

°REPORT 2016:05

Luftfart og klima -

En oppdatert oversikt over status for forskning på klimaeffekter av utslipp fra fly





CICERO Report 2016:05

Luftfart og klima

En oppdatert oversikt over status for forskning på klimaeffekter av utslipp fra fly

Marianne T. Lund, Borgar Aamaas, Terje K. Berntsen, Jan S. Fuglestad

Oktober 2016

CICERO Senter for klimaforskning
P.B. 1129 Blindern, 0318 Oslo
Telefon: 22 85 87 50
E-post: post@cicero.oslo.no
Nett: www.cicero.uio.no

CICERO Center for International Climate
and Environmental Research
P.O. Box 1129 Blindern
N-0318 Oslo, Norway
Phone: +47 22 85 87 50
E-mail: post@cicero.oslo.no
Web: www.cicero.uio.no



Tittel Luftfart og klima - En oppdatert oversikt over status for forskning på klimaeffekter av utslipp fra fly

Forfattere: Marianne T. Lund, Borgar Aamaas, Terje K. Berntsen, Jan S. Fuglestad.

CICERO Rapport 2016:05

Finansielle kilder: AVINOR

Prosjekt: 30784

Prosjektleder: Marianne T. Lund

Kvalitetsansvarlig: Bjørn H. Samset

Emneord: Luftfart, Utslipp i høye luftlag, Strålingspådriv, Klima

Sammendrag: Denne rapporten gir en oppdatert oversikt over hvordan og i hvilken grad de ulike utslippene fra flytrafikk påvirker klima basert på den nyeste forskningen. For å forstå den totale klimaeffekten av luftfart er det viktig å inkludere alle mekanismene som bidrar til klimapåvirkning, samt hvordan disse kan vektles og sammenlignes på tvers av ulike skalaer i tid og rom. Dette er hovedfokus i denne rapporten. Rapporten er en oppdatering av Lund m.fl. (2011) og fokuserer på forskningsresultater siden da. Arbeidet er finansiert av Avinor

Språk: Norsk

Rapporten kan bestilles fra:
CICERO Senter for klimaforskning
P.B. 1129 Blindern
0318 Oslo

Eller lastes ned fra:
<http://www.cicero.uio.no>

The report may be ordered from:
CICERO (Center for International Climate and
Environmental Research – Oslo)
PO Box 1129 Blindern
0318 Oslo, NORWAY

Or be downloaded from:
<http://www.cicero.uio.no>

Innhold

Sammendrag.....	1
1 Introduksjon.....	3
2 Utslipp og klimapåvirkning.....	5
2.1 DRIVHUSGASSER.....	6
2.2 KJEMISKE EFFEKTER.....	7
2.3 DIREKTE OG INDIREKTE EFFEKTER AV PARTIKLER	10
2.4 SKYDANNELSE	12
2.4.1 Forhold for kondensstripedannelse over Norge	14
3 Ulike skalaer for klimapåvirkning i tid og rom.....	18
3.1 SAMMENLIGNE LANGLIVEDE OG KORTLIVEDE KLIMAEFFEKTER.....	18
3.2 REGIONALE VARIASJONER	21
3.3 SPESIFIKK KLIMAEFFEKT.....	22
4 Luftfart og klima i fremtiden.....	24
4.1 MULIGHETER FOR REDUSERT KLIMAPÅVIRKNING	24
4.1.1 Optimaliserte ruter.....	25
4.1.2 Alternative drivstoff.....	27
4.2 LUFTFART I ET ENDRET KLIMA.....	28
5 Oppsummering.....	29
Kilder.....	31

Sammendrag

Luftfartssektoren har vært i sterk vekst over mange tiår, både innenriks og internasjonalt, og veksten forventes å fortsette fremover.

For å forstå den totale klimapåvirkningen fra flytrafikken er det viktig å inkludere alle mekanismene som bidrar. Globalt står luftfart i dag for rundt to prosent av de totale menneskeskapte CO₂-utslippene. CO₂ utgjør imidlertid bare én del av sektorens klimapåvirkning. I tillegg bidrar fly til en rekke andre utslipp som påvirker klima direkte eller indirekte gjennom komplekse kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Kort oppsummert påvirker luftfarten klima gjennom følgende mekanismer:

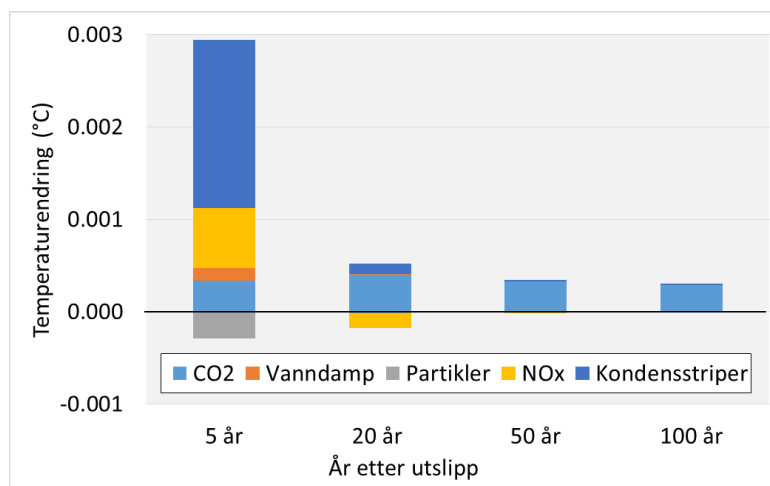
- Utslipp av drivhusgasser (CO₂ og vanndamp) – oppvarmende effekter
- Endringer i ozon og metan fra utslipp av NO_x – en netto oppvarming
- Dannelse av kondensstriper og utvikling av disse til cirruskyer – en netto oppvarming
- Utslipp av forløpere til sulfat- og nitratpartikler – avkjølende effekter
- Utslipp av sotpartikler – en oppvarmende effekt
- Indirekte effekt av partikler på cirruskyer – potensielt en betydelig klimaeffekt, men både størrelse og fortegn (dvs. hvorvidt effekten er oppvarmende eller avkjølende) er svært usikker

Frem til i dag har den kombinerte effekten av dannelse av kondensstriper og cirruskyer høyst sannsynlig gitt det største bidraget til oppvarmingen fra luftfart, fulgt av CO₂. Også produksjon av ozon har gitt viktig bidrag til oppvarmingen, mens de fleste typer partikler, samt reduksjon av metan konsentrasjonen, har gitt avkjølende bidrag.

Det er viktig å bemerke at ozon, kondensstriper og endringer i cirruskyer gir en mer kortvarig oppvarmende klimapåvirkning enn CO₂. De svært ulike tidsskalaene er viktig for den relative betydningen av ulike mekanismer over tid. Dette er illustrert i figur S1, som viser global temperaturendring etter 5, 20, 50 og 100 år som følge av ett års globale utslipp fra fly. Mens kondensstriper og NO_x gir en sterk, men kortvarig oppvarmende effekt, dominerer CO₂ på lengre sikt.

Selv om forskningen har gitt økt forståelse av de ulike mekanismene, gjenstår det usikkerhet knyttet til størrelsen på den samlede klimapåvirkningen. Spesielt stor usikkerhet er knyttet til indirekte effekter av utslipp av partikler fra fly, samt størrelsen på oppvarmingen fra kondensstriper og cirruskyer.

Flere av mekanismene er svært avhengig av de meteorologiske og kjemiske forholdene i atmosfæren, og dermed av *hvor* og i hvilke *høyder* flyvningene skjer. Norske innenriksflyvninger holder ofte lavere høyder enn langdistanseflyvninger. Analyser av meteorologiske data indikerer at innenriks luftfart i større grad foregår i områder med lavere forekomst av de fysiske forholdene i atmosfæren som kreves for dannelse av vedvarende kondensstriper enn det som er tilfelle for flyvninger høyere oppe. For å tallfeste klimapåvirkningen som innenriks luftfart gir gjennom kondensstripedannelse kreves imidlertid detaljerte modellberegninger, da klimaeffekten avhenger av en rekke faktorer som tid på året og skyene optiske egenskaper. Slike modellberegninger er så langt ikke blitt gjort.



Figur S1: Temperatureffekten (°C) etter 5, 20, 50 og 100 år som følge av globale utslipp fra luftfart i 2005. Beregningene er basert på ett års globale utslipp fra fly; etter dette antas ingen utslipp. Beregningene tar utgangspunkt i klimapåvirkning fra dagens luftfart og er gjort med en enkel klimamodell (indirekte effekter av partikler er ikke inkludert).

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlivede effektene av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO₂-effekten alene. Såkalte "multiplikatorer" er blitt introdusert for å angi størrelsen på tilleggseffektene i forhold til kun CO₂-effekten. Basert på en utregningsmetode og et tidsperspektiv som er konsistent med det som brukes for i Kyotoprotokollen for drivhusgasser, gir beregninger gjort her en multiplikator på mellom 0,8 og 2,5. Mens middelveiden er i tråd med tidligere anslag, er intervallet større og reflekterer et stort spenn i estimert klimapåvirkning fra luftfart i nyere vitenskapelige publikasjoner. Dersom man benytter en utregningsmetode basert på global temperaturendring og et kortere tidsperspektiv, blir multiplikatoren lavere.

1 Introduksjon

Det pågår kontinuerlig forskning for å forbedre forståelsen av klimapåvirkningen fra luftfart. Kunnskapen har økt på noen områder, mens nye spørsmål har oppstått på andre. Denne rapporten gir en oppsummering av hvordan og i hvilken grad de ulike utslippene fra flytrafikk påvirker klimaet basert på den nyeste forskningen. Rapporten er en oppdatering av Lund m.fl. (2011) og fokuserer på forskningsresultater siden da.

Innenriks og internasjonal luftfart spiller i dag en viktig rolle i den globale økonomien gjennom både vare- og persontransport. Sektoren har vært i sterk, kontinuerlig vekst over mange tiår, og i 2013 transporterte verdens flyselskaper over 3.1 milliarder passasjerer og luftfartsindustrien sysselsatte 8.7 millioner mennesker (ATAG 2014). Den sterke veksten forventes å fortsette fremover og antall passasjerer kan komme til å mer enn dobles de neste 20 årene (IATA 2014). Prognosene for innenriks norsk luftfart varierer. Mens Nasjonal transportplan 2014-2023 anslår en årlig vekst på 2,3 prosent (Miljøstatus.no 2015), forventer Avinor en utflating av veksten fremover basert på nyere tall. I følge disse ligger veksten i innlandstrafikken an til å avta ned mot 1 % per år.¹

Global luftfart står for rundt to prosent av de totale menneskeskapte CO₂-utslippene. Men CO₂ står bare for en del av sektorens klimapåvirkning. I tillegg slipper fly ut en rekke andre komponenter: vanddamp (H₂O), hydrokarboner (HC), karbonmonoksid (CO), nitrogendioksid (NO_x), svoveldioksid (SO₂) og sotpartikler (black carbon, BC). Disse utslippene påvirker klima direkte eller indirekte gjennom komplekse kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Klimapåvirkningen er sammensatt og komplisert; noen mekanismer gir en avkjøling, andre en oppvarming. Mens CO₂ er godt blandet i atmosfæren og gir samme klimapåvirkning uavhengig

¹ Trafikkprognosen er i samsvar også med grunnlagsdokumentet for NTP 2018-29 og basert på Thune-Larsen, Harald (2015): Trafikkprognoser Avinor 2015 – 2040. Arbeidsdokument 3160 Avinor, Transportøkonomisk Institutt (TØI) 27. februar 2015

av hvor utslippet skjer, har flere av de andre mekanismene sterke geografiske og døgnlige variasjoner. De ulike mekanismene påvirker også klimaet på svært ulike tidsskalaer.

Også andre sektorer påvirker klima gjennom mange ulike mekanismer. Unikt for fly derimot er at størsteparten av utslippene skjer i den delen av atmosfæren som kalles øvre troposfære/nedre stratosfære (rundt 8-12 km høyde). Her er det få eller ingen andre kilder til utslipp og de fysiske og meteorologiske forholdene er annerledes enn ved bakken. Et utslipp fra fly kan derfor gi en annen effekt på atmosfære og klima enn et tilsvarende utslipp fra bakkenære kilder. I tillegg gir utslipp fra luftfarten en unik påvirkning på skyer.

Et annet særtrekk i forbindelse med luftfart er at store deler av utslippene faller utenfor internasjonale rammeverk for utslippsreduksjoner. Kyoto-avtalen, som trådte i kraft i 2005, omfatter kun de nasjonale utslippene fra sektoren. Heller ikke klimaavtalen fra Paris i 2015 omfatter internasjonal luftfart. Utslipp av CO₂ fra internasjonal luftfart er det derimot the International Civil Aviation Organization (ICAO) som er ansvarlig for å redusere. Det ble nylig enighet om en CO₂ standard for nye fly, men det gjenstår å få denne formelt godkjent i ICAO.² Videre inkluderer Kyoto-avtalen bare drivhusgassene CH₄, lystgass (N₂O), SF₆, NF₃, PFC og HFC, i tillegg til CO₂. For å forstå den totale klimaeffekten fra flytrafikken er det imidlertid viktig å inkludere alle mekanismene som bidrar, noe som er et hovedfokus i denne rapporten.

² I oktober 2016, rett i etterkant av at hovedarbeidet med denne rapporten ble avsluttet, ble det også enighet i ICAO om en ny markedsbasert mekanisme (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA) rettet mot å redusere CO₂ utslippene fra internasjonal luftfart.

2 Utslipp og klimapåvirkning

Luftfart har en sammensatt og komplisert klimapåvirkning. Kort forklart påvirker sektoren klima gjennom følgende mekanismer:

- Utslipp av drivhusgasser: hovedsakelig CO₂ og vanndamp
- Kjemiske effekter: Endringer i ozon og metan via utslipp av NO_x
- Direkte og indirekte effekter av partikler som sot og sulfat
- Dannelse av kondensstriper og videre utvikling av disse til cirruskyer. Denne kombinerte effekten refereres ofte til som contrail-cirrus.

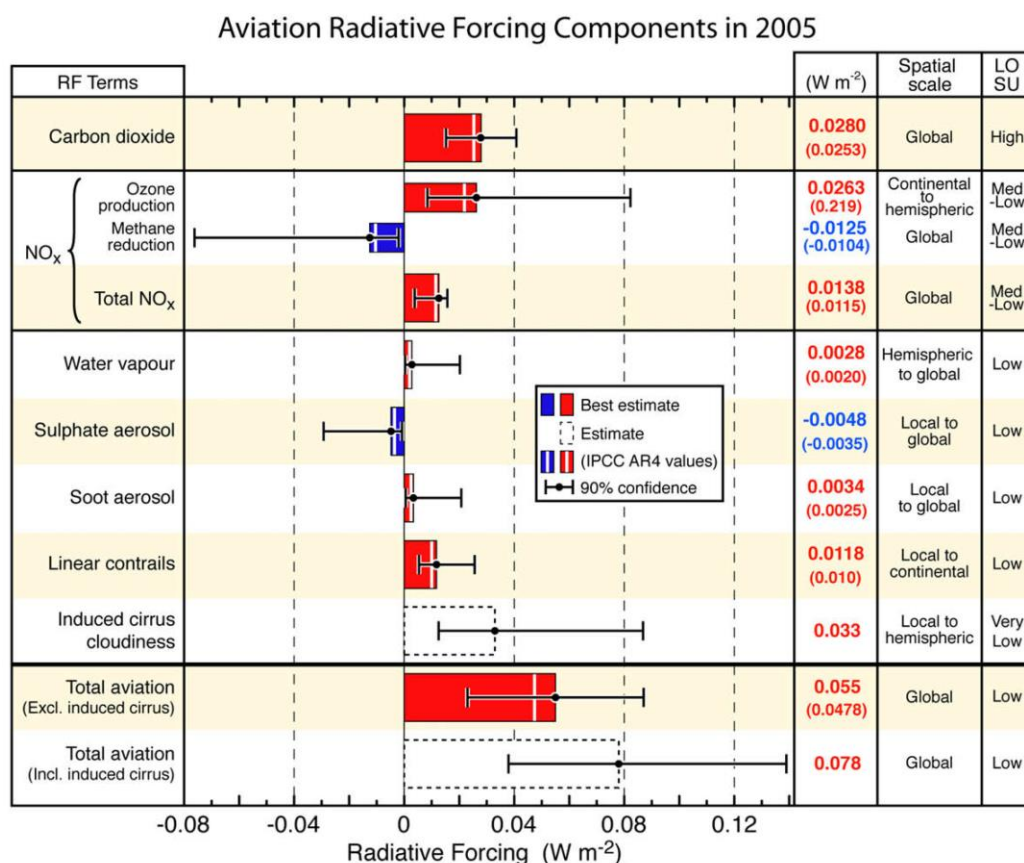
Noen mekanismer gir en avkjøling, andre en oppvarming. Figur 1 fra Lee m.fl. (2009) gir en oppsummering av strålingspådrivet fra de ulike mekanismene, dvs. hvilken effekt de totale utslippene fra luftfart frem til i dag har hatt på klima globalt. Røde stolper indikerer en oppvarmende effekt, mens blå stolper viser de avkjølende bidragene. De størst oppvarmende bidragene kommer fra CO₂, ozonproduksjon og skydannelse, mens sulfatpartikler og metanendringer gir avkjølende bidrag. Figuren viser også et anslag over usikkerheten i strålingspådrivet. Særlig er det det betydelig usikkerhet når det gjelder størrelsen på klimapåvirkningen av skydannelse og utslipp av partikler.

Resten av kapittel 2 gir detaljerte beskrivelser av de ulike mekanismene for klimapåvirkning. Oppdaterte estimer av strålingspådrivet, samt nye mekanismer som ikke er inkludert i figur 1 presenteres og diskuteres.

2.1 Drivhusgasser

Karbondioksid (CO_2) og vanndamp (H_2O) utgjør hoveddelen av utslippene fra fly. De er begge viktige drivhusgasser og en økt mengde gir derfor en oppvarming. For luftfart er det CO_2 som gir den dominerende effekten av disse to, med et beste estimat for strålingspådriv på 28 mW/m^2 for luftfart i 2005 (Lee m.fl. 2009). Videre utslipp i årene etter 2005 betyr at strålingspådrivet fra CO_2 er høyere i dag, men oppdaterte beregninger er ikke publisert.

Klimapåvirkningen forårsaket av vanndamputslipp avhenger sterkt av den vertikale fordelingen av utslippene. I lavere høyder er effekten av vanndamp liten fordi de naturlige kildene (fordampning fra jordens overflate) er dominerende. For flytrafikk i nedre deler av stratosfæren vil derimot utslippene av vanndamp ha en betydelig effekt pga. lave naturlige nivåer. Mens Lee et al. (2009) rapporterte et strålingspådriv på $2,8 \text{ mW/m}^2$ for 2005, fant Wilcox m.fl. (2012) et strålingspådriv på $0,9 \text{ mW/m}^2$, altså bare 1/3 av tidligere tall. Sistnevnte påpeker imidlertid at det er store forskjeller i vertikalfordeling mellom ulike datasett for utslipp, noe som gir usikkerhet i estimatene.

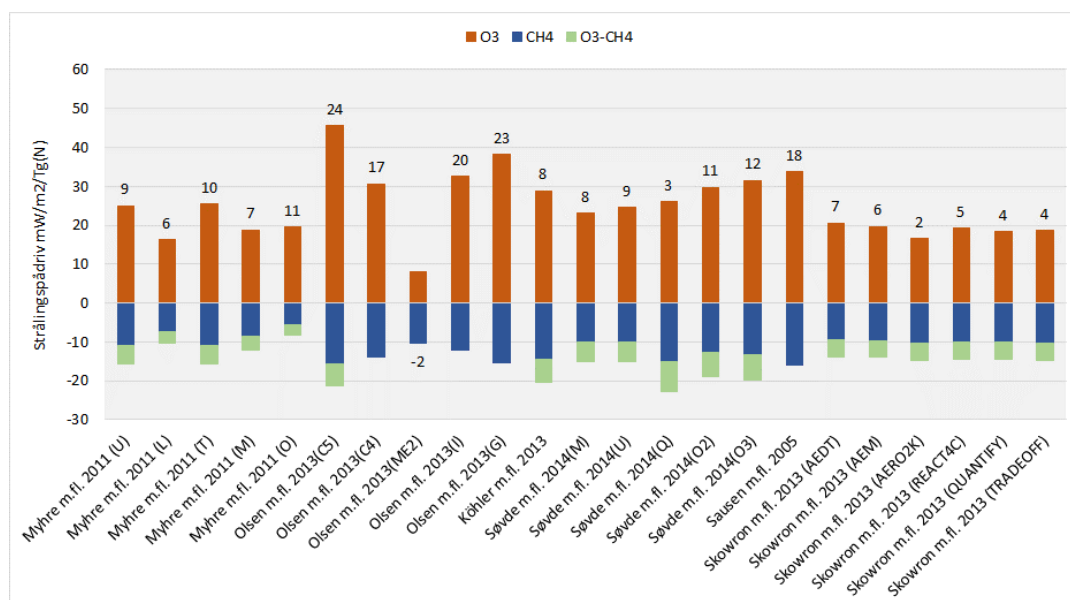


Figur 1: Estimert globalt strålingspådriv i 2005 fra totale globale utslipp fra luftfart (for CO_2 er akkumulert effekt av alle historiske utslipp inkludert). Fra Lee m.fl. (2009).

2.2 Kjemiske effekter

Utslipp av NO_x, CO og HC gir ikke en direkte påvirkning på klimaet, men derimot indirekte effekter via kjemiske reaksjoner i atmosfæren. Fra fly er det utslippet av NO_x som er viktig, da utslippene av CO og HC er neglisjerbare pga. den effektive forbrenningen i flymotorer. Utslipp av NO_x fører til produksjon av ozon i troposfæren og nedre stratosfære. Ozon er en sterk drivhusgass, og en økt mengde gir oppvarming. Klimaeffekten av ozon er spesielt sterk for endringer i øvre troposfære på grunn av de lave temperaturene i denne delen av atmosfæren. I tillegg fører NO_x-utslipp til en økning i atmosfærens såkalte oksidasjonskapasitet (ved at mengden av OH-radikalet øker). Dette gir en reduksjon i mengden av drivhusgassen metan og dermed en avkjølingseffekt. Reduksjonen i metan har i tillegg en virkning på mengden ozon som kompliserer bildet ytterligere og gir en avkjølende effekt. Videre har reduksjonen i metan også en liten avkjølende effekt via redusert mengde stratosfærisk vandndamp. Disse to siste effektene er ikke inkludert i figur 1.

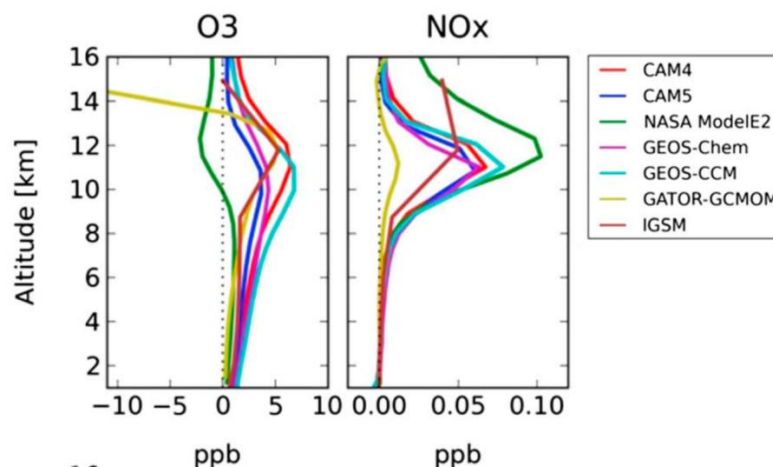
Når det gjelder størrelsen på NO_x-effekten viser studier en betydelig spredning mellom ulike modeller. Figur 2 gir en oppsummering av tilgjengelige estimer fra den vitenskapelige litteraturen for strålingspådrivet fra ozonproduksjon (O₃), metanreduksjon (CH₄) og metaneffekten på ozon (O₃-CH₄) som følge av NO_x-utslipp fra fly. De ulike studiene har brukt ulike datasett for utslipp fra fly. For å kunne sammenligne direkte har vi derfor normalisert resultatene på det totale NO_x-utslippet i de respektive datasettene. Stolpene i figur 2 gir altså ikke den totale NO_x-effekten fra dagens luftfart, men effekten per Tg (= millioner tonn) NO_x (gitt som N) som slippes ut. Det totale globale NO_x-utslippet fra dagens luftfart ligger mellom 2 og 3 Tg NO_x i de ulike datasettene.



Figur 2: Oppsummering basert på den vitenskapelige litteraturen av beregnet strålingspådriv (ved likevekt) fra endringer i ozon og metan på grunn av globale NO_x-utslipp fra fly. Tallene viser nettoeffekten. Alle verdier gitt per Tg N utslipp.

For å studere hvordan forskjeller mellom modeller bidrar til usikkerhet i estimater av NO_x-effekten, anvender flere av studiene i figur 2 samme datasett for flyutslipp i ulike modeller (Myhre m.fl. 2011; Olsen m.fl. 2013; Søvde m.fl. 2014). Alle studiene viser betydelig spredning i modellert strålingspådriv. Størst forskjell mellom høyeste og laveste estimat finner Olsen m.fl. (2013). Modellene brukt i denne studien gir også betydelig høyere strålingspådriv fra ozonproduksjon enn modellene i de andre studiene (med unntak av én modell, som skiller seg ut med en betydelig lavere verdi). Figur 3 er hentet fra Olsen m.fl. (2013) og viser at det spesielt er store variasjoner i vertikalfordelingen av NO_x og ozonendringene mellom de ulike modellene, noe som spiller en viktig rolle for det påfølgende strålingspådrivet.

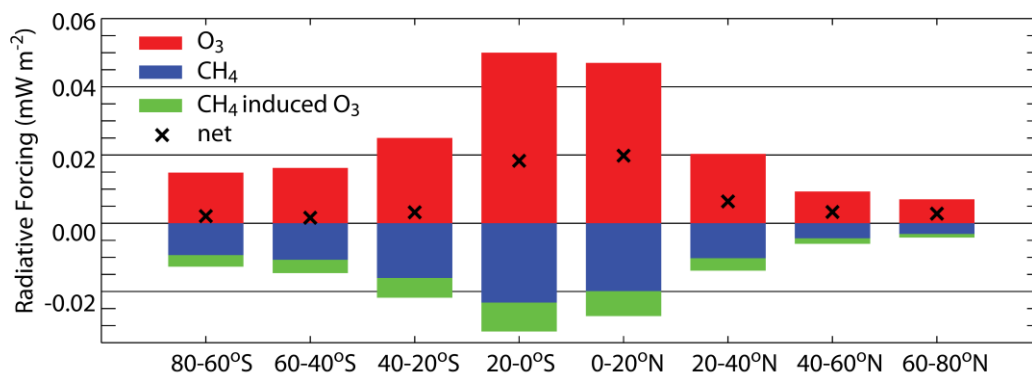
Det er mange mulige kilder til forskjeller mellom modeller, som ulike bakgrunnsnivåer av atmosfærisk NO_x, ulike meteorologiske data, ulik modelloppløsning og forskjellige måter å representere de kjemiske og fysiske prosessene i atmosfæren. En studie av Holmes m.fl. fra 2011 undersøkte hvilke faktorer som betyr mest for usikkerheten i ozon- og metanresponsen til NO_x-utslipp fra fly. De fant at for ozon er den viktigste faktoren hvor effektivt NO_x-utslipp faktisk gir ozonproduksjon, mens for metan skyldes usikkerheten hovedsakelig hvordan atmosfærens oksidasjonskapasitet, og dermed levetiden til metan, påvirkes av NO_x. Disse faktorene er spesifikke for luftfart. For metaneffekten på ozon er det derimot den generelle sammenhengen mellom globale metan- og ozonendringer som er viktig. Flere målrettede studier må til for å forstå betydningen av de ulike prosessene og variasjoner mellom modeller.



Figur 3: Endringer i mengden av ozon og NO_x som funksjon av høyde i ulike modeller forårsaket av NO_x-utslipp fra fly. Fra Olsen m.fl. (2013)

I tillegg til forskjeller mellom modellene, er fordelingen av flyutslippene med høyden en viktig kilde til usikkerhet i estimater av NO_x-effekten. Dette ble undersøkt av Skowron m.fl. (2013). I motsetning til studiene over brukte Skowron m.fl. (2013) samme modell, men fem ulike datasett for utslipp fra luftfart. Disse datasettene har like store totalutslipp, men ulik høydefordelingen. Når strålingspådrivet fra den netto NO_x-effekten ble beregnet, varierte dette med nesten 100% mellom ulike datasett. Slike resultater viser at det er helt nødvendig å ha en nøyaktig representasjon av utslippene i modellene.

Effekten av NO_x er sterkt avhengig av hvor, i hvilken høyde og når på året utslippene skjer. Den geografiske avhengigheten er illustrert bl.a. av Köhler m.fl. (2013). Her undersøker forfatterne hvilken betydning breddegraden hvor et NO_x-utslipp skjer har for den påfølgende endringen i ozon og metan. Som vist i figur 4 gir et NO_x-utslipp i tropene en større endring i metan og ozon (og dermed et sterkere strålingspådriv) enn et like stort utslipp på høyere breddegrader. Det er imidlertid viktig å bemerke at denne figuren ikke viser den totale NO_x-effekten av dagens luftfart, men hvor effektivt like store NO_x utslipp i ulike områder gir strålingspådriv. Selv om utslipp i tropene gir det største strålingspådrivet per kg NO_x, skjer størsteparten av utslippene fra fly på midlere breddegrader i dag. Effekten av de totale NO_x-utslippene fra global luftfart er studert bl.a. av Hoor m.fl. (2009). Den største økningene i ozon skjer i øvre troposfære/nedre stratosfære om våren og sommeren nord for ca. 30°N. Det påfølgende strålingspådrivet er også sterkest nord for 30°N, som vist av bl.a. Myhre m.fl. (2011).



Figur 4: Effekten (i form av globalt strålingspådriv) av like store NO_x-utslipp fra fly i cruisehøyde på ulike breddegrader. Fra Köhler m.fl. (2013).

Effekten av NO_x-utslipp i ulike høyder ble studert av Søvdé m.fl. i 2014. Når NO_x-utslippene ble flyttet 2000 fot opp eller ned i modellen viste beregningene hhv. en økning og en reduksjon på omlag 40 prosent i det kombinerte strålingspådrivet fra endringer i ozon og metan. Dette er også konsistent med tidligere studier av bl.a. Frömming m.fl. (2012). En konsekvens av denne geografiske avhengigheten er at klimaeffekten som følge av endringer i NO_x-utslipp ikke nødvendigvis kan relateres direkte til størrelsen på utslippsendringen dersom den geografiske fordelingen endres samtidig.

Kort oppsummert gir alle de vitenskapelige studiene i figur 2 (med unntak av en modell i en studie) en netto global oppvarmende effekt fra NO_x-utslipp fra fly frem til i dag. Størrelsen på denne oppvarmingen varierer imidlertid betydelig; fra 6 til 13 mW/m² for total global luftfart basert på gjennomsnittet over modellene i hvert av studiene som er inkludert i figur 1. Det øvre estimatet er omtrent halvparten av effekten av CO₂ fra global luftfart frem til i dag. Effekten av NO_x på ozon er avhengig av hvor og når utslippene skjer. For dagens luftfart er effekten sterkest nord for 30°N om sommeren og våren. Gjenstående usikkerheter og forskjeller mellom modeller må systematisk undersøkes og løses for å redusere spennet.

2.3 Direkte og indirekte effekter av partikler

Partikler spiller en viktig rolle i klimasystemet via både direkte og indirekte effekter. Den direkte effekten oppstår fordi partiklene absorberer og reflekterer solstråling. De fleste typer partikler er reflekterende og har en avkjølende klimaeffekt, mens noen, som sotpartikler, absorberer solstråling og virker oppvarmende. Partikler har også indirekte effekter ved at de påvirker dannelsen av skyer og skyenes karakter. Oppsummeringen i figur 1 inkluderer ikke indirekte effekter.

Luftfart slipper ut sotpartikler, organisk karbon og svoveldioksid. Sistnevnte oksideres til sulfatpartikler i luften. Oppdaterte utslippstall gir totale utslipp av sot, organisk karbon og svoveldioksid fra luftfart på henholdsvis 5,96, 6,62 og 221 kilotonn i 2006 (Wilkerson m.fl. 2010). I tillegg kan luftfart gi produksjon av nitratpartikler via utslipp av NO_x .

Nyere studier som har brukt disse utslippstallene over anslår en liten direkte effekt av sotpartikler; mindre enn 1 mW/m^2 (Brasseur m.fl. 2015). Den samme studien oppgir en avkjølende effekt på størrelsesorden -3 til -7 mW/m^2 for den direkte effekten av sulfatpartikler, og en omtrent like stor avkjølende effekt av nitratpartikler. Strålingspådrivet for sotpartikler er konsistent med en tidligere studie av Balkanski m.fl. (2010), mens avkjølingen fra sulfat er sterkere enn tidligere beregnet. Effekten av luftfart på nitratpartikler har ikke blitt inkludert i tidligere vurderinger. Det gjenstår usikkerheter i de globale klima- og atmosfæremodellenes evne til å representere nitrat og denne usikkerheten vil gjenspeiles i estimatene for luftfart.

Mens den *direkte* effekten av partikler fra luftfart er relativt liten, kan den *indirekte* effekten være betydelig. Kunnskapen om dette er imidlertid ufullstendig og størrelsen på klimaeffekten er høyst usikker. Det har særlig vært stort fokus den mulige effekten av sotpartikler på cirrusskyer. Kort forklart kan sotpartikler virke som såkalte frysekjerner, dvs. kjerner for dannelsen av iskrystaller i atmosfæren (se faktaboks). På den måten har de potensialet til å redusere antall iskrystaller i atmosfæren og dermed påvirke cirrusskyene. Figur 5 viser årlig og sonalt midlet endring i antall iskrystaller i atmosfæren når man introduserer en liten mengde sotpartikler fra fly i modellen. De mørkeblå områdene illustrerer at under visse antakelser kan disse sotpartiklene redusere antall iskrystaller betydelig.

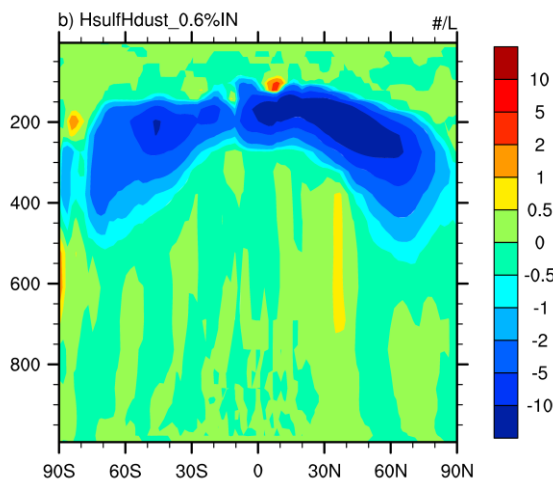
Hvordan dannes iskrystaller i atmosfæren

Cirrusskyer består av iskrystaller. Disse dannes grovt sett på to hovedmåter:

1. Ved at rene vanndråper fryser til is, såkalt homogen frysing.
2. Ved at vanndråper/-damp fryser rundt/på en partikkel, dvs. en frysekjerne; såkalt heterogen frysing.

Dannelsen av en iskrystall er en faseovergang, hvor vann går fra flytende til fast form. Denne overgangen krever alltid energi, men heterogen frysing krever mindre energi enn homogen frysing. Iskrystaller dannes derfor lettere ved heterogen frysing enn ved homogen frysing – dvs. hvis det er en frysekjerne tilstede. Når en iskrystall først er dannet, vil den også vokse ved å ta til seg fuktighet fra luften rundt. Dermed blir det enda vanskeligere å danne nye krystaller ved homogen frysing. Totaleffekten er at hvis frysekjerner er til stede, vil så å si all dannelse av iskrystaller foregå ved heterogen frysing på disse kjernene. Det dannes da et lite antall relativt store krystaller, snarere enn mange små.

Globale klimamodeller klarer å simulere isskyer som cirrus i stadig større grad, men nettoeffekten av sotpartikler fra luftfart er likevel meget vanskelig å anslå. Det dreier seg ikke bare om å forstå balansen mellom de oppvarmende og avkjølende effektene av cirruskyer (se kapittel 2.4); man må også estimere hvordan fryseprosessene ellers vil foregå i en "ren" atmosfære upåvirket av menneskeskapte utslipp, der mineralstøv trolig er den viktigste typen frysekjerner. Mengden og sammensetningen av partikler i en slik upåvirket atmosfæren har man naturlig nok ingen observasjoner av. Man må også bestemme hvor effektive sotpartiklene faktisk er som frysekjerner og hvordan de påvirkes av bakgrunnsnivåene av sulfat. Selv om eksperimenter i laboratorier bidrar til stadig økt forståelse, er sotpartiklenes rolle som frysekjerner fortsatt svært usikker.



Figur 5: Modellert endring i antall iskrystaller i atmosfæren på grunn av utslipp av sotpartikler fra fly. Fra Zhou og Penner (2014).

Først ute med å gi et estimat av strålingspådrivet som sotpartikler fra luftfart har via effekten på cirruskyer var Penner m.fl. i 2009. De fant en sterk avkjølende effekt på -120 til -160 mW/m², altså 2-3 ganger større enn oppvarmingen fra alle andre mekanismer som bidrar til luftfartens klimapåvirkning til sammen, men med motsatt fortegn. Dette estimatet er imidlertid svært avhengig av de valgte forutsetningene, og andre like rimelige forutsetninger kan faktisk gi en oppvarmende effekt. Det siste ble vist i en studie av Liu m.fl. (2009). Her ble en netto avkjølende effekt fra sot fra fly kun beregnet dersom sotpartiklene kan virke som frysekjerner ved relativ fuktighet over is på 120-130 prosent. Under antakelsen at en høyere relativ fuktighet er nødvendig, fant forfatterne en netto oppvarmende effekt av sotpartiklene. Gettelman og Chen (2013) derimot fant ingen statistisk signifikant effekt av sotpartikler i sin studie. Zhou og Penner (2014) endret systematisk flere av de relevante variablene i sin modell og beregnet et strålingspådriv som varierte fra -350 (sterk avkjøling) til +90 (sterk oppvarming) mW/m². Disse studiene illustrerer den store usikkerheten i effekten av sotpartikler, både når det gjelder størrelse og fortegn.

Når det gjelder de indirekte effektene av andre typer partikler, er det foreløpig få studier som har sett spesifikt på luftfart. To nyere studier indikerer en potensielt viktig avkjølende effekt av

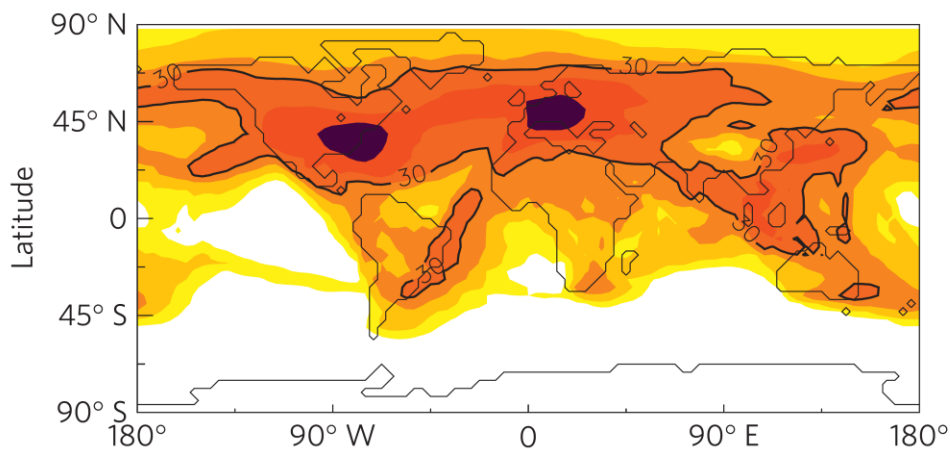
sulfatpartikler, men med et stort usikkerhetsintervall. Gettelman og Chen (2013) beregnet et strålingspådriv på -46 mW/m^2 for den indirekte effekten av sulfat fra flyutslipp av SO_2 , mens Righi m.fl. (2013) fant en indirekte effekt på -15 mW/m^2 for sot-, sulfat- og nitratpartikler kombinert. Sistnevnte gir et spenn på -70 til $+2 \text{ mW/m}^2$ på grunn av antakelser i modellen. Denne effekten skiller seg fra den som skyldes sotpartikler. Sulfatpartiklene påvirker ikke cirrusskyene, men transporteres derimot nedover i atmosfæren og påvirker skyer lavere nede.

Kort oppsummert er det i dag ikke mulig å gi et beste estimat for den indirekte effekten av partikler fra luftfart, på tross av økende kunnskap de siste årene. Særlig stor usikkerhet er knyttet til effekten av sotpartikler på cirrusskyer. Verdiene for denne effekten gitt i Zhou og Penner (2014) er større enn strålingspådrivet fra alle de andre mekanismene som bidrar til luftfartens klimapåvirkning, inkludert CO_2 . Skulle enten den positive eller negative verdien være reell, vil det derfor ha store konsekvenser for både størrelse og fortegn på den totale klimaeffekten fra luftfart. Det er derfor helt nødvendig å redusere usikkerhetene relatert til indirekte effekter av partikler. Isskyer og beskrivelsen av disse i globale klimamodeller er ikke bare et problem relatert til luftfart, men også et som må løses for å bedre vår forståelse av menneskeskapt påvirkning på klima generelt (Boucher m.fl. 2013).

2.4 Skydannelse

I tillegg til å være en drivhusgass, er vanndamp også viktig som en forløper til kondensstriper. Kondensstripene dannes når den varme eksosen med et høyt innhold av vanndamp slippes ut og blandes med tilstrekkelig kald luft slik at det oppstår kondensasjon. Dersom luften er tilstrekkelig kald ($T < -40^\circ\text{C}$) og overmettet i forhold til is (dvs. en relativ fuktighet i forhold til is på over 100%, $\text{RH}_{\text{is}} > 100\%$) kan iskrystaller dannes og kondensstripene bli vedvarende (dvs. på tidsskala minutter til timer). Dette kriteriet kalles Schmidt-Appleman kriteriet for kondensstripedannelse (Appleman 1953; Schumann 1996) og observasjoner viser at slike forhold er ganske vanlig i øvre troposfære. Etter en tid mister kondensstripene sin markerte linjeform, sprer seg utover og kan danne større cirrusskyer. Dette er tynne skyer høyt i atmosfæren bestående hovedsakelig av iskrystaller. Kondensstripene og de påfølgende cirrusskyene omtales ofte med fellesbegrepet “contrail-cirrus”.

Kondensstriper og cirrusskyer gir både oppvarmende og avkjølende klimaeffekter. Den avkjølende effekten skyldes at mer solstråling reflekteres, mens oppvarmingen forårsakes av at langbølget varmestråling fra bakken absorberes. Fordi dette er høye skyer, med betydelig lavere temperatur enn bakken, dominerer den oppvarmende effekten. Kondensstriper og cirrusskyer gir dermed en netto oppvarmende påvirkning på klima globalt, som vist i en rekke vitenskapelige publikasjoner (blant annet IPCC 1999; Sausen m.fl. 2005; Burkhardt og Kärcher 2011; Chen og Gettelman 2013; IPCC 2013; Schumann og Graf 2013; Spangenberg m.fl. 2013). Regionalt vil imidlertid strålingspådrivet avhenge av blant annet tiden på året og dagen, skyhøyden og hvorvidt det er andre skyer under.



Figur 6: Contrail-cirrus strålingspådriv for år 2002 luftfart. Fra Burkhardt og Kärcher (2011).

Flere studier har estimert det totale strålingspådrivet fra contrail-cirrus ved bruk av globale atmosfæremodeller. Et mye brukt estimat er det fra Burkhardt og Kärcher (2011). De beregner et globalt midlet strålingspådriv på 38 mW/m^2 for den kombinerte contrail-cirrus effekten for global luftfart i 2002, med betydelig større regionale effekter opp mot flere 100 mW/m^2 (figur 6). Både høyere og lavere verdier har blitt beregnet. For eksempel beregner Chen and Gettelman (2013) et strålingspådriv fra contrail-cirrus på 13 mW/m^2 for 2006 flyutslipp, altså bare halvparten av Burkhardt og Kärcher (2011). Det er imidlertid viktige forskjeller i hvordan modellene brukt i disse to studiene simulerer kondensstriper. Den siste rapporten fra FNs klimapanel gir et strålingspådriv på 10 mW/m^2 (med usikkerhetsintervall 5 til 30 mW/m^2) for kondensstriper (ikke inkludert cirrusskyer). For den kombinerte effekten av contrail-cirrus bruker FNs klimapanel begrepet effektivt strålingspådriv (Effective Radiative Forcing, ERF^3) og gir et beste estimat på 50 mW/m^2 (med usikkerhetsintervall 20 til 150 mW/m^2) (Myhre m.fl. 2013).

Når kondensstripene mister sin linjeform og utvikler seg til cirrusskyer, kan dannelsen av *naturlige cirrusskyer* forhindres. Denne effekten er inkludert i studien av Burkhardt og Kärcher (2011) og gir en avkjølingseffekt på -7 mW/m^2 som kompenserer for noe av oppvarmingen fra skydannelse på grunn av flytrafikk.

³ Konseptet effektivt strålingspådriv (ERF) inkluderer de raske responsene i klimasystemet til et strålingspådriv, dvs. responser som foregår på tidsskala som er mye kortere enn responsen i havet. Endringer i skyer, inkludert cirrus, regnes som en slik respons (Myhre m.fl. 2013).

Nyere studier har fokusert på å øke kunnskapen om contrail-cirrus ikke bare gjennom modellstudier, men også gjennom eksperimenter og bruk av observasjoner. Laboratoriestudier har vist at man faktisk kan reprodusere produksjonen av iskrystaller på grunn av utslipp fra fly (Wong m.fl. 2013). Dette gir verdifull informasjon for validering av detaljerte modeller og forståelsen av de mikrofysiske prosessene i skydannelse. Flere studier har brukt satellittdata for å studere utbredelsen av kondensstriper og de optiske egenskapene (som er avgjørende for hvilken klimaeffekt de har). Duda m.fl. (2013) produserte et datasett for kondensstriper over hele nordlige halvkule og fant et gjennomsnittlig dekke av kondensstriper på 0.135 prosent i 2006. Basert på disse resultatene, og kombinert med antakelser om optiske egenskaper, beregnet Spangenberg m.fl. (2013) et globalt midlet strålingspådriv fra kondensstriper (altså ikke inkludert cirrusskyer) på 6 mW/m^2 . En annen studie kombinerte modeller med satellittdata over flere år (2004-2011) og estimerte et globalt midlet strålingspådriv fra contrail-cirrus på 50 mW/m^2 (Schumann og Graf 2013). Dette tallet er i overensstemmelse med andre modellstudier, men er imidlertid sterkt avhengig av valgene gjort i modellen og resultatene spenner fra 40 til 80 mW/m^2 . Analyser gjort av Minnis m.fl. (2013) ga også et strålingspådriv på 50 mW/m^2 . Ingen av disse siste studiene tar hensyn til den potensielle effekten på naturlige cirrusskyer, noe som eventuelt vil redusere estimatene.

Kort oppsummert har et økende antall vitenskapelige studier bidratt til økt forståelse av contrail-cirrus de siste årene, og strålingspådrivet har blitt beregnet både med globale modeller og bruk av satellittdata. Disse studiene angir en netto oppvarmende effekt på klima globalt. Videre viser studiene at den oppvarmende effekten av contrail-cirrus høyst sannsynlig har vært større enn oppvarmingen fra CO_2 fra luftfart frem til i dag. FNs Klimapanel gir 50 mW/m^2 (med usikkerhetsintervall 20 til 150 mW/m^2) for den kombinerte contrail-cirrus effekten (Myhre m.fl. 2013). Det er likevel flere faktorer som bidrar til fortsatt usikkerhet i klimapåvirkningen: Hvor vanlig er tilfellene av overmetning i forhold til is, hvor lenge varer contrail-cirrus, hvordan påvirkes naturlige cirrusskyer, hvordan er balansen mellom oppvarmende og avkjølende effekter og hvordan er den geografiske og sesongmessige variasjonen. Slike spørsmål vil være viktig å besvare fremover.

2.4.1 Forhold for kondensstripedannelse over Norge

I forhold til klimaeffekten er det de tilfellene der kondensstripene ikke umiddelbart fordamper igjen, men blir vedvarende, som er av betydning. Som beskrevet over er dannelse av vedvarende kondensstriper avhengig av temperaturen og fuktigheten i lufta, og derfor også av hvilken høyde flyene holder. Dermed vil ikke alle flyvninger ha samme potensiale for skydannelse. For eksempel tyder studier på at selv om flyvninger mellom byer 800 km eller kortere fra hverandre utgjør en betydelig andel av trafikken over USA, så bidrar de mindre til kondensstriper fordi en mindre andel av trafikken foregår i kritiske områder (Chen m.fl. 2012, Sridhar m.fl. 2013). Fordi de fysiske forholdene i atmosfæren over Norge er forskjellige fra de over USA, gjelder denne konklusjonen ikke nødvendigvis for norske forhold.

Flyvninger over relativt korte avstander og lavere høyder utgjør en stor del også av innenriks luftfart i Norge. Studier av sannsynligheten for dannelse av kondensstriper fra innenriks luftfart i Norge, og den påfølgende klimaeffekten, eksisterer til vår viten ikke. Spesielt sistnevnte krever

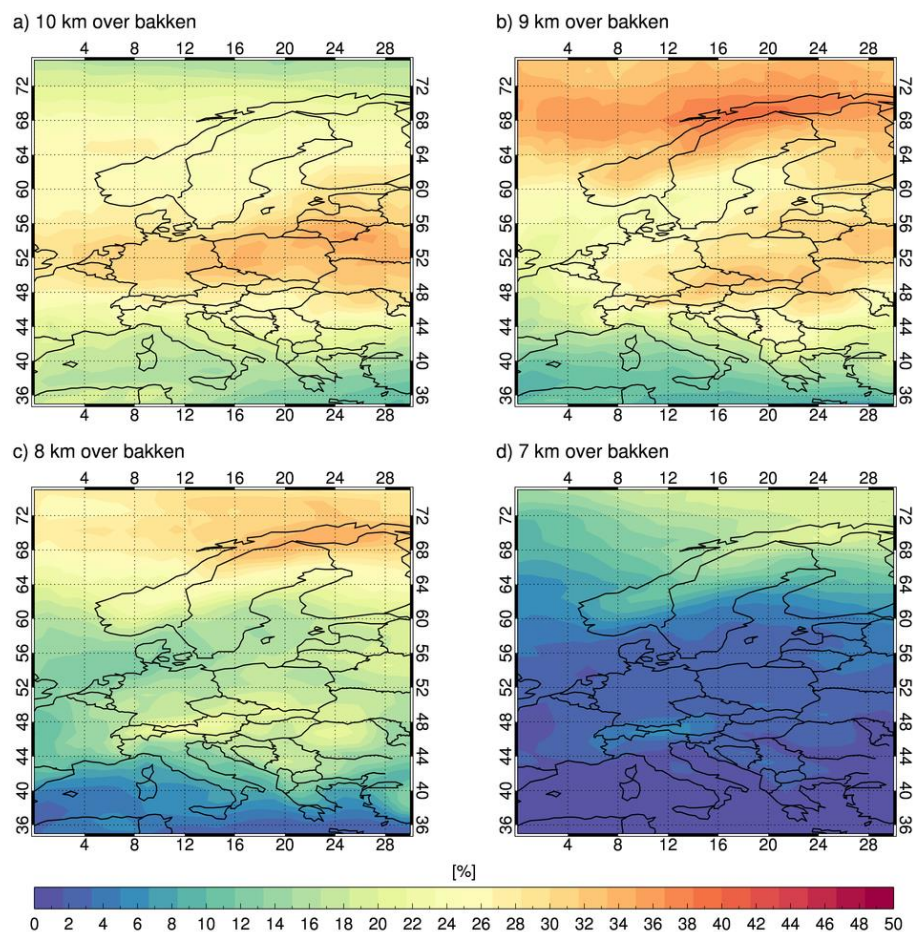
at man gjør eksplisitte modellberegninger. Slike beregninger krever ressurser utover de tilgjengelig i arbeidet med denne rapporten, men bør være et fokus i senere arbeid.

Som et første skritt har vi i arbeidet med denne rapporten analysert meteorologiske data i 2013 og 2014 for å forsøke å kartlegge hvor ofte kriteriet for kondensstripedannelse (dvs. $T < -40^{\circ}\text{C}$ og $\text{RH}_{\text{is}} > 100\%$) er oppfylt i ulike høyder over Norge. Vi refererer til områder hvor disse forholdene er oppfylt som kalde is-overmettede områder. De meteorologiske dataene er generert med den globale værvarslingsmodell som drives ved European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF 2015) basert på et omfattende sett av observasjoner om faktiske meteorologiske forhold. Dataene har en horisontal oppløsning på om lag $100 \times 100 \text{ km}$ og en tidsoppløsning på tre timer. Vi beregner relativ fuktighet over is basert på informasjon om spesifikk fuktighet, temperatur og trykk fra modellen ifølge metoden gitt i Alduchov og Eskridge (1996). På grunn av den relativt grove oppløsningen i de meteorologiske dataene er det rimelig å sette kravet for RH_{is} noe lavere enn 100% for å ta hensyn til små-skala variabilitet. Her bruker vi $\text{RH}_{\text{is}} > 92\%$ basert på Irvine og Shine (2014). Vi bemerker også at selv om vi bruker $T < -40^{\circ}\text{C}$ som temperaturterskel for kondensstripedannelse, vil denne terskelen i realiteten være noe avhengig av faktorer som høyde og fuktighet i luften, samt drivstoff og motortype (Schumann 1996). På bakgrunn av denne usikkerheten undersøker vi også frekvensen av kalde is-overmettede områder under to alternative kriterier: (i) $T < -50^{\circ}\text{C}$ og $\text{RH}_{\text{is}} > 92\%$ og (ii) $T < -40^{\circ}\text{C}$ og $\text{RH}_{\text{is}} > 99\%$.

Figur 7 viser frekvensen av forekomsten av kalde is-overmettede områder over Norge og Europa i 2013 i fire ulike høyder (7, 8, 9 og 10 km). Denne analysen viser at de grunnleggende fysiske forholdene i atmosfæren som kreves for at vedvarende kondensstriper skal dannes forekommer ganske ofte over Norge, spesielt over 9 km høyde. Under dette er frekvensen en god del lavere og flyvninger her vil i større grad skje i områder hvor det er lavere sannsynlighet for kondensstripedannelse. Det er noe lavere frekvens i 2013 enn i 2014. Frekvensen av tilfeller hvor de to alternative kriteriene (lavere temperatur eller høyere overmetning) er oppfylt er som forventet noe lavere enn i figur 7. For klimaeffekten av kondensstriper på våre breddegrader er tiden på året en viktig faktor. Om vinteren er den oppvarmende effekten større enn om sommeren på grunn av lite solstråling og dermed liten avkjølingseffekt. Sammenligner vi frekvensen av kalde is-overmettede områder om sommeren og om vinteren, finner vi en betydelig hyppigere forekomst i vintermånedene i alle høydene vurdert her. Figur 7 viser kun området over Europa. Det er imidlertid også interessant å se på det globale bildet. Når vi gjør det, finner vi at frekvensen generelt øker mot midlere og høye breddegrader, i forhold til i tropene, for høydene studert her. Dette ble også funnet av Lamquin m.fl. (2012).

En viktig kilde til usikkerhet i denne analysen er hvor godt ECMWF dataene representerer den faktiske overmetningen i forhold til is og hvorvidt en så grov oppløsning som $100 \times 100 \text{ km}$ gir tilstrekkelig gode data. Flere studier har sammenlignet is-overmetningen fra ECMWF med observasjoner og satellittmålinger i ulike høyder og områder (Tompkins m.fl. 2007; Lamquin m.fl. 2009; Rädcl og Shine 2010; Dyroff m.fl. 2015). Disse studiene viser en forholdsvis god enighet mellom modell og målinger, særlig for $\text{RH}_{\text{is}} < 110\%$. Frekvensen av høyere overmetninger i forhold til is ble derimot underestimert av modellen. Det er imidlertid verdt å bemerke at alle disse studiene har fokusert på områder sør for 60 grader nord.

Frekvens (%) av kalde is-overmettede forhold i 2013



Figur 7: Frekvensen av forekomsten av kalde is-overmettede områder i 2013 i ulike høyder over Europa, dvs. tilfeller hvor luften var kald ($T < -40^{\circ}\text{C}$) og overmettet i forhold til is ($\text{RH}_{\text{is}} > 92\%$).

Analysen over forteller oss at potensialet for kondensstripedannelse over Norge er tilstede, spesielt i høyder over 9 km. Slik informasjon alene gir likevel svært begrenset informasjon om den potensielle klimaeffekten av innenriks luftfart via skydannelse. Selv om de meteorologiske forholdene skulle være oppfylt, er det andre viktige faktorer som avgjør den påfølgende klimaeffekten. For det første kan kondensstripene på høye bredder ha andre optiske egenskaper og dermed et annet strålingspådriv. For det andre er et avgjørende spørsmål i hvilken grad kondensstripene kan føre til at det utvikler seg et mer eller mindre kontinuerlig dekke av cirrusskyer. En vurdering av klimaeffekten krever derfor detaljerte modellstudier, noe som så langt ikke har blitt gjort for innenriks norsk luftfart og i liten eller ingen grad også for andre områder.

En viktig faktor for den fremtidige klimapåvirkningen av luftfart er hvorvidt og hvordan frekvensen av kalde is-overmettede områder kan komme til å endre seg i et varmere klima. En nylig publisert artikkel viser en mulig økning i frekvensen på høye nordlige bredder gjennom dette århundret dersom de globale menneskeskapte utslippene fortsetter å øke (Irvine og Shine 2015) (se også kapittel 4.2).

Kort oppsummert viser analyser av meteorologiske data at de grunnleggende fysiske forholdene i atmosfæren som kreves for at vedvarende kondensstriper skal dannes er relativt vanlige over Norge, særlig over 9 km høyde. Disse forholdene forekommer oftere om vinteren enn om sommeren, noe som er viktig for den påfølgende klimapåvirkningen av flyvninger over Norge fordi kondensstriper gir en sterkere oppvarmingseffekt når de dannes om vinteren. Frekvensen reduseres med lavere høyder. Innenriksflyvninger i Norge holder generelt lavere høyder enn langdistanseflyvninger på samme breddegrader. For innenriksruter over Sør-Norge befinner flyene seg typisk kun noen få minutter, eller ikke i det hele tatt, i 9 km høyde. Denne tiden øker på ruter mellom Sør- og Nord-Norge. Norsk innenriks aktivitet foregår dermed i større grad i områder med lavere frekvens av de kalde is-overmettede forholdene som kreves for kondensstripedannelse. Videre studier med detaljerte modeller kreves for å kunne tallfeste hvilken klimapåvirkning innenriks luftfart gir gjennom kondensstripedannelse.

3 Ulike skalaer for klimapåvirkning i tid og rom

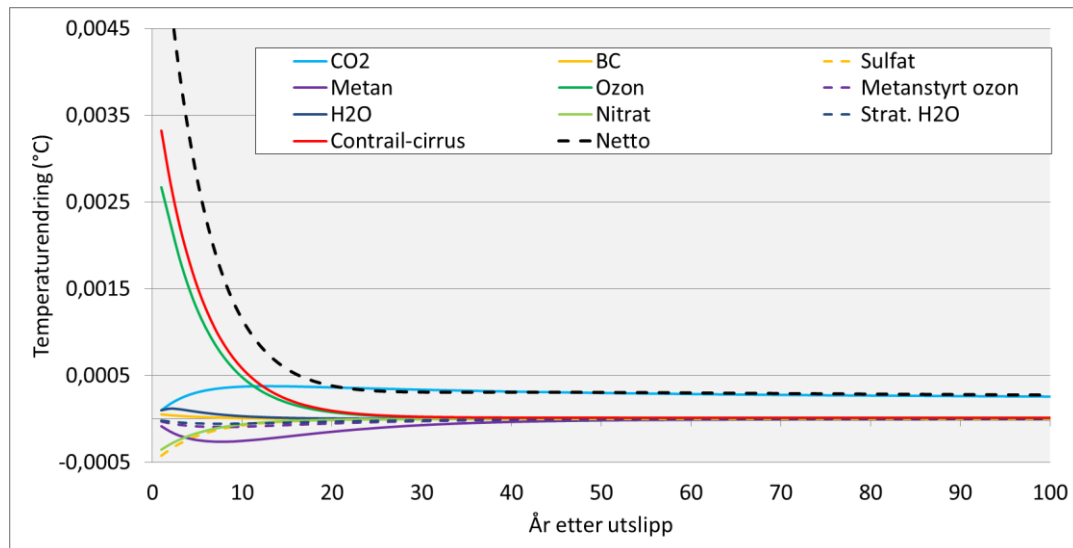
De mange mekanismene som påvirker klima virker over svært forskjellige skalaer i tid og rom. I dette kapittelet ser vi nærmere på hvordan disse kan sammenlignes kvalitativt.

3.1 Sammenligne langlivede og kortlivede klimaeffekter

Så langt har alle studiene omtalt i denne rapporten brukt indikatoren strålingspådriv. Strålingspådriv er nyttig for å gi en førsteordens sammenligning av ulike utslipp og mekanismers effekt på klima, men gir begrenset informasjon om den faktiske klimaendringen som forårsakes. I tillegg er strålingspådriv, når brukt som i de ovennevnte studiene, en "tilbakeskuende" indikator: det gir et mål på klimaeffekten fra før-industriell tid og frem til i dag. For tiltaksutforming er dette ikke direkte anvendbart. De ulike klimaeffektene kan også sammenlignes på en framoverskuende måte for eksempel ved at temperatureffekten som funksjon av tid beregnes. Dette er gjort i figur 8. Her sammenlignes de ulike mekanismenes effekt på den globale bakketemperaturen de neste 60 årene, forårsaket av ett års globale utslipp fra luftfart.

Slike beregninger er spesielt nyttig for å illustrere hvordan de ulike mekanismene påvirker klima på svært ulike tidsskalaer. CO₂ har en lang responstid og en endring i CO₂ gir en svært langvarig oppvarmende effekt. Selv etter 1000 år vil fremdeles 15 til 40 prosent av endringen i mengden CO₂ som følge av et utslipp være igjen i atmosfæren (IPCC 2013). På lengre sikt er det derfor denne gassen som gir den største klimaeffekten av flytrafikk. Ozon, cirruskyer og kondensstriper gir en mye sterkere oppvarming enn CO₂ rett etter utslipp, men på grunn av kort levetid reduseres temperaturendringen raskt. Etter 5-15 år er effekten mindre enn effekten av CO₂. Reduksjonen i metan fra NO_x-utslipp gir en avkjølingseffekt som varer i 20-30 år. Det samme gjør metanstyrt reduksjon av ozon, men i mindre grad. Nettoeffekten av NO_x-utslipp fra fly er en oppvarming på kort sikt, men en liten avkjølede effekt på lang sikt (20 år og mer) fordi oppvarmingen fra produksjon av ozon er mer kortvarig enn avkjølingen fra reduksjon av

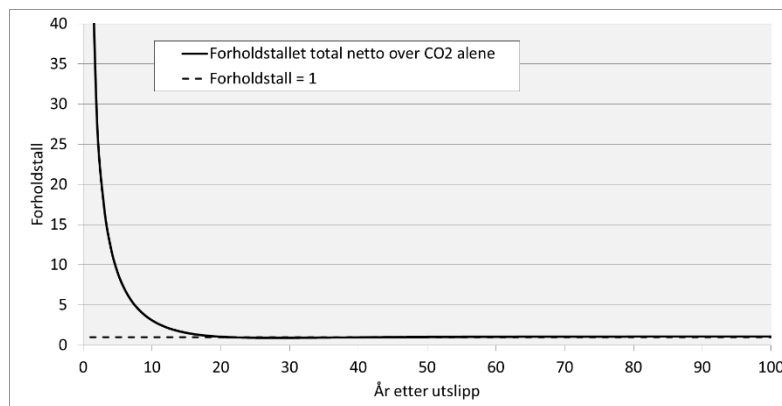
metan. Felles for utslipp av ulike typer partikler er en kortvarig klimapåvirkning på grunn av en levetid i atmosfæren på bare noen dager.



Figur 8: Temperaturendring over tid (°C) pga. utslipp fra fly. Beregningene er basert på ett års globale utslipp fra luftfart; etter dette antas null utslipp og man kan dermed studere utviklingen i global temperaturendringen over tid og se tidsskalaene for klimapåvirkningen. Mekanismer med avkjølende effekt gir negativ temperaturendring. Beregningene er gjort med den enkle klimamodellen beskrevet i Berntsen og Fuglestad (2008) og bruker tall for strålingspådriv fra Lee m.fl. (2009) og Brasseur m.fl. (2015). Indirekte effekter av partikler er ikke inkludert.

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlivede effektene av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO₂-effekten alene. Dette er reflektert blant annet i såkalte "multiplikatorer" som er introdusert for å angi størrelsen på "tilleggseffektene": En multiplikator på 2 betyr at den totale klimaresponsen er dobbelt så stor som utslippene av CO₂ alene tilsier. Slike multiplikatorer blir benyttet i ulike sammenhenger for å regne ut utslipp og klimaeffekt av flyturer og i klimakalkulatorer som benyttes ved kjøp av kompensierende kvoter.

Slik multiplikatoren vanligvis blir benyttet i dag baserer den seg på effekter av *totale historiske* utslipp fra fly. Forholdet mellom CO₂-effekten og de kortlivede mekanismene varierer imidlertid over tid, og i et framoverskuende perspektiv vil valg av multiplikator avhenge sterkt av tidshorisonten. Dette er illustrert i figur 9, som viser forholdet mellom total netto temperaturendring og temperaturendringen fra CO₂ alene for global luftfart (fra figur 8). Mens nettoeffekten er mye større enn CO₂-effekten det første tiåret, blir CO₂ raskt den dominerende effekten og forholdstallet går mot 1.



Figur 9: Forholdet over tid mellom total netto temperaturpåvirkning fra global luftfart og CO₂ effekten alene. Basert på figur 8.

Det har vært mye diskutert hvordan multiplikatoren skal beregnes og hvilken verdi som skal brukes. Klimaeffekten av et utslipp regnes i prinsippet best ut ved simuleringer i komplekse, globale klimamodeller. Men dette er dyrt, komplisert og tar lang tid, samtidig som det kreves tung ekspertise å bruke modellene. Som alternativ er det vanlig å bruke utslippsvektfaktorer (emission metrics) til å anslå klimaeffekten av et gitt utslipp eller aktivitet. De meste vanlige utslippsvektfaktorene ser på *akkumulert strålingspådriv* (Global Warming Potential, GWP) og *momentan temperaturendring* (Global Temperature change Potential, GTP) (Shine m.fl. 2005). Andre utslippsvektfaktorer eksisterer også, slik som for eksempel akkumulert temperaturendring over tid (Peters et al., 2011) eller nedbørsforandringer (Shine et al., 2015), og kan brukes hvis det blir sett på som relevant. En viktig forskjell mellom GWP og GTP er hvordan klimaeffektene vektlegges over tid: Ved bruk av GWP vektlegges de kortlivede klimaeffektene mer enn ved bruk av GTP. Valg av type utslippsvektfaktor og tidshorisont er derfor avhengig av hvilke aspekter ved klimaendringene man er opptatt av og om man er opptatt av endringer på kort eller lang tidsskala. Dette er ikke et rent vitenskapelig spørsmål, men er knyttet til verdibaserte vurderinger.

Tabell 1 viser beregninger av multiplikatoren gjort for denne rapporten og illustrerer multiplikatorens avhengighet av valgt utslippsvektfaktor og tidshorisont (valgt konsistent med FNs Klimapanelts siste rapport). Verdiene i tabellen reflekterer også noe av usikkerheten i luftfartens klimapåvirkning: I beregningene har vi brukt øvre og nedre estimat av strålingspådrivet beregnet av modellene i Brasseur m.fl. (2015), samt modellgjennomsnittet. Indirekte effekter av partikler er ikke inkludert. Ved bruk av GWP for å beregne klimaeffekten varierer multiplikatoren fra 0,6 til 6,6 avhengig av tidshorisont. Hvis man derimot benytter *temperaturendringen* som indikator (dvs. utslippsvektfaktor GTP) blir multiplikatoren betydelig lavere. Dette kommer av at de kortlivede effektene da vektlegges mindre enn for GWP siden klimasystemet “glemmer” effektene over tid. Beregningene her er gjort med en fast utslippsvektfaktor, dvs. med en fast tidshorisont. Man kan også tenke seg at det brukes en tidsavhengig utslippsvektfaktor, hvor man fastsetter et gitt år i fremtiden og dermed får en stadig

kortere tidshorisont ettersom tiden går. I dette tilfellet vil kortlivede klimaeffekter bli stadig viktigere etter hvert som man nærmer seg det gitte året.

		Beregnet med GWP		Beregnet med GTP		
		20	100	20	50	100
	Tidshorisont					
	Modellgjennomsnitt	4.2	1.8	1.5	1	1.1
Strålingspådriv	Nedre estimat	0.6	0.8	0.4	0.9	1
	Øvre estimat	6.6	2.5	2.3	1.2	1.2

Tabell 1. Multiplikatorer for klimapåvirkningen fra luftfart for ulike valg av utslippsvektfaktor (GWP eller GTP) og tidshorisonter mellom 20 og 100 år. Tabellen viser beregninger gjort med øvre og nedre estimat av strålingspådrivet i Brasseur m.fl. (2015), samt modellgjennomsnittet (indirekte effekter av partikler er ikke inkludert). Beregningene er gjort for denne rapporten.

Den mest brukte utslippsvektfaktoren i dag er GWP med en tidshorisont på 100 år – GWP(100) – slik som brukt i Kyotoprotokollen og i nasjonale klimaregnskap for drivhusgassene. Basert på disse valgene beregner vi en middsverdi for multiplikatoren på 1,8. Dette er på størrelsesorden med tidligere verdier fra Lian m.fl. (2007) på 1,2 – 1,8 og med verdier gjengitt i Lund m.fl. (2011). Multiplikatoren beregnet i denne rapporten har imidlertid et større spenn enn tidligere og varierer fra 0,8 til 2,5 for GWP(100). Dette reflekterer en større usikkerhet i estimert strålingspådriv fra andre mekanismer enn CO₂ for dagens luftfart i nyere studier, hvor noen studier finner betydelig høyere eller lavere verdier enn gjennomsnittet. Mens GWP er mest brukt, er det samtidig en økende interesse for GTP som utslippsvektfaktor. En grunn til dette er 2-gradersmålet som det internasjonale samfunnet har blitt enige om. Her kan utslippsvektfaktor GTP være mest relevant, og med dagens utvikling av utslipp kan den globale temperaturstigningen nå 2°C alt i midten av dette århundret (IPCC 2013), noe som taler for en kortere tidshorisont. Dersom man velger GTP med tidshorisont 20 eller 50 år, blir multiplikatoren for luftfart betydelig lavere.

Det finnes ikke et entydig svar på hvordan en slik multiplikator skal beregnes. I forskningsmiljøer brukes i dag multiplikatorer hovedsakelig for å illustrere størrelsen på andre effekter enn CO₂ og hvordan dette avhenger av de ulike antakelsene i beregningene.

3.2 Regionale variasjoner

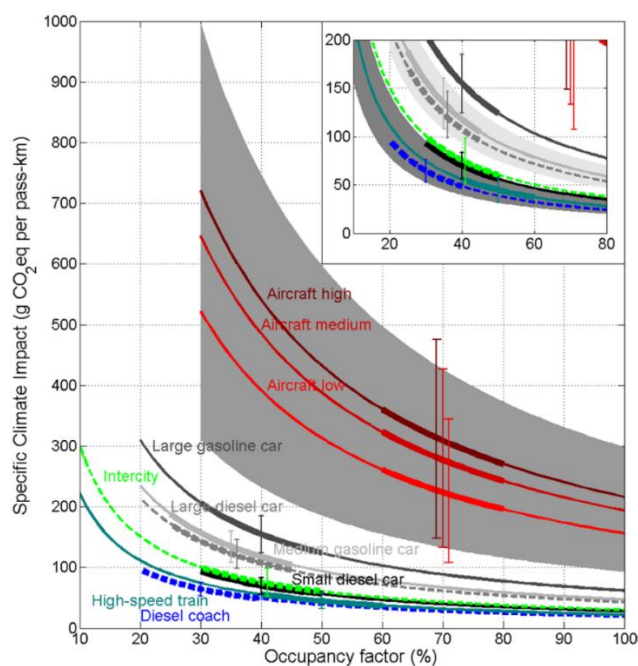
Avsnitt 3.1 omhandler globalt midlede effekter av den globale luftfartssektoren. Men som diskutert tidligere i rapporten kan effekten på globalt strålingspådriv eller temperatur være svært avhengig av *hvor utslippet skjer*. Videre kan regionalt strålingspådriv og temperaturendring avvike betydelig fra det globale gjennomsnittet. For luftfart gjelder dette særlig kondensstriper og cirruskyer, samt NO_x-effekten. Kunnskap om regionale variasjoner i utslipp og påfølgende klimaeffekter kan også være viktig fra et politikkutformingsperspektiv, da et tiltak for å redusere utslipp kan gi ulik effekt avhengig av hvor, og til og med når, det implementeres.

Nyere beregninger presenterer globale utslippsvektfaktorer for NO_x-utslipp på ulike kontinenter, både for luftfart (Köhler m.fl. 2013) og andre sektorer (Aamaas et al., 2015; Collins et al., 2013). For eksempel viser Köhler m.fl. (2013) at det er betydelige forskjeller i GTP og GWP verdiene for utslipp fra luftfart i Kina, India, Europa og USA. Basert på slike resultater kan man i prinsippet også beregne region-spesifikke multiplikatorer. Disse beregninger tar altså hensyn til hvordan utslipp i ulike regioner gir ulik påvirkning på det globale klimaet, men gir ingen informasjon om de faktiske geografiske variasjonene i klimapåvirkningen. Sistnevnte er et relativt nytt tema innen forskning på luftfart og klima.

3.3 Spesifikk klimaeffekt

Som alternativ til å vurdere de totale utslippene, kan ulike transportaktiviteter sammenlignes ved å se på den spesifikke klimapåvirkningen, dvs. klimapåvirkningen per transportarbeid. Persontransport blir som regel normalisert per person- eller passasjerkilometer, men kan også ses på per passasjertime. Varetransport kan for eksempel måles per tonnkilometer eller per volumkilometer. Borken-Kleefeld et al. (2010) sammenlignet veitransport, tog, skipsfart og luftfart for både person- og varetransport. På kort sikt har flytrafikken høyest klimapåvirkning per person-km på grunn av de sterke, men kortvarige oppvarmingen fra contrail-cirrus og ozon. På lengre sikt dominerer CO₂, slik at flyreiser har en lavere eller like stor klimapåvirkning per person-km som bilreiser. For varetransport har flytransport alltid høyest spesifikk klimapåvirkning, fulgt av små lastebiler. Det er viktig å bemerke at fly, skip og landtransport frakter svært forskjellige varer, noe som gjør direkte sammenligning komplisert.

Borken-Kleefeld et al. (2013) sammenlignet reiser med ulike transportmidler for distanser på 500 til 1000 km, der bil, buss, tog og fly alle er reelle alternativer. Resultatene ble sammenlignet som funksjon av belegg i prosent som vist i figur 10. Her har valg av utslippsvektfaktor og tidshorisont størst relativ betydning for flytrafikk. Dersom man velger GWP(100), som i figur 10, fører et nesten fullt fly til omtrent samme spesifikke klimapåvirkning per passasjerkilometer som en bil med bare sjåfør. Valg av andre utslippsvektfaktorer og tidshorisonter vil påvirke sammenligningen. For eksempel blir forskjellen mellom fly og bil mindre dersom man bruker GTP med tidshorisont 20 år.



Figur 10: Den spesifikke klimaeffekten (per passasjerkilometer) av ulike kjøretøy som funksjon av belegg, beregnet med GWP(100). Den tykke delen av linjen viser typiske beleggfaktorer. Det skraverte området indikerer usikkerheten. Figuren i øvre høyre hjørne er en zoom-inn på bensinbiler og tog med fremdrift basert på europeisk elektrisitet. Fra Borken-Kleefeld et al. (2013).

4 Luftfart og klima i fremtiden

4.1 Muligheter for redusert klimapåvirkning

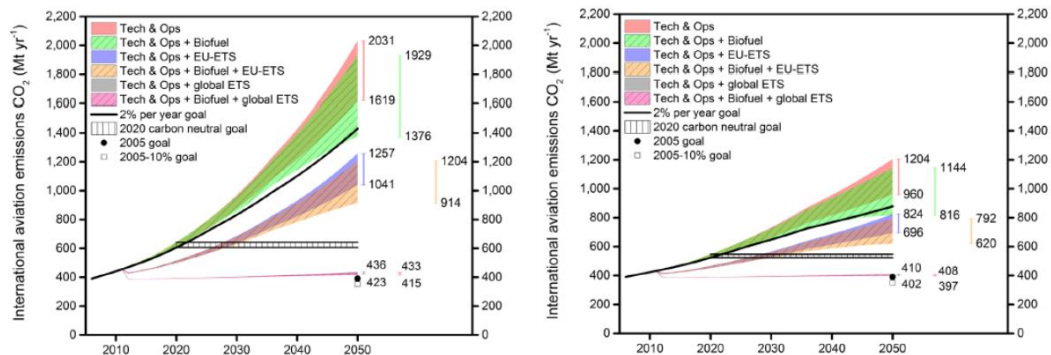
Luftfarten er en sektor som har vært i sterk vekst over lang tid. Det har ikke vært en jevn økning i trafikken: Utviklingen er tett knyttet til den økonomiske utviklingen og reduksjon er observert i perioder, for eksempel knyttet til økonomisk nedgang. Ny teknologi og effektivisering har gjort flyene mer energieffektive, noe som har bidratt til at utslippene ikke øker like raskt som trafikken.

Også globalt har utslippene fra luftfart økt (Sims m.fl. 2014). Totalt stod luftfarten for om lag 630 millioner tonn CO₂ i 2006, hvorav 62 prosent var internasjonal trafikk (Lee m.fl. 2013). Og veksten forventes å fortsette fremover. I følge projeksjoner for fremtidig utvikling kan utslippene nå 1000-3000 millioner tonn CO₂ i 2050, avhengig av aktivitetsvekst og tiltak for utslippsreduksjoner (Lee m.fl. 2013).

Industrien selv har satt ambisiøse mål for å redusere egen klimapåvirkning (ICAO/ATAG 2014):

- i. 1.5 prosent per år forbedring i drivstoffeffektivitet fra 2009 til 2020
- ii. Karbonnøytral vekst fra 2020
- iii. 50 prosent lavere nettoutslipp i 2050 relativt til 2005

Det eksisterer mange muligheter for å redusere klimapåvirkningen. Som vist av Lee m.fl. (2013) kan det likevel bli svært utfordrende å nå utslippsmålene, særlig dersom den sterke veksten i trafikk fortsetter. Figur 11 er hentet fra denne studien og viser de potensielle utslippsreduksjonene frem mot 2050 som kan oppnås ved ulike tiltak (vist med ulike farger), gitt et scenario med høy (til venstre) og lav (til høyre) vekst i flytrafikken. Et bredt sett med tiltak, inkludert teknologiske og operasjonelle forbedringer, alternative drivstoff og markedsbaserte mekanismer er nødvendig dersom betydelige utslippskutt skal oppnås. En rekke andre faktorer, blant annet relatert til kostnader, tilgang på alternative drivstoff og politikkutforming, bidrar også til at det er utfordrende å redusere utslippene fra luftfarten (Sims m.fl. 2014). En fullstendig vurdering av disse faller utenfor denne rapporten. Under ser vi imidlertid nærmere på kunnskapsstatus for to mulige tiltak; *ruteoptimalisering* og *alternative drivstoff*.

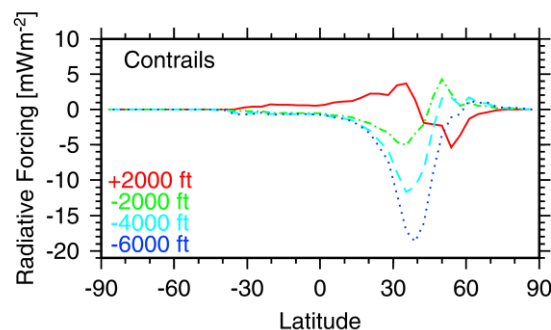


Figur 11: Prosjeksjoner for fremtidig CO₂ utslipp fra internasjonal luftfart og potensiale for utslippsreduksjoner med ulike tiltak. Utviklingen i utslipp er vist i forhold til mål satt for sektoren (blant annet to prosent effektivisering i drivstofforbruk og karbonnøytral vekst i 2020). Resultatene er vist under et hhv høyt (venstre) og lavt (høyre) scenario for trafikkvekst. Fra Lee m.fl. (2013).

4.1.1 Optimaliserte ruter

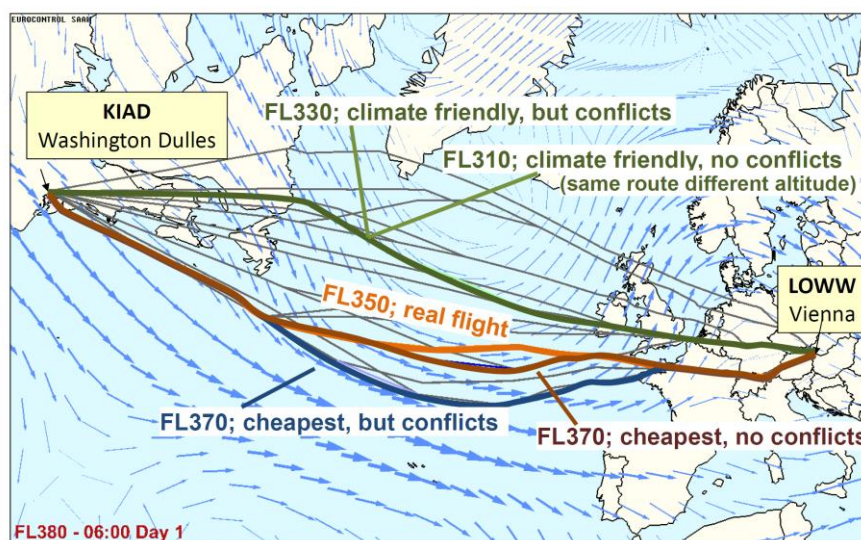
Den potensielt sterke oppvarmende effekten fra contrail-cirrus har ført til økende fokus på mulighetene for å fly utenfor områder med sannsynlighet for kondensstripedannelse og dermed redusere sektorens klimapåvirkning. Det er i hovedsak to måter som blir undersøkt: (i) midlertidig endre høyde uten å endre kurs og (ii) endre kurs i konstant høyde.

Den første metoden er attraktiv fordi de fysiske forholdene i atmosfæren som kreves for kondensstripedannelse (se kapittel 2.4) typisk forekommer i horisontale lag. I en studie fra 2012 modellerte Frömming m.fl. effekten på kondensstriper og ozonproduksjon av å flytte gjennomsnittlig cruisehøyde 2000 fot opp eller 2000, 4000 og 6000 fot ned. Figur 12 viser endring i sonalt og årlig midlet strålingspådriv fra kondensstriper i disse fire tilfellene. En lavere flyhøyde reduserer effekten, spesielt på midlere bredder hvor mesteparten av trafikken er. Globalt midlet ble strålingspådrivet 7 prosent høyere for +2000 fot og 50 prosent lavere for -6000 fot.



Figur 12: Endring i sonalt og årlig midlet strålingspådriv fra kondensstriper ved å fly 2000 fot høyere eller 2000, 4000 og 6000 fot lavere. Fra Frömming m.fl. 2012.

Den andre metoden ble studert i Irvine m.fl. (2012), som analyserte to tiår med meteorologiske data over Atlanteren. Basert på analysene ble et sett av typiske vær-situasjoner, samt sannsynligheten for kondensstripedannelse i ulike høyder i hver av disse situasjonene, identifisert. Disse resultatene ble brukt videre i beregninger av optimaliserte ruter i det nå avsluttede EU prosjektet Reducing Emissions from Aviation by Changing Trajectories for the benefit of Climate (REACT4C). Et av hovedresultatene fra REACT4C er utviklingen av et modellverktøy som kan beregne optimaliserte ruter for å minimere klimaeffekten ved hjelp av såkalte "climate cost functions". Metoden er beskrevet i Grewe m.fl. (2014) og et eksempel på hvordan en rute mellom Wien og Washington DC kan optimaliseres er gjengitt i figur 13.



Figur 13: Mulige ruter mellom Wien og Washington. Denne grønne linjen (FL310) viser den klima-optimaliserte ruten. Fra Grewe m.fl. (2014).

Begge metodene over har potensielle tilleggseffekter fordi ruteendringer kan medføre endringer i drivstofforbruket og dermed i CO₂-utslippene. I tillegg kan endringer i ruter påvirke klimaeffekten av både vanddamp og NO_x. Som nevnt i tidligere kapitler, har studier vist at strålingspådrivet fra både ozon og vanddamp blir redusert ved å fly lavere (Frömming m.fl. 2012, Søvde m.fl. 2014), mens det motsatte er tilfellet for CO₂ fordi en lavere flyhøyde gir høyere drivstofforbruk og utslipp.

Hvordan man skal vekte mulig økning i den langvarige oppvarming fra CO₂ mot reduksjon i kortlivet contrail-cirrus er et åpent og avgjørende spørsmål som har sammenheng med valg av tidshorisont (se kapittel 3). Dette er dessuten ikke et rent vitenskapelig spørsmål, men er knyttet til verdibaserte vurderinger av klimaeffekter på lang og kort sikt. To nyere studier har presentert mulige rammeverk for en slik vektning (Deuber m.fl. 2013, Irvine m.fl. 2014). Irvine m.fl. (2014) viser blant annet at små fly kan fly inntil fire ganger lenger for å unngå kondensstriper enn store fly før "straffen" i form av økte CO₂-utslipp blir tilsvarende stor. Begge studiene påpeker at resultatene er svært avhengig av valgt indikatorer for klimapåvirkning (dvs. strålingspådriv eller temperatur) og tidshorisont.

Hvor effektive metodene er avhenger videre av hvor godt vi kan varsle områder med overmetning og av den eksisterende usikkerheten i strålingspådrivet. Potensialet for å redusere klimaeffekten ved å endre ruter vil naturlig nok variere mellom ulike områder. For eksempel vil potensialet være mindre dersom flyvningene typisk skjer i områder med lavere sannsynlighet for kondensstripedannelse. I slike tilfeller blir det viktigere med tiltak for å redusere CO₂-utslippene dersom man ønsker å redusere klimapåvirkningen av sektoren.

4.1.2 Alternative drivstoff

Flere typer alternative drivstoff har blitt vurdert for bruk i luftfart. Flere petroleumsbaserte syntetiske drivstoff er godkjent og det forskes på nye muligheter i form av biodrivstoff.

Biodrivstoff som klimatiltak er komplisert og omdiskutert. Tradisjonelle antakelser om karbonnøytralitet (altså ingen netto CO₂-utslipp) har blitt vist å ikke holde for mange av dagens biomassetyper og teknologier (Searchinger m.fl. 2009). Spesielt skyldes dette store indirekte utslipp knyttet til produksjon av biodrivstoffet. Fremtidige generasjoner biodrivstoff, for eksempel basert på skogsavfall eller alger, forventes å ha lavere indirekte utslipp, men er i dag ikke i kommersiell produksjon. For at et biodrivstoff skal bli godkjent for bruk stilles strenge krav til bærekraftig produksjon, samt til hvilken reduksjon i drivhusgassutslipp som oppnås i forhold til fossile drivstoff.

Det er i tillegg viktig å huske at karbonnøytralitet ikke er det samme som klimanøytralitet. Dette gjelder ikke minst for luftfartssektoren med sin sterke klimapåvirkning via andre mekanismer enn CO₂. Man har foreløpig begrenset kunnskap om hvordan økt bruk av alternative drivstoff vil påvirke disse andre mekanismene, men nye målinger og eksperimenter kan gi mer innsikt de kommende årene.

De siste årene har det blitt gjennomført tester for å karakterisere utslipp av gasser og partikler fra forbrenning av blandinger med alternative drivstoff. I en ny studie oppsummerer Moore m.fl. (2015) resultater fra eksperimentene APEX (Aircraft Particle Emission Experiment), AAFEX (Alternative Aviation Fuel Experiment) og ACCESS (Alternative Fuel Effects on Contrails and Cruise Emissions). Til sammen 15 ulike typer drivstoff ble testet, inkludert ulike syntetiske petroleumsbaserte Fischer-Tropsch drivstoff, biodrivstoff fra animalske og vegetabiliske fettsyrer og blandinger av disse med standard fossilt drivstoff. Resultatene viser betydelige reduksjoner i utslipp av partikler i forhold til standard drivstoff, på grunn av generelt lavere innhold av svovel og aromater. En annen studie fant også reduserte utslipp av NO_x og CO (Timko m.fl. 2011).

Et viktig spørsmål er om reduserte utslipp av partikler fra et bytte til biodrivstoff kan redusere kondensstripedannelse og den påfølgende klimapåvirkningen. Nyere studier har vist at strålingspådrivet fra kondensstriper er svært avhengig av antallet ispartikler som i utgangspunktet dannes (Lewellen 2014), noe som igjen henger sammen med mengden partikler som flyet slipper ut. Dette gir en indikasjon på at endringer i drivstoff eller motorteknologi også kan spille en rolle for å redusere kondensstripedannelse. Det gjenstår imidlertid mer forskning for dette spørsmålet kan besvares.

4.2 Luftfart i et endret klima

I tillegg til å påvirke klima, er luftfarten til dels også sårbar for klimaendringene. Faktorer som økt temperatur, havnivåstigning, endringer i jetstrøm og nedbør og mer ekstremvær kan påvirke operasjon og planlegging både på bakken og i luften (ICAO 2010). En vurdering av denne sårbarheten er ikke del av denne rapporten. Men endringer i klima kan også endre sektorens klimapåvirkning, noe som så langt er studert i begrenset grad. Her ser vi nærmere på to nyere studier.

Vil sannsynligheten for kondensstripedannelse endre seg i et varmere klima? I en studie publisert i 2015 undersøkte Irvine og Shine hvordan frekvensen av områder hvor kriteriet for kondensstripedannelse er oppfylt kan endre seg dersom de menneskeskapte utslippene fortsetter å øke. Resultater fra fem globale klimamodeller ble analysert og sammenlignet. Disse modellene viste en økning i frekvensen på midlere og høye nordlige breddegrader (opp mot 5% mot slutten av århundret) og en reduksjon i tropene. Klimaendringer over det 21. århundret kan dermed ha betydning for potensiale for kondensstripedannelse. Den faktiske endringen vil naturligvis også avhenge av hvordan aktiviteten og teknologien i luftfarten utvikler seg.

En annen viktig faktor for flyvninger er vind. Karnauskas m.fl. (2015) påpeker at fremtidige klimaendringer kan komme til å endre jetstrømmene. Dersom slike endringer fører til totalt sett økt flytid og drivstofforbruk, har det betydning for klimapåvirkningen. Klimamodellene er imidlertid uenige i om og i hvilken grad endringer i jetstrømmene vil forekomme.

Generelt har man bedre kunnskap om og forståelse av fremtidig temperatur, nedbør og havnivåstigning enn av andre faktorer som vind, tordenvær og tåke (IPCC 2013, Wuebbles m.fl. 2014). Videre er dagens klimamodeller bedre på å simulere endringer i det globale klimaet eller klimaet over større områder, mens det er betydelig større usikkerhet i lokale klimaendringer og variasjoner på kortere tidsskala. Dette begrenser kunnskapen om hvordan luftfarten best kan planlegge for fremtidens klimaendringer.

5 Oppsummering

Luftfartens klimapåvirkning er sammensatt og komplisert. I tillegg til CO₂ er det en rekke andre utslipp fra fly som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Store deler av utslippene fra luftfart faller utenfor internasjonale rammeverk for utslippsreduksjoner. Kyoto-avtalen, som trådte i kraft i 2005, omfatter kun de nasjonale utslippene fra sektoren og bare drivhusgassene CO₂, CH₄, lystgass (N₂O), SF₆, NF₃, PFC og HFC. For å forstå den totale klimaeffekten fra flytrafikken er det imidlertid viktig å inkludere alle mekanismene som bidrar til klimapåvirkning.

Den kombinerte effekten av dannelse av kondensstriper og cirrusskyer har høyst sannsynlig gitt det største bidraget til oppvarmingen fra luftfart frem til i dag, fulgt av CO₂. Også produksjon av ozon på grunn av NO_x-utslipp gir viktig bidrag til oppvarming, mens de fleste typer partikler, samt reduksjon i mengden metan, gir avkjølende bidrag. Det er imidlertid viktig å bemerke at ozon, kondensstriper og endringer i cirrusskyer gir en mer kortvarig oppvarmende klimapåvirkning enn CO₂, noe som har betydning for den relative betydningen av ulike mekanismer over tid. Dersom man vil redusere flytrafikkens bidrag til global oppvarming på lang sikt, er det nødvendig å redusere CO₂-utslippene.

Kontinuerlig forskning over mange år har gitt økt forståelse av de ulike mekanismene for klimapåvirkning. Samtidig har nye spørsmål oppstått og det gjenstår usikkerhet knyttet til størrelsen på den samlede klimapåvirkningen fra sektoren. Spesielt stor usikkerhet er knyttet til indirekte effekter av utslipp av partikler fra fly, samt størrelsen på oppvarmingen fra kondensstriper og cirrusskyer. Per i dag er det ikke mulig å gi et beste estimat for den indirekte effekten av partikler fra luftfart.

Flere av mekanismene er svært avhengig av de meteorologiske og kjemiske forholdene i atmosfæren, og dermed av hvor flyvningene skjer. Spesielt gjelder dette produksjon av ozon og dannelse av kondensstriper. Norske innenriksflyvninger holder generelt lavere høyder enn langdistanseflyvninger over samme område. Analyser av meteorologiske data gjort for denne rapporten indikerer at innenriks aktivitet i større grad foregår i områder med lavere forekomst av de atmosfæriske forholdene som kreves for dannelse av vedvarende kondensstriper. For å tallfeste klimapåvirkningen som innenriks luftfart gir gjennom kondensstripedannelse kreves imidlertid detaljerte modellberegninger, da klimaeffekten avhenger av en rekke faktorer som tid på året og skyene optiske egenskaper. Slike modellberegninger er så langt ikke gjort.

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlivede effektene av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO₂-effekten alene. Såkalte

"multiplikatorer" er blitt introdusert for å angi størrelsen på disse tilleggseffektene i forhold til CO₂. Basert på en utregningsmetode (GWP) og et tidsperspektiv (100 år) som er konsistent med det som brukes i Kyotoprotokollen, gir beregninger gjort for denne rapporten en multiplikator på 1,8. Dette tallet er basert på middelveiden for estimert klimapåvirkning av dagens luftfarts fra nyere vitenskapelige publikasjoner og er i tråd med anslag fra tidligere litteratur. Usikkerheten i klimapåvirkningen fra andre mekanismer enn CO₂ påvirker imidlertid multiplikatoren. Noen studier finner betydelig høyere eller lavere verdier enn gjennomsnittet og dersom man benytter disse tallene varierer multiplikatoren fra 0,8 til 2,5 for GWP(100), noe som er et større spenn enn tidligere anslått. Dersom man benytter en utregningsmetode basert på global temperaturendring (GTP) og et kortere tidsperspektiv, blir multiplikatoren betydelig lavere. Det finnes ikke et entydig svar på hvordan en slik multiplikator skal beregnes da den er svært avhengig av tidsperspektivet og indikator for evaluering av klimapåvirkningen. Slike valg er ikke et rent vitenskapelig spørsmål, men er knyttet til verdibaserte vurderinger av klimaeffekter på lang og kort sikt.

Kilder

- Aamaas, B., m.fl.** (2015) Multimodel emission metrics for regional emissions of short lived climate forcers. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15(18):26089-26130
- Alduchov, O. A. og R.E. Eskridge** (1996) Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.*, 35:601-609
- ATAG** (2014) www.atag.org/facts-and-figures.html
- Appleman, H.** (1953) The formation of exhaust contrails by jet aircraft. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34:14 – 20.
- Balkanski, Y., m.fl.** (2010) Direct radiative effect of aerosols emitted by transport: from road, shipping and aviation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10:4477-4489
- Berntsen, T. og J. Fuglestad** (2008) Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *PNAS*, 105(49):19154-19159.
- Borken-Kleefeld, J., m.fl.** (2010) Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport. *Environmental Science & Technology*, 44(15):5700-5706
- Borken-Kleefeld, J., m.fl.** (2013) Mode, Load, And Specific Climate Impact from Passenger Trips. *Environmental Science & Technology*, 47(14):7608-7614
- Boucher, O., m.fl.** (2013) Clouds and Aerosols. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Brasseur, G.P., M. Gupta, m.fl.** (2015) Impact of aviation on climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. *Bulletin of the American Meteorological Society*, in press.
- Burkhardt, U. og B. Kärcher** (2011). Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* 1:54-58
- Chen, C.-C. og A. Gettelman** (2013) Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus. *Atmos. Chem. Phys.*, 13:12525-12536
- Chen, N. Y., m.fl.** (2013) Tradeoff between contrail reduction and emissions in United States national airspace, *J. Aircraft*, 49:1367-1375
- Collins, W.J. m.fl.** (2013) Global and regional temperature-change potentials for near-term climate forcers. *Atmos. Chem. Phys.*, 13(5):2471-2485
- Deuber, O., m.fl.** (2013) A physical metric-based framework for evaluating the climate trade-off between CO₂ and contrails—The case of lowering aircraft flight trajectories, *Environ. Sci. Policy* 25:176-185
- Duda, D.P., m.fl.** (2013) Estimation of 2006 Northern Hemisphere contrail coverage using MODIS data. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 612-617
- Dyoff, C., m.fl.** (2013) Comparison of ECMWF analysis and forecast humidity data with CARIBIC upper troposphere and lower stratosphere observations, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 141:833–844
- ECMWF** (2015) <https://software.ecmwf.int/wiki/display/OIFS/About+OpenIFS>.
- Frömming, C., m.fl.** (2012) Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude. *J. Geophys. Res.* 117, D19104
- Gettelman, A. og C. Chen** (2013) The climate impact of aviation aerosols, *Geophys. Res. Lett.* 40:2785–2789

- Grewe, V., m.fl.** (2014) Aircraft routing with minimal climate impact: the REACT4C climate cost function modelling approach (V1.0), *Geosci. Model Dev.*, 7175–201
- Holmes C.D., m.fl.** (2011) Uncertainties in climate assessment for the case of aviation NO. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(27):10997–11002
- Hoor P., m.fl.** (2009) The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY, *Atmos. Chem. Phys.*, 9:3113–3136
- IATA** (2014) www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2014-10-16-01.aspx
- ICAO** (2010). ICAO Environmental Report: Chapter 6 Adaptation.
- ICAO/ATAG** (2014). Aviation Action Plan. Tilgjengelig fra <http://aviationbenefits.org/newswire/2014/09/un-climate-summit-2014/>
- IPCC** (1999): Aviation and the Global Atmosphere
- IPCC** (2013) Summary for policy makers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Irvine, E. A., m.fl.** (2012) The dependence of contrail formation on the weather pattern and altitude in the North Atlantic. *Geophysical Research Letters* 39(12)
- Irvine, E. A., m.fl.** (2014) A simple framework for assessing the tradeoff between the climate impact of aviation carbon dioxide emissions and contrails for a single flight, *Environ. Res. Lett.* 9
- Irvine, E. A. og K. P. Shine** (2015) Ice supersaturation and the potential for contrail formation in a changing climate. *Earth Syst. Dynam.* 6(2):555–568.
- Karnauskas, K. B., m.fl.** (2015) Coupling between air travel and climate. *Nature Clim. Change*, in press
- Köhler, M.O., m.fl.** (2008) Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation, *J. Geophys. Res.*, 113, D11305
- Köhler, M.O., m.fl.** (2013) Latitudinal variation of the effect of aviation NO_x emissions on atmospheric ozone and methane and related climate metrics. *Atmospheric Environment* 64: 1–9
- Lamquin, N., m.fl.** (2009) Evaluation of upper tropospheric humidity forecasts from ECMWF using AIRS and CALIPSO data. *Atmos. Chem. Phys.*, 9:1779–1793
- Lee D. S., m.fl.** (2009) Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment* 43, 3520–3537.
- Lee, D.S., m.fl.** (2013) Bridging the aviation CO₂ emissions gap: why emissions trading is needed. Report, [http://www.cate.mmu.ac.uk/projects/bridging-the-aviation-CO₂-emissions-gap-why-emissions-trading-is-needed/](http://www.cate.mmu.ac.uk/projects/bridging-the-aviation-CO2-emissions-gap-why-emissions-trading-is-needed/)
- Lewellen, D.C.** (2014) Persistent contrails and contrail cirrus. Part ii: full lifetime behavior. *J. Atmos. Sci.* 71:4420–4438.
- Lian, m.fl.** (2007) Bærekraftig og samfunnsnyttig luftfart. TØI rapport 2007. toi.no/article19574-8.html
- Liu, X., m.fl.** (2009). Influence of anthropogenic sulfate and black carbon on upper tropospheric clouds in the NCAR CAM3 model coupled to the IMPACT global aerosol model, *J. Geophys. Res.*, 114, D03204
- Lund, M.T., Jan S. Fuglestad, Terje Berntsen** (2011) Luftfart og klima – En oppdatert oversikt over status for forskning på klimaeffekter av utslipp fra fly. CIENS rapport 3 – 2011.
- Minnis, P., m.fl.** (2013) Linear contrails and contrail cirrus properties determined from satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3220–3226
- Moore, R.H., m.fl.** (2015) Influence of Jet Fuel Composition on Aircraft Engine Emissions: A Synthesis of Aerosol Emissions Data from the NASA APEX, AAFEX, and ACCESS Missions, *Energy & Fuels* 29(4):2591–2600
- Myhre G., m.fl.** (2011) Radiative forcing due to changes in ozone and methane caused by the transport sectors. *Atmospheric Environment*, 45:387–394
- Myhre, G., m.fl.** (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Miljøstatus.no** (2015) www.miljostatus.no/Tema/Klima/Klimanorge/Kilder-til-utslipp-av-klimagasser/Transport/Flytrafikk/

- Olsen, S.C., m.fl.** (2013) Comparison of model estimates of the effects of aviation emissions on atmospheric ozone and methane. *Geophys. Res. Lett.* 40:6004–6009
- Penner J.E., m.fl.** (2009) Possible influence of anthropogenic aerosols on cirrus clouds and anthropogenic forcing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9:879-896
- Peters, G.P., m.fl.** (2011) The integrated global temperature change potential (iGTP) and relationships between emission metrics. *Environmental Research Letters* 6(4):044021
- Rädel, G. og K.P. Shine** (2010) Validating ECMWF forecasts for the occurrence of ice supersaturation using visual observations of persistent contrails and radiosonde measurements over England. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 136:1723–1732
- Righi, M., m.fl.** (2013) The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: simulations for year 2000 emissions, *Atmospheric Chemistry and Physics*. 13:9939-9970
- Sausen R., m.fl.** (2005) Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorol Z* 14:555–561
- Searchinger, T.D., m.fl.** (2009) Fixing a critical climate accounting error. *Science*, 326(5952):527-528
- Schumann, U.** (1996). On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorologische Zeitschrift*, 5:4 –23
- Schumann, U. og K. Graf** (2013) Aviation-induced cirrus and radiation changes at diurnal timescales. *J. Geophys. Res.*, 118, 18
- Shine, K.P., m.fl.** (2005) Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Climatic Change* 68(3):281-302
- Shine, K. P., m.fl.** (2015) Metrics for linking emissions of gases and aerosols to global precipitation changes, *Earth Syst. Dynam.*, 6:525-540
- Sims R., m.fl.** (2014) Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Skowron, A., m.fl.** (2013) The assessment of the impact of aviation NO_x on ozone and other radiative forcing responses – The importance of representing cruise altitudes accurately. *Atmospheric Environment* 74:159-168.
- Spangenberg, D.A., m.fl.** (2013) Contrail radiative forcing over the Northern Hemisphere from 2006 Aqua MODIS data. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 595-600
- Sridhar, B., m.fl.** (2013) Energy Efficient Contrail Mitigation Strategies for Reducing the Environmental Impact of Aviation, Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013), Chicago, IL, June 2013
- Søvde, O. A., m.fl.** (2014) Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multimodel estimate of aircraft NO_x emission impact on O₃ photochemistry, *Atmospheric Environment* 95, 468-47
- Timko, M.T., m.fl.** (2011) Combustion products of petroleum jet fuel, a Fischer–Tropsch synthetic fuel, and a biomass fatty acid methyl ester fuel for a gas turbine engine, *Combustion Science and Technology*, 183, 1039-1068
- Tompkins, A.M., m.fl.** (2007) Ice supersaturation in the ECMWF integrated forecast system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 133:53–63
- Wilcox, L.J., m.fl.** (2012) Radiative forcing due to aviation water vapour emissions. *Atmospheric Environment* 63:1-13
- Wilkerson, J.T., m.fl.** (2010) Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10:6391-6408
- Wong H.-W., m.fl.** (2013) Laboratory and modeling studies of the effects of water and soot emissions and ambient conditions on the properties of contrail ice particles in the jet regime. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 10049
- Wuebbles, D., m.fl.** (2014) CMIP5 climate model analyses: climate extremes in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95:571–583
- Zhou, C. og J.E. Penner** (2014) Aircraft soot indirect effect on large-scale cirrus clouds: Is the indirect forcing by aircraft soot positive or negative? *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119:11,303–11,320



CICERO (Center for International Climate and Environmental Research - Oslo)

CICERO (Center for International Climate and Environmental Research - Oslo) was established by the Norwegian government in 1990 as a policy research foundation associated with the University of Oslo. CICERO's research and information helps to keep the Norwegian public informed about developments in climate change and climate policy.

The complexity of climate and environment problems requires global solutions and international cooperation. CICERO's multi-disciplinary research in the areas of the natural sciences, economics and politics is needed to give policy-makers the best possible information on which to base decisions affecting the Earth's climate.

The research at CICERO concentrates on:

- Chemical processes in the atmosphere
- Impacts of climate change on human society and the natural environment caused by emissions of greenhouse gases
- Domestic and international climate policy instruments
- International negotiations on environmental agreements

CICERO (Center for International Climate and Environmental Research - Oslo)

P.O.Box 1129 Blindern, N-0318 Oslo, Norway

Visiting address: CIENS, Gaustadalléen 21, 0349 Oslo

Telephone: +47 22 85 87 50

E-mail: post@cicero.oslo.no www.cicero.uio.no

cicero.uio.no