sustainable development*. European Commission, Brussels.
- [Fichter et al., 2004] Fichter, C., Marquart, S., and R., S. (2004). Impact of Cruise Altitude on Contrails. In Robert Sausen, C. F. and Amanatidis, G., editors, "*Aviation, Atmosphere and Climate*", number 83 in Air pollution research report, pages 322–327. European Commission.
- [Guldberg and Nielsen, 2004] Guldberg, A. and Nielsen, J. (2004). Contrails and their Impact on Climate. Scientific report, DMI, Denmark.
- [IPCC, 1999] IPCC (1999). *Aviation and the global atmosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [IPCC, 2001] IPCC (2001). *CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Mannstein and Schumann, 2004] Mannstein, H. and Schumann, U. (2004). Observations of Contrails and Cirrus over Europe. In Robert Sausen, C. F. and Amanatidis, G., editors, "*Aviation, Atmosphere and Climate*", number 83 in Air pollution research report, pages 244–248. European Commission.
- [Marquart et al., 2003] Marquart, S., Ponater, M., Mager, F., and Sausen, R. (2003). Future Development of Contrail Cover, Optical Depth, and Radiative Forcing: Impacts of Increasing Air Traffic and Climate Change. *Journal of Climate*, 16:2890–2904.
- [Meyer et al., 2002] Meyer, R., Mannstein, H., Meerkötter, R., Schumann, U., and Wendling, P. (2002). Regional radiative forcing by line-shaped contrails derived from satellite data. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107(D10):ACL 17 1–16.
- [Minnis et al., 2004] Minnis, P., Kirk Ayers, J., Palikonda, R., and Phan, D. (2004). Contrails, cirrus trends, and climate. *Journal of Climate*, 17:1671–1685.
- [Ponater et al., 2002] Ponater, M., Marquart, S., and Sausen, R. (2002). Contrails in a comprehensive global climate model: Parameterization and radiative forcing results. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107(D13):ACL 2 1–15.
- [Ponater et al., 2004] Ponater, M., Marquart, S., Ström, L., Gierens, K., R., S., and Hüttig, G. (2004). On the potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact. In Robert Sausen, C. F. and Amanatidis, G., editors, "*Aviation, Atmosphere and Climate*", number 83 in Air pollution research report, pages 316–321. European Commission.
- [Sausen et al., 2004] Sausen, R., Fichter, C., and Amanatidis, G., editors (2004). *Aviation, Atmosphere and Climate*, number 83 in Air pollution research report. European Commission.
- [Schumann and Amanatidis, 2001] Schumann, U. and Amanatidis, G. T., editors (2001). *Aviation, aerosols, contrails and cirrus clouds*, number 74 in Air pollution research report. European Commission.

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.

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 publikationer fra Danmarks Klimacenter

Rapporterne findes på Klimacentrets liste over publikationer på http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/fk-introduktion/publikationer_dkc.htm.