



CIENS

Forskningssenter for miljø og samfunn

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

Prosjektleder Jan S. Fuglestad, CICERO

CIENS-rapport 3-2011



TEMPO

Transport og miljø

Tittel:

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

Forfattere:

Marianne T. Lund, CICERO
Terje Berntsen, UiO og CICERO
Jan S. Fuglestad, CICERO

CIENS-rapport:

3 - 2011

ISSN: 1890-4572

ISBN: 978-82-92935-08-8

Finansieringskilde:

Avinor og forskningsprosjektet TEMPO

Prosjektleder:

Jan S. Fuglestad, CICERO

Kvalitetsansvarlig:

Knut H. Alfsen, CICERO

Antall sider:

29

Pris:

250,-

Dato:

24. juni 2011

Emneord:

Luftfart
Klima
Strålingspådriv

Sammendrag:

I dag frakter omtrent 23 000 fly over 2,2 milliarder passasjerer årlig. På global basis står flytrafikken for omtrent 2-2,5 prosent av de totale menneskeskapte CO₂-utslippene. Sivil innenriks flytrafikk i Norge slapp ut 1,05 million tonn CO₂ i 2008, i følge rapportering til United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2011). Utslippene fra utenriks flytrafikk fra norske lufthavner var i 2008 i underkant av 1,2 millioner tonn CO₂ (National Inventory Report, 2010).

Luftfart er en sektor som har vært i vekst; i Norge har utslippene fra innenriks sivil luftfart økt med 55 prosent i perioden 1990 til 2008, og også globalt har utslippene økt. Det har vært en enda kraftigere økning i trafikken, men denne økningen har ikke vært jevn: Utviklingen er tett knyttet til den økonomiske utviklingen og reduksjon er observert i perioder med økonomisk nedgang. Ny teknologi og effektivisering av flymønstre har gjort flyene mer energieffektive, noe som har bidratt til å redusere utslippene, men det har ikke vært nok til å kompensere for den sterke veksten i trafikk. Dersom denne trenden fortsetter vil de totale utslippene fra luftfart øke videre.

I tillegg til CO₂ består utslipp fra fly av en rekke andre komponenter som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Dette er ikke unikt for luftfart, men gjelder også for andre sektorer. Påvirkningen er sammensatt og komplisert; noen mekanismer gir en avkjøling, andre en oppvarming. Noen effekter er regionale og har en geografisk (og døgnlig) variasjon i strålingspådrivet. Regionalt heterogene strålingspådriv kan potensielt endre temperatur- og trykkfordelingen i atmosfæren og dermed også sirkulasjonsmønstrene. De ulike utslippene har også svært varierende levetid i atmosfæren og påvirker dermed klimaet på forskjellig tidsskalaer. For en del av mekanismene som gir klimapåvirkning er de kjemiske og meteorologiske forholdene i atmosfæren avgjørende. Endringer i hvilke områder eller høyder flyene opererer i kan dermed føre til endringer i klimapåvirkningen.

Innhold

Innhold.....	2
Sammendrag for beslutningstakere.....	3
Utslipp og klimapåvirkning fra fly.....	3
Ulike tidsskalaer for klimapåvirkning	4
Spesifikk klimaeffekt	7
Kort oppsummert	8
Introduksjon	9
1. Utslipp og klimapåvirkning	10
1.1 Klimapådriv fra NOx-utslipp	11
1.2 Kondensstriper og cirrusskyer.....	14
2. Ulike tidsskalaer for klimapåvirkning	20
2.1 Spesifikk klimaeffekt.....	23
3. Luftfartens utvikling	25
4. Oppsummering.....	26
Kilder	27

Sammendrag for beslutningstakere

I dag frakter omtrent 23 000 fly over 2,2 milliarder passasjerer årlig. På global basis står flytrafikken for omtrent 2-2,5 prosent av de totale menneskeskapte CO₂-utslippene. Sivil innenriks flytrafikk i Norge slapp ut 1,05 million tonn CO₂ i 2008, i følge rapportering til United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2011). Utslippene fra utenriks flytrafikk fra norske lufthavner var i 2008 i underkant av 1,2 millioner tonn CO₂ (National Inventory Report, 2010). Luftfart er en sektor som har vært i vekst; i Norge har utslippene fra innenriks sivil luftfart økt med 55 prosent i perioden 1990 til 2008, og også globalt har utslippene økt. Det har vært en enda kraftigere økning i trafikken, men denne økningen har ikke vært jevn: Utviklingen er tett knyttet til den økonomiske utviklingen og reduksjon er observert i perioder med økonomisk nedgang. Ny teknologi og effektivisering av flymønstre har gjort flyene mer energieffektive, noe som har bidratt til å redusere utslippene, men det har ikke vært nok til å kompensere for den sterke veksten i trafikk. Dersom denne trenden fortsetter vil de totale utslippene fra luftfart øke videre.

I tillegg til CO₂ består utslipp fra fly av en rekke andre komponenter som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Dette er ikke unikt for luftfart, men gjelder også for andre sektorer. Påvirkningen er sammensatt og komplisert; noen mekanismer gir en avkjøling, andre en oppvarming. Noen effekter er regionale og har en geografisk (og døgnlig) variasjon i strålingspådrivet¹. Regionalt heterogene strålingspådriv kan potensielt endre temperatur- og trykkfordelingen i atmosfæren og dermed også sirkulasjonsmønstrene. De ulike utslippene har også svært varierende levetid i atmosfæren og påvirker dermed klimaet på forskjellig tidsskalaer. For en del av mekanismene som gir klimapåvirkning er de kjemiske og meteorologiske forholdene i atmosfæren avgjørende. Endringer i hvilke områder eller høyder flyene opererer i kan dermed føre til endringer i klimapåvirkningen. Dette er fokus i EU-prosjektet REACT4C² som skal undersøke hvorvidt alternative ruter og flyhøyder kan redusere klimapåvirkningen. Et hovedmål er å se på mulighetene for å ta hensyn til nettoklimaeffekter i operasjonelle rutiner for ruteplanlegging.

Utslipp og klimapåvirkning fra fly

Karbondioksid (CO₂) og vanndamp (H₂O) utgjør hoveddelen av utslippene fra fly. I tillegg kommer nitrogenoksider (NO_x), svoveldioksid (SO₂), karbonmonoksid (CO), hydrokarboner (HC) og partikler som organisk karbon (OC) og sot (Black Carbon, BC).

CO₂ og H₂O er begge viktige drivhusgasser. En økt mengde av disse fører til at mer varmestråling fra jorda fanges i atmosfæren og gir derfor en oppvarming. For flytrafikk er det CO₂ som gir den dominerende effekten fordi de naturlige kildene til vanndamp (fordampning fra overflaten) er dominerende. For flytrafikk i nedre deler av stratosfæren vil derimot utslippene av vanndamp ha en betydelig effekt pga. lave naturlige nivåer. Fly slipper også ut noe SO₂ (pga. svovelinnehold i drivstoffet) som via prosesser i atmosfæren danner sulfatpartikler. Disse partiklene reflekterer sollys og har en avkjølende effekt. Det samme gjelder OC. Sotpartikler absorberer derimot solstråling og fører til en oppvarming. Utslippene av SO₂, OC og sot fra flytrafikk er små og gir liten direkte klimaeffekt i forhold til andre komponenter.

¹ Strålingspådriv (radiative forcing) er definert som endring i energibalansen på toppen av atmosfæren pga. en endring i sammensetningen i atmosfæren. Brukes som mål på styrken på en forstyrrelse som kan gi klimaendring.

² REACT4C: www.react4c.eu/. Universitetet i Oslo og CICERO deltar i dette prosjektet.

NO_x, CO og HC gir ikke direkte påvirkning på klimaet, men indirekte effekter via kjemiske reaksjoner. Fra fly er det utslippet av NO_x som er viktig, da utslippene av CO og VOC er neglisjerbare pga. den effektive forbrenningen i flymotorer. Utslipp av NO_x fører til produksjon av ozon (O₃) i troposfæren og nedre stratosfære. Ozon er en betydelig drivhusgass og en økt mengde gir oppvarming. I tillegg fører NO_x til endring i atmosfærens oksidasjonskapasitet og dermed til en reduksjon av drivhusgassen metan (CH₄), noe som gir en avkjøling. Reduksjon i metan har også en virkning på ozon som kompliserer bildet ytterligere: Mindre metan betyr at det blir produsert mindre ozon, og dette har en avkjølende effekt. Netto klimaeffekt av NO_x-utslippene kan kvantifiseres ved at strålingspådrivet fra endringene i ozon og metan summeres.

I tillegg til å være en drivhusgass, er H₂O også viktig for dannelsen av kondensstriper. Når den varme vanddampen i eksosen slippes ut og blandes med tilstrekkelig kald luft, oppstår kondensasjon. Hvis forholdene i atmosfæren er riktige, dvs. at atmosfæren i utgangspunktet er overmettet mht. is, produseres iskrystaller som danner lange kondensstriper. Kondensstriper gir både oppvarmende og avkjølende effekter, men beregninger indikerer at netto global effekt er en oppvarming. Studier tyder imidlertid også på at kondensstriper gir mindre effektiv oppvarming enn CO₂ per enhet strålingspådriv (Ponater m.fl. (2005), Rap m.fl. (2010)), altså at de har en lavere "climate efficacy"³.

Etter en tid mister kondensstripene sin markerte linjeform, sprer seg utover og kan danne cirrusskyer. Dette er tynne skyer bestående hovedsakelig av iskrystaller. Kondensstripene og de påfølgende cirrusskyene omtales ofte med fellesbegrepet "contrail-cirrus". En ny studie av Burkhardt og Kärcher (2011) estimerer et positivt strålingspådriv på 37,5 mW/m² i 2002 relativt til pre-industriell tid for den kombinerte contrail-cirrus effekten. Til sammenligning har utslipp av CO₂ og NO_x fra luftfart gitt strålingspådriv på henholdsvis 25 mW/m² og 6 mW/m² i 2000 (Lee m.fl. (2009) og Myhre m.fl. (2011)). Det er imidlertid viktig å bemerke at contrail-cirrus og NO_x gir en mer kortvarig klimapåvirkning enn CO₂, noe som har betydning for den relative påvirkningen evaluert på lengre tidsskala. Når kondensstripene mister sin linjeform og utvikler seg til cirrusskyer, kan dannelsen av naturlige cirrusskyer forhindres. I den samme studien er denne reduksjonen i naturlig cirrus estimert å gi en negativ effekt på -7mW/m² som kompenserer for noe av oppvarmingen fra skydannelse pga. flytrafikk. Dette estimatet er imidlertid svært usikkert.

En studie indikerer at sotpartikler fra flytrafikk kan ha en påvirkning på stor-skala cirrusskyer ved at de virker som frysekjerner. Nettoeffekten av disse sotpartiklene er meget vanskelig å anslå og selv fortegnet er usikkert, men Penner m.fl. (2009) estimerte en avkjølende effekt på opptil -160 mW/m². Dannelsen av og påvirkningen på cirrusskyer pga. utslipp fra flytrafikk kan ha potensielt ha sterke klimaeffekter, men kunnskapen om dette er ufullstendig, og mer forskning gjenstår for å kunne kvantifisere størrelsen på effekten.

Ulike tidsskalaer for klimapåvirkning

Dagens (år 2005) strålingspådriv fra luftfart utgjør ca. 3,5 % (4,9 % inkludert cirrusskyer) av det totale menneskeskapte strålingspådrivet siden pre-industriell tid (Lee m.fl. 2009).

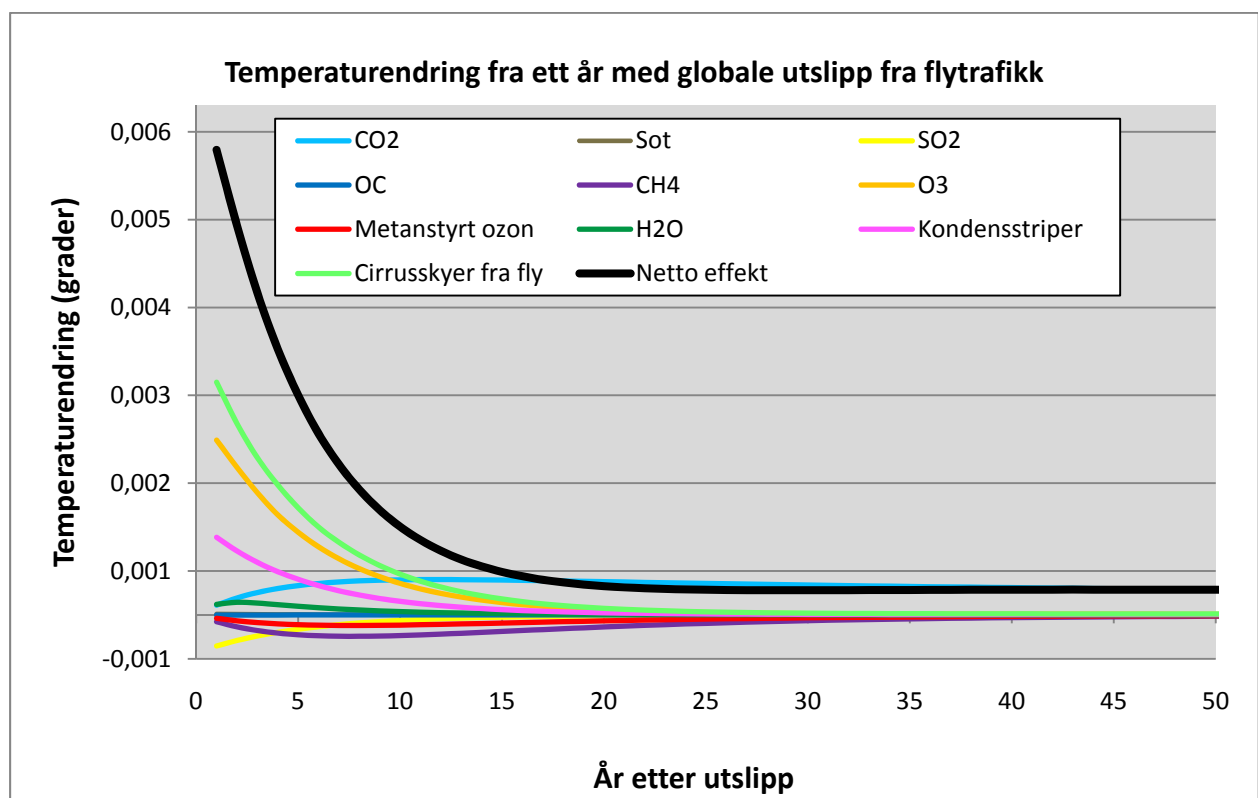
Strålingspådrivet fra de ulike komponentene fører til en endring i jordens bakketemperatur. I realiteten er det nødvendig med utslipp over tid for at det skal ha betydelig effekt på klima. Skeie m.fl. (2009) beregnet at utslipp fra flytrafikk fra 1940 bidro til 4 % av den totale

³ Begrepet "climate efficacy" uttrykker global temperaturendring per enhet strålingspådriv relativt til endringen fra CO₂.

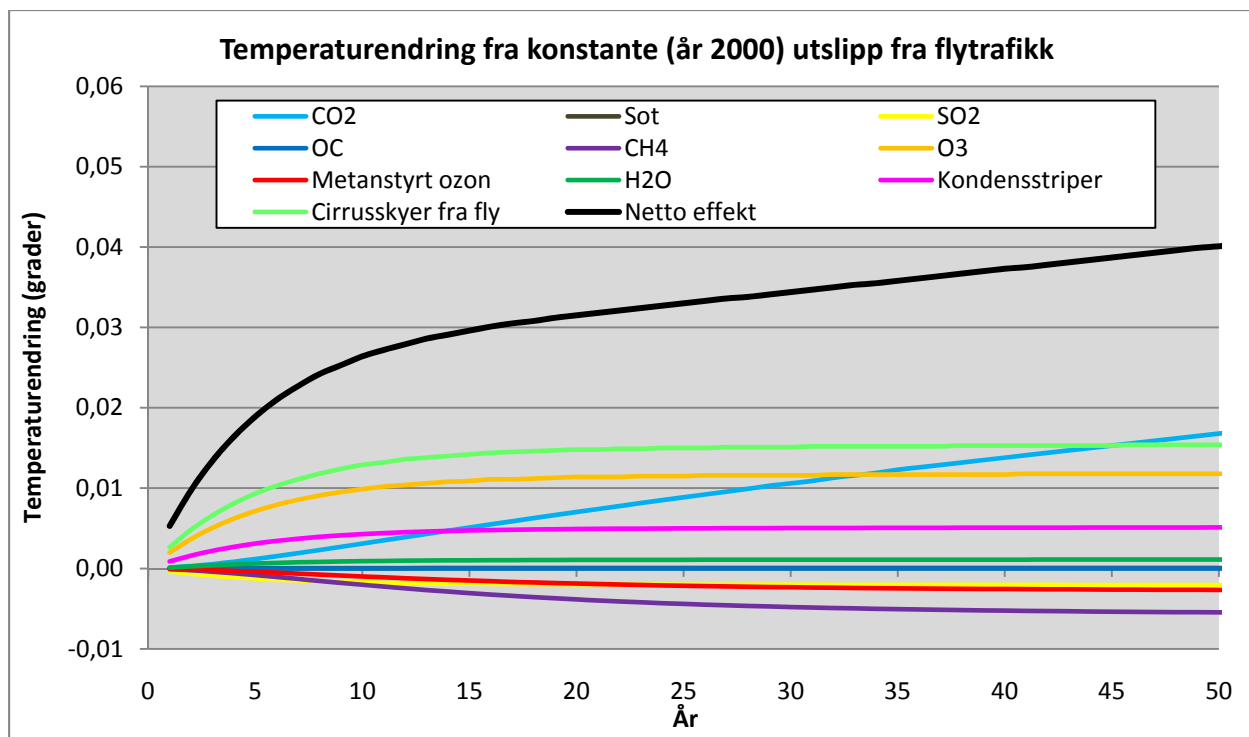
menneskeskapte oppvarmingen i år 2000. Dette er et tilbakeskuende perspektiv og er mindre relevant for utforming av tiltaksstrategier. Berntsen og Fuglestvedt (2008) beregnet effekten på den globale bakketemperaturen de neste 50 år for de ulike komponentene fra ett års globale utslipp fra luftfart, altså et fremoverskuende perspektiv, som vist i figur 1A. Dette illustrerer også hvor forskjellig tidsskala de ulike effektene har.

CO₂ har lang responstid og vil gi oppvarmende effekt i flere hundre år etter at den slippes ut. På lengre sikt er det derfor denne gassen som vil gi den største klimaeffekten av flytrafikk. Ozon, cirrusskyer og kondensstriper gir en mye sterkere oppvarming enn CO₂ de første årene etter utslipp, men på grunn av korte levetider reduseres temperaturendringene raskt, og etter 5-15 år er effekten mindre enn fra CO₂. Reduksjonen i CH₄ 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 er en oppvarming på kort sikt, men en avkjøling på lang sikt (20 år og mer) fordi oppvarmingen fra produksjon av O₃ er mer kortvarig enn avkjølingen fra reduksjon av metan. Felles for partiklene er en kortvarig klimapåvirkning på grunn av en levetid på bare noen dager.

I dette eksemplet er effektene av utslipp illustrert ved hjelp av pulser. I virkeligheten vil utslippene være kontinuerlige. CO₂ effekten vil da bygge seg opp, mens de kortlevede effektene når omtrent en likevekt, og vil således også ha stor effekt over tid. Dette er illustrert i figur 1B. Beregningene gir en netto temperaturendring på 0,05 grader etter 100 år med dagens (år 2000) utslipp.



Figur 1A. Temperaturendring [°C] fra flytrafikk (basert på Berntsen og Fuglestvedt (2008)) Beregningene er basert på ett års globale utslipp fra fly; etter dette antas ingen utslipp og man kan dermed studere utviklingen i global temperaturendringen over tid og se tidsskalaene for klimapåvirkningen. Komponenter med avkjølende effekt gir negativ temperaturendring.



Figur 1B. Temperaturendring [$^{\circ}\text{C}$] fra flytrafikk. Beregnet med konstante globale år 2000 utslipp fra fly. Figuren er basert på Berntsen og Fuglestvedt (2008).

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlevede effekter av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO_2 -effekten alene. Dette er bl.a. reflektert i såkalte "vektfaktorer" som er introdusert for å angi størrelsen på "tilleggs effektene". Slike vektfaktorer blir benyttet i ulike sammenhenger for å regne ut utslipp og klimaeffekt av flyturer og i klimakalkulatorer som benyttes ved kjøp av kompenserende kvoter. Basert på en utregningsmetode og et tidsperspektiv som er konsistent med det som brukes i Kyotoprotokollen, er det foreslått å bruke en vektfaktor på 1,2 – 1,8 (Lian m.fl., 2007). Nyere studier (Shine (2010) basert på Fuglestvedt m.fl. (2010)) gir justerte tall, men i samme intervall som Lian m.fl. (2007).

Det har vært diskutert hvordan vekt faktoren skal beregnes og hvilken verdi som skal brukes, da dette er svært avhengig av tidsperspektivet og indikator for evaluering av klimapåvirkningen, og av hvilke komponenter som inkluderes. Dette er illustrert i tabell 1, som viser en oppsummering av vekt faktorer for ulike antakelser om indikator, tidshorisont og effekter. Ved bruk av integrert strålingspådriv som indikator (slik som i Global Warming Potential, GWP) varierer vekt faktoren fra 4,9 til 1,1 avhengig av tidshorisont og antagelser om størrelsen på NO_x -effekten, samt hvorvidt effekten av luftfart på skyer (Aviation Induced Cloudiness - AIC) er inkludert. Hvis man derimot benytter temperaturendringen (slik som i Global Temperature change Potential, GTP) som indikator blir vekt faktoren betydelig lavere. Dette kommer av at de kortlevede effektene da vekt legges mindre enn for GWP siden klimasystemet "glemmer" effektene over tid. For tilfellet lav NO_x -effekt og ingen AIC, er faktoren til og med under 1.

I forskningsmiljøer brukes i dag vekt faktorer kun for å illustrere avhengighet av de ulike antakelsene, og det er flere grunner til å velge andre tilnærminger enn en fast faktor (se for eksempel Fuglestvedt m.fl. (2010), Forster m.fl. (2006) eller Forster m.fl. (2007)).

		GWP basert			GTP basert		
Tidshorisont		20	100	500	20	50	100
AIC inkl.	Høy NO _x	4.9	2.0	1.3	1.6	1.1	1.1
	Lav NO _x	4.4	1.9	1.3	1.1	0.9	1.1
AIC ekskl.	Høy NO _x	2.7	1.4	1.1	1.0	1.0	1.1
	Lav NO _x	2.2	1.3	1.1	0.4	0.7	1.0

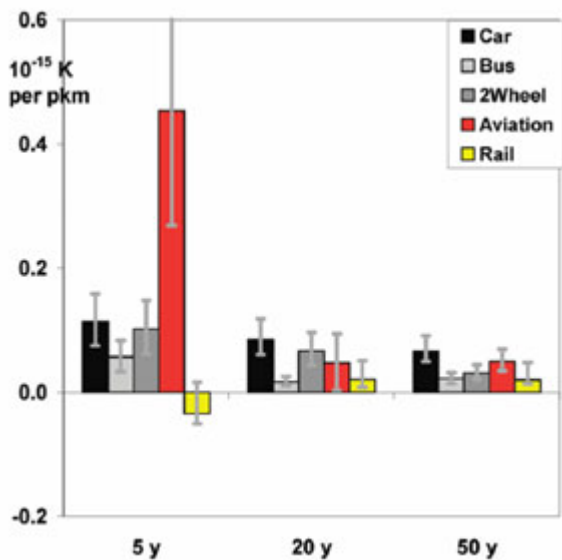
Tabell 1. Vektfaktorer for klimapåvirkningen fra luftfart (basert på Shine (2010)) for ulike valg av indikator (GWP eller GTP) og tidshorisonter mellom 20 og 500 år. Tabellen viser resultater med og uten effekten av kondensstriper og cirruskyer (Aviation Induced Cloudiness - AIC) og for høyt eller lavt estimat av effekten av NO_x.

For å redusere flytrafikkens bidrag til global oppvarming på lang sikt er det nødvendig å redusere CO₂-utslippene siden disse står for den mest langvarige oppvarmingseffekten. Hvis man derimot er interessert i å begrense hastigheten på oppvarmingen eller i oppvarmingen på kort sikt, blir også de andre komponentene viktige. Kyoto-avtalen, som trådte i kraft i 2005, gir tallfestede mål for reduksjon av klimagasser for en rekke industrialiserte land. Avtalen er basert på en tidshorisont på 100 år for klimapåvirkningen og benytter akkumulert strålingspådriv (gitt ved GWP-vektede utslipp), ikke temperaturendring, som indikator. For luftfart og skipsfart er et særtrekk i forbindelse med Kyoto-avtalen at den bare omfatter de nasjonale utslippene.

Utslippene fra utenrikstrafikk, derimot, skal reguleres gjennom FNs internasjonale luftfartsorganisasjon (ICAO) og sjøfartsorganisasjon (IMO). Videre gjelder det for alle sektorer at Kyoto-avtalen bare inkluderer de såkalt langlevende drivhusgassene (CO₂, CH₄, lystgass (N₂O), PFC og HFC). Som beskrevet over er det imidlertid en rekke andre komponenter i tillegg til CO₂ som er viktig for å forstå den totale klimapåvirkningen, fra luftfart.

Spesifikk klimaeffekt

For å rangere transportsektorene mht klimaeffekt kan man også se på den spesifikke klimapåvirkningen, dvs klimapåvirkning per transportarbeid. Dette er gjort for første gang for veitrafikk, tog, skipsfart og luftfart i en ny studie av Borken-Kleefeld m.fl. (2010). Her er klimaeffekten av person- og godstransport normalisert hhv per passasjer kilometer (pkm) og tonn kilometer (tkm). Figur 2 viser spesifikk klimapåvirkning av persontransport gitt ved endring i temperatur fra ett års utslipp fra veitrafikk, luftfart og tog ved tre ulike tidshorisonter, 5, 20 og 50 år. For persontransport er spesifikk klimapåvirkning fra flytrafikk på kort sikt klart størst på grunn av den sterke, men kortvarige oppvarmingen fra ozon, kondensstriper og cirruskyer. Etter 5 år er spesifikk effekt 4 ganger større enn for biler. På lengre sikt, når oppvarmingen domineres av CO₂, er derimot temperaturendringen per pkm høyere for reiser med bil enn for fly. Temperaturendringen per pkm er lavest for tog og buss. Den spesifikke klimaeffekten er avhengig av valgt indikator for klimaendring (temperaturendring eller akkumulert strålingspådriv) og tidshorisont, samt av utført transportarbeid. Resultatene i dette studiet er basert på globale gjennomsnittstall for passasjerbelegg. Særlig for biler er utslippet per pkm avhengig av belegg.



Figur 2. Sammenligning av temperaturendringen av ett års globale utslipp fra transportsektorene evaluert etter 5, 20 og 50 år. Temperaturendringen er gitt per passasjer kilometer (pkm) for persontransport. Basert på globale gjennomsnittstall for passasjerbelegg. Fra Borken-Kleefeld, Berntsen og Fuglestvedt (2010).

Kort oppsummert

Luftfart kan påvirke klimaet gjennom flere mekanismer og klimapåvirkningen er sammensatt og komplisert. I tillegg til CO₂, består utslipp fra fly av en rekke andre komponenter som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Dette gjelder også for andre sektorer. Med unntak av CO₂ dekker ikke Kyotoprotokollen de viktigste klimaeffektene fra luftfart.

I år 2000 bidro utslipp fra flytrafikk fra 1940 til rundt 4 % av den totale menneskeskapte oppvarmingen siden pre-industriell tid (Skeie m.fl. (2009)). Den samme studien beregner et bidrag på 4 – 8 % i år 2100 basert på ulike utslippsscenarioer for luftfart konsistent med scenariene fra FNs klimapanel. Den kombinerte effekten av kondensstriper og dannelsen av cirrusskyer har gitt det største bidraget til oppvarmingen. Det er i midlertid stor usikkerhet knyttet til disse mekanismene. Også produksjon av ozon pga. NO_x-utslipp og CO₂ gir viktige bidrag til oppvarmingen. Det er viktig å bemerke at ozon, kondensstriper og endringer i cirrusskyer gir en mer kortvarig klimapåvirkning enn CO₂, noe som har betydning for den relative fremtidige påvirkningen. For å redusere flytrafikkens bidrag til global oppvarming på lang sikt er det nødvendig å redusere CO₂-utslippene siden disse står for den mest langvarige oppvarmingseffekten.

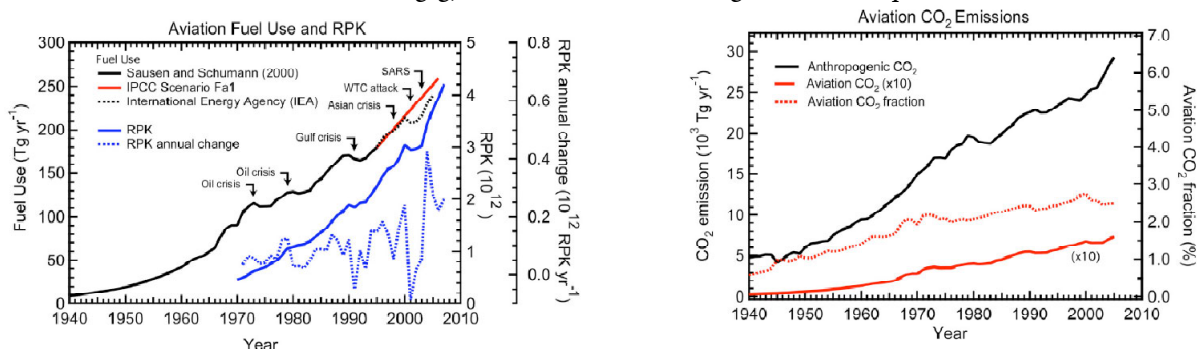
På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlevede effekter av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO₂-effekten alene. Såkalte "vektfaktorer" er blitt introdusert for å angi størrelsen på "tilleggseffektene". Basert på en utregningsmetode (GWP) og et tidsperspektiv (100 år) som er konsistent med det som brukes i Kyotoprotokollen, er det foreslått å bruke en vektfaktor på 1,2-1,8 (Lian m.fl. 2007). Nye studier gir tall av samme størrelse. Vekt faktoren er svært avhengig av tidsperspektivet og indikator for evaluering av klimapåvirkningen, og av hvilke komponenter som inkluderes. I forskningsmiljøer i dag brukes slike vekt faktorer gjerne for å illustrere avhengighet av de ulike antakelsene og andre tilnærminger kan velges.

Hvor utslippene skjer kan ha betydning for den påfølgende klimaeffekten og det forskes nå på hvorvidt alternative ruter og flyhøyder kan redusere klimapåvirkningen fra luftfart.

Introduksjon

I dag frakter omtrent 23000 fly over 2,2 milliarder passasjerer årlig (ACCRI, 2008). På global basis står flytrafikken for mellom 2 og 2,5 prosent av de totale menneskeskapte CO₂-utslippene (Figur 1). Innenriks flytrafikk i Norge slapp ut 1,05 million tonn CO₂ i 2008, i følge rapportering til United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2011). Utslippene fra utenriks flytrafikk fra norske lufthavner var i 2008 i underkant av 1,2 millioner tonn CO₂ (National Inventory Report, 2010).

I tillegg til CO₂ består utslipp fra fly av en rekke andre komponenter som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Dette er ikke unikt for luftfart, men gjelder også for andre sektorer. Påvirkningen er sammensatt og komplisert; noen mekanismer gir en avkjøling, andre en oppvarming. Noen effekter er regionale og har en geografisk og døgnlig variasjon i strålingspådrivet⁴. Regionalt heterogene strålingspådriv kan potensielt endre på temperatur- og trykkfordelingen i atmosfæren og dermed også på sirkulasjonsmønsteret. De ulike utslippene har også svært varierende levetid i atmosfæren og påvirker dermed klimaet på forskjellig tidsskala. For en del av mekanismene som gir klimapåvirkning er de kjemiske og meteorologiske forholdene i atmosfæren avgjørende. Endringer i hvilke områder eller høyder flyene opererer i kan dermed føre til endringer i klimapåvirkningen. Det er knyttet stor usikkerhet til flere av mekanismene, spesielt når det gjelder dannelsen av kondensstriper og cirrusskyer. Disse mekanismene kan potensielt ha sterke klimaeffekter, men mer forskning gjenstår for å kunne angi størrelsen på effekten.



Figur 1. Historisk utvikling i globalt drivstofforbruk og transportarbeid (passasjer kilometer) fra flytrafikk samt historiske utslipp av CO₂ utslipp totalt og fra flytrafikk. Fra Lee m.fl. (2009).

Et særtrekk i forbindelse med luftfart og skipsfart er at Kyoto-avtalen, som trådte i kraft i 2005 og gir tallfestede mål for reduksjon av klimagasser for en rekke industrialiserte land, bare omfatter deler av utslippene. For det første er bare de nasjonale utslippene fra disse sektorene med i reduksjonsmålene. Videre inkluderer Kyoto-avtalen bare de såkalt langtlevede drivhusgassene (CO₂, CH₄, lystgass (N₂O), SF₆, PFC og HFC). For å forstå den totale klimaeffekten fra flytrafikken er det imidlertid viktig og inkludere alle mekanismene som bidrar til strålingspådriv.

Dette notatet gir en oppsummering av de ulike utslippene fra flytrafikk og hvordan og i hvilken grad de påvirker klimaet. De nyeste resultatene fra forskningen, samt områder hvor mer forskning er nødvendig, er presentert. Videre diskuteres avhengigheten av netto klimaeffekt for en sektor av antakelser man gjør om utslipp, samt indikator og tidshorisont for evaluering av klimaeffekten.

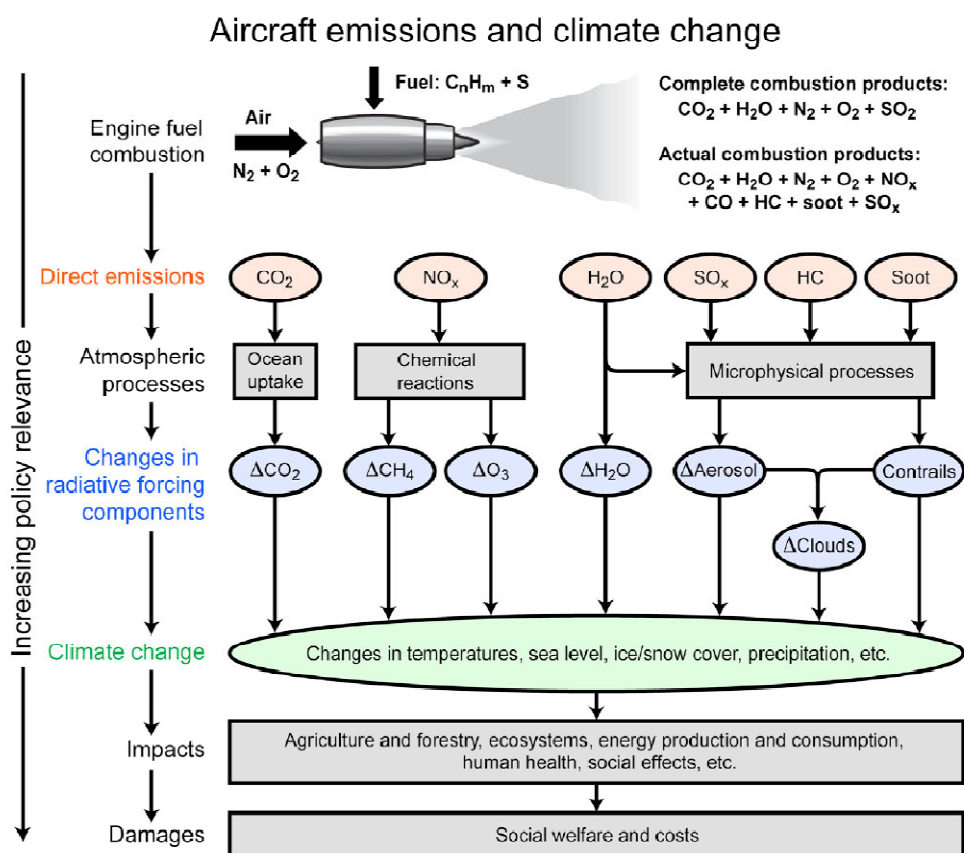
⁴ Strålingspådriv (radiative forcing) er definert som endring i energibalansen på toppen av atmosfæren pga. en endring i sammensetningen i atmosfæren. Brukes som et mål på styrken på en forstyrrelse som kan gi klimaendringer.

1. Utslipp og klimapåvirkning

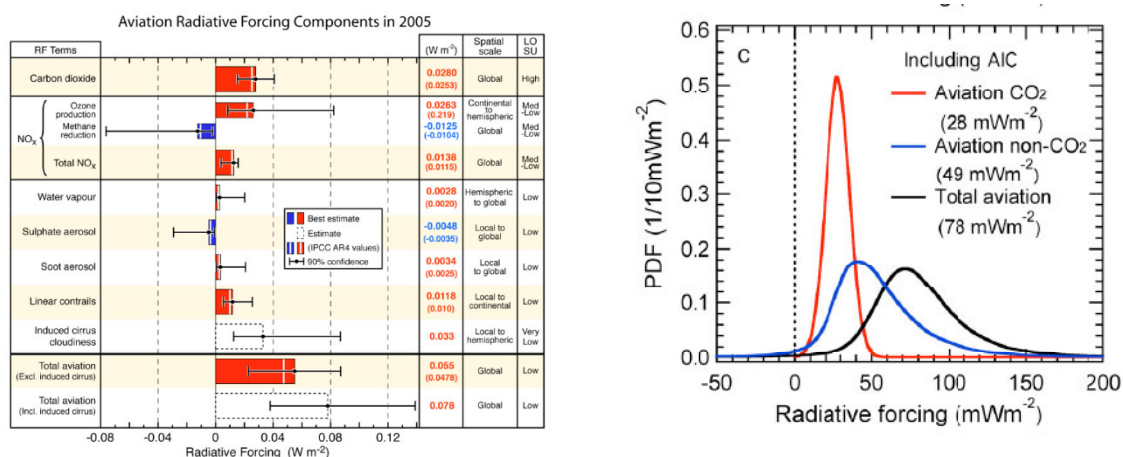
Karbondioksid (CO_2) og vanndamp (H_2O) utgjør hoveddelen av utslippene fra fly. I tillegg kommer nitrogenoksider (NO_x), svoveldioksid (SO_2), karbonmonoksid (CO), hydrokarboner (HC) og partikler som organisk karbon (OC) og sot (Black Carbon, BC). Figur 2 gir en skjematisk oversikt over potensielle klimaeffekter av utslipp fra flytrafikk.

CO_2 og H_2O er begge viktige drivhusgasser. En økt mengde av disse fører til at mer varmestråling fra jorda fanges i atmosfæren og gir derfor en oppvarming. For luftfart er det CO_2 som gir den dominerende effekten fordi de naturlige kildene til vanndamp (fordampning fra overflaten) er dominerende. For flytrafikk i nedre deler av stratosfæren vil derimot utslippene av vanndamp ha en betydelig effekt pga. lave naturlige nivåer. Fly slipper også ut noe SO_2 (pga. svovelinnhold i drivstoffet) som via prosesser i atmosfæren danner sulfatpartikler. Disse partiklene reflekterer sollys og har en avkjølende effekt. Det samme gjelder OC . Sotpartikler absorberer derimot solstråling og fører til en oppvarming. Utslippene av SO_2 , OC og sot fra flytrafikk er små og gir liten direkte klimaeffekt i forhold til andre komponenter.

Figur 3 viser estimert globalt strålingspådriv i 2005 pga. utslipp fra luftfart, inkludert anslag over usikkerheten. De største bidragene kommer fra CO_2 , produksjon av ozon pga. NO_x -utslipp og dannelse av kondensstriper og cirrusskyer, men med betydelig usikkerhet knyttet til estimatene. Totalt globalt strålingspådriv er estimert til $0,055 \text{ W/m}^2$ ($0,078 \text{ W/m}^2$ når effekten på cirrusskyer er inkludert). Dette utgjør 3,5 prosent (4,9 prosent inkludert cirrusskyer) av totalt menneskeskapt strålingspådriv siden pre-industriell tid (Lee m.fl., 2009).



Figur 2. Oversikt over hvordan ulike utslipp og prosesser pga. luftfart kan påvirke klima (fra Lee m.fl. (2009) basert på Fuglestad m.fl.(2003).

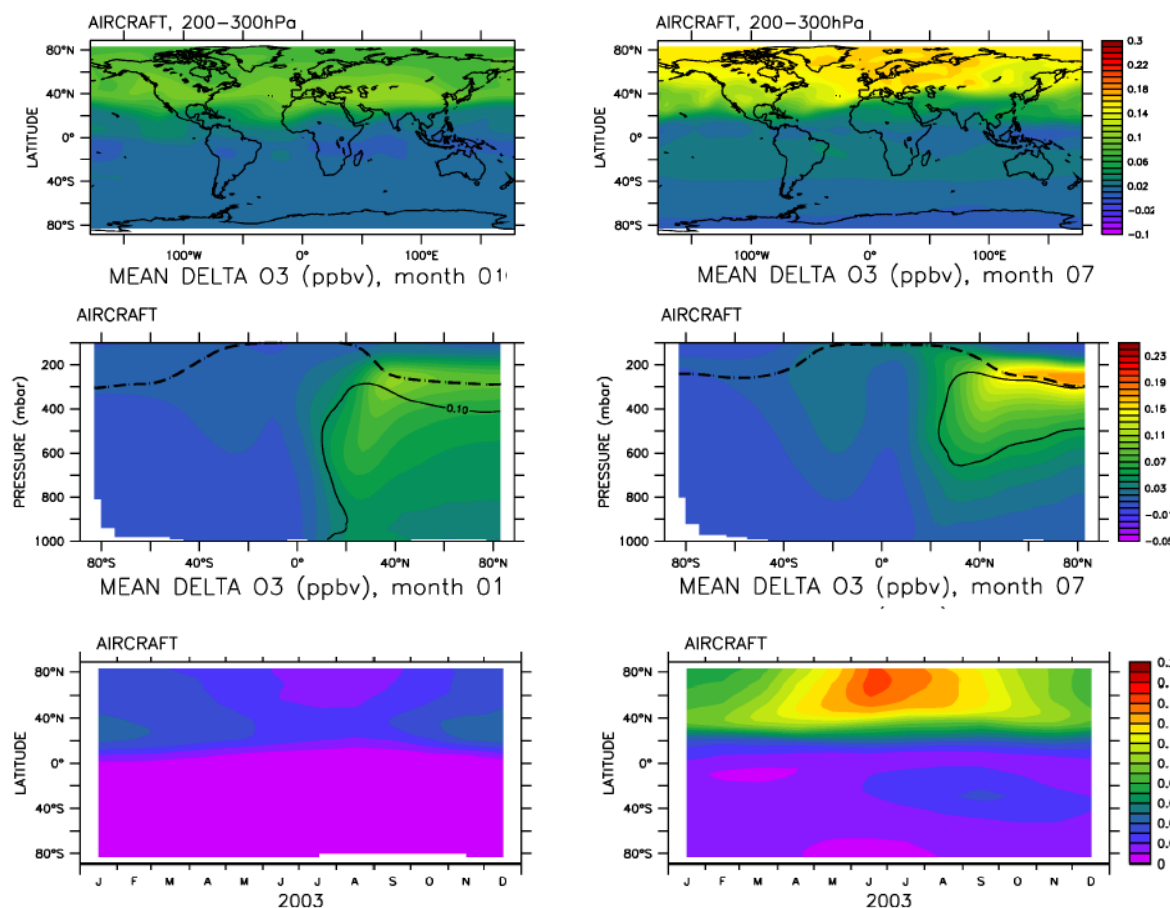


Figur 3. Estimert globalt strålingspådriv i 2005 pga. utslipp fra luftfart (for CO₂ er akkumulert effekt av alle historiske utslipp inkludert). Figuren til høyre viser et anslag over usikkerheten i det totale strålingspådrivet (inkludert økning i cirrusskyer) i form av sannsynlighetsfordeling. Fra Lee m.fl. (2009).

1.1 Klimapådriv fra NO_x-utslipp

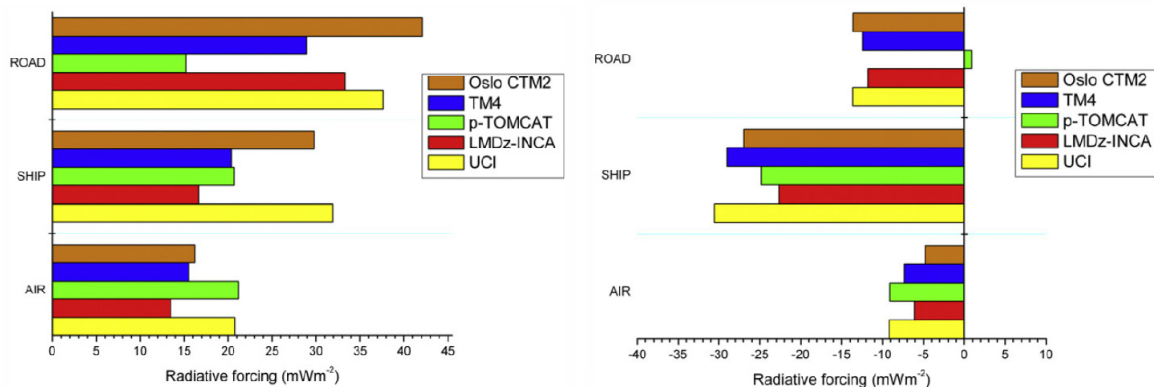
NO_x, CO og HC har ikke en direkte påvirkning på klimaet, men de har indirekte effekter via kjemiske reaksjoner. Fra fly er det utslippet av NO_x som er viktig, da utslippene av CO og VOC er neglisjerbare pga. den effektive forbrenningen i flymotorer. Utslipp av NO_x fører til produksjon av ozon (O₃) i troposfæren og nedre stratosfære. Ozon er en betydelig drivhusgass og en økt mengde gir oppvarming. I tillegg fører NO_x-utslipp til økning i atmosfærens oksidasjonskapasitet (ved at mengden av OH radikalet øker) noe som gir en reduksjon av drivhusgassen metan (CH₄), og dermed en avkjøling. Reduksjonen i metan har også en virkning på ozon som kompliserer bildet ytterligere: Mindre metan betyr at det blir produsert mindre ozon, og dette har en avkjølede effekt. I EU-prosjektet QUANTIFY (www.ip-quantify.eu), der både UiO og CICERO er med, har det blitt gjort omfattende modellberegninger av effektene av utslipp av ozonforløpere (NO_x, CO og VOC) fra ulike transporttyper (skipsfart, luftfart og veitrafikk). Konsentrasjonsendringer og strålingspådriv på grunn av totale globale utslipp fra de ulike sektorene har blitt beregnet med 5 forskjellige kjemi/transport modeller (CTM modeller) og resultatene er publisert i en artikkel av Hoor m.fl. i 2009. Noen sentrale resultater er gjengitt nedenfor. Figur 4 viser endringer i ozonkonsentrasjonene ved en 5 prosent endring i utslipp fra flytrafikk for hhv. juli og januar. De to øverste plottene viser konsentrasjonsendringene i cruise høyde (9-12 km), mens de to midterste viser endringene midlet sonalt øst-vest. De to nederste plottene viser sesongvariasjonen i midlede konsentrasjoner i en vertikal søyle fra hhv. bakken til ca. 2 km høyde (til venstre) og i toppen av troposfæren (9-12 km). Følsomhetstester har vist at responsen er nokså lineær, dvs. at totaleffekten er tilnærmet lik 20 ganger så stor som vist på figurene. De største økningene finner vi i øvre troposfære/nedre stratosfære (ØTNS) området om våren og sommeren nord for ca. 30°N.

Netto klimaeffekt av NO_x-utslippene kan kvantifiseres ved at strålingspådrivet på grunn av endringene ozon og metan summeres. Figur 5 (Myhre m.fl., 2011) viser det globale, årlige strålingspådrivet fra hhv. veitrafikk, skip og fly for ozon og metan separat basert på resultatene fra de 5 kjemi/transport modellene. Mens skip gir et netto negativt strålingspådriv, gir alle disse 5 modellene et netto positivt (oppvarmende) strålingspådriv fra luftfart og veitrafikk. Netto strålingspådriv midlet over modellene (og inkludert effekten av metan på ozon og stratosfærisk vanndamp) er 0,016, -0,018 og 0,006 W/m² for hhv. veitrafikk, skipsfart og luftfart. Siden netto pådrivet er en differanse mellom to store tall (i forhold til nettoen) er det naturlig nok betydelig usikkerhet i nettotallet.

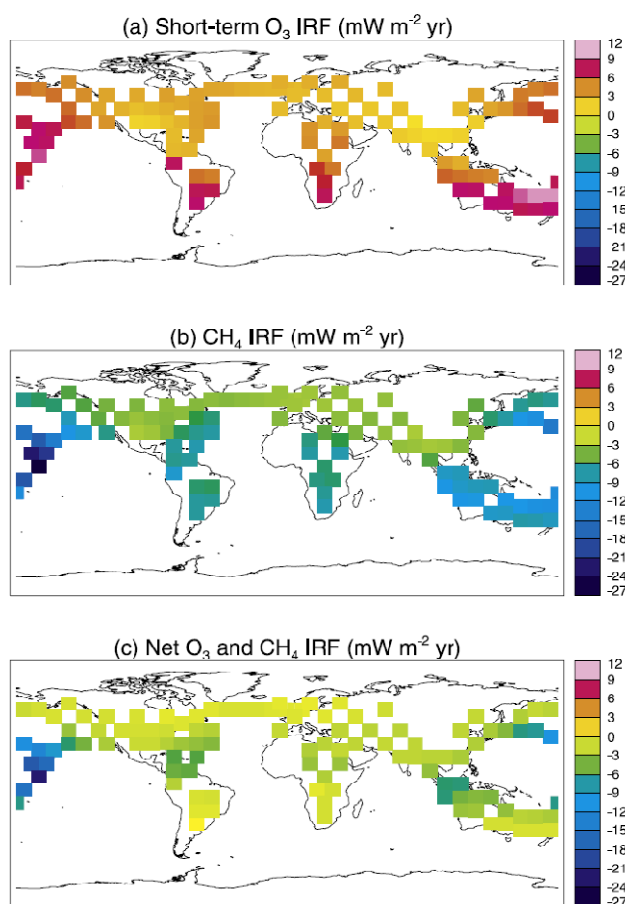


Figur 4. Modellerte endringer i ozon (i januar og juli) i atmosfæren (ppbv) ved 5 prosent økning i utslipp av NO_x fra luftfart i år 2000 (basert på totalutslipp på 0,67 Tg(N)/yr). Beregningen er middelerdien for resultatene fra 5 kjemi/transport modeller som deltar i EU prosjektet QUANTIFY (www.ip-quantify.eu/). Dette inkluderer OsloCTM2 modellen fra Universitetet i Oslo. De to nederste panelene viser månedlig effekt i hhv. nedre troposfære (under 4 km) til venstre og i cruise høyde. Figuren er hentet fra Hoor m.fl. (2009).

Man har altså oppvarmende og avkjølende effekter av NO_x-utslipp, og teoretiske betraktninger og modellstudier tyder på at nettoeffekten er avhengig av tid og sted for utslippene. Stevenson og Derwent (2009) har gjort en omfattende studie der mer enn 100 modellkjøringer med utslipp i ulike geografiske områder er studert, se Figur 6. Modellen som Stevenson og Derwent har brukt er ikke med blant de 5 modellene i QUANTIFY. Alle beregningene er gjort for utslipp i juli måned. De finner at det er betydelige forskjeller i både ozon- og metan-effekten avhengig av hvor utslippene skjer, men at størrelsen på effektene er korrelert slik at hvis et utslipp i et gitt område gir stor ozoneffekt gir utslippet der også en stor effekt på metan. Dette stemmer godt overens med tidligere beregninger for andre kilder (Fuglestad m.fl., 1999; Berntsen og Isaksen, 1999). Generelt antyder resultatene fra Stevenson og Derwent at både ozon- og metan-effekten er størst i tropene og på sydlige halvkule, men dette kan være en følge av at de bare har sett på utslipp i juli måned (Figur 6). For å studere effekten av utslipp på høye breddegrader mer spesifikt vil det være ønskelig å gjøre en tilsvarende studie for utslipp på høye bredder og for flere årstider.



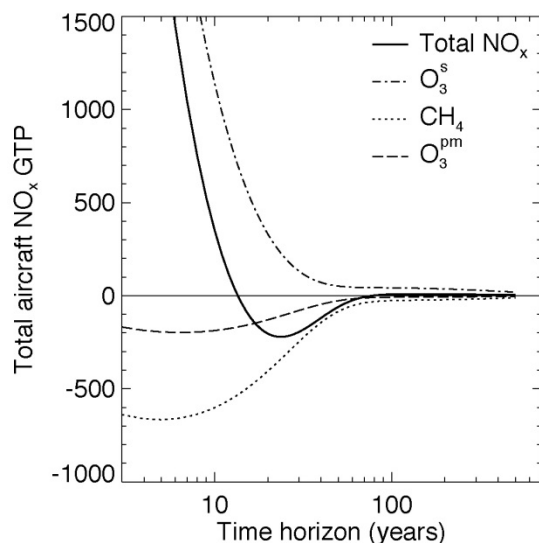
Figur 5. Globalt, årlig midlet strålingspådriv i år 2000 [mW/m^2] for O_3 (til venstre) og CH_4 (til høyre) for veitrafikk, skipsfart og luftfart basert på resultatene fra 5 kjemi/transport modeller. Fra Myhre m.fl. (2011).



Figur 6. Beregnet globalt strålingspådriv for utslipp av NO_x fra flytrafikk i ulike gridceller (markerte kvadrat på figuren). De markerte kvadratiske rutene på figuren viser hvor utslippet skjer (for hver separate modellberegning), mens fargen indikerer styrken på globalt integrert strålingspådriv som følge av utslippet i denne gridcellen. Strålingspådrivet er summert fra tidspunktet for utslipp opp til 100 år, derav IRF (integrated radiative forcing). Figuren viser bidraget fra ozonøkning (positivt pådriv), fra metan (negative pådriv) og nettoeffekten av både ozon og metan. Fra Stevenson og Derwent (2009).

I EU-prosjektet ATTICA (www.ssa-attica.eu) er det sammenstilt resultater fra en rekke ulike beregninger i litteraturen, og klimaeffektene fra ulike komponenter i utslippene fra fly er fremstilt som Global Warming Potentials (GWP) og Global Temperature change Potential (GTP) (Fuglestad m.fl., 2010). Hvilken av disse indikatorene og hvilken tidshorisont som benyttes har stor betydning for beregnet nettoeffekt av NO_x . I tillegg finner man at resultatene viser stor spredning mellom de ulike modellene. Figur 7 viser hvordan GTP for NO_x fra fly varierer over tid basert på en studie av Wild m.fl. (2001). På kort sikt har NO_x en sterk oppvarmingseffekt, men over tid skifter denne fortegn og gir avkjøling for deretter å gå mot null. GWP og GTP verdiene for NO_x fra fly ble oppdatert i Myhre m.fl. (2011) og er vist i

Tabell 1 under. I tillegg til stor variasjon avhengig av tidshorisont, er det stor spredning i resultatene fra de ulike modellene.



Figur 7. Global Temperature change Potential (GTP) for ett års utslipp av NO_x fra flytrafikk som funksjon av tid etter utslippet. (NB: Logaritmisk skala på den horisontale aksen). (Fuglestad m.fl., 2010)

Table 5

Global Warming Potentials (GWP) and Global Temperature change Potentials (GTP) for year 2000 AIR NO_x emissions (a) GWP values for one-year pulse emissions of NO_x for a 20, 100 and 500 year time horizons and (b) GTP values for 20, 50 and 100 years. The first three numbers show the individual contributions from the short-lived O₃, the CH₄-induced O₃ and the CH₄ (which includes stratospheric water vapour changes), respectively; the net GWP and GTP are shown in bold. The mean values use the multi-model means of the specific forcings (Table 4) and lifetimes (Table 3). All numbers are rounded, so that the net values may not be the sum of numbers as they are presented here. All values are on a per kg N basis and are relative to CO₂. The GTP values are specific to a given value of climate sensitivity – see text for details.

(a) GWP	H = 20	H = 100	H = 500
Oslo CTM2	785 – 115 – 333 = 338	223 – 41 – 116 = 67	68 – 12 – 5 = 20
IM4	753 – 170 – 490 = 92	214 – 61 – 174 = –21	65 – 19 – 53 = –6.3
p-TOMCAT	1028 – 209 – 601 = 218	292 – 78 – 221 = –6.3	89 – 24 – 67 = –2.0
LMDz-INCA	656 – 142 – 411 = 103	186 – 52 – 148 = –14	57 – 16 – 45 = –4.2
UCI	1008 – 226 – 654 = 128	287 – 78 – 223 = –15	87 – 24 – 68 = –4.5
Mean	846 – 173 – 496 = 177	241 – 62 – 176 = 2.7	73 – 19 – 54 = 0.8
Range of net	92 to 338	–21 to 67	–6.3 to 20
Fuglestad et al. (2010) range of net	120 to 470	–2.1 to 71	–0.7 to 22
(b) GTP	H = 20	H = 50	H = 100
Oslo CTM2	248 – 271 – 97 = –121	39 – 55 – 20 = –37	32 – 18 – 6.2 = 7.9
IM4	238 – 406 – 145 = –313	37 – 87 – 31 = –81	30 – 27 – 9.4 = –5.6
p-TOMCAT	324 – 510 – 183 = –369	51 – 122 – 44 = –115	41 – 35 – 12.3 = –5.8
LMDz-INCA	206 – 343 – 123 = –259	32 – 78 – 28 = –74	26 – 23 – 8.1 = –4.7
UCI	318 – 526 – 188 = –396	50 – 100 – 36 = –86	41 – 34 – 11.7 = –4.6
Mean	267 – 412 – 147 = –292	42 – 88 – 32 = –79	34 – 27 – 9.5 = –4.1
Range of net	–396 to –121	–115 to –37	–5.8 to 7.9
Fuglestad et al. (2010) range of net	–590 to –200	–210 to –59	–9.5 to 7.6

Tabell 1. Global Warming Potentials (GWP) og Global Temperature change Potential (GTP) for år 2000 utslipp av NO_x fra flytrafikk gitt for 3 ulike tidshorisonter. Fra Myhre m.fl. (2011).

1.2 Kondensstriper og cirrusskyer

I tillegg til å være en drivhusgass, er vanndamp (H₂O) også viktig som en forløper til kondensstriper (contrails). Kondensstripene dannes når den varme eksosgassen med et høyt innhold av vanndamp slippes ut og blandes med tilstrekkelig kald luft slik at det oppstår kondensasjon. Under spesielle forhold kan atmosfæren være overmettet mht is uten at det er dannet iskrystaller fordi det mangler små partikler som kan virke som såkalte frysekjerner. Hvis forholdene i atmosfæren er slik, dannes iskrystaller og stripene blir persistente. Kondensstriper gir både oppvarmende og avkjølende effekter, men beregninger indikerer at netto klimaeffekt er en oppvarming (IPCC, 1999, Lee m.fl., 2010).

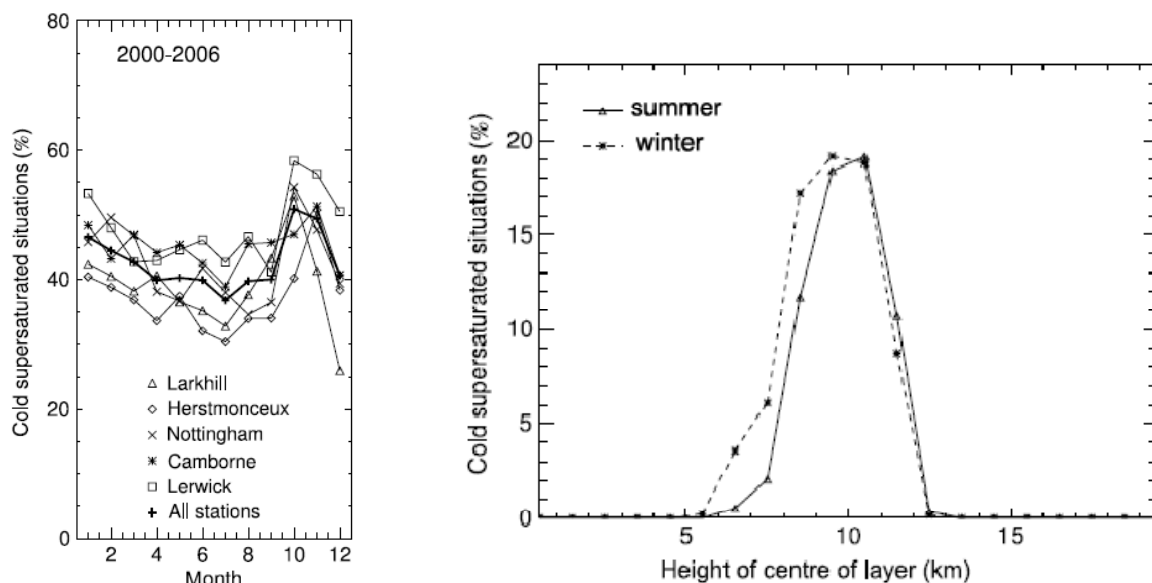
Etter en tid mister kondensstripene sin markerte linjeform, sprer seg utover og kan danne cirrusskyer. Dette er tynne skyer bestående hovedsakelig av iskrystaller. Kondensstripene og de

påfølgende cirrusskyene omtales ofte med fellesbegrepet “contrail-cirrus”. Flytrafikken kan også bidra til dannelse av cirrusskyer ved utslipp av partikler eller gasser som danner partikler. Disse mekanismene kan potensielt ha sterke klimaeffekter, men kunnskapen om dette er ufullstendig, og mer forskning gjenstår for å kunne angi størrelsen på effekten. Usikkerheten kommer av flere faktorer: Hvor vanlig er tilfellene av overmetning mhp is, hvor lenge varer en slik cirrus sky, hvordan påvirkes naturlige cirrusskyer, hvordan er balansen mellom oppvarmende og avkjølende effekter og hvordan er den geografiske og sesongmessige variasjonen i disse faktorene?

Cirrusskyer (tynne isskyer høyt oppe i troposfæren) gir et strålingspådriv ved at mer solstråling reflekteres (avkjølingseffekt) og ved at langbølget varmestråling fra bakken absorberes og sendes ut igjen tilbake mot bakken (en drivhuseffekt som bidrar til oppvarming). Fordi dette er høye skyer, med betydelig lavere temperatur enn bakken, vil den oppvarmende effekten dominere. Globale estimer av netto strålingspådrivet fra AIC (Aviation Induced Cloudiness) er på om lag $0,03 \text{ W/m}^2$, med en betydelig usikkerhet (se Figur 3). En ny studie av Burkhardt og Kärcher (2011) estimerer et positivt strålingspådriv på $0,038 \text{ W/m}^2$ i 2002 relativt til pre-industriell tid for den kombinerte contrail-cirrus effekten. Når kondensstripene mister sin linjeform og utvikler seg til cirrusskyer, kan dannelsen av naturlige cirrusskyer forhindres. I den samme studien er denne reduksjonen i naturlig cirrus estimert å gi en negativ effekt på $-0,007 \text{ W/m}^2$ som kompenserer for noe av oppvarmingen fra skydannelse pga flytrafikk. Dette estimatet er imidlertid svært usikkert. Til sammenligning har utslipp av CO_2 og NO_x fra luftfart gitt strålingspådriv på henholdsvis $0,025 \text{ W/m}^2$ og $0,006 \text{ W/m}^2$ (Lee m.fl. (2009) og Myhre m.fl. (2011)). Det er imidlertid viktig å bemerke at contrail-cirrus og NO_x gir en mer kortvarig klimapåvirkning enn CO_2 , noe som har betydning for den relative påvirkningen evaluert på lengre tidsskala.

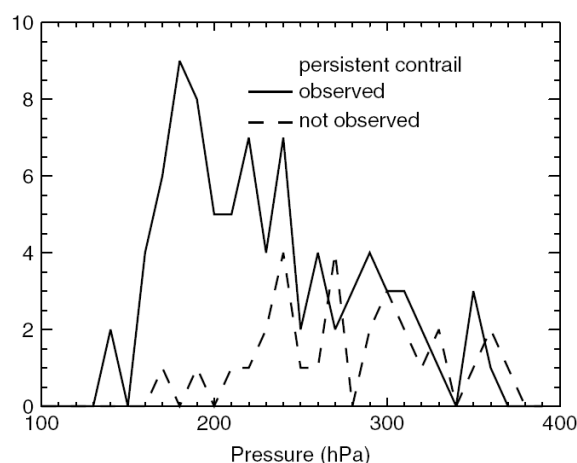
Fordi cirrusskyer både reflekterer solstråling og har en drivhuseffekt vil tiden på døgnet eller året være viktig for klimaeffekten av disse mekanismene (Stuber m.fl., 2006). Dannes de om natten (eller i polarnatten på høye bredder) vil den avkjølende effekten være null og oppvarmingen kan bli betydelig. Likeledes vil cirrusskyer som dannes over overflater som allerede reflekterer solstråling godt (for eksempel snø og is) gi en større oppvarming. Skyer over mørke overflater, som for eksempel hav, vil øke refleksjonen av innkommende solstråling.

Dannelse av kondensstriper og cirrusskyer er avhengig av temperaturen og fuktigheten i lufta og dermed av hvilken høyde flyene holder. I forhold til klimaeffekten er det de tilfellene der forholdene er slik at kondensstripene ikke umiddelbart fordamper igjen, men blir persistente som er av betydning. Det har vist seg at det er ved forhold der luften er kald ($T < -40^\circ\text{C}$) og overmettet mht. is (relativ fuktighet i forhold til is, $\text{RH}_{\text{is}} > 100\%$) som gir persistente kondensstriper. Figur 8 viser hvor ofte det er slike forhold i atmosfæren, og i hvilke høyder man kan regne med å finne disse lagene.



Figur 8. Observasjoner fra engelske stasjoner (basert på meteorologiske sonde målinger) av (til venstre) frekvens av tilfeller der det er minst et lag i vertikalen som er overmettet mht. is og der $T < -40^{\circ}\text{C}$. Figuren til høyre viser høydefordeling av de overmettede lagene. Fra Rädcl og Shine (2007).

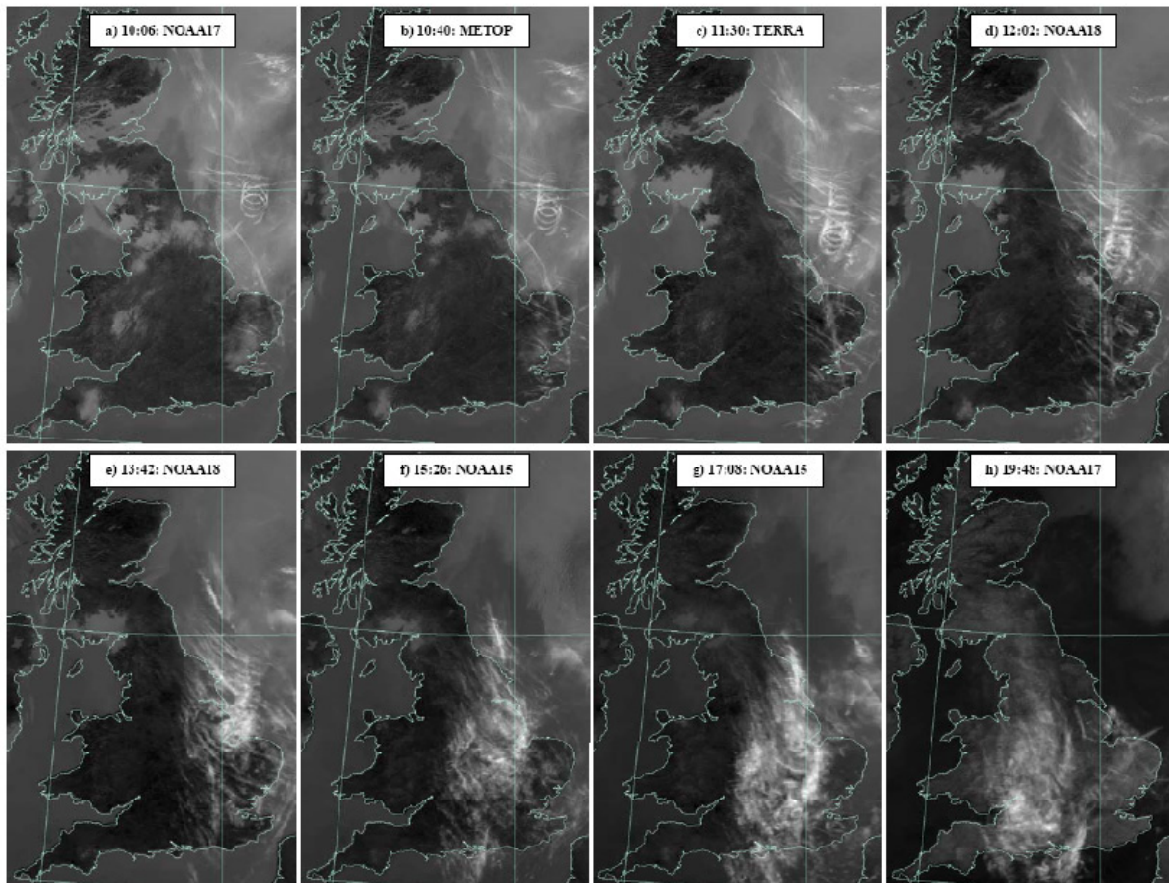
Rädcl og Shine (2007) gjorde også visuelle observasjoner av persistente kondensstriper fra Reading samtidig (± 1 time) som sondeoppstigningen fra Larkhill i nærheten. Figur 9 viser antall tilfeller der gunstige forhold ble identifisert ($T < -40^{\circ}\text{C}$ og $\text{RH}_{\text{is}} > 100\%$) i en gitt høyde og det ble observert persistente kondensstriper (heltrukken linje) eller ikke observert persistente kondensstriper (stiplet linje). Vi ser at mellom 250 og 150 hPa ble det nesten bestandig observert persistente kondensstriper fra fly når forholdene skulle være gunstige. Dette tyder på at kriteriet ($T < -40^{\circ}\text{C}$ og $\text{RH}_{\text{is}} > 100\%$) kan brukes for å identifisere områder der en flyvning vil kunne gi persistente kondensstriper.



Figur 9. Observerte tilfeller der sondeoppstigninger fra Larkhill identifiserte gunstige forhold for persistente kondensstriper, og det samtidig ble (heltrukken linje) eller ikke ble (stiplet linje) observert persistente kondensstriper fra fly i Reading innenfor et tidsrom på ± 1 time. Fra Rädcl og Shine (2007).

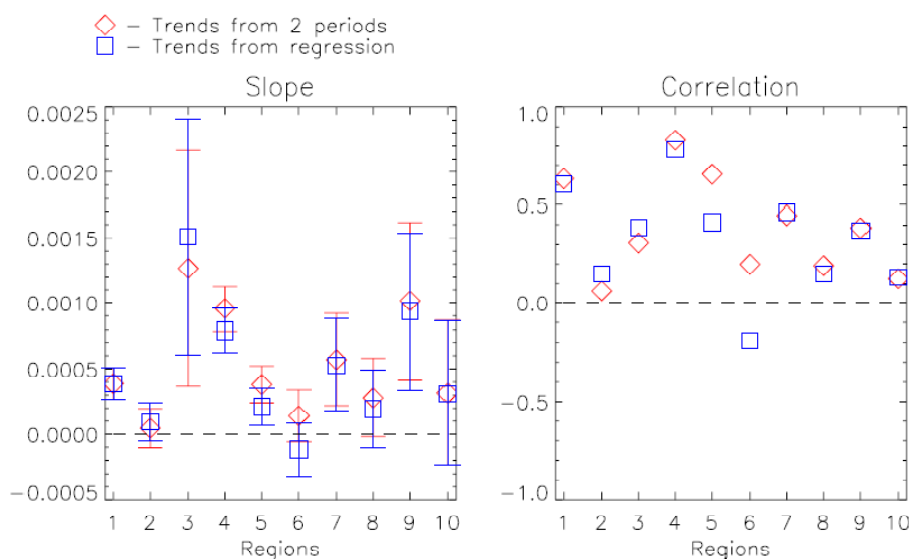
Et avgjørende spørsmål når det gjelder potensiell klimaeffekt av kondensstriper er i hvilken grad de kan føre til at det utvikler seg et mer eller mindre kontinuerlig dekke av cirrusskyer. Figur 10 viser en serie med satellittbilder av en spiralformet kondensstripe over Nordsjøen øst for England som etter hvert blir en del av et omfattende cirrusskydekke over sørlige deler av England (Haywood m.fl., 2009). Cirrusskydekket varte over en periode på 18 timer og hadde en

utbredelse på 50 000 km². Det er selvfølgelig vanskelig å si ut fra et slikt observert tilfelle om mye av disse cirrusskyene ville blitt dannet uansett, men det gir en indikasjon på at kondensstriper har en betydning. Haywood m.fl. (2009) gjorde også beregninger av strålingspådrivet fra denne ene hendelsen (under antagelsen om at alt skyldes flyutslipp) og fant et strålingspådriv som tilsvarte 7 prosent av det totale globale estimatet for denne mekanismen. Det vil si at det skal bare et veldig lite antall slike hendelser til før effekten overskrider det som er anslaget for global totaleffekt, og at det globale estimatet for contrail-cirrus (gitt over) kan være et underestimat.



Figur 10. Satellittbilder av utviklingen av cirrusskyer (lys hvit farge) fra en spiralformet kondensstripe over Nordsjøen og England. Lavereliggende stratocumulusskyer har en grå fargetone. Fra Haywood m.fl. (2009)

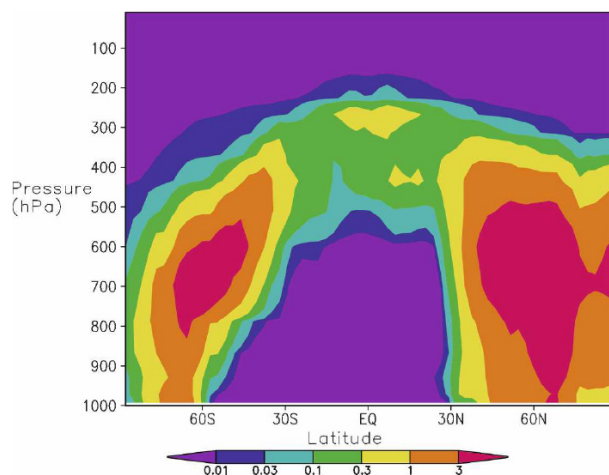
Ved Institutt for Geofag, UiO, har man brukt satellittobservasjoner av cirrusskyer og sett om det er en sammenheng mellom områder med økning i cirrusskyer og utslipp fra flytrafikk (Stordal m.fl., 2006). Figur 11 viser at for mange regioner er det en positiv trend i mengden av cirrusskyer, og at dette ofte korrelerer positivt med utslippet fra luftfart.



Figur 11. Resultater av romlig regresjonsanalyse mellom observert trend i cirruskydekket og utslipp fra luftfart (fra Stordal m.fl. (2006))

Hvordan forekomsten og egenskapene til cirruskyer har endret seg siden pre-industriell tid pga. utslipp av partikler eller gasser som danner partikler er et relativt nytt felt innenfor klimaforskning. Tidligere versjoner av globale klimamodeller har ikke vært i stand til å simulere dannelsen av isskyer i noe særlig detaljert grad. For at det skal kunne danne seg en ispartikkel i atmosfæren kreves det enten veldig lav temperatur ($T < -40^{\circ}\text{C}$) slik at man kan få homogen nukleasjon, dvs. dannelsen av en ispartikkel uten hjelp av en frysekjerne. Ved høyere temperaturer må det være en partikkel (frysekjerne) tilstede for at en underkjølt skydråpe skal fryse. Det har vært spekulert på om utslipp av sotpartikler fra fly kan være virksomme som slike frysekjerner. Nettoeffekten av disse sotpartiklene er meget vanskelig å anslå, da det ikke bare dreier seg en balanse mellom de oppvarmende og avkjølende effektene av cirruskyer (se over); man må også estimere hvordan fryseprosessene foregikk i en "ren" pre-industriell atmosfære, der mineralstøv trolig var den viktigste typen frysekjerner. I et arbeid av Penner m.fl. (2009), der man kan si at det har blitt vurdert hvor stor en slik effekt maksimalt kan være (som en følsomhetsstudie), har de kommet frem til en avkjølende effekt på opptil $-0,16 \text{ W/m}^2$, altså 2-3 ganger større enn totaleffekten av alle andre effekter til sammen (se Figur 3), men med motsatt fortegn. Slik det diskuteres i artikkelen fra Penner m.fl. vil dette estimatet være svært avhengig av forutsetningene (svært usikre) som er valgt, og andre like rimelige forutsetninger kan faktisk gi en oppvarmende effekt. En studie av Liu m.fl. (2009) finner en netto avkjølende effekt fra sot fra fly bare dersom sotpartiklene kan virke som frysekjerner ved relativ fuktighet i atmosfæren på 120-130 prosent. Hvis det kreves en høyere relativ fuktighet blir nettoeffekt en oppvarming. Wang og Penner (2010) studerer effekten av partikler på is- og skydannelse og fryseprosesser med en forbedret parametrisering.

Også ved Institutt for Geofag ved UiO arbeides det med dannelsen av isskyer, og hvordan dette best skal beskrives i globale klimamodeller. Det har ikke vært arbeidet direkte mot effekter av flyutslipp frem til nå, men mer grunnleggende forskning på å forstå og beskrive prosessene i form av likninger som kan brukes i klimamodellene. Figur 12 viser et eksempel på konsentrasjon av iskrystaller i CAM-Oslo modellen (Storelvmo og Kristjansson, 2008). Dette arbeidet er videreført i en ny artikkel av Hoose m.fl. (2010).



Figur 12. Beregnet konsentrasjon av iskrystaller pr. cm^3 (midlet sonalt og over et år) i CAM-Oslo modellen ved hjelp av en ny mikrofysikkparameterisering for kalde skyer.

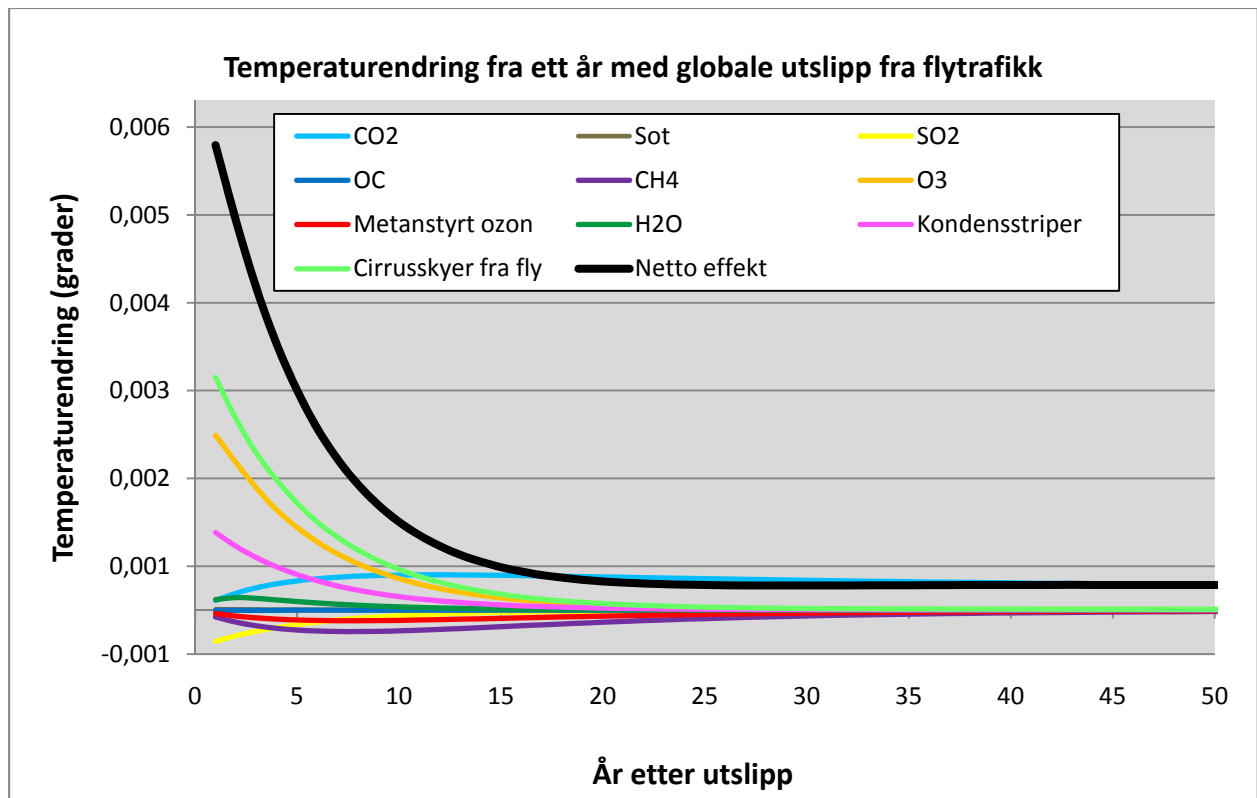
Ikke alle utslipp fører til samme temperaturendring selv om de gir likt strålingspådriv. Begrepet "climate efficacy" uttrykker global temperaturendring per enhet strålingspådriv relativt til endringen fra CO_2 . Studier tyder på at kondensstriper gir mindre effektiv oppvarming enn CO_2 per enhet strålingspådriv. Ponater m.fl. (2005) og Rap m.fl. (2010) finner en climate efficacy på henholdsvis 59 og 31 prosent, dvs. at strålingspådrivet fra kondensstripene gir opptil 69 prosent mindre oppvarming enn et tilsvarende pådriv fra CO_2 . Dette vil også være med på å avgjøre netto klimaeffekt fra flytrafikk.

2. Ulike tidsskalaer for klimapåvirkning

Strålingspådrivet fra de ulike komponentene fører til en endring i jordens bakketemperatur. I motsetning til strålingspådriv, som ofte brukes som mål på klimapåvirkningen, sier temperaturendring noe om den faktiske klimaendringen og det kan derfor argumenteres for at dette er en indikator som er mer relevant og kanskje lettere og forstå. Figur 13 viser beregnet effekt på den globale bakketemperaturen de neste 50 år for de ulike komponentene fra *ett* års globale utslipp fra luftfart. Dette illustrerer hvor forskjellig tidsskala de ulike effektene har.

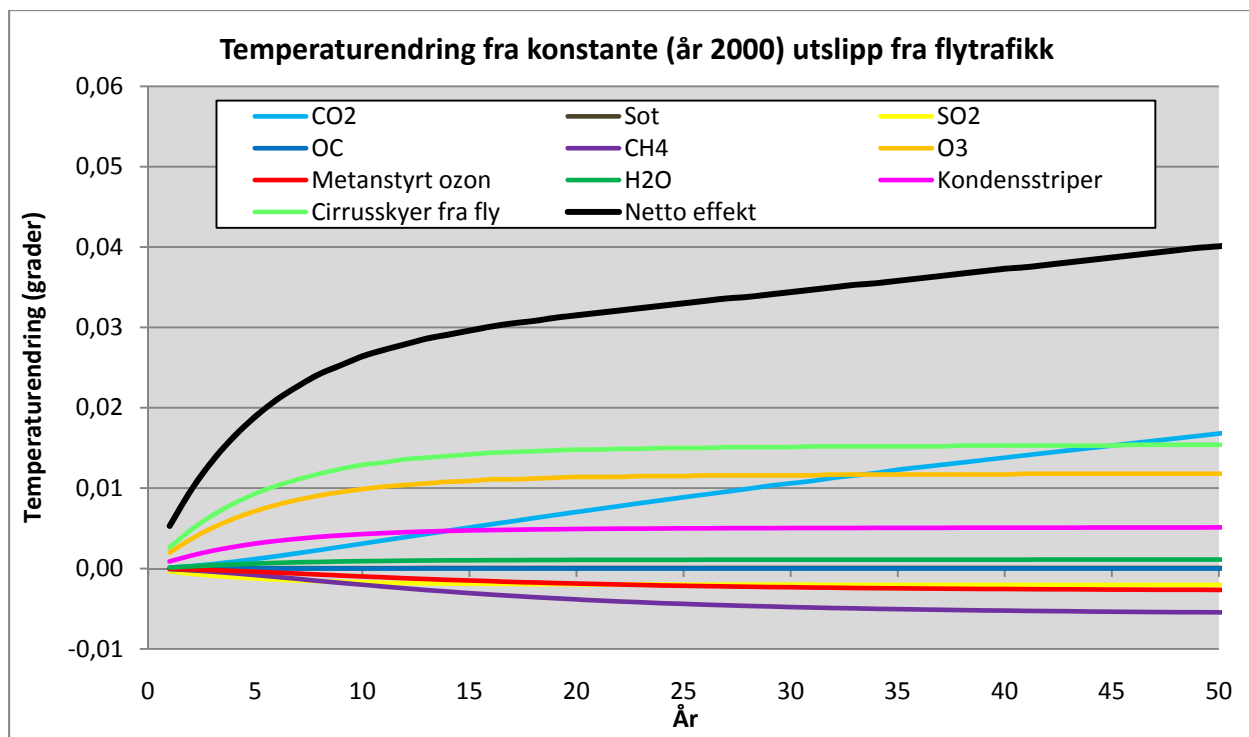
CO₂ har en lang responstid og vil gi oppvarmende effekt i flere hundre år etter at den slippes ut. På lengre sikt er det derfor denne gassen som vil gi den største klimaeffekten av flytrafikk. Ozon, cirrusskyer og kondensstriper gir en mye sterkere oppvarming enn CO₂ med en gang, men på grunn av kort levetid reduseres temperaturendringen raskt, og etter 5-15 år er effekten mindre enn fra CO₂. Reduksjonen i CH₄ 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 er en oppvarming på kort sikt, men en avkjøling på lang sikt (20 år og mer) fordi oppvarmingen fra produksjon av O₃ er mer kortvarig enn avkjølingen fra reduksjon av metan. Felles for de ulike partikkeltypene er en kortvarig klimapåvirkning på grunn av en levetid på bare noen dager.

Mens Figur 13 viser klimaeffekten over tid av ett års utslipp på global skala, kan man i stedet se på effekten av konstante utslipp over tid, noe som også er mer representativt for virkelige utslipp. Figur 14 viser responsene for et slikt tilfelle. CO₂-effekten vil da bygge seg opp, mens de kortlevede effektene når omtrent en likevekt, og vil således også ha stor effekt over tid. Fordi man i tilfellet med konstante utslipp hele tiden har påfyll av NO_x som gir betydelig ozondrevet oppvarming på kort sikt, vil effekten av NO_x i dette tilfellet hele tiden være en netto oppvarming. Beregningene gir en netto temperaturendring på 0,05 grader etter 100 år med dagens (år 2000) utslipp.



Figur 13. Temperaturendring [$^{\circ}\text{C}$] fra flytrafikk (basert på Berntsen og Fuglestvedt (2008)) Beregningene er basert på ett års globale utslipp fra fly; etter dette antas ingen utslipp og man kan dermed studere utviklingen i global temperaturendringen over tid og se tidsskalaene for klimapåvirkningen. Komponenter med avkjølende effekt gir negativ temperaturendring.

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlevede effekter av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO_2 -effekten alene. Dette er reflektert bl.a. i såkalte "vektfaktorer" som er introdusert for å angi størrelsen på "tilleggs effektene". Slike vektfaktorer blir benyttet i ulike sammenhenger for å regne ut utslipp og klimaeffekt av flyturer og i klimakalkulatorer som benyttes ved kjøp av kompenserende kvoter.



Figur 14. Temperaturendring [$^{\circ}\text{C}$] fra flytrafikk. Beregnet med konstante globale år 2000 utslipp fra fly. Figuren er basert på Berntsen og Fuglestad (2008).

Det har vært diskutert hvordan vekt faktoren skal beregnes og hvilken verdi som skal brukes, da dette er svært avhengig av tidsperspektivet og hvilke komponenter som inkluderes. Dette er illustrert i Tabell 2, som viser en oppsummering av vekt faktorer for ulike antakelser om indikator, tidshorisont og effekter. Ved bruk av integrert strålingspådriv som indikator (slik som i Global Warming Potential, GWP) varierer vekt faktoren fra 4,9 til 1,1 avhengig av tidshorisont og antagelser om størrelsen på NO_x -effekten, samt hvorvidt effekten av kondensstriperne er inkludert. Hvis man derimot benytter temperaturendringen (slik som i Global Temperature change Potential, GTP) som indikator blir vekt faktoren betydelig lavere. Dette kommer av at de kort-levede effektene da vekt legges mindre enn for GWP siden klimasystemet "glemmer" effektene over tid. For tilfellet lav NO_x -effekt og ingen kondensstriper, er faktoren til og med under 1. Basert på en utregningsmetode og et tidsperspektiv som er konsistent med det som brukes i Kyoto protokollen, er det foreslått å bruke en vekt faktor på 1,2 – 1,8 (Lian m.fl., 2007). I forskningsmiljøer brukes i dag vekt faktorer for å illustrere størrelsen på andre effekter enn CO_2 og hvordan dette avhenger av ulike antakelsene, og det er flere grunner til å velge andre tilnærminger enn en fast faktor (se for eksempel Forster m.fl. (2006), Forster m.fl. (2007), Fuglestad m.fl. (2010)). Vekt faktoren baserer seg på effekter av totale historiske utslipp fra fly frem til i dag og effekten av dette på global skala. Faktoren vil også være avhengig av hvor flyvningene skjer. Dette skyldes først og fremst effektene på kondensstriper og cirruskyer og til en viss grad effektene av NO_x . Særlig vil cirrusdannelse på høye breddegrader kunne ha en effekt som avviker fra det globale middelet, pga. lange perioder med liten solinnstråling og fordi bakken ofte har en høy refleksjonsevne, noe som er relevant for norsk luftfart. Sannsynligheten for dannelse av cirrus kan også være betydelig annerledes enn for flyvninger på midlere breddegrader pga. andre meteorologiske forhold.

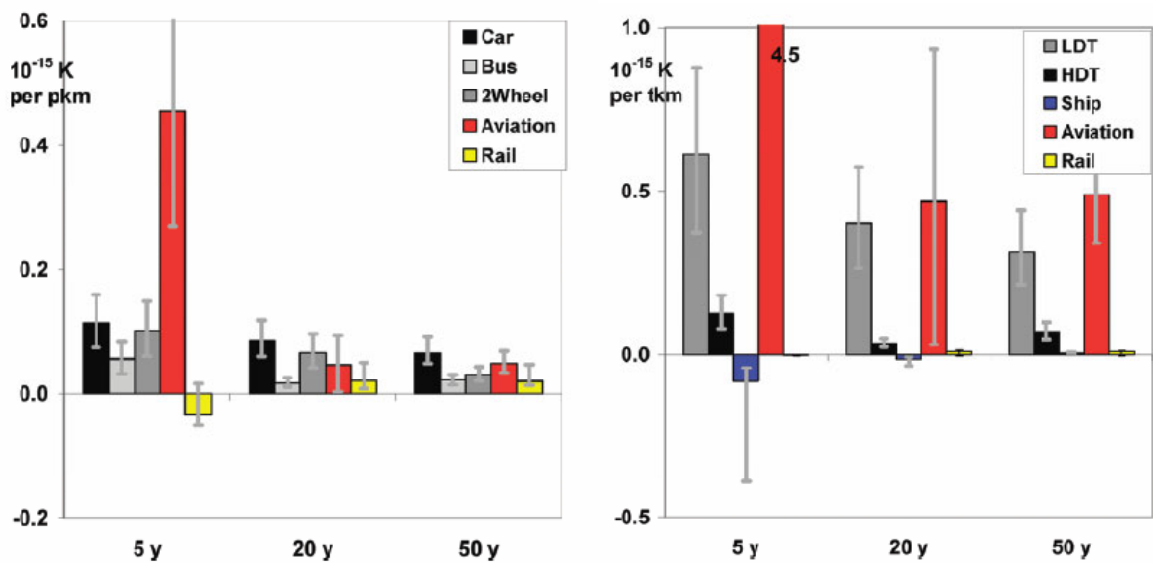
		GWP basert			GTP basert		
Tidshorisont		20	100	500	20	50	100
AIC inkl.	Høy NO _x	4.9	2.0	1.3	1.6	1.1	1.1
	Lav NO _x	4.4	1.9	1.3	1.1	0.9	1.1
AIC ekskl.	Høy NO _x	2.7	1.4	1.1	1.0	1.0	1.1
	Lav NO _x	2.2	1.3	1.1	0.4	0.7	1.0

Tabell 2. Vektfaktorer for klimapåvirkningen fra luftfart (basert på Shine (2010)) for ulike valg av indikator (GWP eller GTP) og tidshorisonter mellom 20 og 500 år. Tabellen viser resultater med og uten effekten av kondensstriper og cirrusskyer (Aviation Induced Cloudiness - AIC) og for høyt eller lavt estimat av effekten av NO_x.

For å redusere flytrafikkens bidrag til global oppvarming på lang sikt er det nødvendig å redusere CO₂-utslippene siden disse står for den mest langvarige oppvarmingseffekten. Hvis man derimot er i interessert i å begrense hastigheten på oppvarmingen eller i oppvarmingen på kort sikt, blir også de andre komponentene viktige. Kyoto-avtalen, som trådte i kraft i 2005, gir tallfestede mål for reduksjon av klimagasser for en rekke industrialiserte land. Avtalen er basert på en tidshorisont på 100 år for klimapåvirkningen og benytter akkumulert strålingspådriv (gitt ved GWP-vektede utslipp), ikke temperaturendring, som indikator. For luftfart og skipsfart er et særtrekk i forbindelse med Kyoto-avtalen at den bare omfatter de nasjonale utslippene. Dette skyldes at for internasjonal luftfart, i likhet med internasjonal skipsfart, er det vanskelig å komme til enighet om hvordan disse utslippene og utslippsreduksjoner skal fordeles. Utslippene fra utenrikstrafikk skal reguleres gjennom FNs internasjonale luftfartsorganisasjon (ICAO) og sjøfartsorganisasjon (IMO). Videre gjelder det for alle sektorer at Kyoto-avtalen bare inkluderer de såkalt langtlevede drivhusgassene (CO₂, CH₄, lystgass (N₂O), PFC og HFC). Innenriks luftfart i Norge er i dag pålagt å betale en CO₂-avgift på kr 0,68 per liter drivstoff. I tillegg introduserte EU i 2008 lovgivning for å inkludere internasjonal luftfart i EUs kvotemarked. Dette vil tre i kraft i 2012, men inkluderer igjen bare utslipp av CO₂ og bare flyvninger til og fra EU/EØS land. Som beskrevet over er det imidlertid en rekke andre komponenter i tillegg til CO₂ som er viktig for å forstå den totale klimapåvirkningen fra flytrafikken.

2.1 Spesifikk klimaeffekt

For å rangere transportsektorene mht. klimaeffekt kan man også se på den spesifikke klimapåvirkningen, dvs. klimapåvirkning per transportarbeid. Dette er gjort for første gang for veitrafikk, tog, skipsfart og luftfart i en ny studie av Borken-Kleefeld m.fl. (2010). Her er klimaeffekten av person- og godstransport normalisert hhv. per passasjer kilometer (pkm) og tonn kilometer (tkm). Figur 15 viser klimapåvirkningen gitt ved endring i temperatur fra ett års utslipp fra de ulike sektorene ved tre ulike tidshorisonter, 5, 20 og 50 år. For persontransport er spesifikk klimapåvirkning fra flytrafikk på kort sikt klart størst på grunn av den sterke, men kortvarige oppvarmingen fra ozon, kondensstriper og cirrus skyer. Etter 5 år er spesifikk effekt 4 ganger større enn for biler. På lengre sikt, når oppvarmingen domineres av CO₂, er derimot temperaturendringen per pkm lavere for fly enn for reiser med bil. Temperaturendringen per pkm er lavest for tog og buss. For godstransport er den temperaturendringen per tkm igjen størst for fly, fulgt av små lastebiler. Den spesifikke klimaeffekten er avhengig av valgt indikator for klimaendring (temperaturendring eller integrert strålingspådriv) og tidshorisont, samt av utført transportarbeid. Resultatene i dette studiet er basert på globale gjennomsnittstall for passasjerbelegg. Særlig for biler er utslippet per pkm avhengig av belegg.



Figur 15. Sammenligning av temperaturendringen av ett års globale utslipp fra transportsektorene evaluert etter 5, 20 og 50 år. Temperaturendringen er gitt per passasjer kilometer (pkm) for persontransport (til venstre) og per tonn kilometer (tkm) for godstransport. Basert på globale gjennomsnittstall for passasjerbelegg. Fra Borken-Kleefeld m.fl. (2010).

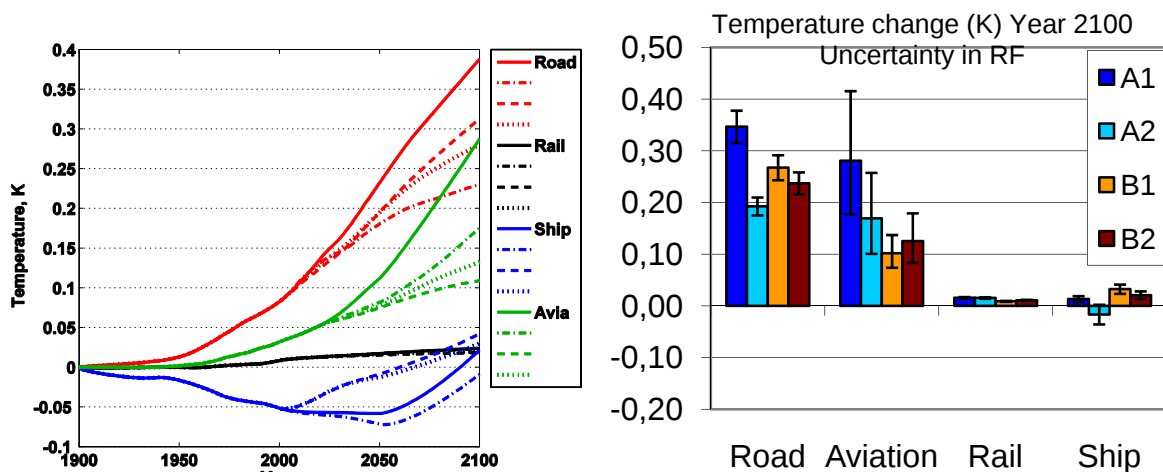
3. Luftfartens utvikling

Luftfart er en sektor som har vært i vekst; i Norge har utslippene fra innenriks sivil luftfart økt med 55 prosent i perioden 1990 til 2008.

SSB rapporterer, i tråd med UNFCCC's metodologi, utslippstall for norske utslipp per sektor og komponent. For flytrafikk er kun innenriks flytrafikk inkludert, og man har heller ikke spesifisert utslipp av vandamp og ulike partikkeltyper og partikkelforløpere. Videre er naturlig nok ikke effektene på kondensstriper og cirrus inkludert. Disse utslippsoversiktene gir derfor et ufullstendig bilde av klimaeffekter av norske flyutslipp.

Også globalt har utslippene fra luftfart økt (se Figur 1). Det har ikke vært en jevn økning i trafikken: Utviklingen er tett knyttet til den økonomiske utviklingen og reduksjon er observert i perioder med økonomisk nedgang. Ny teknologi og effektivisering av flymønstre har gjort flyene mer energieffektive, noe som har bidratt til å redusere utslippene, men det har ikke vært nok til å kompensere for den sterke veksten i trafikk. Denne trenden antas å fortsette fremover slik at utslippene fra luftfart vil øke videre.

I en studie av Skeie m.fl. (2009) fra EU prosjektet QUANTIFY er det gjort beregninger av transportsektorenes historiske bidrag til global oppvarming samt fremtidige bidrag gitt ulike scenarier (Figur 16). Bidraget fra flytrafikk i år 2000 ble beregnet til 4 prosent, og avhengig av scenario kan dette øke til 8 prosent mot slutten av århundret. Som diskutert over er det store usikkerheter knyttet til effekter av kondensstriper og cirruskyer. Usikkerhet i kunnskapen om effekter av flyutslipp ble tatt hensyn til i beregningene i Skeie m.fl. og Figur 16 viser store usikkerhetsintervall for flytransport pga de potensielt sterke effekter av kondensstriper og cirruskyer.



Figur 16. Global temperaturendring fra luftfart, sammen med veitrafikk, skipsfart og tog (Skeie m.fl., 2009), både historisk og for ulike scenarier for fremtidig utslipp. Figuren til høyre viser effektene av usikkerhet i klimaeffektene.

4. Oppsummering

Luftfart kan påvirke klimaet gjennom flere mekanismer og klimapåvirkningen er sammensatt og komplisert. I tillegg til CO₂ består utslipp fra fly av en rekke andre komponenter som påvirker klimaet, enten direkte eller indirekte via kjemiske og fysiske prosesser i atmosfæren. Dette gjelder også for andre sektorer. Med unntak av CO₂ dekker ikke Kyotoprotokollen de viktigste klimaeffektene fra luftfart.

I år 2000 bidro utslipp fra flytrafikk fra 1940 til rundt 4 prosent av den totale menneskapte oppvarmingen siden pre-industriell tid (Skeie m.fl. (2009)). Den kombinerte effekten av kondensstriper og dannelse av cirruskyer har gitt det største bidraget til oppvarmingen. Også CO₂ og produksjon av ozon pga NO_x-utslipp gir viktige bidrag til oppvarmingen. Det er imidlertid stor usikkerhet knyttet til disse mekanismene. Den samme studien beregner et bidrag på 4-8 prosent i år 2100 basert på ulike utslippsscenarioer for luftfart konsistent med scenariene fra FNs klimapanel. Det er viktig å bemerke at ozon, kondensstriper og endringer i cirruskyer gir en mer kortvarig klimapåvirkning enn CO₂, noe som har betydning for den relative fremtidige påvirkningen. For å redusere flytrafikkens bidrag til global oppvarming på lang sikt er det nødvendig å redusere CO₂-utslippene siden disse står for den mest langvarige oppvarmingseffekten.

På grunn av de sterkt oppvarmende, men kortlevede effekter av flytrafikk vil den totale klimaeffekten de første årene etter utslipp være betydelig større enn CO₂-effekten alene. Såkalte "vektfaktorer" er blitt introdusert for å angi størrelsen på "tilleggseffektene". Basert på en utregningsmetode (GWP) og et tidsperspektiv (100 år) som er konsistent med det som brukes i Kyotoprotokollen, er det foreslått å bruke en vektfaktor på 1,2-1,8 (Lian m.fl. 2007). Nye studier gir tall av samme størrelse. Vektfactoren er svært avhengig av tidsperspektivet og indikator for evaluering av klimapåvirkningen, og av hvilke komponenter som inkluderes.

Kilder

ACCRI (Aviation Climate Change Research Initiative) Report 2008

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/aviation_climate/

Berntsen T., and I.S.A. Isaksen, 1999. Effects of lightning and convection on changes in tropospheric ozone due to NO_x emissions from aircraft. *Tellus*, 51B, 766-788

Berntsen T. and J. Fuglestad, 2008. Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *PNAS*, 105

Borken-Kleefeld J., T. Berntsen, J. Fuglestad, 2010. Specific climate impact of passenger and freight transport. *Environmental Science & Technology* 44(15), 5700-5706

Burkhardt og Kärcher (2011). Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* 1, 54-58

Forster, P., K.P. Shine, N. Stuber (2006). It is premature to include non-CO₂ effects of aviation in emission trading schemes. *Atmospheric Environment*, 40, 1117-1121.

Forster, P., V. Ramaswamy, m.fl. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon, S., m.fl. (Eds), *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge and New York

Fuglestad J.S., T. Berntsen, I.S.A. Isaksen, H. Mao, X.-Z. Liang and W.-C. Wang, 1999. Climatic effects of NO_x emissions through changes in tropospheric O₃ and CH₄. A global 3-D model study. *Atm. Environment*, 33 961-977

Fuglestad, J. S., T. K. Berntsen, O. Godal, R. Sausen, K. P. Shine, and T. Skodvin, 2003. Metrics of Climate Change: assessing radiative forcing and emission indices, *Climatic Change*, 58, 267-331

Fuglestad J. S., Shine K. P., Berntsen T., Cook J., Lee D. S., Stenke A., Skeie R. B., Velders G. J. M. & Waitz I. A., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. *Atmospheric Environment*. 44(37), 4648-4677

Haywood, J. M., R. P. Allan, J. Bornemann, P. M. Forster, P. N. Francis, S. Milton, G. Rädcl, A. Rap, K. P. Shine, and R. Thorpe, 2009. A case study of the radiative forcing of persistent contrails evolving into contrail-induced cirrus, *J. Geophys. Res.*, 114, D24201, doi:10.1029/2009JD012650

Hoor P., J. Borken-Kleefeld, D. Caro, O. Dessens, O. Endresen, M. Gauss, V. Grewe, D. Hauglustaine, I. S. A. Isaksen, P. Jöckel, J. Lelieveld, G. Myhre, E. Meijer, D. Olivie, M. Prather, C. Schnadt Poberaj, K. P. Shine, J. Staehelin, Q. Tang, J. van Aardenne, P. van Velthoven, and R. Sausen, 2009. The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3113-3136

Hoose C., Kristjansson J. E., Chen J. P. & Hazra A., 2010. A Classical-Theory-Based Parameterization of Heterogeneous Ice Nucleation by Mineral Dust, Soot, and Biological Particles in a Global Climate Model. *J. Atmos. Sci.* 67(8), 2483-2503

IPCC 1999: Aviation and the Global Atmosphere

- Lee D. S., Fahey D. W., Forster P. M., Newton P. J., Wit R. C. N., Lim L. L., Owen B. & Sausen R., 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*. 43(22-23), 3520-3537
- Lee D. S., Pitari G., Grewe V., Gierens K., Penner J. E., Petzold A., Prather M. J., Schumann U., Bais A., Berntsen T., Iachetti D., Lim L. L. & Sausen R., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*. 44(37), 4678-4734
- Lian m.fl., Bærekraftig og samfunnsnyttig luftfart. TØI rapport 2007.
<http://www.toi.no/article19574-8.html>
- Liu, X., J. E. Penner, and M. Wang, 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, doi:10.1029/2008JD010492
- Myhre G., Shine K. P., Rädel G., Gauss M., Isaksen I. S. A., Tang Q., Prather M. J., Williams J. E., van Velthoven P., Dessens O., Koffi B., Szopa S., Hoor P., Grewe V., Borken-Kleefeld J., Berntsen T. K. & Fuglestad J. S., 2011. Radiative forcing due to changes in ozone and methane caused by the transport sector. *Atmospheric Environment*, 45(2), 387-394
- National Inventory Report 2010 Norway. Greenhouse Gas Emissions 1990 2008 (www.klif.no)
- Penner J.E., Y.Chen, M.Wang, and X.Liu, 2009. Possible influence of anthropogenic aerosols on cirrus clouds and anthropogenic forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 879-896
- Ponater, M., S. Marquart, R. Sausen, and U. Schumann, 2005. On contrail climate sensitivity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L10706, doi:10.1029/2005GL022580
- Rap, A., P. M. Forster, A. Jones, O. Boucher, J. M. Haywood, N. Bellouin, and R. R. De Leon, 2010. Parameterization of contrails in the UK Met Office Climate Model, *J. Geophys. Res.*, 115, D10205, doi:10.1029/2009JD012443
- Rädel G. and K. P. Shine, 2007. Evaluation of the use of radiosonde humidity data to predict the occurrence of persistent contrails, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133: 1413-1423
- Shine, K., 2010. Radiative forcing and climate change, *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Edited by Richard Blockley and Wei Shyy. © John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-68665-2
- Skeie R. B., Fuglestad J., Berntsen T., Lund M. T., Myhre G. & Rypdal K., 2009. Global temperature change from the transport sectors: Historical development and future scenarios. *Atmospheric Environment*. 43, 6260-6270.
- Stevenson, D. S., and R. G. Derwent, 2009. Does the location of aircraft nitrogen oxide emissions affect their climate impact?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17810, doi:10.1029/2009GL039422.
- Stordal F., G.Myhre, E.J.G.Stordal, W.B.Rossow, D.S.Lee, D.W.Arlander, and T.Svendby, 2005. Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic? *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2155-2162
- Storelvmo Trude and Jón Egill Kristjánsson, 2008. Aerosol Influence on Mixed-Phase Clouds in CAM-Oslo, *J. Aerosol, Sciences*, 65, 3214-3230
- Stuber N., Piers Forster, Gaby Rädel, Keith Shine, 2006. The importance of the diurnal and annual cycle of air traffic for contrail radiative forcing , *Nature* 441, 864-867
- UNFCCC (2011) <http://unfccc.int/2860.php> (31.03.2011)

- Wang M. and J.E. Penner, 2010. Cirrus clouds in a global climate model with a statistical cirrus cloud scheme, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5449-5474
- Wild, O., M. J. Prather, and H. Akimoto, 2001. Indirect long-term global radiative cooling from NO_x emissions, *Geophysical Research Letters*, 28, 1719-1722.

CIENS

Forskningssenter for miljø og samfunn

Oslo Centre for Interdisciplinary
Environmental and Social Research

Post- og besøksadresse:

CIENS

Gaustadalléen 21
0349 OSLO

Tel.: +47 22 18 51 00

Fax: +47 22 18 52 00

www.ciens.no

Print: CopyCat AS

ISSN: 1890-4572

ISBN: 978-82-92935-08-8