

Beräkning av avgasemissioner från flygtrafik

Beskrivning av FOI3-metoden

TOMAS MÅRTENSSON, ANDERS HASSELROT



Tomas Mårtensson, Anders Hasselrot

Beräkning av avgasemissioner från flygtrafik

Beskrivning av FOI3-metoden

Titel	Beräkning av avgasemissioner från flygtrafik, beskrivning av FOI3-metoden
Title	Calculation of emissions from air traffic, a description of the FOI3-method.
Rapportnr/Report no	FOI-R-3677-SE
Månad/Month	06
Utgivningsår/Year	2013
Antal sidor/Pages	29 p
ISSN	
Kund/Customer	Transportstyrelsen, Swedavia
Forskningsområde	3. Flygteknik och luftstridssimulering
FoT-område	Flygteknik
Projektnr/Project no	E34513, E34514
Godkänd av/Approved by	Lars Høstbeck
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Denna rapport innehåller en beskrivning av FOI3-metoden vilken används för att beräkna mängden förbränt bränsle samt avgasutsläpp från flygtrafik. Metoden är framtagen för att effektivt kunna räkna på stora volymer trafik. De utsläpp som beräknas är CO₂, CO, HC (uppdelat i CH₄ och NMVOC), NO_x (samt andel N₂O) och SO₂.

Med FOI3-metoden beräknas totalemissioner och bränsleförbrukning för varje segment av flygningen vilket möjliggör att beräkna utsläppen för LTO-cykeln (Landning and Take Off - utsläpp under 3000 fot) eller för hela flygningen.

Det är enkelt att fördela beräknade utsläpp på flygplantyp, flygplats eller andra kategorier som t.ex. inrikes eller utrikes trafik.

Detta dokument beskriver FOI3 metoden vad avser metod, krav på indata, typ av utdata och en uppskattning av metodens felkällor.

Detta metoddokument ersätter tidigare rapport (FOI-R-1625—SE) som beskriver den äldre FFA2-metoden.

Nyckelord: Emissioner, bränsleförbrukning , flygtrafik, klimatrapportering

Summary

This report describes the FOI3-method. The method calculates emissions and fuel burn from aircraft. This method is tailored to deal with a large amount of data (typically emission inventories for a year of traffic at many airports). The calculated emissions are CO₂, CO, HC (divided into CH₄ and NMVOC), NO_x, N₂O and SO₂.

The FOI3 method calculates total emissions and fuel burn for each segment of the flight and can be used to calculate the so called LTO cycle (Landing and Take Off cycle below 3000 feet) or for the entire flight.

It is easy to allocate the output to individual aircraft types or airports or in different categories like international or domestic flights.

In this report we present the methodology, emission sources, requirements on input data and an error estimate of the FOI3 method.

This report replaces earlier report (FOI-R-1625--SE) in which the older FFA2 method was described.

Keywords: air traffic, fuel burn, emissions, climate reporting

Innehållsförteckning

1	Inledning	11
2	Nödvändig indata – Flygtrafik	12
3	Underlagsdata för emissioner	13
3.1	Kabinfaktor	13
3.2	Flygplan.....	14
3.3	Motor	14
3.4	Modellering LTO.....	15
4	Metod	17
4.1	Flygplatser och distanser	17
4.2	Flyghöjd.....	17
4.3	Flygplan och emissionsdata.....	18
4.4	Data för LTO	18
4.5	Taxningsdata.....	18
4.6	Emissionsdata för hela flygningar	18
4.7	Flygningar till slutdestination i Sverige.....	19
4.8	Flygningar till slutdestination utomlands	19
5	Resultat och rapportering	20
5.1	Koldioxid, svaveldioxid och använd energi	20
5.2	Lustgas och metan.....	21
5.3	Partiklar	21
5.4	Rapportering	22
6	Feluppskattning	23
6.1	Antagandet om en optimal flyghöjd.	23
6.2	Interpolering av data i Hurdy Gurdy	23
6.3	Taxning	23
6.4	Flugen distans.....	23
6.4.1	Flugen distans – start och stigning i TMA.....	24
6.4.2	Flugen distans – cruise, stigning och plané över TMA	24
6.4.3	Flugen distans – plané i TMA och landning.....	25
6.5	Reservbränsle	25
6.6	Kombination av flygplan och motor.....	25
6.7	Sammanfattning feluppskattningar	25

6.8	Jämförelser försålt flygbränsle med modellberäkningar av bränsleförbrukning.	26
7	Referenser	29

Förkortningar

AERO-MS	Aviation Emissions and evaluation of Reduction Options - Modeling System (AERO-MS)
APU	Auxillary Power Unit
ATM	Air Traffic Management
ATS	Air Traffic Services
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CH ₄	Metan
CO	Kolmonoxid
CO ₂	Koldioxid
EDMS	Emissions and Dispersion Modelling System
Eurocontrol	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration
FDR	Flight Data Recorder
FFA	Flygtekniska Försöksanstalten
FOA	First Order Approximation
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
HC	Ofullständigt förbrända kolväten (ibland UHC)
HCR	Hydron Carbon Ratio
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IEA	International Energy Agency
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
LTO	Landing and Take-Off
NASA	The National Aeronautics and Space Administration
Nm	Nautiska mil
NMVOC	Non Methane Volatile Organic Compounds
NO _x	Kväveoxid
NO ₂	Kvävedioxid
pkm	Passagerarkilometer
SFC	Specific Fuel Consumption
SO ₂	Svaveldioxid
TMA	Terminal Manoeuvring Area
UHC	Unburned Hydrocarbons
UNFCCC	United Nations
Termer	
Kabinfaktor	Andel av flygplanssätena som är fyllda under en flygning (oftast uttryckt i procent)
Storcirkeldistans	Den fysiskt kortaste vägen mellan två punkter på jordytan
Passagerarkilometer	antalet passagerare multiplicerat med flugen sträcka

1 Inledning

FOI3-metoden har utvecklats ur FFA2-metoden [1]. FOI3-metoden innebär att ett nytt sätt att hantera flygplansdata har införts. Metoden har använts för redovisning av avgasutsläpp för 2011 års flygningar och senare. FFA2-metoden var i sin tur en vidareutveckling av FFA-metoden [2] vilken användes fram till och med 1997. 1998 räknades alla resultat från 1995 och framåt om med FFA2-metoden vilken har använts sedan dess. Namnet FFA härstammar från Flygtekniska Försöksanstalten, FFA, som 2001 blev en del av Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI.

I denna rapport beskrivs den s.k. FOI3-metoden vilken är framtagen för att beräkna mängden förbränt bränsle samt avgasutsläpp från flygtrafik. De utsläppsslag som beräknas är CO₂, CO, HC (uppdelat i CH₄ och NMVOC), NO_x (samt andel N₂O) och SO₂. liksom mängden förbränt bränsle.

Med FOI3-metoden beräknas totalemissioner och bränsleförbrukning för hela flygningar och samt för utsläpp från flygplansrörelser under 3000 fot vid flygplatserna, den s.k. LTO-cykeln. Möjlighet finns att separat beräkna resultat för inrikes samt utrikes trafik. Flygplatsutsläppen kan presenteras för varje flygplats med uppdelning i starter och landningar. Beräkningsmetoden är utvecklad för att enkelt kunna användas vid framtagning av data för nya statistikbehov. Olika behov kan tillgodoses genom att utsläppen kan fördelas på ett antal olika poster, t.ex. LTO-cykeln av flygningarna för en speciell flygplats, miljö- eller bullerklass eller internationella/nationella flygningar.

Följande utdata tas normalt fram med FOI3-metoden. Ytterligare information kan relativt enkelt produceras.

- totala antalet flygna kilometer
- totala antalet passagerarkilometer
- totala antalet flygningar
- genomsnittlig kabinfaktor (utifrån aktuellt totalt antal passagerare och bedömd total kabinkapacitet)
- totala mängden utsläpp av CO₂, CO, HC (uppdelat i CH₄ och NMVOC), NO_x (samt andel N₂O) och SO₂
- totala mängden förbränt bränsle
- totala mängden använd energi

Ovanstående data kan fördelas på följande poster:

- utsläppen vid flygplatserna vid rörelser under 3000 fot
- enskilda flygplatser, avgångar eller ankomster
- internationella/nationella flygningar
- trafikflyg/annan flygverksamhet (typ av flygning)
- jet-, turboprop- och kolvmotorflygplan

2 Nödvändig indata – Flygtrafik

I sin första version använde FOI denna metod år 1995 och formatet på indataunderlaget har inte ändrats sedan dess. Statistiken som tillhandahålls av bl. a. Transportstyrelsen och Swedavia innehåller ett stort antal parametrar. Varje rad i underlaget innehåller trafikdata för en flygplansindivid per destination. I tabell 4.1 finns, *med grå bakgrund*, de parametrar som måste finnas för att kunna utföra beräkningarna. Övriga listade parametrar behövs för att kunna fördela resultaten i önskade kategorier.

Tabell 2.1 Beskrivning av parametrar i statistiken

Parameter	Beskrivning	Anmärkning
Flygplats	Namn på den första av flygplatserna i flygplatsparet	Fyrställig ICAO-kod
TYP	Flygplanstyp	Fyrställig ICAO-kod
Destination	Namn på den andra av flygplatserna i flygplatsparet	Fyrställig ICAO-kod
A/D	ARRIVAL eller DEPARTURE, anger om flygningen ankommer eller avgår från Flygplats	A eller D
Antal rörelser	Antal starter (D) eller landningar (A)	
PAX	Antal passagerare	
INT/DOM	Anger huruvida flygningen är internationell eller nationell	I eller D
Klass	Anger typ av flygverksamhet	A="aerial work", I=skol, M=militär, N=charter, P=privat, S=linjefart, T=taxi
Bolag	Flygbolag	Treställig ICAO-kod
Regbet	Registreringsbetäckning	Femställig nationell kod

Notera att FOI3-metoden för varje flygplantyp *antar en given motortyp*. Om motortyp rapporteras i indata är det alltså inte säkert att det är den motorn som används vid beräkningen i FOI3-metoden, se kapitel 3, där FOI3-metodens motorer redovisas.

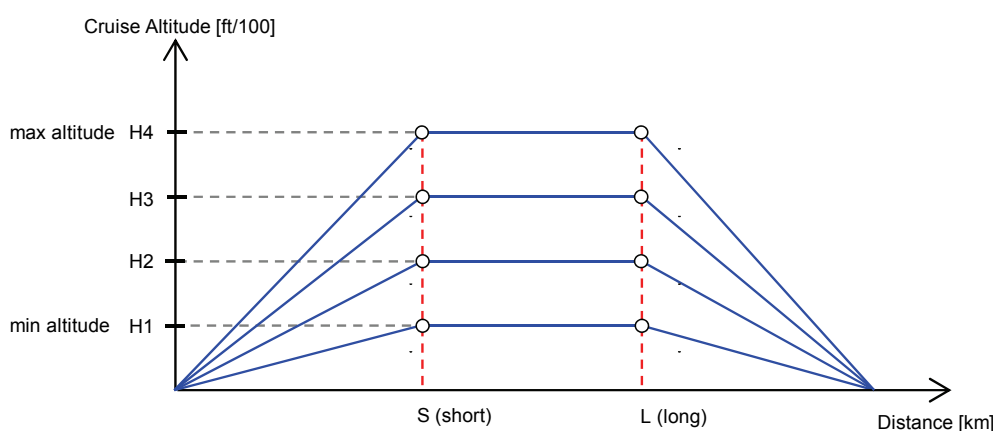
3 Underlagsdata för emissioner

En jämn kvalitet på emissionsunderlagen erhålls genom att uteslutande använda en och samma datakälla: PIANO [3], ett mjukvaruverktyg för parametriska studier av flygplansdesign, innehåller data för en stor del av de flygplan som trafikerar Sverige. I programmet finns en stor databas med omkring 200 flygplan med tillhörande data för aerodynamik och motorer. Flygplan som saknas i databasen kan skapas i programmet förutsatt att geometri, aerodynamik och motorkarakteristik är kända. Majoriteten av de flygplan för vilka emissionsdata tagits fram i denna rapport baseras på PIANO-data vilka läggs i en FOI-administrerad databas benämnd Hurdy-Hurdy [4][5].

Enkla flygbanor kan konstrueras varvid bränsleförbrukning och totalemissioner beräknas. De grundemissionsdata som används i PIANO hämtas från "ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank" [6]. Denna databas innehåller emissionsdata endast för jetmotorer med en dragkraft över 26,7 kN. Databasen innehåller uppgifter om NO_x -, HC- och CO-emissioner (i formen g/kg bränsle) samt bränsleflöde för varje motor.

Underlag för turbopropmotorer samt mindre jetmotorer är hämtade från de olika motortillverkarna [7]. Boeing 2-metoden [8] används för att beräkna emissioner under flygning (d.v.s. utanför LTO-cykeln) utifrån bränsleförbrukningen som modelleras fram i PIANO. Prestanda för flygplan som inte finns i PIANO fås ur Jane's¹ eller andra öppna källor.

Med PIANO körs en lång och en kort distans för flygplanet. En högsta flyghöjd definieras och ur det väljs sedan tre ytterligare lägre höjder. Detta ger sammanlagt åtta datapunkter som är det som används för framtagning av emissionskoefficienterna i Hurdy-Hurdy, se figur 1.



Figur 1 De åtta datapunkterna som beräknas i PIANO och använd i databasapplikationen.

3.1 Kabinfaktor

För hela flygningar, d.v.s. flygningar från en flygplats till en annan, är sambanden mellan bränsleförbrukning och emissioner funktioner av startvikten. Startvikten beror i sin tur av den planerade flygdistansen vilken är dimensionerande för den mängd bränsle man för med sig. Då man utför en simulering av en flygning i PIANO och anger en tänkt flygsträcka beräknas den förväntade bränsleförbrukningen inklusive standardbränslereserver. Vid körningen med PIANO förutsätts en kabinfaktor på 65 % men vid beräkning av totala utsläpp i FOI3-metoden görs en justering av kabinfaktorn med

¹ IHS Jane's Defense & Security Intelligence & Analysis

hjälp av inrapporterade data, så den genomsnittliga kabinfaktorn² används (FFA2-metoden förutsatte 65 respektive 90 % i sina beräkningar)

3.2 Flygplan

I underlagen FOI räknar på finns ofta hundratals olika flygplantyper representerade. Alla typer som är nya identifieras före körning och emissionsdata för dessa måste skapas. Detta görs antingen med PIANO enligt ovan beskriven metodik eller så används ett befintligt ”jämförelseflygplan”, d.v.s. en flygplantyp som har samma emissionskaraktistik som då får representera den nya typen.

Precis som tidigare vid framtagandet av emissionsdata har största vikten lagts vid de vanligaste flygplanen, d.v.s. de flygplan som utför den största delen av trafikarbetet och som därmed har stor inverkan på utsläppsmängden. För de resterande flygplanstyperna som trafikerar Sverige har data för jämförda flygplanstyper använts.

Vid 2012 års emissionsberäkningar omfattade flygplansdatabasen 238 objekt, varav 97 helt (41 %) var på jämförelsegrund. Resten av flygplanen kan anses vara PIANO-grundade (direkt framtagna, som också applicerats för andra versioner av samma grundtyp). Trots att antalet jämförda flygplan är stort, bidrar dessa obetydligt i trafikarbetet (Antal passagerarkilometer), vilket bäst illustreras av nedanstående tabell:

Tabell 3.1 Jämförelseflygplanens bidrag till rörelser, bränsleförbrukning och transportarbete i FOI3- metoden (baserat på data från 2012)

	Antal rörelser	Förbrukat bränsle	Antal Passagerare	Antal kilometer	Antal personkilometer
Utrikes	4.36%	1.28%	0.22%	3.57%	0.11%
Inrikes	10.54%	2.33%	1.34%	7.40%	0.85%

Förbrukat bränsle i tabellen representerar bedömd total mängd för jämförflygplanen. Felet i bedömningen kan rimligtvis uppgå till 10 %, vilket totalt sett (alla flygplanen) innebär att bränslefelet är ca 0.13 % (10 % av 1.28 %) för utrikes och 0.23 % (10 % av 2.33 %) för inrikes. Motsvarande siffror gäller för emissionerna, kanske något högre eftersom dessa i regel varierar mera än bränsleflödena.

3.3 Motor

FOI3-metoden *antar* för varje flygplantyp *en motortyp*. År 2011 uppdaterades databasen då vi under 2010 års beräkningar konstaterade att de motorer FFA2 metoden antog på flera vanliga flygplan var på väg att fasas ut av flygbolagen, några av de vanligare typerna representerades då också av jämförelseflygplan³. Det bestämdes att alla viktiga typer skall använda PIANO beräknade data.

I tabell 3.2 syns vilka motorer vi använder vid beräkningarna för de 22 vanligaste förekommande typerna. Valet baseras på statistik från 2011.

Då flygbolagen hela tiden omsätter sin flygplanflotta ligger det i sakens natur att denna databas regelbundet behöver uppdateras för att överensstämma med verkligheten. Avregleringen av det statliga flygplatsägandet har medfört att den trafikstatistik som

² Utifrån aktuellt totalt antal passagerare och total kabinkabinkapacitet i indata beräknas verklig kabinfaktor.

³ Tydliga ändringar i trafikmönstret var bland annat SAS utfasning av MD80 och den ökade användningen B736 och B738 av SAS, Norwegian och Ryan air.

rapporteras in till myndigheterna inte är så komplett som tidigare. Som exempel rapporteras inte motortyp in från alla flygplatser längre.

Det kan på sikt bli svårare att skaffa relevanta uppgifter på vilka motorer som är representativa för trafiken i landet.

Tabell 3.2 Motorer för de vanligaste flygplanen som används vid emissionsberäkningar

<i>Flygplantyp</i>	År	Antal landningar	Motor i databasen
B738	2011	29620	CFM56-7B20/2
A320	2011	16323	CFM56-5A1
B736	2011	8399	CFM56-7B20/2
A319	2011	6920	CFM56-5A1
A321	2011	5910	CFM56-5B1
MD80-serien	2011	5862	JT8D-217
B737	2011	4895	CFM56-7B20/2
B733	2011	3524	CFM56-3C1
E190	2011	3440	CD34-10E7
E145	2011	2713	AE3007A
E170	2011	2502	CF34-8E6A1
B752+B753	2011	2373	RB211-535E4
B735	2011	2229	CFM56-5B1
B762+B763	2011	1930	CF6-80C2B7F
A332+A330	2011	1842	TRENT 772
F100	2011	1027	TAY Mk 650-15
B734	2011	1024	CFM56-3C1
E135	2011	939	AE3007A
B744	2011	857	CF6-80C2B5F
B772+B773+B77L	2011	376	GE90-92B/2
B462	2011	310	ALF502R-5
B463	2011	237	LF507

3.4 Modellering LTO

LTO-cykeln (under höjden 3000 fot över marknivån), från landning t.o.m. start har enligt ICAO följande standardiserade tidsåtgång och motorpådrag:

- Approach (4 min, 30%)
- Take-off (0.7 min, 100%)
- Climb out (2.2 min, 85 %)

- Taxi in, taxi out (26 min, 7%)

I FOI3-metoden har denna schematiska hantering frångåtts⁴, till förmån för en fysikalisk modellering. Grunden för motorpådragen för LTO är fortfarande de procentuella siffrorna för jetmotorer, medan fastiderna bestäms av flygplanets grundegenskaper, såsom sammanlagd motordragkraft, startvikt (baserat på kabinfaktor) och aerodynamik.

För framtagning av emissionsdata för LTO har aerodynamiskt underlag och motorkarakteristik hämtats från PIANO. För bedömning av flygplanens olika fastider inom LTO-cykeln har en fysikaliskt orienterad beräkningsgång, HARP [9], skapats där klaffsättningar och motoregenskaper beaktas. Därmed ges en grund för noggrannare beräkningar.

Den fysikaliska modelleringen av LTO medför att ”Take-off”-delen är beroende av mängden tankat flygbränsle med hänsyn till flygdistansen, medan landningsfasen alltid har ett bestämt värde då i huvudsak endast reservbränsle återstår. Den varierande vikten medför också effekter på tider i LTO under start.

Observera att de schematiska standardtider och gaspådrag som anges i ICAO:s emissionsdatabas ovan *inte* används i dessa beräkningar.

Emissioner för startdelen av flygningen (0-3000 fot) beror av vikten som i sin tur beror av distansen. Vid landningen antas den extra bränslemängden en längre flygsträcka medför vara förbrukad, d.v.s. att endast reservbränsle återstår. Vid flygplanets inträde i landningsfasen är vikten alltså alltid densamma för en specifik flygplanstyp och emissionerna därför oberoende av distansen.

HARP ger underlag till LTO emissionerna i Hurdy-Gurdy.

⁴ Beskriven metodansats är identisk med den som fanns i FFA2-metoden.

4 Metod

Databashanteringsverktyget, Hurdy-Gurdy håller ihop beräkningarna. Med utgångspunkt från i statistiken registrerad flygplansmodell bestäms vilken bränsletyp och emissionsdata som skall kopplas till varje datarad. I de fall emissionsdata saknas viktas flygplanet mot ett bestämt jämförelseflygplan. Distansen räknas fram och alla utsläpp kan sedan beräknas.

Eftersom Hurdy-Gurdys data mestadels gäller för 65 % kabinfaktor, görs alltid en övergripande resultatjustering med hänsyn till verklig kabinfaktor. Denna beräknas utifrån uppgifter om flygplanens kabinkapacitet⁵ (ur databasen) och statistikunderlagets passagerarantal (rapporterat)

För de flygningar som startar och landar på samma flygplats räknas i fallet hela flygningar endast emissioner för en LTO eftersom man inte vet något om hur lång flygningen var.

4.1 Flygplatser och distanser

Alla distanser beräknas såsom storcirkelsavstånd mellan avgång- och destinationsflygplatsernas lägeskoordinater.

Innan körning kan utföras sker en sökning i FOI:s lokaliseringsdatabas där eventuella flygplatskoder som saknas identifieras. Koordinater och tillhörande metadata för dessa flygplatser tillförs på detta vis kontinuerligt lokaliseringsdatabasen. Databasen innehåller för närvarande 9655 flygplatser.

Flygningarna är schabloniserade på så sätt att de är utritade, d.v.s. start- och landningsbanorna antogs vara riktade i samma väderstreck som den tänkta linje som förbinder avgångs- och ankomstflygplatserna. Distanserna som används mellan de olika flygplatserna är det beräknade storcirkelavståndet. Dessa omständigheter ger en viss underskattning av det totala antalet flygna kilometer.

4.2 Flyghöjd

Den naturliga metodansatsen är att anta att flygningen görs på en optimal flyghöjd.

Det är huvudsakligen flygplanets aerodynamiska egenskaper som bestämmer hur högt och fort man flyger. Vingarna ska generera en lyftkraft som svarar mot flygplanets vikt med last. Den höga flygfarten leder till luftmotstånd, bestående av parasitmotstånd (lägsta motstånd, betingat av friktion och aerodynamisk form) och lyftkraftsberoende motstånd. Detta ska balanseras av motorernas sammanlagda dragkraft. Eftersom motorns specifika bränsleförbrukning (SFC, bränsleflöde per dragkraftsenhet) beror relativt lite av flyghöjd, är primärintresset vid flygning att minimera det totala luftmotståndet och därmed motorernas dragkraft. För varje flyghöjd finns det en bränsleoptimal fart.

Bränsleoptimal fart ökar med flyghöjden. När farten närmar sig ljudhastigheten så medför det ökade luftmotståndet att det inte är bränsleekonomiskt att flyga för nära ”ljudvallen”. I praktiken ligger bränsleoptimal fart på dagens passagerarflygplan runt 850-900 km/h.

I Hurdy-Gurdy itereras optimal flyghöjd fram. En alldeles för hög höjd ansätts inledningsvis och sedan stegar programmet iterativt nedåt till man når den höjd där flygningen kan genomföras med hänsyn till förutsättningarna. Notera att denna höjd, särskilt för korta flygningar ofta är högre än vad man i praktiken flyger på, se kapitel 6.1 för feluppskattning.

⁵ Definieras som antal stolar för passagerarflygplan.

4.3 Flygplan och emissionsdata

Innan körning kan utföras sker en genomgång där eventuella flygplan som saknas i databasen identifieras. FOI3 metoden hanterar förutom turbofläkt, turboprop också kolvmotorförsedda flygplan.

Den särskilda behandlingen för militära flygplan (utifrån underlag från Försvarets materielverk, FMV) som gjordes i FFA2-metoden har tagits bort i FOI3-metoden. Att behandla sådana flygplan standardmässigt, bedöms ge likvärdiga data eller bättre, särskilt som FMV-data endast avsåg LTO-delen av flygningen.

Militära helikoptrar, liksom övriga civila sådana, hanteras för närvarande inte alls. Dock finns det en utvecklad databasstruktur för helikoptrar i FOI3-metoden som kan tas i bruk.

4.4 Data för LTO

LTO-delen av en flygning definieras enligt ICAO som aktivitet under 3000 fot (ca 914 m), ”*Landing and Take-Off*”. För *avgångar*, både till *inrikes* och *utrikes* destinationer, ingår ut-taxning, start och stigning upp till 3000 fot i LTO-beräkningen och för *ankomster* ingår plané från 3000 fot, landning och in-taxning.

4.5 Taxningsdata

Taxningsdata, som bestäms av det motorpådrag som nått och jämnt balanserar rullfriktion för gällande flygplanstyngd (effekt av mängden bränsle), har tagits fram på formen utsläpp per tidsenhet. Således en högre nivå vid start och en lägre vid landning.

Vid beräkningar brukar aktuella taxitider från flygplatser tillhandahållas från kunden. Dessa används vid körning. I de fall taxitid inte rapporteras används de grundvärden som redovisas i tabell 4.1. För övriga flygplatser används schablontider på fem minuters ut-taxning och tre minuters in-taxning. Internationella flygningar tilldelas 13 minuters ut- och in-taxning vardera på utlandsdestinationen (totalt 26 minuter, vilket motsvarar ICAO:s standardtid för taxning).

Tabell 4.1 Generella taxningstider (default)

Flygplats	Uttaxning [min]	Intaxning[min]
Stockholm-Arlanda	9,6	5,3
Göteborg-Landvetter	6,4	2,1
Malmö-Sturup	5	3
Övriga inrikes	5	3
Utrikes	13	13

4.6 Emissionsdata för hela flygningar

Sambanden mellan bränsleförbrukning, utsläpp och distansen är inom vissa gränser mer eller mindre linjära. I stället för att som tidigare (FFA2) använda ett par överlappande (i distans) linjära ekvationer, utnyttjas nu (FOI3) Hurdy-Gurdys olinjära egenskaper.

Bränsleförbrukningen (och emissioner av CO, HC och NO_x) för en flygning beräknas som summan av *nio* olika delar av flygningen. Detta illustreras av nedanstående exempel där FC betyder Fuel Consumption:

$$\begin{aligned}
 \text{Fuelmass}[kg] = & FC_{\text{taxiout}}[kg] + FC_{\text{takeoff}}[kg] + FC_{\text{climbout}}[kg] && (\text{Takeoff part of LTO}) \\
 & + FC_{\text{climb2}}[kg] + FC_{\text{cruise}}[kg] + FC_{\text{descent2}}[kg] && (\text{climb and decent to and from Cruise}) \\
 & + FC_{\text{approach}}[kg] + FC_{\text{landing}}[kg] + FC_{\text{taxiinn}}[kg] && (\text{Landing part of LTO})
 \end{aligned}$$

Koldioxid (CO₂) beräknas som förbränt bränsle multiplicerat med 3,16. Hur övriga emissioner beräknas redovisar vi i kapitel fem.

4.7 Flygningar till slutdestination i Sverige

För flygningar med slutdestination i Sverige, ingår i beräkningarna ut-taxning, en hel flygning och in-taxning räknat på endast *ankomster* för att undvika att flygningarna beräknas två gånger. En inrikes flygning är ju registrerad både som ankomst på en flygplats och som avgång på en annan.

4.8 Flygningar till slutdestination utomlands

De internationella hela flygningar som *startar* i Sverige belastar den svenska emissionstotalen till skillnad från de internationella flygningar som *landar* i Sverige. ”Internationella flygningar” betyder här således ut-taxning, flygning till destination utomlands samt in-taxning vid flygplats i utlandet.

5 Resultat och rapportering

Varje indatarad i statistiken, dvs. antalet *landningar* eller *starter* multipliceras med emissionsdata för den speciella flygning som beskrivs av radens parametrar.

Antalet passagerarkilometer, *pkm*, beräknas som antalet passagerare multiplicerat med flugen sträcka.

Möjlighet finns att enkelt dela upp utsläppen på önskat sätt, t.ex. som utsläpp per flygplanstyp, miljöklass eller utsläpp vid viss flygplats.

Hurdy-Gurdy beräknar bränsleförbrukningen och emissioner av CO, HC, NO_x och CO₂. Övriga rapporterade emissioner och energiförbrukning baseras på att resultaten från Hurdy-Gurdy kombineras med specifikationen på flygbränsle och i vissa fall enklare schablonvärden.

Standardförfarande är att, som tidigare redovisats, emissioner redovisas som totalvikten per substans över rapporteringsperioden (vanligen ett år). Uppdelning sker på internationella och nationella flygningar och LTO. Dessutom räknas emissionsfaktorer ut där utsläppen av varje substans delas med den totala energimängden uttryckt i terajoule TJ.

5.1 Koldioxid, svaveldioxid och använd energi

Utsläppen av koldioxid och svaveldioxid och förbrukad energi är proportionella mot bränsleförbrukningen.

En koldioxidfaktor på 3,16 används för Jet A1 (flygfotogen). Denna faktor är bestämd ur HCR = 1,92 (väte-kol-förhållande) för Jet A1.

Faktorn används i FOI3-metoden även för kolvmotorflygplan, trots att HCR = 1.87 för flygbensin. Felet är dock försumbart eftersom kolvmotorflygplanens andel av totalutsläppen är liten: år 2012 stod de för knappt 0,1 % av CO₂-utsläppet från inrikestrafiken.

Tabell 5.1 Bränslespecifikation Jet A1

Parameter	Aviation fuel – Jet A1
Värmevärde	34,9 MJ/l
	43,1 MJ/kg
Fossilt CO₂	2,6 kg/l
	3,16 kg/kg
Svavelinnehåll	250 ppm – massa
	0,025% viktsprocent
SO_x emissioner	0,41 g/l
	0,5 g/kg
Densitet vid +15° C	0,8102 kg/l

Bränslets svavel oxideras vid förbränningsprocessen till svaveloxider. Främst bildas svaveldioxid, SO₂. Idag används vanligen flygbränsle med ett svavelinnehåll på 0,5 g/kg enligt specifikationen på JET A1 (se tabell 5.1). SO₂ beräknas som produkten av förbrukat bränsle och svavelinnehållet i JET A1 multiplicerat med två.

Baserat på värmevärdet 43,1 MJ/kg från specifikationen av flygbränsle JET-A1 beräknas använd Energi (i kWh) som 11,95 gånger bränsleförbrukningen.

Tabell 5.2 Samband mellan förbränt bränsle, CO₂, SO₂ och använd energi

Formel	Enhet
CO ₂ =förbränt bränsle * 3,16	[kg] → [kg]
SO ₂ =förbränt bränsle/1000	[kg] → [kg]
Energi=förbränt bränsle * 11,95	[kg] → [kWh]

5.2 Lustgas och metan

Förutom bränsleförbrukningen och de bränsleberoende emissionerna beräknas utsläppen av kväveoxider⁶ (NO_x), kolväten⁷ (HC) och kolmonoxid (CO) ut med Hurdy Gurdy.

För beräkning av lustgas och metan används IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories [10]. Av beräknad mängd HC antas en sjättedel utgöra Metan enligt den fördelning mellan metan (CH₄) respektive NMVOC⁸ som IPCC rekommenderar.

Notera att Metan *inte* ska beräknas eller rapporteras för cruise fasen av flygningen utan endast tillskrivs emissioner i LTO-fasen.

Andelen lustgas (N₂O) beräknas genom en konstant multiplicerad med antalet LTO respektive en faktor multiplicerad med bränsleförbrukningen för cruise, se Tabell 6.2. Denna fördelning är hämtad från EMEP/EEA [11].

Tabell 5.3 Faktorer för framräkning av CH₄, NMVOC och N₂O

Formel	Enhet
CH ₄ =HC * 1/6	[kg] → [kg]
NMVOC=HC * 5/6	[kg] → [kg]
N ₂ O=0,1 kg per ton bränsle (cruise)	[kg]
N ₂ O=0,1 kg per LTO (inrikes)	[kg]
N ₂ O=0,3 kg per LTO (internationell)	[kg]

5.3 Partiklar

För närvarande görs inga beräkningar eller uppskattningar av partiklar. Det finns approximativa metoder där man kombinerar smoke-number⁹, motorns bränsleflöde och specifikationen för aktuellt bränsle för att räkna fram partikelutsläpp. USA:s luftfarsmyndighet, FAA använder en sådan metod kallad FOA (First Order Approximation) i deras emissionsverktyg EDMS (Emissions and Dispersion Model System) [12].

⁶ NO_x är ett samlingsnamn för kvävedioxid (NO₂) och kvävemoxid (NO) m.fl.

⁷ HC är ett samlingsnamn för kolväten. Emissionens komponenter är dels nybildade kolväten och dels oförbränt bränsle.

⁸ NMVOC står för "non-methane volatile organic compounds" dvs. flyktiga organiska ämnen exklusive metan.

⁹ En parameter som finns i ICAO:s certifieringsblad för flygmotorer.

5.4 Rapportering

Det ställs höga krav på redovisningen av emissioner [11][12]. Man ska kunna redovisa hur detaljerat beräkningarna sker, vilka felkällor som finns, hur man säkerställer spårbarhet i rapporteringen.

IPCC anger tre angreppssätt (tier levels) beroende på vilken typ av data man har tillgång till. Tier 1 och 2 är i grunden baserade på försålt flygbränsle men där man i nivå två (Tier 2) har data fördelat på flygplanstyp och underlag som gör det möjligt att fördela emissionerna mellan faserna LTO respektive Cruise.

På nivå tre (Tier 3) ska data baseras på verkliga flygrörelser. Här görs en uppdelning mellan 3A och 3B, där den huvudsakliga skillnaden är att för 3A har man endast information om start och landningsplats, för 3B ska man ha tillgång till den verkliga flygbanan.

FOI utför ingen rapportering av emissioner. FOI konstaterar att den metodik som används för beräkning av direkta utsläpp är på nivå 3A¹⁰.

¹⁰ FOI3 metoden uppfyller i många delar (men inte alla) även kraven för nivå Tier 3B

6 Feluppskattning

All information som skulle behövas för att beräkna de faktiska emissionerna från en flygning finns sällan. Detta gäller både FOI:s modeller, som av nödvändighet gör en del antaganden, och indata som ofta saknar all information om hur flygningen gick till. I detta kapitel beskrivs kort felkällorna och ett försök att kvantifiera storleksordningen på dessa. I första hand kvantifierar vi felet i termer av bränsleförbrukning, för övriga emissioner görs en samlad bedömning i sammanfattningen. Felkällorna analyseras utifrån de antaganden som görs om flygbanan och hur den delas upp i olika faser i modellerna vilka återspeglar verkliga förhållanden för civil flygtrafik.

6.1 Antagandet om en optimal flyghöjd.

I praktiken ligger optimal flyghöjd lägre än vad som gäller för ”cruise”, eftersom det kostar bränsle att stiga. Vid kortare flygsträckor nås inte ens ”optimal” höjd, förrän det är dags att börja göra plané. Att kvantifiera felet i bränsleförbrukning för en ”icke optimal flyghöjd” är förhållandvis enkelt, problemet ligger i att veta hur stor skillnaden är mellan verklig och antagen flyghöjd.

I databladen för de flygningar FOI räknar på saknas nästan alltid verklig flyghöjd.

FOI har beräknat skillnaden i bränsleförbrukning för andra flyghöjder än den optimala. Detta fel är proportionellt mot flygningens längd. Om ett flygplan flyger 4000 fot (1200 meter) lägre än sin optimala höjd så är skillnaden ca 1 % i ökad bränsleåtgång för en inrikes flygning (500 km). För en dito Europeisk flygning ökar bränsleåtgången ca 2,5 % (1000 km). Det finns anledning att tro att felet inrikes är stort (ca 2,5 %) då den optimala flyghöjden ligger väldigt högt jämfört med den höjd som trafiken i verkligheten går på.

För europeiska flygningar är det något bättre, men även här är beräkningarna för optimistiska. För interkontinentala flygningar är detta fel mindre och man flyger i alla fall i närheten av sin optimala höjd.

6.2 Interpolering av data i Hurdy Gurdy

Med hjälp av programmet PIANO tas för varje flygplanstyp åtta datapunkter ut, se figur 1. Bränsle och emissioner beräknas i Hurdy-Gurdy med algoritmer som interpolerar från datapunkterna. Jämförelser mellan Hurdy-Gurdy och PIANO visar att Hurdy-Gurdy *överskattar* bränsleförbrukningen med ca 0,5 % för kortare flygningar (inrikes) upp till 3 % för långa flygningar.

6.3 Taxning

Taxning modelleras fysikaliskt och med representativa taxitider för svenska flygplatser. För nationella beräkningar är felet litet (< 0,5 %). För internationella flygningar är taxitider in eller ut (beroende på riktning) oftast underskattade då vi antar att de svenska förhållandena gäller. Störst är felet för ankommande internationell trafik där taxitider ut på de större flygplatserna i världen är avsevärt högre än för svensk trafik. Sett över hela flygningen är det ändå ett litet bidrag som eventuella skillnader i taxibränsle ger. Här kan skillnaderna utsläpp av emissioner däremot vara stora beroende på motortyp

6.4 Flugnen distans

Inget tillägg görs i modellerna för att kompensera för verklig flugnen distans. Här finns de potentiellt största felkällorna. I modellerna antas att den flugna sträckan motsvarar en storcirkelbåge, d.v.s. den kortaste vägen ett flygplan kan ta mellan två punkter på jorden. I

verkligheten styrs flygtrafiken av flygtrafikledningen och måste följa uppgjorda flygvägar, undvika militära övningsområden, annan flygtrafik och måste dessutom starta och landa på banor som därmed bestämmer kursen och flygbanan i ett stort område runt flygplatsen.

Flygvägsförlängningarna som presenteras nedan representerar således *inte* förlängningarna i förhållande till de i verkligheten kortaste flygbanorna utan mot den teoretiskt kortaste sträckan.

6.4.1 Flugen distans – start och stigning i TMA

Under start är gaspådraget högt och en eventuell flygvägsförlängning genererar direkt ökad bränsleförbrukning.

FOI har underlag att räkna på rutförlängning vid starter från Arlanda, men beräkningarna är inte gjorda. Uppskattningen, efter att tittat på bilder på radarspår för normaltrafik, är att startförlängningen är ca 50 km på Arlanda. Medelflyglängden för svenska inrikesflygningar baserat på 2012 års data är geometriskt 384 km (storcirkel). Då data innehåller en hel del små flygplan är medelflyglängden baserat på personkilometer sannolikt mer representativt för detta ändamål. För 2012 är då medelflyglängden inrikes 479 km och flygvägsförlängningen under start är då ca 10 % av flugen sträcka inrikes (Arlanda har ungefär 25% av antalet rörelser i landet)

För övriga flygplatser så är bedömningen att Bromma, Landvetter och Sturup kan ha förlängningar som tidvis blir signifikanta. Övriga flygplatser har mycket små förlängningar i samband med start och stigning. Nationellt uppskattar vi att bränsleåtgången underskattas med ca 3-5% för startande trafik

För europatrafik är det svårare att hitta underlag. Förlängningarna vid start är större, men som andel av flygningen blir bedömningen att tillägget i bränsleförbrukning blir i storleksordningen 2-5 %. Detta baseras på det som kallas ”TMA delay” siffror i Eurocontrols Performance Review [13]. För interkontinentala flygningar är denna del mycket liten i proportion till hela förbrukningen.

6.4.2 Flugen distans – cruise, stigning och plané över TMA

Cruisedelen av flygningen mellan in och utpassering i terminalområde innehåller stigning och plané till/från cruise. För många inrikesflygningar är tiden på cruise mycket kort. FOI saknar underlag för att kvantifiera rutförlängningen under cruisefasen. Nationellt är vår bedömning att man oftast tillåts att flyga förhållande vis rakt mellan in/ut-passering i TMA. Trafik i södra Sverige är tidvis påverkad av militära restriktioner och flyger då inte rakaste vägen. Effekten av längre flugen distans bedöms under cruisefasen till 2 % i Sverige.

För europatrafiken tillhandahåller Euroncontrol [13] medelvärden på denna fas och för 2011 var medelförlängningen ca 50 km per flygning (motsvarar 5%). För interkontinentala flygningar saknar vi underlag, det varierar stort beroende på var flygningen går. För flygningar över Nordatlanten följer man i regel de ATM spår som kallas OTS-tracks som inte alls följer en storcirkel. Flygplanen tilldelas ett ”spår” de ska följa under resan. Detta är för att säkerställa separation mellan flygplan i områden där radarövervakningen saknas eller om befintliga system slutar att fungera. För vissa flygningar kan rutförlängningen vara avsevärd i detta system. För Asien är det ofta rakare flygningar men beroende på restriktioner över konfliktområden så flygs det för vissa sträckor avsevärda omvägar. Även flygavgifterna för att flyga över vissa länder kan påverka valet av rutt. Underskattningen i relation till hela förbrukningen bedömer vi till 2-10% för kontinentala flygningar.

6.4.3 Flugen distans – plané i TMA och landning

För inrikestrafiken där Arlanda intar en särställning har FOI i andra studier [14] konstaterat att inflygningen är ca 100 km längre än vad en helt rak teoretisk bana skulle ge. Värdet bygger på radarspår från 20 dagar vid Arlanda. Dagarna är valda så att de representerar både ”enkla” och ”svåra” väderförhållanden och olika inflygningskombinationer. Då det handlar om inflygning där gaspådraget i medeltal är lägre så är tillskottet i bränsleförbrukning inte direkt översättbart till förlängningen i distans.

För 2012 är medelflyglängden inrikes 479 km (personkilometer). Således är den verkliga flyglängden i medeltal ca 20 % längre för en inrikesflygning med landning på Arlanda.

För övriga flygplatser så är bedömningen att Bromma, Landvetter och Sturup kan ha förlängningar som tidvis blir signifikanta. För övriga Svenska flygplatser är det ofta mycket mindre förlängningar i samband med landning. FOI uppskattar att tillägget till beräknad bränsleförbrukning nationellt är i storleksordningen 5-10 %.

För europaflygningar är medellängden enligt Eurocontrol ca 1000 km och en landning på Arlanda ger då en rutförlängning på 10 %. För landningar som görs utrikes är förlängningen av flugen distans betydligt större än på Arlanda. Många av de större hubbarna i Europa har rutförlängningar som både i ”grundläget” och vid svåra trafiklägen är mycket högre än på t.ex. Arlanda. Statistik från Eurocontrol redovisar inte sträckan explicit utan som ”tid i TMA. Vår bedömning är att för europaflygningar är tillägget i bränsle i storleksordningen 10-15 % av hela flygningen, för längre interkontinentala flygningar är förlängningen försumbar (< 1 %).

6.5 Reservbränsle

Hanteringen av reservbränsle bedöms vara hanterat på ett korrekt sätt och detta utgör en mycket liten felkälla för korta och medellånga flygningar.

6.6 Kombination av flygplan och motor

FOI3-metoden antar att alla flygplan av en typ har samma motor. Så länge valet av motor är representativt för den generation flygplanet tillhör så är felet litet vad gäller bränsleförbrukning. Exempelvis ska en äldre version av Boeing 737 ha en äldre motor än de allra nyaste versionerna av samma flygplan. Här har FOI utvecklat databasen under 2010-2011 för att säkerställa att flygplanstyperna har representativa motorer. För emissioner av andra substanser kan skillnaderna vara mycket stora för olika motorer (av samma generation) då de kan ha olika typer av teknik för att reducera vissa typer av utsläpp.

6.7 Sammanfattning feluppskattningar

Tabellen visar en sammanställning av feluppskattningen. Inrikes motsvarar en sträcka av 500 km, Europa 1000 km och kontinent > 3000 km.

Tabell 6.1 Sammanställning feluppskattning

Felkälla	Fas av flygning	Fel i bränsleförbrukning [%]		
		Inrikes	Europa	Kontinent
Optimal flyghöjd	Cruise	+2,5	+2,5	+1
Interpolering H-G	N/A	-0,5	-2	-3
Flugen Distans	Start, stig i TMA	+3-5	+2-5	+1
Flugen Distans	Cruise, stig/sjunk ovan TMA	+2	+5	+2-10
Flugen Distans	Plané i TMA, Landning	+5-10	+10-15	< +1
Taxning	Taxi in/ut	<0,5	<0,5	<0,5
Reservbränsle	Hela	0	0	<0,5
Flygplan/motor	Hela	<0,5	<0,5	<1
		+13 - 20	+18,5 – 26,5	+6 – 17

FOI har genom SAS fått tillgång till hela 2011 års verkliga förbrukning (FDR-data för en flygplantyp) för två sträckor, en inrikes och en europaflygning. Då detta är medelvärde av alla flygningar på ett år får det betraktas som ett väldigt stabilt och representativt underlag

Beräkningarna i FOI3-metoden *underskattar* den rapporterade bränsleförbrukningen med 17 % inrikes och 23 % för en flygning till Europa. FOI har inga motsvarande siffror att jämföra med för interkontinentala flygningar. Det har heller inte varit möjligt att utvärdera beräkningar för LTO-cykeln då data endast bestått av hela flygningar.

Viktas man felen baserat på antalet rörelser inrikes och utrikes är underskattningen i medeltal 19 % i beräkningen med FOI3 metoden.

6.8 Jämförelser försålt flygbränsle med modellberäkningar av bränsleförbrukning.

Försålt flygbränsle är en annan datakälla som används för att estimerar utsläpp från flyg. Det är känt att modeller som räknar ut bränsleåtgång och emissioner kommer fram till lägre utsläpp än siffrorna för försålt flygbränsle.

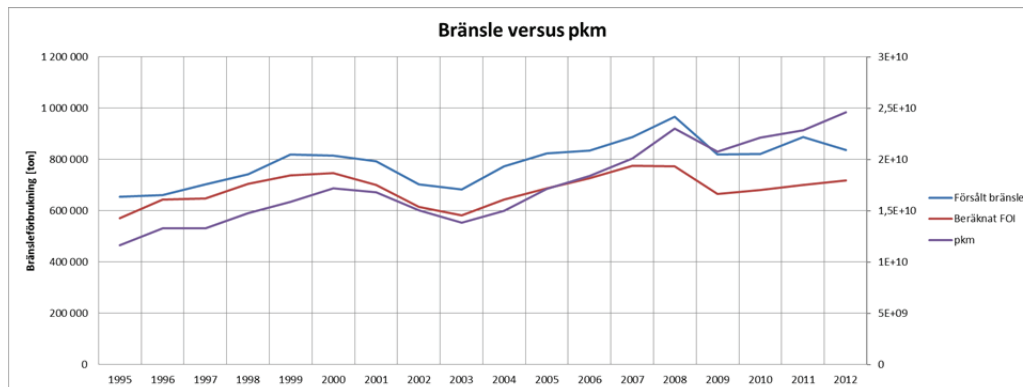
I EU-projektet TEAM_Play redovisas jämförelser mellan modellen AERO MS (och andra CAEP/8 modeller) med IEA/UNFCCC bunkersiffror [15]. Modellerna redovisar lägre förbrukning. För ICAO:s 40 ”annex 1” länder är skillnaden i medeltal -11 %. Skillnaderna varierar mellan -3 % (Japan) och -17 % (Canada). De flesta av dessa modeller gör tillägg för flugen distans (relativt storcirkel) eller har indata med information om verklig rutt.

Modellerna är olika komplexa men precis som vi redovisat för våra modeller, innehåller de olika antaganden som är förenklingar av verkligheten. Utöver modellfel så pekar man på att bunkersiffrorna innehåller allt försålt flygbränsle och att globalt så ingår då:

- militär flygning som står för 11 % av totala förbrukningen
- allmänflyg som står för 2 % av totala förbrukningen
- förbrukning i APU¹¹ som står för 1 % av totala förbrukningen

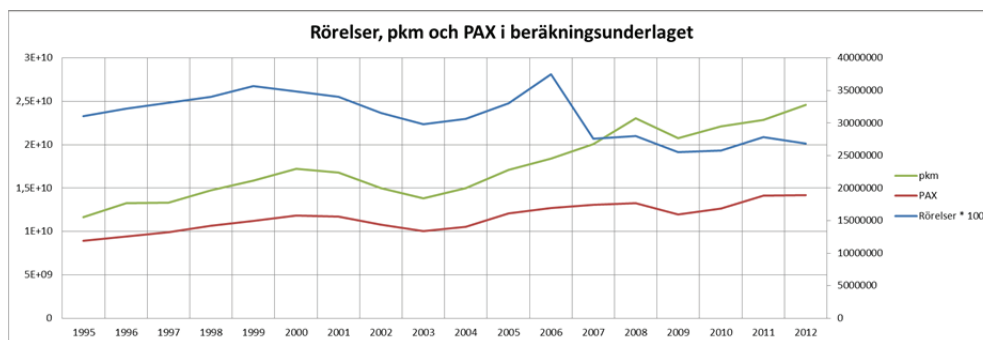
¹¹ Den hjälpmotor som finns på flygplan för att producera el eller möjliggöra motorstart om inte markström är tillgänglig APU står för Auxillary Power Unit)

För svenska förhållanden är skillnaden mellan beräknade emissioner och försålt flygbränsle senaste fem åren i storleksordningen 25 %. Som vi visat i tidigare avsnitt underskattar FOI3 metoden bränsleförbrukningen med uppskattningsvis 20 %. Detta förklarar stora delar, men inte hela skillnaden.



Figur 2. Försålt och beräknat flygbränsle åren 1995-2012 (ton) tillsammans med trafikarbetet i personkilometer (högra axeln). Se figur 3 för kommentarer angående ändringar i beräkningsmetod och indata under perioden 1995 – 2012.

I figur 2 visas beräknat och försålt bränsle tillsammans med det totala trafikarbetet uttryckt i personkilometer. Kurvorna har i grunden samma utseende och man ser tydligt hur lågkonjunkturen 2001-2003 och 2008-2009 påverkar flyget. Antalet personkilometer har i stort sett fördubblats sedan 1995. Värt att notera är att trafikarbetet efter 2005 ökar snabbare än förbrukningen. Detta kan vara ett tecken på en ökad effektivitet i flygningarna (högre kabinfaktor). Skillnaderna i utseende på kurvorna mellan försålt och beräknad bränsleåtgång är inte entydiga, man kan notera att den beräknade mängden har en mer monoton trend och inte hoppar lika mycket som den motsvarande för försålt bränsle.



Figur 3. Antal passagerare, rörelser och personkilometer 1995 – 2012.

Övriga grundläggande parametrar som antal passagerare och rörelser visas i figur 3 tillsammans med kommentarer om de ändringar som skett i modell och indata från 1995.

De viktigaste ändringarna under 2000-talet är följande:

- fram till och med år 2005 beräknades endast statliga flygplatser plus de fyra största icke statliga.
- från 2006 görs beräkningar på alla flygplatser (statliga och icke statliga) med tillstånd för kommersiell trafik.
- från 2007 är privatflyg och skolflyg inte med i beräkningarna.
- från 2008 är beräkningarna gjorda med ny metod (FOI3). Metoden har utvecklats under 2011-2012 och för att skapa en konsistent tidsserie utan ”hopp” har åren från 2008 räknats om med FOI3 metoden.

Klimatrapporteringsförordningen kom 2005 vilket är det år som Metan och Lustgas började rapporteras.

7 Referenser

- [1] Näs, A. (2005) Beskrivning av FFA2-metoden för beräkning av avgasemissioner från flygtrafik., FOI-R—1625-SE
- [2] Hasselrot, A. (2000): FFA Methods for Computing Exhaust Emissions from Aircraft: Description and Validation, FFA-TN-2000-14
- [3] Simons, D. (1997) PIANO, Project Interactive Analysis and Optimisation, Lissys Ltd, Woodhouse Eaves, UK . Se även www.piano.aero . (besökt 2013-10-15)
- [4] Hasselrot, A. (2001): Hurdy-Gurdy 1.0 with Database of 25 Turboprop Aircraft, a File Maker Solution. (Software on CD), FOI/FFA
- [5] Hasselrot, A. (2010): Data Preparation Manual for the Flight Emission Methods Hurdy-Gurdy and Hurdy-Gurdy_GrinderXY, FOI-R-2972-SE
- [6] ICAO Engine Exhaust Databank, International Civil Aviation Organization. <http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php> (besökt 2013-10-15)
- [7] Pratt & Whitney Inc. Canada, 1801 Courtneypark Drive East, Mississauga, Ontario Canada L5T 1J3, 1997
- [8] Baughcum, S.L., S.C. Henderson, T.G. Tritz, and D.C. Pickett, 1996b: Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis. NASA-CR-4700, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 196 pp
- [9] Hasselrot, A. (1998): HARP, Hasselrot's Reviewed Pollution. A computing scheme for deciding flight profile and exhaust emissions in takeoff and landing, (FFA 1998)
- [10] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy, Chapter 3 Mobile Combustion, 2006
- [11] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, updated 2010.
- [12] http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/edms_model/ (besökt 2013-10-15)
- [13] Eurocontrol. (2011), Performance Review Report; An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2011
- [14] Mårtensson, T. (2011) Environmental Key Performance Indicators for Air Traffic Management, ANERS 25-27 October 2011, Marseille
- [15] Duchêne, N. et al. (2013) Run of baseline scenarios. Leverabel 3.5 I EU projektet TEAM_Play.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se