

Bakgrunnsnotat for kapittelet "Utslipp i høye luftlag" i rapporten *Bærekraftig og samfunnsnyttig luftfart 2020*

Marianne T. Lund, Jan S. Fuglestad og Bjørn H. Samset

September 2020

Dette dokumentet utdyper det vitenskapelige grunnlaget bak kapittelet "Utslipp i høye luftlag" i rapporten *Bærekraftig og samfunnsnyttig luftfart 2020*. Lund et al. (2016) ga, på oppdrag av Avinor, en oppdatert oversikt over status på kunnskapen om luftfart og klima frem til 2015, og vi fokuserer her på studier publisert etter dette. Materialet er i hovedsak basert på Lee et al. (2020). Dette er den første vitenskapelige sammenfatningen på feltet siden 2009, og den mest omfattende av sitt slag. Her gis konsistente beste estimater for effekten av de ulike utslippene helt frem til 2018, samt nye estimat for den såkalte multiplikatoren for tilleggseffektene til CO₂, inkludert en ny beregningsmetode.

Luftfartens klimapåvirkning

Aktiviteten og drivstofforbruket i global luftfartssektor har økt betydelig de siste fire tiårene, med særlig sterk vekst i Asia siste tid. I perioden 1970 til 2012 anslås en årlig økning i CO₂ utslippene fra sektoren på 2.2%, fulgt av en årlig økning på 5% fra 2013 til 2018. Denne trenden forventes å fortsette fremover. Eksempelvis anslår framskrivninger fra industrien en 4.4% årlig vekst i flytrafikken de neste 20 årene (Airbus, 2018). Usikkerheten rundt slike anslag har økt i 2020 på grunn av COVID-19 pandemien. I perioden med de mest omfattende restriksjonen (April 2020), er det beregnet at de daglige CO₂ utslippene fra luftfarten falt med 60% relativt til året før (Le Quéré et al., 2020) og det er betydelig usikkerhet knyttet til den videre utviklingen.

Global luftfart står for 2.5% av de totale menneskeskapte CO₂ utslippene (inkludert arealbruksendringer). Det relative bidraget har endret seg lite tross den sterke veksten fordi også andre menneskeskapte utslipp har økt. Bidraget fra global luftfart til total menneskeskapt klimapåvirkning (tall for 2011) beregnes til 3.5% (gitt i form av effektiv strålingspådriv – se neste avsnitt). Dette inkluderer alle klimarelevante utslipp, ikke bare CO₂. Tallet er noe lavere enn gitt i flere tidligere studier, der man har anslått at global luftfart står 5% av den totale klimapåvirkningen. Denne forskjellen skyldes ikke at man har fått en fundamentalt endret forståelse av tilleggseffektene, men at man i forskningsmiljøene har hatt et skifte i måten man beregner de ulike utslippenes strålingspådriv på.

Beregning av klimapåvirkningen – fra RF til ERF

Tradisjonelt har man benyttet konseptet *strålingspådriv* (radiative forcing, RF) som et førsteordens mål på klimaeffekten av de ulike utslippene. Strålingspådriv er definert som endringen, målt på toppen av atmosfæren, i balansen mellom strålingen som kommer inn i klimasystemet fra sola og utgående varmestråling fra jorda som følge av en endring i mengden av gasser eller partikler. Fordi det er en tilnærmet lineær sammenheng mellom strålingspådriv og forventet endring i den globale bakketemperaturen når klimasystemet når ny likevekt, brukes strålingspådriv som en tilnærming for temperatureffekten. Et negativt strålingspådriv gir en avkjølende temperatureffekt, mens positivt strålingspådriv betyr oppvarming.

I senere tid har det vært en tendens i forskningen til å gå over til det som kalles *effektivt strålingspådriv* (ERF). ERF ble introdusert av FNs Klimapanel i deres femte hovedrapport i 2013 og er et bedre mål for den endringen i bakketemperatur som resulterer fra et strålingspådriv, særlig for klimadrivere som ikke er jevnt fordelt i atmosfæren, som partikler og kondensstriper. Det er fordi ERF også inkluderer raske endringer i atmosfæren som følger av den opprinnelige forstyrrelsen (dvs. fra endringen i mengden gass eller partikler). Slike effekter er viktige for den endelige klimaresponsen, men fordi de ikke resulterer direkte fra endringen i et utslipp, fanges de ikke opp av RF.

For luftfarten har bruken av ERF særlig betydning for contrail-cirrus. Tidligere studier har rapportert at contrails-cirrus er betydelig mindre effektive i å drive temperaturendring sammenlignet med CO₂ (Bickel et al., 2020; Ponater et al., 2005; Rap et al., 2010). I snitt er derfor ERF for contrail-cirrus anslått å være 45% lavere enn RF. For endringer i ozon og metan (fra NO_x utslipp) trekker overgangen fra RF til ERF i motsatt retning og øker effekten.

Det er viktig å understreke at ERF og RF ikke er direkte sammenlignbare og at de nye tallene ikke impliserer at man har fått en fundamental endret forståelse av f.eks. contrail-cirrus. I Lee et al. (2020) oppgis derfor både RF og ERF for de ulike mekanismene.

Kunnskapsstatus tilleggseffektene

Luftfart påvirker global temperatur gjennom følgende utslipp og påfølgende prosesser:

- **CO₂ og vanndamp** – direkte oppvarmende effekt gjennom økt drivhuseffekt
- **Contrail-cirrus** – netto oppvarmende effekt gjennom dannelse av kondensstriper og videre utvikling av disse til cirruskyer
- **NO_x** – netto oppvarmende effekt fra endringer i ozon (oppvarming) og reduksjon i metan (avkjøling), samt effekter på vanndamp og ozon (avkjøling).
- **Svovel- og nitratpartikler** – direkte avkjølende effekt via refleksjon av sollys
- **Sotpartikler** – direkte oppvarmende effekt via absorpsjon av sollys
- **Indirekte effekt av partikler på skyer** – oppvarmende og avkjølende bidrag.

Den vitenskapelige forståelsen har blitt bedre det siste tiåret, men det gjenstår likevel usikkerheter rundt hvor store bidrag til temperaturendring de ulike mekanismene gir. Her gir vi en kort oppsummering av status:

- **CO₂**: Det nyeste anslaget gir en ERF for CO₂ på 34.3 (±6) mW m⁻². Dette er en økning på 17% i forhold til forrige større sammenfatning fra 2009 (Lee et al., 2009). Fordi CO₂ påvirker klimaet over så lang tid, er klimaeffekten i dag bestemt av hele utslippshistorien og økningen siden 2009 skyldes den fortsatte økning i utslippene. Graden av vitenskapelig sikkerhet regnes som høy for CO₂, og eksisterende usikkerheter relateres i hovedsak til ulike måter å inkludere karbonsyklusen på i klimamodellene som benyttes på, samt til fremtidig utvikling i utslippene fra sektoren.
- **Vanndamp**: har moderat grad av vitenskapelig sikkerhet. Det er relativt få studier av den direkte effekten av vanndamputslipp fra fly, men de som eksisterer anslår en svakt oppvarmende effekt. Den **direkte effekten av partikler**, både de avkjølende (sulfat, nitrat) og oppvarmende (sot), anslås også å være liten.
- For **contrail-cirrus** har det vært en markant forbedring i modellene de siste årene, med utvikling av prosess-basert modellering i globale og regionale modeller. Lee et al. (2020) beregner ERF for contrail-cirrus på 57 mW m⁻² (spenn 17 til 98 mW m⁻²). Lee et al. (2009) inkluderte kun kondensstriper, ikke den videre effekten via cirrus-skyer, og ga derfor et mye lavere estimat av effekten.
- Som nevnt over, har flere studier vist at ERF er betydelig lavere enn RF for contrail-cirrus. Bickel et al. (2020) viste at den viktigste grunnen til dette er at det er en reduksjon i naturlige cirrus-skyer når contrail-cirrus oppstår, som bidrar til en avkjøling og dermed veier opp for noe av oppvarmingen fra contrail-cirrus. Dette bekrefter funn tidligere gjort i modeller.
- Nyere studier antyder at klimaeffekten av contrail-cirrus er avhengig av mengden sotpartikler som slippes ut fra flyene: en reduksjon i antallet sotpartikler reduserer antallet ispartikler som dannes. Dette reduserer tykkelsen og levetiden til kondensstripene, og gir dermed et lavere

strålingspådriv (mindre oppvarming) (Burkhardt et al., 2018). Dette er et viktig funn for vurderinger av hvorvidt alternative/syntetiske drivstoff kan være med på å både redusere effekten av CO₂ og contrail-cirrus.

- **NO_x:** den vitenskapelige forståelsen av nettoeffekten av NO_x utslipp fra fly på klima har utviklet seg over det siste tiåret. Selv om det er fortsatt er betydelig usikkerhet i størrelsen på effekten, så er den vitenskapelige forståelsen at NO_x utslipp i netto gir en oppvarmende effekt. Det nyeste beste estimatet er basert på mer enn 20 studier og gir et strålingspådriv på 17.5 mW/m⁻², 29% sterkere enn i Lee et al. (2009).
- Både det oppvarmende bidraget fra ozon og avkjølingen fra endringer i metan er sterkere i den nyeste studien. Sistnevnte skyldes at man har funnet en 25% sterkere klimaeffekt av metan enn tidligere anslått (Etminan et al., 2016). Dette gjelder utslipp fra alle sektorer, men for luftfart betyr det imidlertid et større negativt (avkjølede) bidrag fra reduksjonen i metan fra NO_x-utslipp fra sektoren, noe som trekker netto oppvarmingen noe ned. Dette veies imidlertid opp av høyere oppvarmingseffekt av NO_x-drevet ozonproduksjon.
- Den **indirekte effekten av partikkelutslipp** er potensielt betydelig relativt til andre effekter av sektorens utslipp, men anslagene er svært usikre. Strålingspådrivet fra endringer i lavtliggende skyer fra sulfat- og nitratpartikler er sannsynligvis negativt (avkjølede) og muligens av betydelig størrelse (titalls mW m⁻²). Anslag for effekten av sotpartikler på cirruskyer varierer fortsatt fra sterkt positivt, til sterkt negativt og nær neglisjerbart. Det har ikke vært noen betydelig fremgang mot å bedre avgrense størrelsen på denne sistnevnte effekten siden Lund et al. (2016).

Totalt sett utgjør tilleggseffektene 2/3 og CO₂ 1/3 av den totale klimapåvirkningen fra sektoren frem til i dag. De ulike mekanismene som bidrar til luftfartens totale klimapåvirkning virker på svært ulike tidsskalaer, fra dager til århundrer. Det betyr at det relative forholdet kan endre seg over tid. Ozon, contrail-cirrus og andre tilleggseffekter har sterk men kortvarig klimapåvirkning, mens CO₂ blir dominerende over tid.

Multiplikatoren for tilleggseffektene

Verdier for den såkalte *multiplikatoren* (dvs. faktoren som angir forholdet mellom den totale CO₂-ekvivalente klimapåvirkningen fra sektoren og effekten av CO₂ alene) faller i spennet 1.0 – 4.0 med de nyeste tallene fra Lee et al. (2020), avhengig av tidshorisont og metode for å beregne CO₂-ekvivalens. For hver av disse verdiene vil det i tillegg være et spenn som reflekterer usikkerheten i ERF. For det spesifikke tilfellet der man benytter Global Warming Potential (GWP) med en tidshorisont på 100 år, er faktoren 1.7. Generelt beregnes et sterkere strålingspådriv for de fleste klimadriverne fra luftfartssektoren i Lee et al. (2020) enn i tidligere sammenfatninger. Likevel er multiplikatoren tilnærmet uendret fra Lund et al. (2016) og andre tidligere studier. Dette skyldes både økt påvirkning fra CO₂, samt at både negative og positive strålingspådriv er sterkere.

Særlige begrensninger er knyttet til bruk av GWP for å sammenligne gasser og klimadrivere med svært ulik levetid. Som et svar på disse utfordringene er en ny, alternativ bruk av GWP introdusert i den vitenskapelige litteraturen. Beregningsmåten, kjent som GWP*, sammenligner *endringer i utslipp* av kortlivede klimadrivere med et *engangsutslipp* av den langlivede referansegassen CO₂ og gir en bedre tilnærming til effekt på global temperatur enn det den tradisjonelle bruken av GWP gjør. GWP* er også med på å redusere avhengigheten av valgt tidshorisont. Forskjellen mellom å bruke GWP og GWP* blir særlig stor i tilfeller der utslippene endres raskt. GWP* benyttes i Lee et al. (2020) og viser at den globale luftfartssektoren nå varmer klima omtrent tre ganger så raskt som effekten fra med sektorens CO₂-utslipp alene (dvs. multiplikator på 3).

Multiplikatoren er basert på den globalt midlede klimapåvirkningen fra global luftfart. Mange av tilleggseffektene er imidlertid avhengig av hvor og når utslippene skjer. Dette kan ha betydning for bruk av multiplikatorer for individuelle flyvninger eller bestemte områder. Et eksempel er norsk innenriks luftfart. Mange av disse flyvningene er relativt korte og holder lavere høyder enn internasjonale flyvninger. Et viktig spørsmål er i hvilken grad, og med hvilken klimapåvirkning, innenriks flyvninger bidrar til kondensstripedannelse. Lund m.fl. (2016) viste at de atmosfæriske forholdene som kreves for at vedvarende kondensstriper skal dannes er periodevis til stede i representative høyder over Norge. Dette er imidlertid i seg selv ikke nok til å konkludere. Et pågående forskningsprosjekt ledet av CICERO (https://cicero.oslo.no/no/aviate_home) har som mål å tallfeste om kondensstriper faktisk dannes og hvilken klimaeffekt de i så fall har.

Det store spennet i levetid for klimapåvirkning er også en velkjent og fundamental utfordring for sammenligning av utslippenes klimaeffekt på en CO₂-ekvivalent skala, og dermed for beregningen av multiplikatorer. Det store spennet i multiplikatoren gitt over illustrerer begrensningene i bruken av slike faktorer.

Tiltak for å redusere klimapåvirkningen av tilleggseffektene

En rekke studier har satt søkelys på tiltak for å redusere klimaeffekten av tilleggseffektene:

- Mange studier har sett på potensialet for å unngå contrail-cirrus dannelse ved å omgå områder med spesifikke atmosfæriske forhold eller ved å optimalisere flytidene for å minimere den oppvarmende effekten av contrail-cirrus (f.eks. ved å unngå flyvninger på natten) (bl.a. Matthes et al., 2017; Teoh et al., 2020; Yin et al., 2018). Nyere studier peker på at en liten andel flyvninger utgjør en stor andel av totale contrail-cirrus, noe som øker potensialet for effekt av en slik strategi. Et viktig kriterium er at man har nøyaktige nok varsler av de atmosfæriske forholdene. Videre involverer slike tiltak ofte en økning i drivstofforbruk (og dermed i CO₂-utslipp).
- Operasjonelle tiltak kan også redusere effekten av NO_x, ved å endre høyden til flyene (Frömming et al., 2012), men vil igjen oftest gi en tilhørende økning i CO₂.
- Teknologiske forbedringer er også studert som mulig tiltak for å redusere tilleggseffektene. Eksempler inkluderer reduksjon i mengden NO_x utslipp per kg drivstoff (Freeman et al., 2018) eller reduksjon i antall partikler i eksosen (ved å designe den kjemiske sammensetning av drivstoffet) for å redusere contrail-cirrus effekten (se over) (Burkhardt et al., 2018).

Per i dag er reguleringer for utslipp av CO₂, NO_x og sotpartikler iverksatt gjennom ICAO. Hvorvidt det er mulig å inkludere disse utslippene, samt tiltak for andre tilleggseffekter, i internasjonale rammeverk og avtaler (for eksempel i CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme) eller i EUs kvotehandel system) er et åpent spørsmål. Fordi CO₂ hopper opp i atmosfæren og gir en langvarig oppvarming, må tiltak som reduserer kortlivede effekter på bekostning av økt drivstofforbruk vurderes meget nøye. Langsiktig reduksjon i global oppvarming er helt avhengig av raske og dype kutt i CO₂ utslipp. Kortlivede tilleggseffekter kan spille en komplementær rolle. Ufullstendig kunnskap om enkelte tilleggseffekter og negative sideeffekter i form av økt CO₂ er imidlertid en begrensning for en fullstendig vurdering av den rollen.

Kildeliste:

- Airbus Global Market Forecast 2017-2036 (Airbus France 2017), 2018.
- Bickel M., Ponater M., Bock L., et al. Estimating the Effective Radiative Forcing of Contrail Cirrus, *Journal of Climate*. 33(5), 1991-2005, 10.1175/jcli-d-19-0467.1, 2020.
- Burkhardt U., Bock L. & Bier A. Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions, *npj Climate and Atmospheric Science*. 1(1), 37, 10.1038/s41612-018-0046-4, 2018.
- Etminan M., Myhre G., Highwood E. J., et al. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing, *Geophysical Research Letters*. 43(24), 12,614-612,623, 10.1002/2016gl071930, 2016.
- Freeman S., Lee D. S., Lim L. L., et al. Trading off Aircraft Fuel Burn and NO_x Emissions for Optimal Climate Policy, *Environmental Science & Technology*. 52(5), 2498-2505, 10.1021/acs.est.7b05719, 2018.
- Frömming C., Ponater M., Dahlmann K., et al. Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 117(D19), 10.1029/2012jd018204, 2012.
- Le Quéré C., Jackson R. B., Jones M. W., et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement, *Nature Climate Change*. 10(7), 647-653, 10.1038/s41558-020-0797-x, 2020.
- Lee D. S., Fahey D. W., Forster P. M., et al. Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmospheric Environment*. 43(22), 3520-3537, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>, 2009.
- Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, 117834, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>, 2020.
- Lund M. T., Aamaas B., Berntsen T. K., et al. Luftfart og klima - En oppdatert oversikt over status for forskning på klimaeffekter av utslipp fra fly. CICERO Report 2016:05, 2016.
- Matthes S., Grewe V., Dahlmann K., et al. A concept for multi-criteria environmental assessment of aircraft trajectories. , *Aerospace* 4(42), 2017.
- Ponater M., Marquart S., Sausen R., et al. On contrail climate sensitivity, *Geophysical Research Letters*. 32(10), 10.1029/2005gl022580, 2005.
- Rap A., Forster P. M., Haywood J. M., et al. Estimating the climate impact of linear contrails using the UK Met Office climate model, *Geophysical Research Letters*. 37(20), 10.1029/2010gl045161, 2010.
- Teoh R., Schumann U., Majumdar A., et al. Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, *Environmental Science & Technology*. 54(5), 2941-2950, 10.1021/acs.est.9b05608, 2020.
- Yin F., Grewe V., Frömming C., et al. Impact on flight trajectory characteristics when avoiding the formation of persistent contrails for transatlantic flights, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 65, 466-484, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.017>, 2018.