



Nr B2305
April 2018

Sammanställning av flygets klimatpåverkan och möjlighet till minskning av dessa - alternativa flygrutter för minskade höghöjdseffekter och biobränslen

Litteraturgenomgång inom förstudie OP-FLYKLIM

Jana Moldanova, Christian Asker och Sara Sköld



I samarbete med: SMHI, Swedavia och
Luftfartsverket

Författare: Jana Moldanová, Christian Asker och Sara Sköld

Medel från: Trafikverkets FOI verksamheten

Fotograf: Eberhard Grossgasteiger, www.pexels.com

Rapportnummer B 2305

ISBN 978-91-88787-50-7

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2018

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Projektet Optimering av flygrutter för minskad klimatpåverkan OP-FLYKLIM, som finansierats av Trafikverkets forsknings- och innovationsportfölj för luftfartsområdet, kartlägger kunskapsläget inom flera områden som har betydelse för möjligheterna att minska flygets klimatpåverkan. Denna rapport är nummer 1 av tre leveranser i projektet och kartlägger kunskapsläget kring hur flygets utsläpp, inklusive introducerade k-strimmor och cirrusmoln påverkar klimatet och möjligheten att minska flygets klimatpåverkan genom alternativa flygrutter. Den innehåller även en sammanställning av kunskapsläget när det gäller biojetbränslen, deras "well-to-wake"-klimatpåverkan och emissioner av luftföroreningar, i jämförelse med fossila jetbränslen.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Summary	6
Inledning	7
Påverkan av flygets utsläpp på klimatet	7
Olika mått av klimatpåverkan	11
Möjligheten att minska flygets klimatpåverkan genom alternativa flygrutter	13
Allmänt 13	
Effekter av att endast undvika kondensationsstrimmor	13
Transatlantiska flygningar	14
Möjliga reduktioner för Arktis.....	14
Möjligheter till reduktion av klimatpåverkan för trafik över svenskt luftrum	14
Biojetbränslen	15
Produktionssätt för alternativa flygbränslen	15
Typer av alternativa jetbränslen	17
Utsläpp av växthusgaser	18
Förändringar i markanvändning.....	18
Slutsatser kring växthusgasutsläpp från AJF	19
Ytterligare omständigheter kring produktion av AJF	19
Källor 20	

Sammanfattning

Idag står den globala flygtrafiken för ca 2-3% av det fossila CO₂-utsläppet härlett från mänskliga aktiviteter. Flygtrafikens bidrag till global uppvärmningen i form av strålningsdrivning är dock 4.9% om man tar hänsyn till effekt från kortlivade klimatföroreningar (short-lived climate pollutants, SLCP) relaterade till flyget, även kallade höghöjdseffekter. Dessa innefattar utsläpp av vattenånga, sot och andra partiklar, bildning av kondensstrimmor och flyginducerade cirrusmoln samt utsläpp av NO_x som leder till förändringar av halter av ozon och metan i atmosfären. Det relativa bidraget av SLCP från flyget varierar kraftigt beroende på vilket mått man använder, med GWP₂₀ (Global Warming Potential på en tidshorisont 20 år) ligger total effekt av flygmissionerna relativt till CO₂ inom intervallet 2.1-4.8, för GWP₁₀₀ ligger samma proportion mellan 1.3 och 2.0, använder man Global TemperaturPotential GTP ligger proportionen mellan 1.0 och 1.1 för GTP₁₀₀.

Klimatpåverkan av SLCP är starkt beroende av atmosfäriska förhållanden där utsläppen sker. Persistenta kondensstrimmor bildas och värmer upp klimatet när flygplan rör sig i områden som har luftfuktighet övermättad mot is och som är molnfri. Även utsläpp av NO_x kan ge olika effekter beroende på förhållandena vid utsläpp. Flera studier har utvärderat möjligheterna att optimera flygrutter med hänsyn till både CO₂ utsläpp och effekter från SLCP genom att justera var/när största delen av utsläppen sker. Man har visat att trots en högre bränsleförbrukning vid alternativa flygrutter kunde man uppnå en minskad klimatpåverkan med mått GWP₁₀₀.

Klimatmålet med max. 2° temperaturhöjning kräver mer än en halvering av utsläppen av växthusgaser till år 2050 vilket kräver en bred övergång till alternativa bränslen fria från fossilt kol. För flyget finns ett flertal alternativa jetbränslen (AJF) med lägre halter fossilt kol i sin well-to-wake cykel (WTWk). WTWk minskningen varierar kraftigt med processen som bränslet framställts genom samt vilket råmaterial som använts. Det finns flera negativa effekter kring ändrad markanvändning som är en mycket viktig hållbarhetsaspekt. Det alternativ som ger störst WTWk minskning är att producera AJF från restprodukter som avfallsolja och skogsrester. För vissa alternativ, som sojabönor och palmolja, ligger WTWk högre hos AJF än hos de konventionella jetbränslena. Dessutom kopplas AJF-produktionen till en konflikt mellan matproduktion och bränsleproduktion, potentiellt minskad biodiversitet, vattenkonsumtion samt föroreningar som uppstår vid produktion vilka inte går att ignorera ur ett hållbarhetsperspektiv.

Summary

Today, global aviation contributes with about 2-3% to the global anthropogenic emissions of fossil CO₂, but its contribution to global warming in the form of radiative forcing is 4.9%, taking into account also the effects of short-lived climate pollutants (SLCPs) related to aviation, also known as high altitude effects. These include emissions of water vapour, soot and other particles, formation of contrails and aircraft-induced cirrus clouds, as well as emissions of NO_x which lead to changes in levels of ozone and methane in the atmosphere. The relative contribution of SLCPs from aviation varies greatly depending on the metric used, with GWP₂₀ (Global Warming Potential over a 20-year horizon), the total effect of global aviation emissions relative to CO₂ is in the range of 2.1-4.8, for GWP₁₀₀ is the same ratio in the range 1.3 and 2.0, for Global Temperature Potential (GTP) range for the same ratio is 1.0 to 1.1 for GTP₁₀₀.

The climate impact of SLCPs depends strongly on the atmospheric conditions where emissions occur. Persistent contrails are formed and heat the climate when airplanes move in areas with air humidity oversaturated with respect to ice and are cloud free. NO_x emissions can also cause different effects depending on conditions at the place of emission. Several studies have evaluated the possibilities of optimizing air traffic routing with respect to both CO₂ emissions and SLCP effects by adjusting where/when most of the emissions occur. It has been shown that even with increased fuel consumption in an alternative flight route one could achieve a reduced climate impact, using GWP₁₀₀ as a metric.

The climate target of max 2° temperature increase requires more than halving the greenhouse gas emissions by 2050, which requires a worldwide transition to alternative fossil-free fuels. For the aviation, there are several alternative jet fuels (AJF) with lower carbon intensity in its well-to-wake cycle (WTWc) comparing to the raw-oil based ones. The WTWc reduction varies greatly with the process method and the raw material used in the jet fuel production; the negative effects of land use change have an important sustainability aspect. Alternatives which give the largest WTWc reduction is AJF produced from residues such as waste oil and forest residues. For some alternatives, such as soybeans and palm oil, the WTWc is higher for AJF than for conventional jet fuels. AJF production is also linked to sustainability issues regarding land use, such as the conflict between food production and fuel production, potentially reduced biodiversity, water consumption and pollution arising from production.

Inledning

Idag bidrar global flygtrafik med ca 2-3% av det globala antropogena utsläppet av CO₂. Flygtrafikens bidrag till global uppvärmning är dock 4,9 % (osäkerhetsgränser 2-14%) (Lee et al., 2010). Förutom utsläpp av fossilt CO₂ påverkar flygtrafiken klimatet genom en rad andra mekanismer som innefattar utsläpp av vattenånga, sot och andra partiklar, bildning av kondensstrimmor och flyginducerade cirrusmoln samt utsläpp av NO_x som leder till förändringar av halter av ozon och metan i atmosfären. Dessa strålningsdrivande komponenter kan sammanfattas som kortlivade klimatföroreningar (SLCP - Short Lived Climate Pollutants). SLCP emitteras av både landbaserade emissionskällor, sjöfart och flyg; effekter av SLCP emitterade från flyg är dock särskilt viktiga eftersom påverkan är beroende av plats där utsläppet sker och är sammanlagt mycket högre i tropopausregionen där största delen av flygets emissioner sker. Klimateffekter av SLCP relaterade till flyget kallas även höghöjdseffekter.

Mycket forskning bedrivs i Europa om hur flygets utsläpp påverkar klimatet både genom introducerade k-strimmor och cirrusmoln. Att bedöma den totala klimatpåverkan av SLCP är komplicerat. Hänsyn måste tas först till vilka förhållanden som råder när utsläppet sker och därefter den totala effekten på global skala under olika tidshorisonter. Val av både tidshorisont och mått på påverkan har stor betydelse för resultatet av det relativa bidraget av en komponent i utsläppet till den totala klimateffekten. För att minska flygets klimatpåverkan optimerar man i första hand flygrutter med hänsyn till minskad bränsleförbrukning och med det minskade utsläpp av koldioxid, men man har undersökt även möjligheten att minska flygets totala klimatpåverkan genom alternativa flygrutter där effekterna av SLCP kan minskas (t ex i EU-projektet REACT4C). Denna rapport presenterar en sammanställning av det aktuella forskningsläget för att bedöma hur ett eventuellt framtida system för att minska klimatpåverkan från flyg i svenskt luftrum skulle kunna utformas. Detta kan uppnås genom optimerade flygrutter för att ta hänsyn både till bränsleförbrukning och till bildningen av k-strimmor och cirrusmoln samt effekter av SLCP.

För att uppnå ett klimatmål med max. 2° temperaturhöjning måste utsläppen halveras till år 2050. Detta mål kräver både energieffektivisering, minskning av påverkan av SLCP och även en bred övergång till alternativa bränslen fria från fossilt kol. IATA har identifierat att användning av biojetbränslen är enda alternativet som finns för flyg inom kort och medel tidshorisont (2020-2050) för att uppnå utsläppsminskning på den ambitionsnivån (IATA, 2016). Här redovisar vi kunskapsläget för biojetbränslen, deras "well-to-wake" klimatpåverkan i jämförelse med fossila jetbränslen och hållbarhetsfrågor kopplade till dessa.

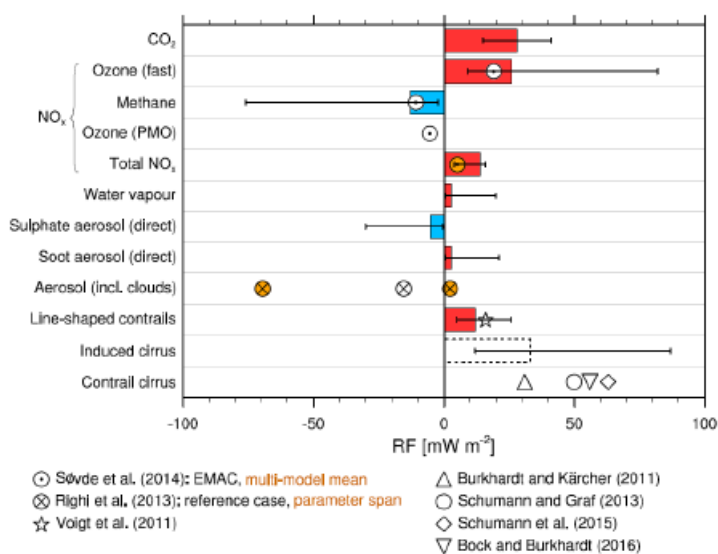
Påverkan av flygets utsläpp på klimatet

Det finns ett antal olika effekter av flyg. Lee et al. (2010) skiljer mellan effekter av sub- och supersoniskt flyg, i denna rapport betraktar vi enbart subsoniskt flyg. Effekterna är:

- Emissioner av CO₂ (uppvärmning)
- Emissioner av vattenånga på hög höjd (uppvärmning)
- Emissioner av NO_x som leder till ozonbildning i troposfären (uppvärmning)
- Emissioner av NO_x som via atmosfärkemiska processer leder till nedbrytning av metan i atmosfären (nedkylning), vilket i sin tur orsakar minskning av troposfärisk ozon på en lång tidshorisont (nedkylning); minskning av metan leder även till minskning av vattenånga på samma tidshorisont (nedkylning, Grewe et. al., 2014)

- Emissioner av sotpartiklar orsakar direkt positiv strålningsdrivning (uppvärmning)
- Bildning av sulfatpartiklar från svavlet i jetbränslet orsakar direkt negativ strålningsdrivning (nedkylning)
- Bildning av persistenta kondensstrimmor efter flygplan bidra med både positiv (värmande) och negativ (kylande) strålningsdrivning men den sammanlagda effekten är positiv (uppvärmning)
- Bildning av cirrusmoln från spridda kondensstrimmor bidrar, likt kondensstrimmor, med både positiv och negativ strålningsdrivning med netto uppvärmningseffekt.
- Sotpartiklar från flyg kan påverka cirrusmoln även genom seeding av molnen, d.v.s. partiklar fungerar som extra kondensationskärnor för molndroppar, magnitud och även riktning av påverkan av den effekten är dock mycket osäker.
- Sotpartiklar från flyg bidrar till uppvärmning även sekundärt, genom deposition på is och snö i Arktis (Jacobsson et al., 2012)

Figur 1 visar en uppdaterad bedömning av storleken av de ovan listade effekterna på strålningsdrivningen och deras osäkerhetsmarginaler. Figuren avser strålningsdrivning som det globala flygets emissioner sedan förindustriell tid har orsakat år 2005. Flygets totala strålningsdrivning år 2005 (exklusive flygintroducerade cirrusmoln) var $\sim 55 \text{ mW}\times\text{m}^{-2}$ (90% sannolikhetsintervall 23–87 $\text{mW}\times\text{m}^{-2}$), vilket var 3.5% av den totala antropogena strålningsdrivningen (90% sannolikhetsintervall 1.3–10%). Inkluderar man uppskattning av strålningsdrivning av flygintroducerade cirrusmoln, stiger flygets bidrag år 2005 till 78 $\text{mW}\times\text{m}^{-2}$ (90% sannolikhetsintervall 38–139), vilket motsvarar 4.9% av den totala antropogena strålningsdrivningen (90% sannolikhetsintervall 2-14%) (Lee et al., 2009).



Figur 1. Komponenter av strålningsdrivning år 2005 från emissioner från global flygtrafik under eran från förindustriell tid fram till år 2005 (baserat på Lee et al., 2010, uppdaterat av Greve et al., 2017)

Att bedöma klimatpåverkan från alla komponenter inklusive SLCP är betydligt mer komplicerat än klimatpåverkan från bara CO₂ där man förutsätter en jämn fördelning av CO₂ över atmosfären. Både de atmosfärskemiska processerna som involverar NO_x, processer som involverar bildning av partiklar i emissionsplymer, bildning av kondensstrimmor och processer som påverkar cirrusmoln varierar med fysikaliska och kemiska förhållanden som råder i områden där utsläppet sker samt

under deras transport och omvandling. Persistenta kondensationsstrimmor bildas och påverkar klimatet enbart när flygplan flyger genom områden vars fuktighet är övermättad mot is (ice-supersaturated region, ISSR) och området samtidigt är fritt från cirrusmoln. Om första kriteriet inte uppfylls sublimerar k-strimman snabbt, andra kriteriet är ett villkor för att en persistent strimma ska ha effekt på strålningsbalansen. Klimatpåverkan av NO_x visar en distinkt variabilitet med altitud och latitud. Utsläpp i områden med molnbildning och nederbörd har betydligt lägre påverkan än utsläpp i regioner med uppvällning, vilken förlänger uppehållstider av emitterade ämnen. Kemisk sammansättning och fotokemisk aktivitet vid emissionen påverkar också storlek på perturbation i ozon och metankoncentrationerna som en enhetsmassa NO_x emission orsakar. Att kunna ta hänsyn till detta kräver beräkningar med kemiska transportmodeller som beskriver dessa processer både på regional och global skala. Dagens kunskap om dessa processer, särskilt de som gäller påverkan på cirrusmoln, innehåller många osäkerheter och resultaten har således stor spridning.

För klimatsystem som är i jämvikt, d.v.s. om koncentrationen av klimatgaser är konstant eller ökar exponentiellt i jämn takt, gäller ett linjärt förhållande mellan global medeltemperaturförändring vid jordens yta ΔT_s och strålningsdrivningsperturbation ΔF :

$$\Delta T_s = \lambda \cdot \Delta F$$

Där λ är klimatkänslighetsparametern som för långlivade klimatgaser antogs ha ett konstant värde. Detta värde skiljer sig mellan olika klimatmodeller. På senare tid har forskningen visat att λ varierar med typ av strålningsdrivning, särskilt om den är inhomogen, detta gäller också strålningsdrivning från flygrelaterat ozon, kondensstrimmor och cirrusmoln (Lee et al., 2010). Egenskapen att ΔF orsakar olika temperaturrespons kallas 'klimatverkan' (eng. 'efficacy'):

$$r_i = \lambda_i / \lambda_{CO_2}$$

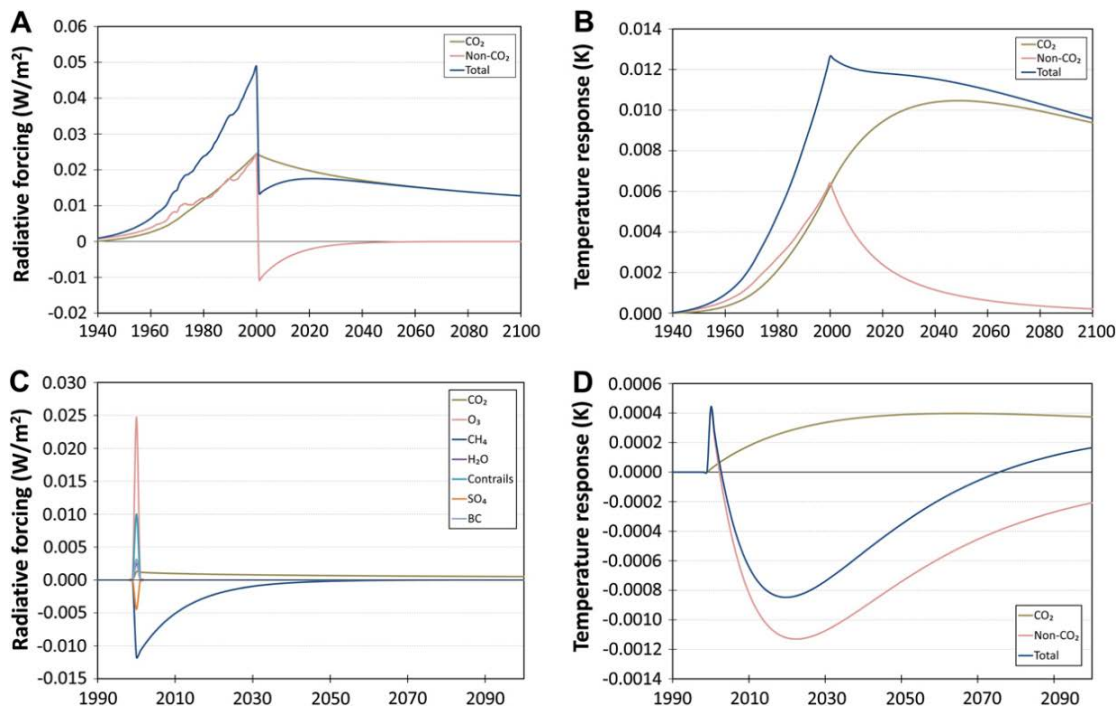
Där λ_i och λ_{CO_2} är klimatkänslighetsparametrar för klimatgas, kondensstrimma eller moln, respektive CO₂. Tabell 1 visar r_i för strålningsdrivningskomponenter relaterade till flyg.

Tabell 1. Klimatverkan av strålningsdrivningsperturbationer från flygemissioner (Ponater et al., 2006)

Perturbation	r_i
CO ₂	1
Ozon (flygrelaterat)	1.37
CH ₄	1.18
H ₂ O	1.14
Kondensstrimmor	0.59
Cirrus	Okänt

En viktig aspekt av inhomogen strålningsdrivning är att värmande och kylande komponenter ofta inte verkar på samma plats. Värmande effekter av kortlivat ozon bildas som en konsekvens av flygets NO_x emissioner och är koncentrerade till norra hemisfären. Där sker största delen av emissionerna. De kylande effekterna av minskade metanutsläpp och till detta relaterad minskning av ozon är jämnt fördelat globalt (IPCC 1999). Klimatresponsen av strålningsdrivning från flygintroducerade moln är ännu mer komplicerad eftersom ΔF kan växla mellan positiv och negativ drivning beroende på geografisk position och tid på dygnet.

En aspekt av strålningsdrivning som mått är att den inte tar hänsyn till tidsaspekter relaterade till upptag av värme i oceanerna vilket ökar klimatsystemets tröghet. Medan temperaturresponserna på en kort strålningsdrivningsperturbation klingar av snabbt, kommer responserna på en perturbation som varat under en lång tid att klinga av under mycket längre tid. Figur 2 illustrerar detta genom att visa responserna av strålningsdrivningen och globala medeltemperaturen på flygemissioner från en studie av Lee et al. (2010). Lee et al. (2010) använde en förenklad klimatmodell för att studera effekten av två olika emissions-scenarier; det första var historiska flygemissioner fram till år 2000 då de upphör tvärt; det andra är en emissionspuls under 1 år. Fallet med historiska emissioner (panel A och B) visar att när flygemissionerna upphör i modellen, får man en negativ RF från icke-CO₂ komponenter och en långsam minskning av RF från CO₂ i linje med tidsskalan för den globala kolsänkan. Temperaturresponserna från icke-CO₂ komponenter minskar långsamt eftersom restvärme lagrats i haven och fördröjer uppkomsten av en ny jämvikt. Det är en ännu långsammare respons för CO₂. För pulsemission (panel C och D) kan man se en långsam respons av RF och ännu långsammare för temperaturen från CO₂ komponenten. Man kan även se en negativ strålningsdrivning från metanrespons som relativt till CO₂ responsen är större än i fallet med historiska emissioner och som varar ungefär under ett decennium och en kort respons av RF på de kortlivade komponenterna (O₃, H₂O, aerosoler och kondensstrimmor). Sammanlagda temperaturresponserna i det här fallet är negativ under flera decennier för att sedan bli positiv p.g.a. CO₂ drivning. Sammantaget kan man se att temperaturresponserna har mycket lång tidshorisont men att även RF från SLCP kan ha avklingningstid på mer än ett decennium.



Figur 2. Respons av strålningsdrivning RF (W/m²) (A&C) och global temperatur T (°K) (B&D) för samtliga komponenter relaterade till flygemissioner. A&B: RF och T för scenario med historiska flygemissioner mellan 1940 och 2000, inga emissioner efter 2000. C&D: scenario med en pulsemission som motsvarar förbränning av bränsle (motsvarande 100 Tg C) under ett år (från Lee et al., 2010).

Olika mått av klimatpåverkan

Det finns en rad mått som används för att bedöma klimatpåvekan från emissioner. Kyotoprotokollet använde Global Warming Potential (GWP) med flera tidshorisonter som mått. GWP är ackumulerad strålningsdrivning av en klimatgas normaliserad med ackumulerad RF från samma massa CO₂, båda är ackumulerade under tidshorizonten i fråga. Med tanke på det komplexa förhållandet mellan strålningsdrivning och temperatur för olika strålningsdrivningskomponenter har GWP tidvis varit kritiserat, men den generella acceptansen av måttet och utvecklingen av konceptet gör att den är idag brett använd även för SLCP. I IPCC rapporten 'Aviation and the Global Atmosphere' (IPCC, 1999) användes momentan RF från historiska flygmissioner som mått. Det är ett relevant mått som är skilt från GWP och förväxling av dessa två orsakade en del missförstånd. Man introducerade begreppet Radiative Forcing Index (RFI) som är momentan RF från SLCP från historiska flygmissioner normaliserad med RF från CO₂ från detsamma. RFI förväxlas dock ofta med GWP för flygets SLCP.

Olika mått är relevanta för olika frågeställningar. Därför har en rad klimatmått undersökts som utgår från global RF eller förändring av global temperatur, som absoluta effekter eller relativa till påverkan från CO₂. Även effekterna av en pulsemission (t.ex. X ton BC under 1 år eller global emission av NO_x från det globala flyget under 1 år) eller av bestående emissioner har studerats. Denna kan antingen motsvara ett visst scenario eller hålla emissionen konstant på en viss nivå, t.ex. emissioner från globalt flyg 2018. En viktig skillnad är också att man antingen undersökt ackumulerat effekt under tidshorizonten i fråga eller på effekten vid en specifik tidpunkt. Exempel på mått som betraktar effekten vid en tidpunkt är strålningsdrivning och temperaturförändring från allt historiskt utsläpp av flyg år 1992 vilket användes i IPCC rapporten 'Aviation and the global atmosphere' (IPCC, 1999). Man kan annars använda år 2005 som presenteras i Lee et al. (2010). I en lång rad studier analyseras effekter av olika emissionsscenarioer vid fasta tidpunkter (år 2050, 2100) i framtiden (e.g. AR5, IPCC 2015). Tabell 2 ger en översikt av klimatmått.

Tabell 2 Sammanfattning av olika mått av global medelklimatpåverkan (Efter Fuglestad et al., 2010)

Mått	Emissioner	Användning, fördelar	Nackdelar
RF, ΔT nuvarande	Pågående historiska emissioner	Tillskrivning av nutida klimatförändringar till olika komponenter	Temperaturmättet kräver bedömning av klimatkänsligets-parametrar, båda inventering av historiska emissioner av samtliga relevanta föroreningar
RF, ΔT framtida	Pågående historiska och framtida emissioner	Påverkan från historiska och framtida emissioner på RF och ΔT vid en tidpunkt i framtiden	Som ovan, kräver också framtidsscenarioer för emissionerna.
RF, ΔT från emissionspuls – GTP(H)	Pulsemission under 1 år	Påverkan av ett års emission på temperatur år H i framtiden (motsvarande finns för RF)	Val av tidshorizont H har mycket större effekt än hos GWP och kräver bedömning
Tidsintegrerad RF från emissionspuls - GWP	Pulsemission under 1 år	Karakterisering av klimatpåverkan av nutida emissioner inom Kyoto-protokollet	Val av tidshorizont är en bedömning
Pågående GWP(H) och pågående GTP(H)	Konstant pågående emission	Version av GTP där emission är konstant mellan nu och en tidpunkt i framtiden	Räknar med konstant emission i framtiden

Tabell 3 visar GWP, GTP och CO₂-ekvivalentemissioner för olika komponenter från ett års emissioner från globalt flyg år 2005. I nedre delen av tabellen kan man se hur den relativa betydelsen av SLCP-komponenten i totala klimateffekten varierar med måtten som används. GWP som integrerar effekten av pulsemissionen är störst på en 20-års horisont och sjunker på en 100-års horisont. GTP som tittar på effekt på temperaturen vid tidshorisonten visar maximalt relativ betydelse på 20-års horisont om man räknar med effekter från flygintroducerade cirrusmoln och för en 100-års horisont sjunker effekten. Utan cirrusmoln är total GWP/GWP(CO₂) mindre än 1 för de kortare tidshorisonterna.

Tabell 3. Emissionsklimatmått (GWP20, GWP 100, GTP20, GTP100) och motsvarande CO₂ ekvivalentemissioner CO₂eq. NO_x-lo är låg uppskattning av NO_x klimatpåverkan baserat på Stevenson et al. (2004), NO_x-hi är hög uppskattning baserat på Kohler et al. (2008).

	Mått					Flygemissioner 2005	CO ₂ eq (TgCO ₂ /år) för 2005					LOSU ^b (CO ₂ eq)
	GWP 20	GWP 100	GTP 20	GTP 50	GTP 100		Tg CO ₂ , N, H ₂ O	GWP 20	GWP 100	GTP 20	GTP 50	
CO ₂	1	1	1	1	1	641	641	641	641	641	641	Hög
NO _x -lo	120	-2,1	-590	-210	-9,5	0,88	106	-1,9	-521	-185	-8,4	Väldigt låg
NO _x -hi	470	71	-200	-59	7,6	0,88	415	63	-177	-52	6,7	Väldigt låg
H ₂ O	0,49	0,14	0,14	0,023	0,02	252	123	35	35	5,8	5	
SO ₄	-140	-40	-41	-6,9	-5,7	0,18	-25	-7	-7	-1,2	-1	
BC (sot)	1600	460	470	77	64	0,006	10	2,8	2,8	0,46	0,38	
K-strimmar	0,74	0,21	0,21	0,036	0,03	641	474	135	135	23	19	Låg
AIC ^a	2,2	0,63	0,64	0,11	0,089	641	1410	404	410	71	57	Väldigt låg
<i>Inkl AIC</i>												
Total NO _x -lo							2739	1208	696	554	713	Väldigt låg
Total NO _x -hi							3048	1273	1040	688	728	Väldigt låg
Ratio (lo) Total/CO ₂							4,3	1,9	1,1	0,86	1,1	Väldigt låg
Ratio (hi) Total/CO ₂							4,8	2	1,6	1,1	1,1	Väldigt låg
<i>Exkl. AIC</i>												
Total NO _x -lo							1329	805	286	484	656	Väldigt låg
Total NO _x -hi							1638	869	630	617	671	Väldigt låg
Ratio (lo) Total/CO ₂							2,1	1,3	0,45	0,75	1	Väldigt låg
Ratio (hi) Total/CO ₂							2,6	1,4	0,98	0,96	1	Väldigt låg

a AIC = Flygintroducerade cirrus moln (Aircraft Introduced Cirrus)

b LOSU = Nivå av vetenskaplig förståelse (Level Of Scientific Understanding)

Möjligheten att minska flygets klimatpåverkan genom alternativa flygrutter

Allmänt

Med minimering av flygets klimatpåverkan menas minskning av utsläpp som har en värmande effekt på klimatet. De åtgärder som kan implementeras får inte öka flygets kostnader för mycket och inte heller påverka säkerheten. Dock kan eventuella åtgärder för att reglera flygets ekonomi vara aktuella att implementera för att ruttoptimering ska fungera på bästa sätt.

Det finns två huvudspår för att minska klimatpåverkan av flyget: minimera själva utsläppen eller minimera effekterna som utsläppen av kortlivade komponenter har genom att justera var/när största delen av utsläppen sker. Minimering av effekterna sker generellt på bekostnad av själva utsläppens storlek, men trots detta kan den totala påverkan på klimatet minska på detta vis.

Flertalet studier inom området utgår från faktiskt använda flygrutter under en begränsad period samt geografiskt område och modellerar hur utsläppen kunde ha blivit för olika alternativa färdvägar. Då används även det väder som rådde under den utvalda perioden.

Medan CO₂ har lång uppehållstid i atmosfären och därmed påverkar klimatet under lång tid har de andra utsläppen från flyget kortare uppehållstid. Valet av metrik och tidshorisont påverkar därmed vilken flygrutt som ger lägst klimatpåverkan, samt även vilken typ av åtgärd som är mest effektiv.

Effekter av att endast undvika kondensationsstrimmor

Det finns flera studier kring hur ändring av enbart flyghöjden kan påverka bildningen av kondensationsstrimmor och av dessa orsakade cirrus-moln. Flera tar dock ej hänsyn till effekter av NO_x utan fokuserar enbart på kondensationsstrimmor i förhållande till CO₂-emissioner.

Irvine et al. (2012) undersökte klimatpåverkan från CO₂ samt kondensationstrimmor för transatlantiska flygningar (London – New York). Irvine et al (2012) har dock bortsett från effekter av NO_x. Metoden använder förenklade modeller där utbredning och uppehållstid av k-strimmor utgår från observationer. Genom att omdirigera flyg horisontellt och undvika ändring av flyghöjd kunde den mest bränslebesparande flyghöjden bibehållas. Detta minimerade bränsleåtgången och kunde därmed hålla nere kostnader samt CO₂-relaterade climateffekter. Resultaten visar att positiva effekter, dvs minskad klimatpåverkan från flyget, kan uppnås med denna metod, men att dessa är starkt beroende av metrik och tidshorisont. Vidare visas att små flygplan kan ta en större (upp till 4 gånger) omväg än stora för att undvika kondensationsstrimmor med bibehållen klimatnytta, vilket kan ha betydelse för svensk luftfart.

Operationell tillämpning förutsätter att områden med ISSR (ice-supersaturated region) kan prognostiseras med hög tillförlitlighet.

Transatlantiska flygningar

Flera studier har granskat just transatlantiska flygningar, bland annat inom projektet REACT4C. Modellsystem som används i REACT4C innehåller avancerade beräkningar av 5-d s.k. klimatkostnadsfunktioner, d.v.s. lokal klimatpåverkan av en enhet emission (3-d rumskoordinater + tid + typ av emission). Klimatkostnadsfunktioner beräknas med hjälp av en global atmosfärisk kemisk modell där både effekter av NO_x emission på ozon och metan och bildning, spridning och uppehållstid av k-strimmar modelleras i modellen som körs i trajektorie-mod.

Grewe et al. (2017) visar att det är möjligt att genomföra ruttoptimering som ger en minskad klimatpåverkan genom klimatoptimering av flygrutter. Denna studie är gjord för transatlantiska flygningar, där både sommar och vinterförhållanden inkluderats. Studien visar bland annat att klimatpåverkan kan reduceras med 10% med 1% ökning av flygkostnaderna, vilket till största delen är bränslekostnader. Resultaten gäller för marknära temperatur och tidshorisonten 20 år som mått men håller även för tidshorisont 100 år. Effekter av sot på molnens egenskaper har inte inkluderats i studien då dessa är mycket osäkra.

Då det är transatlantiska flygningar som studeras är det möjligt att optimera rutter utan att ta hänsyn till trängsel i luftrummet, vilket är ett antagande som inte nödvändigtvis håller för Skandinavien. Metoden som används i studien kan dock inkludera justering av rutter för att upprätthålla nödvändiga säkerhetsavstånd mellan flygplan.

Möjliga reduktioner för Arktis

Jacobsson et al. (2012) har studerat hur omdirigering av all kommersiell flygtrafik från Arktis (innanför polcirkeln) kan ändra klimatpåverkan. Omdirigeringen leder till något längre flygvägar, med högre emissioner av CO₂ och SLCP till följd, men reduktionen av BC/sot som deponeras på isen i Arktis kan få stora effekter för minskad klimatpåverkan.

Arktis istäcke tros kunna försvinna inom 2-3 årtionden, vilket kommer att ge en ytterligare kraftig uppvärmande effekt, genom att solstrålningen i högre utsträckning absorberas av land och hav, istället för att reflekteras av isen. Omdirigering av flygtrafik från Arktis kan fördröja denna utveckling.

Denna metod har även fördelen att den inte kräver operationell ruttplanering med den komplexitet och kostnader som detta kan medföra. Enligt Jacobsson et al. (2012) är åtgärdskostnaderna mycket lägre än kostnaderna för climateffekterna. Därför skulle de kunna kompenseras med marknadsbaserade åtgärder om kostnader för klimatpåverkan från SLCP skulle inkluderas.

Möjligheter till reduktion av klimatpåverkan för trafik över svenskt luftrum

I princip kan de modeller som används i t.ex. REACT4C användas för att utvärdera ruttoptimering för flygtrafik över svenskt luftrum. En mer detaljerad studie som inkluderar praktiska tester krävs dock för att med säkerhet kunna utvärdera kvalitet och praktisk genomförbarhet.

En sådan studie kan använda ett dataset med historiska trafikdata för ett antal flygningar, som sedan används som baslinje för att utvärdera klimatpåverkan. Sedan kan ruttoptimering användas för dessa flygningar och en optimerad total klimatpåverkan beräknas. GWP100 är måttet som

används mest i sammanhanget. En studie där man studerar ett scenario där en åtgärd tillämpas på större skala under en längre tidsperiod och där man tittar på momentana effekter av pågående scenarioemissioner på RF och global temperatur i flera punkter i framtiden är en viktig komplettering för att ta hänsyn till tidigare diskuterat komplexitet av SLCPs roll i klimatsystemet.

Detaljerad information om metodiken som använts i REACT4C ges i Grewe et al. (2014).

För att kunna använda metodiken operationellt krävs väderprognosdata tillgänglig i god tid innan flygningen ska starta, som kan ge en pålitlig väderprognos och prognostisera ISSR. Vidare krävs information om den planerade ruten och vilka möjliga rutter som kan användas med hänsyn till eventuell trängsel i luftrummet.

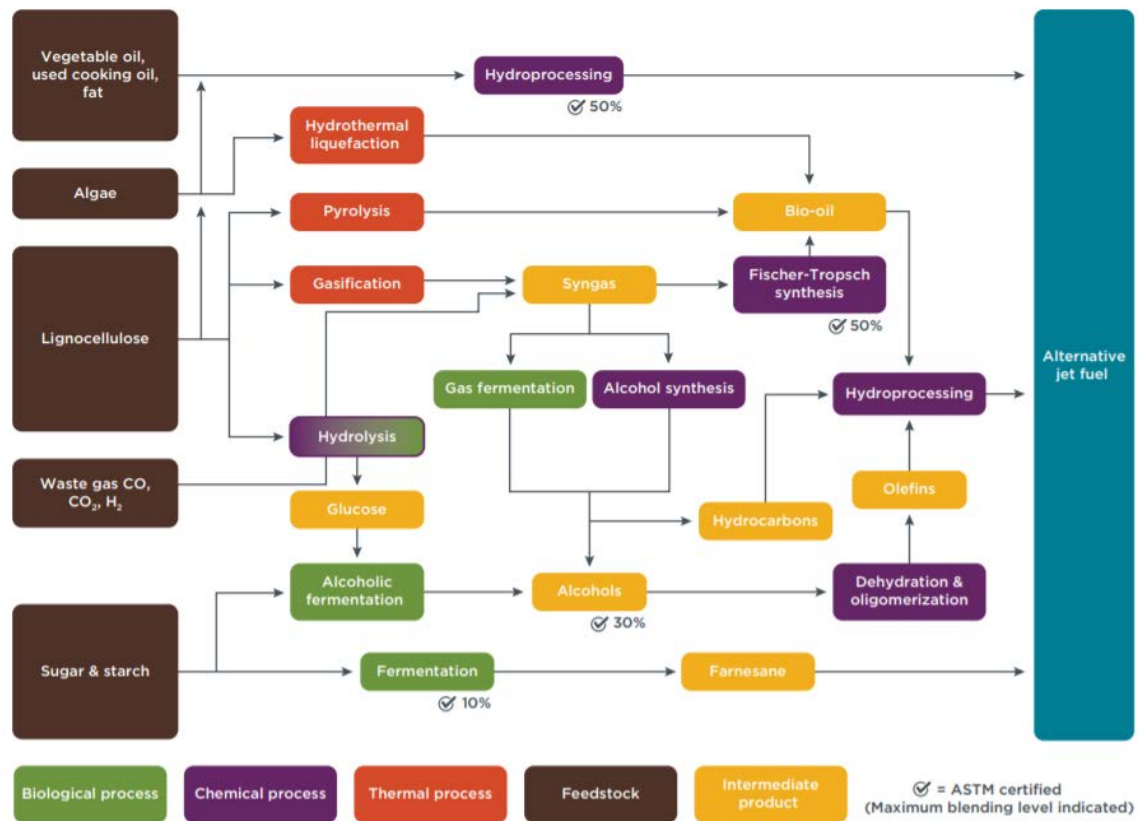
Innan en operationell tillämpning kan tas fram, krävs en studie som kvantifierar klimatbesparingarna.

Biojetbränslen

Bränslen från okonventionella källor kallas *alternativa jetbränslen* (från engelskans Alternative Jet Fuels eller AJF) och skiljs då från konventionella källor såsom råolja, olika vätskekondensat från naturgas, tjockolja, skifferolja och oljesand (ASTM, 2016). Forskning visar dock att trots att bränslena kommer från okonventionella källor, har de alternativa flygbränslena varierande utsläpp av växthusgaser, i vissa fall högre än de petroleumbaserade bränslena. Det är två komponenter som avgör om alternativa bränslen ger en minskad effekt på klimatet: koldioxidintensiteten hos bränslena och tillgängligheten till det råmaterial som utgör grunden för produktionen (ICCT, 2017). För att kunna ta ställning till koldioxidintensiteten ur ett livscykelanalysperspektiv behöver både de olika alternativa bränslena presenteras samt deras produktionssätt.

Produktionssätt för alternativa flygbränslen

Utvecklat alternativt flygbränsle måste certifieras i enlighet med standarden ASTM D7566 för att kunna användas inom flygbranschen. Organisationen ASTM International har utvecklat standarden som fastställer tekniska krav på bränslena när de blandas med petroleumbaserat flygfotogen. Bland annat måste värmevärde, bränsletäthet, fryspunkt, fluiditet, aromatisk halt och termisk stabilitet säkerställas (ASTM, 2016). Produktionen av alternativa flygbränslen kan ske genom biologiska, kemiska, mekaniska och termala processer, se Figur 3 nedan. Det finns även hybrider mellan dessa processer för att framställa jetbränslen. Fem alternativa flygbränslen har producerats och certifierats av ASTM i enlighet med standarden. Det är (med maximala inblandningshalten inom parentes) hydroprocessade estrar och feta syror (50% inblandning), Fischer-Tropsch fotogen med eller utan aromater (båda 50% inblandning), hydroprocessade fermenterade sockerarter (10% inblandning) samt alkohol till jetfotogen (30% inblandning) (ICCT, 2017).



Figur 3. Utvalda produktionsätt för alternativa flygbränslen. Copyright: The International Council on Clean Transportation, 2017. Reprinted with permission.

Ett centralt begrepp vid produktion av bränsle är hydroprocessning, något som nämnts tidigare och även visas i processbilden ovan. Det är egentligen två separata processer: hydrobehandling och hydrocrackning. Hydrobehandling (hydrotreatment på engelska) är en katalytisk reaktion med väte för att öka bränslets renhet och ge en likformig produkt som kan beredas vidare. Hydrocrackning bryter ner de komplexa kolvätena till enklare molekyler så att det blir mer högvärdiga produkter (ICCT, 2017).

Typer av alternativa jetbränslen

Hydroprocessade estrar och feta syror (HEFA) eller HVO (Hydrogenated vegetable oils) produceras genom att konvertera växtoljor eller avfallsoljor och fetter till diesel eller jetbränsle. Med crackning och hydroprocessning skapas ett bränsle som kemiskt är likt konventionellt jetbränsle och enkelt att blanda med detsamma, så kallat *hydroprocessed renewable jet* eller *synthetic paraffinic kerosene*. Processen att framställa bränslet är väletablerad och har använts av både flygvapnet och kommersiella flygningar med blandningar upp till 50 % med vanligt jetbränsle (BioJetMap, 2016). År 2017 fanns tio anläggningar som producerade förnybar diesel genom samma process, totalt 4,5 miljoner kubikmeter bränsle under 2014 (EIA, 2016).

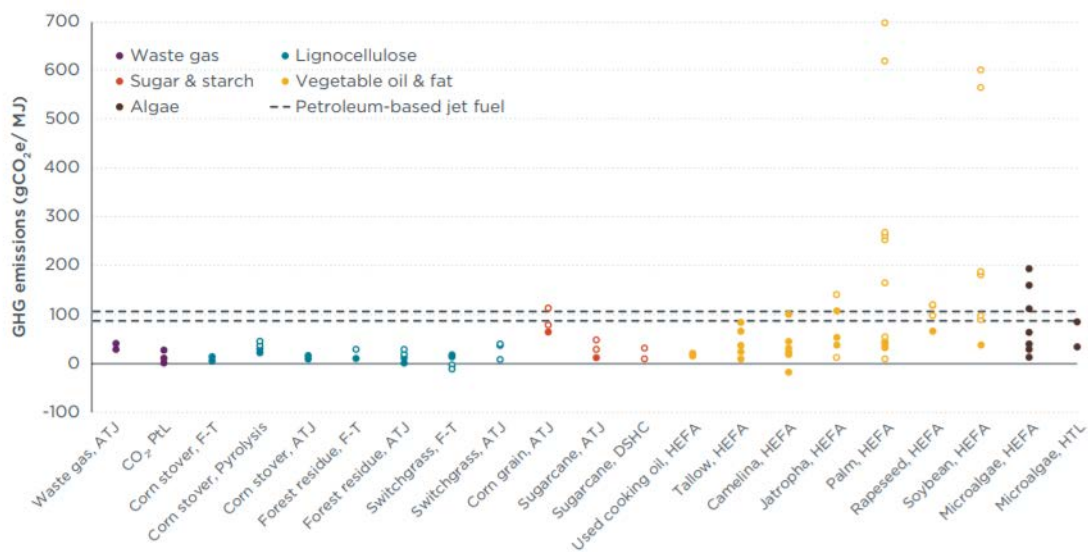
Biomassa kan konverteras till bio-olja genom snabb pyrolysis, Fischer-Tropsch-syntes eller hydrotermal förvätskning (HTL, på engelska hydrothermal liquefaction). Därefter måste bio-oljorna genomgå hydroprocessning och crackas till den typ av bränsle som vill produceras. Idag är det billigare att producera diesel än jetbränsle, vilket har gjort att befintliga anläggningar producerar biodiesel (ICCT, 2017).

Det finns två sätt att producera alternativt jetbränsle genom power-to-liquids (PtL). Antingen via Fischer-Tropsch-syntes eller metanolsyntes. Power-to-liquids är en process där kolväten produceras från el, vatten och koldioxid. Koldioxiden skulle potentiellt kunna tas från utsläpp och därmed ge ytterligare koldioxidminskningar. Det finns idag en demonstrationsanläggning som framställer PtL via Fischer-Tropsch-syntes i Dresden i Tyskland. Alternativt jetbränsle via PtL är godkänt via ASTM med 50 % inblandning. Ingen PtL har fått godkänt som framställts via metanolsyntes än. Styrkor hos PtL är att det krävs lite vatten för framställning jämfört med biobränslen samt att det inte finns några behov för att ta mark i anspråk. Det är jämförelsevis dyrt att framställa PtL om man ser till den totala produktionskostnaden (GEA, 2016).

Bränsle kan även framställas genom att alkohol konverteras till bränsle, så kallat alcohol-to-jet, eller ATJ. Råmaterialet kan vara socker eller stärkelse, eller syntesgas (en blandning av kolmonoxid och vätgas). Socker kan även fermenteras till jetbränsle, då kallat direct sugar to hydrocarbons (DSHC) eller synthesized iso-paraffins produced from hydroprocessed fermented sugars (SIP). SIP produceras idag från sockerråvara men skulle kunna produceras från cellulosa (ICCT, 2017). Både förgasningsteknik samt Fischer-Tropsch-teknik har tillräcklig mognad för att ha en kommersiell produktion i stor skala om 5-10 år (IVL, 2018).

Utsläpp av växthusgaser

Enligt Internationella flygtransportorganisationen IATA kan utsläppen av koldioxid ur ett livscykelanalysperspektiv minskas med 80 % om man använder alternativa jetbränslen istället för konventionella bränslen (IATA, 2017). Koldioxidminskningen well-to-wake (WTWk) varierar med processen som bränslet framställts genom samt vilket råmaterial som använts. I det ideala fallet får man potentialen för utsläppsminskningar genom att subtrahera koldioxidintensiteten hos alternativa jetbränslen (AJF) från de konventionella jetbränslenas koldioxidintensitet. I vissa fall ligger koldioxidintensiteten högre hos AJF än hos de konventionella jetbränslena, se Figur 4 (ICCT, 2017).



Figur 4. Koldioxidintensitet för alternativa jetbränslen, grupperad efter råmaterialkategori samt produktionsväg. Ofyllda prickar i grafen inkluderar uppskattningar i markanvändnings-förändringar (ATJ = alcohol to jet, DSHC = direct sugar to hydrocarbons, F-T: Fischer-Tropsch, HEFA = hydroprocessed esters and fatty acids, HTL = hydrothermal liquefaction, PtL = power-to-liquids). Copyright: The International Council on Clean Transportation, 2017. Reprinted with permission.

Förändringar i markanvändning

Då utsläpp från alternativa jetbränslen beräknas, måste hänsyn tas till de eventuella förändringar i markanvändning som sker. Då AJF produceras från biomassa kan direkta och indirekta utsläpp ske på grund av ändrad markanvändning. Direkta utsläpp kan ske om markanvändningen ändras på ett sätt så att markens möjlighet att binda kol försämras när marken ställs om till att producera råmaterial till biobränslen. Indirekta utsläpp sker då åkermark konverteras till biomasseproducerande mark och annat land måste tas i anspråk för matproduktion. De ökande utsläppen kommer då från den nya mark som tagits i anspråk för att producera mat. Denna effekt är svårt att studera och har därför modellerats genom GLOBIOM (Global Biosphere Management Model). Markanvändningsförändringen varierar över världen, men i denna modell baseras datan på efterfrågan på biobränsle sett från ett europeiskt perspektiv och bör därför enbart ses som indikativ (Valin et al, 2015).

Ett sätt att undvika utsläpp från förändrad markanvändning är att använda restprodukter för produktion av AJF. Typiska restprodukter från skogsbruk är gallringsved samt s.k. GROT (grenar

och toppar), som ofta lämnas kvar i skogen idag. I Tabell 4 syns jämförande värden i utsläpp av koldioxid för skogsrester jämfört med andra bioprodukter (IVL, 2018).

Tabell 4. Växthusgasutsläpp vid produktion av bioflygbränslen och besparingspotentialen jämfört med konventionella flygbränslen, baseras på ett utsläpp på 88 g CO_{2eq}/MJ (IVL, 2018).

Råvara	Avfallsolja ^c	Majs-rester	Skogs-rester	Skogs-rester ^a	Skogs-rester ^b	Skogs-rester ^a	Skogs-rester ^b
Teknik^d	HEFA	FT	FT	HTL	HTL	HPO	HPO
Utsläpp [g-CO_{2eq}/MJ]	27	13	6	18	20	22	40
Växthusgasreduktion	69%	85%	93%	80%	77%	75%	55%

^a Produktion av vätgas från processgaser; ^b Produktion av vätgas från naturgas; ^c Avser främst använd frityrolja;

^d HEFA=Hydrogenated esterified fatty acids, FT=Fischer Tropsch, HTL=Hydrothermal liquefaction, HPO=Hydrogenated pyrolysis oil

Slutsatser kring växthusgasutsläpp från AJF

Palmolja, sojabönor och mikroalger visar på de största variationerna i koldioxidintensitet. Det uttalande som IATA gjort med minskningar på 80 % i utsläpp för konvertering från konventionellt flygbränsle till biobränsle gäller inte biobränsle baserat på palmolja och sojabönor som snarare kan öka utsläppen med upp till 7 gånger. Få studier har hittats kring koldioxidintensitet när det gäller biobränslen baserat på socker och stärkelse. Det alternativ som ger minst negativ effekt på markanvändning är att producera AJF från restprodukter. Det är avgörande att rätt produktions sätt och gröda eller biprodukt väljs vid användande av AJF för att flygindustrin ska kunna minska sina koldioxidutsläpp (ICCT, 2017).

Ytterligare omständigheter kring produktion av AJF

Det finns ytterligare några försvårande omständigheter som kan påverka möjligheten att framställa AJF för flygindustrin som bland annat handlar om hållbarhet vid produktion. Hållbarhetsproblematiken är kopplad till markanvändning, konflikten mellan matproduktion och bränsleproduktion, potentiellt minskad biodiversitet, vattenkonsumtion samt föroreningar som uppstår vid produktion. För att komma till rätta med detta har möjligheten att utveckla en hållbarhetscertifiering av bränsle diskuterats. En rapport producerad av WWF i Tyskland under 2013 visade stora brister vid en genomgång av olika certifieringsinitiativ. Bland annat säkerställdes inte organisationerna tillräckliga krav på hållbarhetsmål, att många av initiativen har låg transparens samt inte kunde säkerställa förbud av slav- eller barnarbete (WWF, 2013).

Mängden tillgänglig biomassa är också ett potentiellt problem för att kunna framställa de mängder av AJF som krävs för flygindustrins behov. Dessutom finns andra sektorer globalt som behöver biobränsle som konkurrerar med flygbranschen om bränslet. Ett scenario beräknat av ICCT uppskattar tillgången på AJF till omkring 1,1 EJ/år år 2050 (ICCT, 2017). Detta motsvarar 4,6 % av International Civil Aviation Organisation (ICAO) uppskattade totala jetbränslebehov år 2050.

Det är stora osäkerheter i uppskattningen av kostnader för framställning av AJF. Framför allt beror framtida kostnader för bränslet på en mängd faktorer, från råvarans typ och kvalitet, hur det konverteras till bränsle, storlek på produktionsindustri, processdesign till hur mogen tekniken är. Dessutom är det idag svårt att dela information om kostnader för AJF då detta anses kommersiellt känsligt (IRENA, 2017). Generellt kan man dock säga att råvarukostnaden är högst för

vegetabiliska oljor och fetter såsom palmolja och sojaböner, lägst för avfall som hushållsavfall. Samtidigt är de tekniker som krävs för att framställa användbart biobränsle högst för hushållsavfall och lägst för vegetabiliska oljor och fetter (ICCT, 2017). Mawhood et al. (2016) bedömer HEFA som mest redo att kommersialiseras tillsammans med bränsle framställt med Fischer-Tropsch, medan ATJ anses mer på forskningsnivå, där fler än enstaka produktionsanläggningar finns. Flyget är priskänsligt och flygbränslet står i medeltal mellan 2011-2018 för 25 % av flygoperatörernas operationella kostnader (Statista, 2018). Detta i kombination med avsaknad av skatt på konventionellt flygbränsle minskar flygoperatörernas vilja att betala för AJF jämfört med vägtransportörerna som vant sig vid en högre skattenivå.

Sedan första kommersiella testflygningen på alternativt jetbränsle år 2008-2009 (Science America, 2009), har kommersialiseringen av AJF fortsatt vara begränsad på grund av förhållandevis hög kostnad och låg tillgänglighet. En del flygoperatörer har utvecklat långsiktiga överenskommelser med tillverkare av alternativt jetbränsle för att säkerställa tillgång. IATA har registrerat 29 avtal från 2009-2015, där till exempel flygbolag som Cathay Pacific, United Airlines och FedEx/Southwest Airlines ingår (IATA, 2016).

2011 har EU kommissionen tillsammans med flera flygplans och bränsleproducenter och flygbolag lanserat 'The biofuel flight path initiative' som satt upp ett mål att år 2020 tillverka 2 miljoner ton biojetbränsle årligen, vilket motsvarar ca 4% av EUs konsumtion av jetbränsle. År 2015 var tillverkningen fortfarande på en låg nivå, ca 5 kt.

Sammantaget gör svårigheterna att framställa alternativt jetbränsle på ett miljömässigt, ekonomiskt och socialt hållbart sätt i kombination med de marknadsförutsättningar som flygbranschen har det svårt att nå koldioxidminskningar inom branschen genom omställning till alternativt jetbränsle.

Källor

ASTM International. (2016) ASTM D7566-16b, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. doi:10.1520/D7566-16B

BioJetMap. (2016). Biokerosene flight database and web application. <http://www.biojetmap.eu/#31080>, besökt 2018-05-07.

Energy Information Administration. (2016). International energy outlook 2016. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/transportation.cfm>, besökt 2018-04-30.

Fuglestvedt, J. S., Shine, K. P., Berntsen, T., Cook, J., Lee, D. S., Stenke, A., Skeie, R. B., Velders, G. J. M., and Waitz, I. A.: Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics, Atmos. Environ., 44, 4648–4677, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.044>, 2010.

German Environment Agency (GEA), 2016. Power-to-Liquids - Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel.

Grewe, V., 2017. Climate Impact of Aviation CO₂ and non-CO₂ effects and examples for mitigation options. Presentation on T&E workshop 23 January 2018, [www.transportenvironment.org/sites/te/files/Climate%20impact%20of%20aviation%20CO₂%20and%20non-CO₂%20effects_Volker%20Grewe.pdf](http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Climate%20impact%20of%20aviation%20CO2%20and%20non-CO2%20effects_Volker%20Grewe.pdf)

Grewe, V., Matthes, S., Frömming, C., Brinkop, S., Jöckel, P., Gierens, K., Champougny, T., Fuglestvedt, J., Haslerud, A., Irvine, E., Shine, K., 2017, Feasibility of climate-optimized air traffic routing for trans-Atlantic flights. *Environ. Res. Lett.* 12, 034003.

Grewe V. et al., 2014. Aircraft routing with minimal climate impact: the REACT4C climate cost function modelling approach (V1.0). *Geosci. Model Dev.* 7, 175–201

International Air Transport Association (IATA), 2017. Fact Sheet Alternative Fuels. https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-alternative-fuels.pdf, besökt 2018-04-22.

International Air Transport Association (IATA) 2016. IATA 2015 report on alternative fuels (10th ed.). <https://www.iata.org/publications/Documents/2015-report-alternative-fuels.pdf> besökt 2018-05-04.

International Council on Clean Transportation (ICCT) 2017. White paper. Mitigating International Aviation Emissions – Risks and opportunities for alternative jet fuels. Washington, USA. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Aviation-Alt-Jet-Fuels_ICCT_White-Paper_22032017_vF.pdf, besökt 2018-05-04.

International Renewable Energy Agency (IRENA) 2017. Biofuels for aviation – technology brief. http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_biofuels_for_aviation_2017.pdf besökt 2018-05-07.

IPCC, 1999. Aviation and the global atmosphere. In: E Penner, J., Lister, D.H., Griggs, D.J., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland, M. (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, in: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp., 2014.

Irvine, E. A., Hoskins, B. J., and Shine, K. P., 2012. The dependence of contrail formation on the weather pattern and altitude in the North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12802, doi:10.1029/2012GL051909.

IVL Svenska Miljöinstitutet, 2018. Bioflygbränslen från skogsråvara, rapport till Vinnova, 2018-01-09, Dnr. 2017-01228.

Jacobsson, M. Z., Wilkerson, J. T., Balasubramanian, S., Cooper, W. W. Jr., Mohleji, N., 2012. The effects of rerouting aircraft around the arctic circle on arctic and global climate. *Climate Change* 115, 709-724.

Köhler, M.O., Rädcl, G., Dessens, O., Shine, K.P., Rogers, H.L., Wild, O., Pyle, J.A., 2008. Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation. *Journal of Geophysical Research* 113, D11305.

Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., and Sausen, R.: Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmos. Environ.*, 43, 3520–3537, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>, 2009.



Mawhood, R., Gazis, E., de Jong, S., Hoefnagels, R., Slade, R., (2016) Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 10:462-484.

Ponater, M., Pechtl, S., Sausen, R., Schumann, U., Hüttig, G., 2006. Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: a state-of-the-art assessment. *Atmos. Environ.* 40, 6928–6944.

Science America (2009) Biofuels ready for takeoff. <https://www.scientificamerican.com/article/are-jet-biofuels-ready-for-takeoff/>, besökt 2018-04-27

Statista, the statistics portal (2018) Aviation industry fuel costs worldwide. <https://www.statista.com/statistics/591285/aviation-industry-fuel-cost/>, besökt 2018-05-04

Stevenson, D.S., Doherty, R.M., Sanderson, M.G., Collins, W.J., Johnson, C.E., Derwent, R.G., 2004. Radiative forcing from aircraft NO_x emissions: mechanisms and seasonal dependence. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 109, D17307.

Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., & Hamelinck, C. (2015). The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf, besökt 2018-04-23

WWF Germany (2013) Comparative analysis of certification schemes for biomass used for the production of biofuels. http://wwf.panda.org/wwf_news/?212775/WWF-analysis-Searching-for-Sustainability%E2%80%93Comparative-analysis-of-certification-schemes-for-biomass-used-for-the-production-of-biofuels, besökt 2018-05-04.



Rapport B 2305 – Sammanställning av flygets klimatpåverkan och möjlighet till minskning av dessa - alternativa flygrutter för minskade höghöjdseffekter och biobränslen

