

# Inrikesflygets klimatpåverkan– en analys av radarspår

Projektrapport: TSA-2016-122



Författare: Tomas Mårtensson (FOI), Therese Sjöberg (TS), Patrik Bergviken (LFV)

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
Bakgrund .....	3
Syfte och målsättning.....	3
Data .....	4
Bakgrundsinformation – Inrikes flygtrafik i Sverige .....	6
Distans och höjdberäkningar - Metod.....	7
Felkällor distans och höjd.....	8
Analys av radarspår - Resultat .....	10
Verkligt flugen distans – absolut sträcka i kilometer .....	10
Extra flugen distans – relativt storcirkelavstånd.....	10
Analys i skillnader mellan ankommande och avgående trafik.....	12
Vertikal ineffektivitet.....	13
Flyghöjd .....	14
Anpassning av resultaten till FOI3-metoden.....	16
I vilken omfattning flyger inrikestrafiken i stratosfären?.....	18
Bränsleförbrukning.....	21
BADA.....	21
FOI3 .....	21
Jämförelser FOI3 – BADA.....	22
Slutsatser .....	24
Verkligt flugen sträcka och flyghöjder.....	24
Inrikestrafiken och flygning i stratosfären .....	24
Bränslejämförelser FOI3 - BADA.....	25
Fortsatt arbete .....	25
Projektets uppskattning till .....	25
Referenser .....	26

## Sammanfattning

### Bakgrund

En av Transportstyrelsens huvuduppgifter är att verka för att de transportpolitiska målen nås. Det transportpolitiska hänsynsmålet om säkerhet, miljö och hälsa refererar i sin tur till att transportsektorn ska bidra till att miljökvalitetsmålen nås, med särskild fokus på målet om begränsad klimatpåverkan. Transportstyrelsen är enligt klimatrapporteringsförordning 2014-1434 ålagd att för luftfart i Sverige utföra beräkningar av ett antal luftemissioner och rapportera dessa till Naturvårdsverket för vidare redovisning i till EU och FN:s klimatkonvention (UNFCCC). Därmed är det viktigt att beräkningarna håller så hög kvalitet som möjligt.

Transportstyrelsen (inklusive dess föregångare) har sedan 1995 anlitat Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) för att genomföra de emissionsberäkningar som har krävts för att myndigheten ska kunna fullgöra sina åtaganden enligt bland annat klimatrapporteringsförordningen. Försålt flygbränsle är en annan datakälla som används för att estimerar utsläpp från flyg. FOI använder sig av den så kallade FOI3-metoden [1] för att utföra beräkningar av utsläppen från samtliga svenska trafikflygplatser, avseende både inrikes- och utrikesflyg.

I den modellering som idag görs med FOI3-modellen är flugen distans mellan två orter storcirkeldistansen (kortaste vägen). I verkligheten styrs flygtrafiken av flygtrafikledning och måste följa uppgjorda flygvägar, undvika militära övningsområden, separeras från annan flygtrafik och måste dessutom starta och landa på banor som därmed bestämmer kursen och flygbanan i ett stort område runt flygplatsen. FOI3-modellen underskattar bränsleförbrukningen och tillhörande emissioner då inget tillägg görs för den verkliga flygvägsförlängningen<sup>1</sup>.

Flygets FN-organ ICAO<sup>2</sup> beslutade vid sin senaste generalförsamling hösten 2016 att utveckla ett globalt marknadsbaserat styrmedel för att hantera luftfartens klimatpåverkan, kallat Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). ICAO:s miljökommitté CAEP<sup>3</sup> arbetar under 2017 med att ta fram metoder för övervakning, rapportering och verifiering av det internationella flygets utsläpp av koldioxid. För att kunna verifiera flygbolagens eventuella utsläppsrapporteringar är det viktigt att ha stöd av tillförlitliga emissionsberäkningsmodeller.

### Syfte och målsättning

En förbättring av befintlig emissionsberäkningsmodell baserat på erfarenheter från verkliga flygningar (radarspår) skulle kunna bli ett verktyg för uppföljning av efterlevnaden av både CORSIA och EU ETS<sup>4</sup> för flyget. Detta projekt syftar till utveckla förbättrade möjligheter att beräkna klimateffekter från verkliga flygvägar. Metoden kan i förlängningen även underlätta i Transportstyrelsens bedömningar av ansökningar från Luftfartsverket (LFV) om nya eller ändrade flygvägar och dess effekter på utsläpp till luft av bl.a. koldioxid. Underlaget kan också användas för att studera andra klimateffekter på hög höjd. Detta handlar både om bildning av

<sup>1</sup> Modellen underskattar också bränsleförbrukningen av andra skäl kopplat till antagande om flyghöjd (vertikala in-effektiviteten) etc, se modellbeskrivningen i [1].

<sup>2</sup> International Civil Aviation Organization

<sup>3</sup> Committee on Aviation Environmental Protection

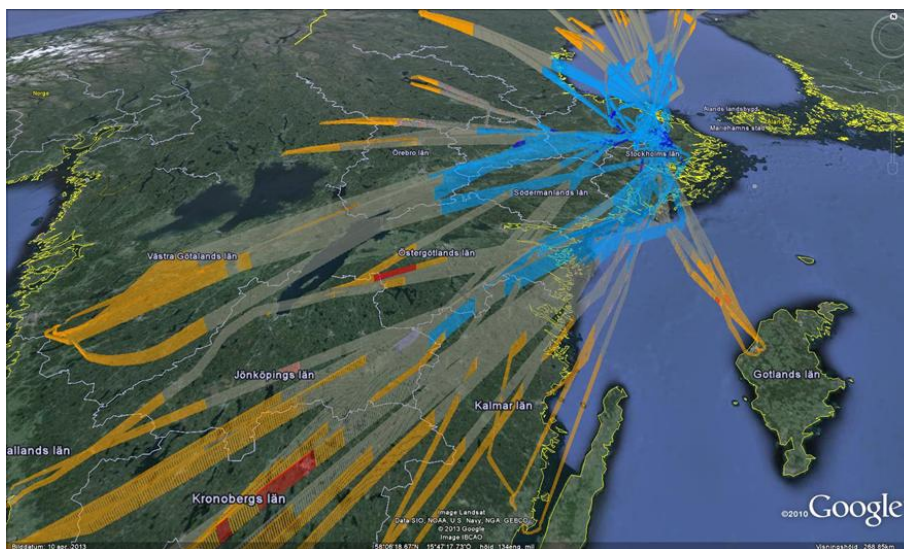
<sup>4</sup> EU Emission Trading Scheme, EU:s utsläppshandelssystem

kondensationsstrimmor och påverkan från vattenånga, sot, kväve- och svavelföreningar som på hög höjd påverkar klimatet.

Projektet använder radarspår från LfV:s radarsystem och analysverktyg GAIA. Inom ramen för detta projekt kommer Eurocontrols bränsleberäkningsmodell BADA implementeras i GAIA med syftet att dels användas för att jämföra BADA:s bränsleberäkningsresultat med beräkningarna i FOI3-modellen, dels till att undersöka potentialen att i realtid kunna analysera bränsleineffektiviteter det svenska flygvägs- och flygledningssystemet.

Målsättningarna med projektet är att:

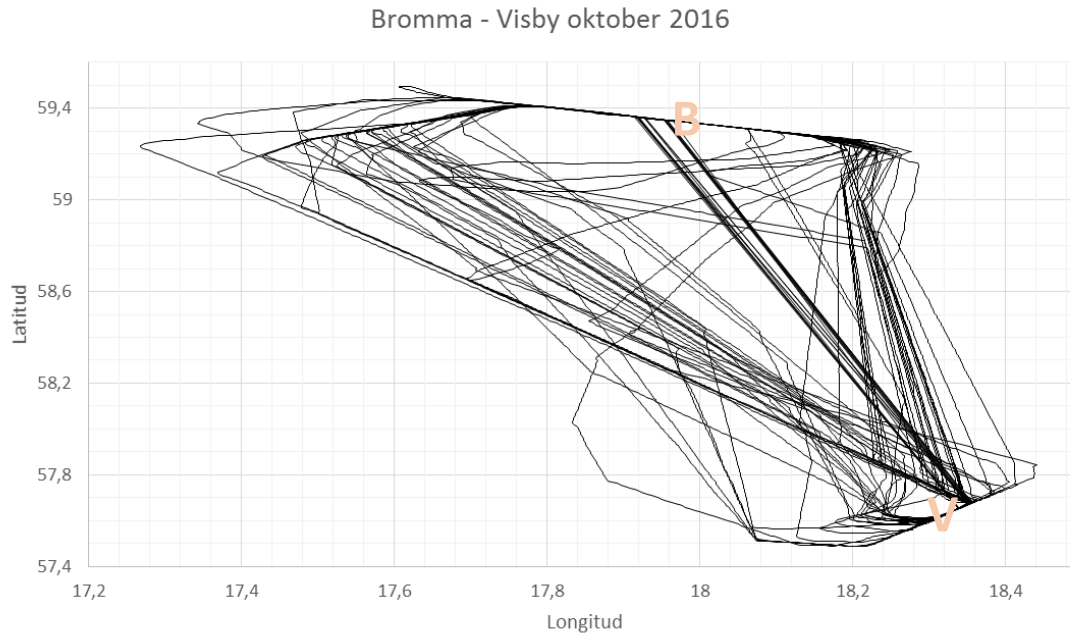
- Analysera radarspår för att undersöka verkligt flugna sträckor (inrikes)
- En analys av flyghöjd för trafiken och dess relation till tropopausens höjd
- Jämföra bränsleförbrukningen mellan FOI3 modellen och BADA-modellen



Figur 1. Utskrift från LfV:s GAIA-system som visar alla svenska inrikesflygningar in till Stockholm-Arlanda en dag i augusti 2013 (KML-fil i Google Earth). Verklig flygsträcka visas och vertikala ineffektiviteten både under climb, flyghöjd och descent framgår av olika färgkodning av den vertikala profilen.

## Data

I projektet har FOI, via LfV, fått tillgång till verkliga radarspår för sju inrikes sträckor där alla flygningar för fyra veckor (en vecka per årstid) analyserats. Data består av radarspår från LfV:s system GAIA. Data innehåller hela flygningar där position och höjd är lagrat var femte sekund. Tillhörande metadata består av flygplanstyp, start och landningsplats. Notera att data bygger på transponderdata (sekundärradar) och finns således bara tillgängligt när transpondern är på och nås av flygtrafiktjänstens radar. Data innehåller radarspårerna mellan första och sista transponderekot i luften, normalt ca 20-50 meter över banan. Det finns dock en del variation i dataspårens början och slut. På vissa platser kan radarn se flygplanet på marken då transpondern ibland sänder på rullbanan vid start och landning finns i vissa fall denna del av flygningen med.



Figur 2. Exempel på data. 64 radarspår Bromma <-> Visby under måndag till fredag vecka 40 (oktober) 2016. Flygplatsernas position är utmärkta med "B" respektive "V" i figuren. Notera att inte alla dessa spår ingår i analysen nedan.

Av intresse för denna studie är reguljär trafik som står för det mesta av transportarbetet. En uppdelning är gjord mellan turbofläkt - (jetflygplan) och turbopropflygplan i analysen. Data innehöll enstaka militära flygningar, affärsjet (turbofläkt och turboprop) samt ett antal mindre flygplan med kolvmotor. Dessa tre kategorier är inte medtagna i analysen. Data var överlag av god kvalitet och endast fåtal flygningar underkändes<sup>5</sup> i den initiala kvalitetskontrollen. I figur 2 visas ett exempel på radarspår från Bromma till Visby (båda riktningarna) under v40 (oktober 2016). I den vidare analysen är således vissa av dessa spår inte medtagna.

Totalt har 2181 radarspår använts för analysen inrikes. För turbofläkt (jet) har 1721 radarspår analyserats och motsvarande siffra för turboprop är 460, en sammanställning av sträckor och antal flygningar framgår i tabell 1.

**Tabell 1. Datasammanställning av analyserade radarspår.**

Turbofläkt – antal spår	Februari (v07)	Maj (v20)	Juli (v28)	Oktober (v40)	Totalt	ICAO-kod	GCD [km]
Arlanda – Landvetter <->	88	120	71	124	403	ESSA - ESGG	394
Arlanda – Sturup <->	73	85	16	94	268	ESSA – ESMS	532
Arlanda – Luleå <->	104	117	91	117	429	ESSA – ESPA	689
Arlanda – Visby <->	0	2	10	0	12	ESSA – ESGG	223
Bromma – Landvetter <->	58	97	32	104	291	ESBB – ESGG	379
Bromma – Sturup <->	71	107	32	108	318	ESSB - ESSV	190
<b>Summa Turbofläkt</b>	<b>394</b>	<b>528</b>	<b>252</b>	<b>547</b>	<b>1721</b>		
<b>Turboprop – antal spår</b>							

<sup>5</sup> Några längre flygningar med start och landning på samma plats är undantagna analysen.

Arlanda – Landvetter <->	6	8	8	8	30	ESSA - ESGG	394
Arlanda – Sturup <->	8	12	12	12	44	ESSA – ESMS	532
Arlanda – Visby <->	36	43	29	49	157	ESSA – ESSV	223
Bromma – Landvetter <->	4	4	0	3	11	ESSB – ESGG	379
Bromma – Sturup <->	2	0	0	2	4	ESBB – ESMS	506
Bromma – Visby <->	46	62	46	60	214	ESSB - ESSV	190
<b>Summa Turboprop</b>	<b>102</b>	<b>129</b>	<b>95</b>	<b>134</b>	<b>460</b>		
<b>Totalt</b>	<b>496</b>	<b>657</b>	<b>347</b>	<b>681</b>	<b>2181</b>		

## Bakgrundsinformation – Inrikes flygtrafik i Sverige

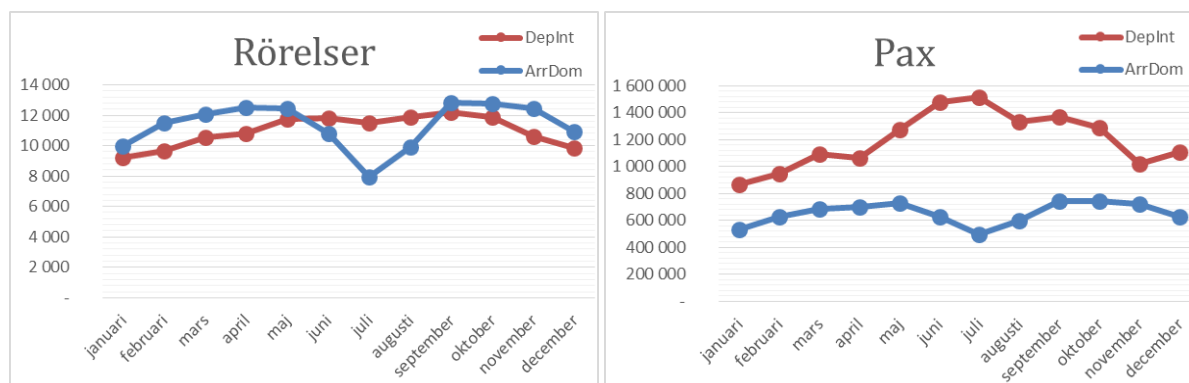
En översikt av de grundläggande förhållandena i inrikes flygtrafiken är bra för att kunna sätta studiens resultat i perspektiv.

I inrikestrafiken år 2016 genomförde 136 099 starter och landningar och med 7,8 miljoner passagerare ombord. Av rörelserna stod turbofläktflygplanen för 76,7 % av totalen och turboprop således för 23,2 %.

Sammanlagt förbrändes 153, 1 miljoner kg flygbränsle under 2016 (beräknat med FOI3-metoden) vilket motsvarar direkta utsläpp av koldioxid på 481,4 miljoner kg.

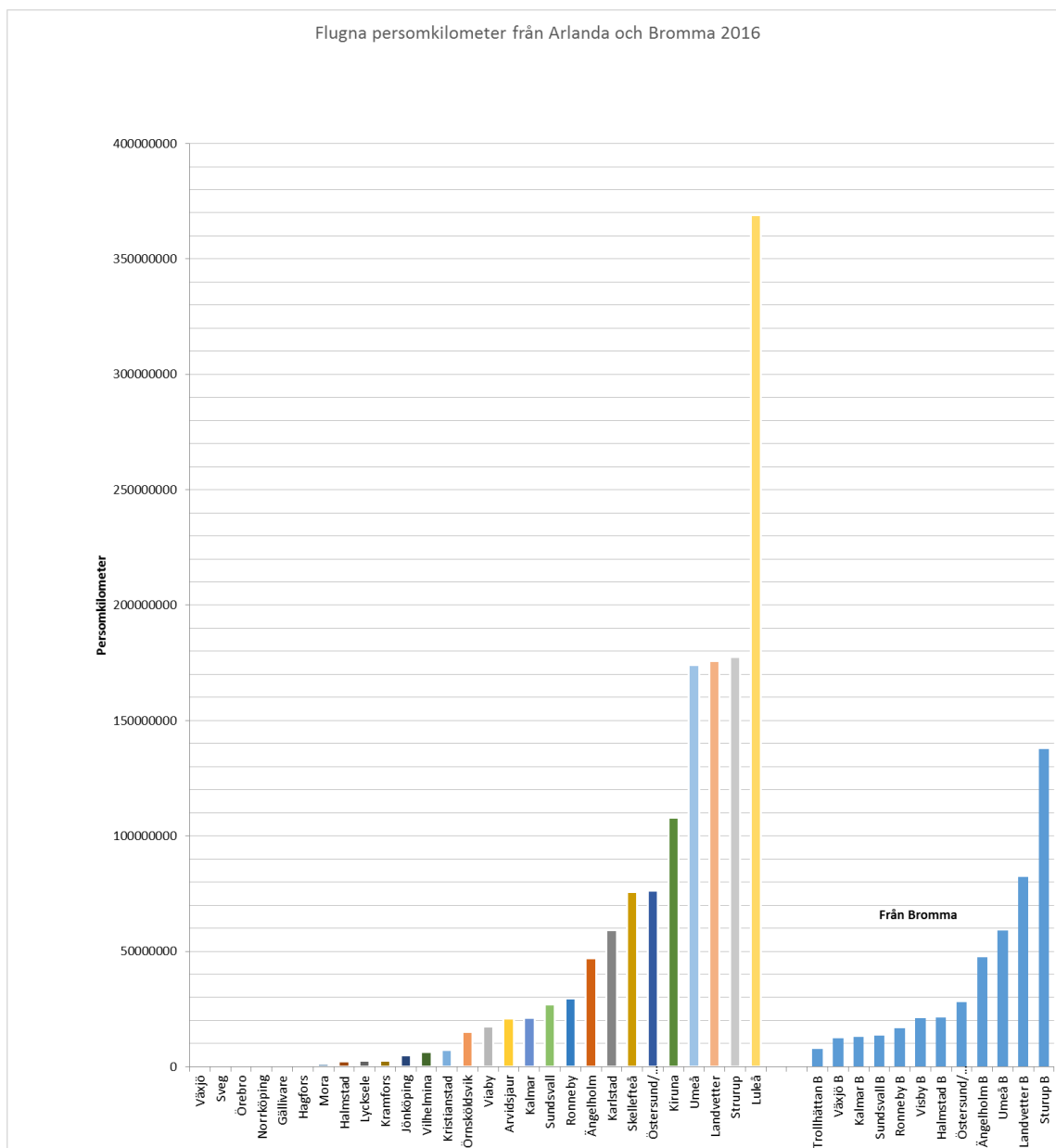
Som jämförelse har utrikestrafiken (avgående från Sverige) något lägre antal rörelser (131 689), men antalet passagerare är ungefär dubbelt så många (14,4 miljoner) och mängden förbränt flygbränsle och därmed utsläppen av koldioxid 4,6 så höga som för inrikestrafiken (706,5 miljoner kg flygbränsle och 2232 miljoner kg koldioxid beräknat med FOI3-metoden). Den nästa fem gånger större förbränningen förklaras av de längre distanserna som flygs utrikes.

Figur 3 visar på hur antal rörelser och antal passagerare under 2016 var fördelat månadsvis för internationell respektive inrikes trafik. Notera för inrikes (blå linje), det tydliga minima som finns i juli månad för både antal rörelser och antal passagerare.



Figur 3. Antal rörelser och antal passagerare under 2016. Fördelat månadsvis för internationell respektive inrikes trafik. Röd kurva för avgående internationell trafik, blå kurva för inrikes trafik (ankommande – ena riktningen). Studien använder data för en vecka ur månaderna februari, maj, juli och oktober.

För att få en uppfattning om inrikestrafikens transportarbete visas i figur 4 flugna personkilometer för alla sträckor från Arlanda och Bromma. Detta har räknats fram med underlag från Transportstyrelsen (2016). Inga sträckor mellan andra flygplatser är med i analysen. Notera att sträckan Arlanda – Luleå står för en femtedel av utfört transportarbete i inrikestrafiken. De sju sträckor som analyserats motsvarar 51 % av flugna personkilometer enligt figur 10.



Figur 4. Personkilometer år 2016 inrikesflygningar från Arlanda och Bromma. Blå staplar till höger är flygningar från Bromma.

### Distans och höjdberäkningar - Metod

Från radarspårerna har den verkligt flugna distansen räknats som summan av del-distanserna mellan de loggade punkterna. Distansen mellan punkter har beräknats enligt följande.

Låt  $\varphi_i$ ,  $\lambda_i$  och  $\varphi_{i+1}$ ,  $\lambda_{i+1}$  vara den geografiska latitud och longitud för två punkter  $i$  och  $(i + 1)$  där  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . Den centrala vinkeln,  $\Delta\sigma$  mellan de ovan nämnda punkterna, ges av den sfäriska Cosinussatsen:

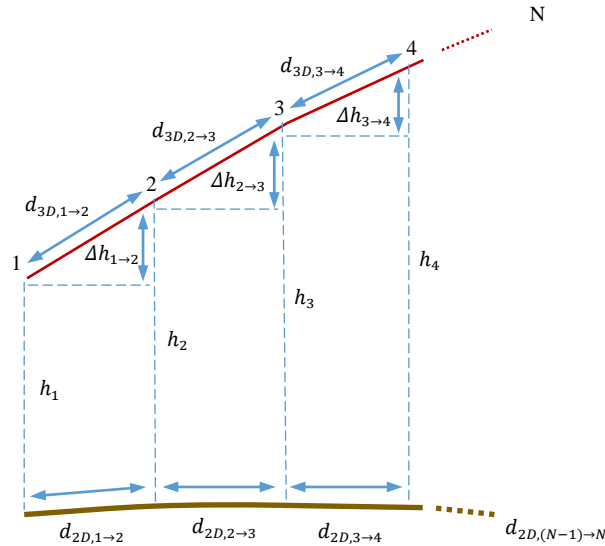
$$\Delta\sigma = \cos^{-1}(\sin \varphi_i \cdot \sin \varphi_{i+1} + \cos \varphi_i \cdot \cos \varphi_{i+1} \cdot \cos(|\lambda_{i+1} - \lambda_i|)) \quad (1)$$

Avståndet  $d$ , dvs. båg­längden ges enligt ekvation (2):

$$d = R \cdot \Delta\sigma \quad (2)$$

där  $R$  är Jordens medelradie.

Då höjdinformation finns med i underlaget beräknas på detta sätt den flygna sträckan först i tre dimensioner. En projektion av denna "3D-sträcka" görs också till jordytan som kan jämföras med storcirkeldistansen.



Figur 5. Beräkning av flugen sträcka genom summering av storcirkelavstånd mellan två på följande punkter.  $N$  är antal lagrade datapunkter i underlags datafil ("plots.csv") för en viss flygning.

Den projicerade flygna sträckan beräknas (med latitud och longitud från radarspårdata) genom summering av storcirkelavstånd mellan två på följande punkter enligt ekvation (3):

$$D_{2D} = \sum_{i=1}^{N-1} d_{2D,i \rightarrow i+1} \quad (3)$$

där,  $i=1, 2, \dots, N$ , och  $N$  är antal lagrade datapunkter i radarspårerna för en viss flygning (dvs. för en viss "flt\_id" i datafilen "flights.csv"). Samt  $d_{2D,i \rightarrow i+1}$  är ovan nämnda storcirkelavstånd mellan två på följande punkter (se figur 2).

"3D-sträcka" beräknas (med latitud, longitud och altitud från radarspårdata) enligt ekvation (4) se även figur 2:

$$D_{3D} = \sum_{i=1}^{N-1} d_{3D,i \rightarrow i+1} \quad (4)$$

där  $d_{3D,i \rightarrow i+1} = \sqrt{(d_{2D,i \rightarrow i+1})^2 + (\Delta h_{i \rightarrow i+1})^2}$  är "3D-sträcka" och  $\Delta h_{i \rightarrow i+1} = h_{i+1} - h_i$  är altitudskillnaden mellan två på följande altituder (se figur 2).

I denna rapport används ordet "flyghöjd" för det som på engelska kallas *cruise*. Flyghöjden tas direkt ur radardatat. I databehandlingen definieras distansflygningen på höjd att inledas respektive avslutas när variationen i höjddata är mindre än 15 meter.

### Felkällor distans och höjd

Skillnaderna mellan den projicerade (2D) sträckan och "3D-sträckan" är mindre än 0,1 % km för de längsta flygningarna. Ytterligare en felkälla uppstår av att radarspårerna oftast saknar kortare delar vid



start och landning då sekundärradarn normalt får eller tappar kontakt först på 20-50 meters höjd över marken. En analys av storcirkelavståndet mellan första och sista loggpunkt, jämfört med den storcirkel som används i analysen, visar på små skillnader, 0,1-0,2 % (medelvärde). I den vidare analysen används storcirkelavstånd mellan flygplatsernas så kallade ARP (Aerodrom Reference Point). Stora flygplatser som exempelvis Arlanda täcker mycket stora ytor och avståndet mellan punkten där start eller landning sker är ibland flera kilometer från ARP.

Antagandet om att flygplanet hela tiden flyger rakt mellan datapunkterna (5 s intervall) bedöms vara den största felkällan. Trafiken som analyseras i vår studie svänger sällan snabbare än tre grader per sekund (i horisontalplanet) och denna typ av svängar sker främst efter start och landning eller vid kösituationer när flygplanen läggs i vänteläge (holding). Med antaganden att hastigheten är 150 m/s vid sväng går det uppskatta<sup>6</sup> skillnaden mellan den cirkelbåge som flygplanet flyger och den raka sträckan radarpunkterna ger. Felet uppgår då till ca 34 m/s vid max sväng. Om flygplanet antas utföra en maximal sväng under 5% av flygningens varaktighet (ca 120-180 sekunder) innebär detta underskattningar på mellan 1-2 % av den flygna sträckan<sup>7</sup>. Vi bedömer detta vara högt räknat och att svängar vanligen är flackare än antagandet här.

Höjdinformationen som är en rapport direkt från flygplanets transponder är mycket tillförlitlig och exakt.

---

<sup>6</sup> Antagen radie på sväng ca 3400 meter (Bankning 25 grader)

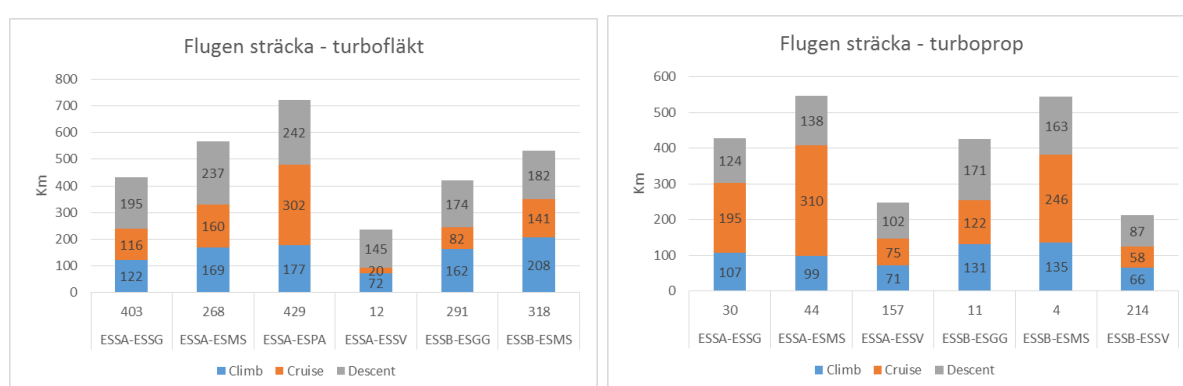
<sup>7</sup> För enstaka flygningar som hamnar i väntelägen kan felet vara betydligt större

## Analys av radarspår - Resultat

Nedan redovisas de analyser som genomförts av radarspårens karakteristik horisontellt och vertikalt.

### Verkligt flugen distans – absolut sträcka i kilometer

I absoluta mått (km) syns i figur 4 hur långa stig-, höjd- och sjunkfaserna är för de undersökta sträckorna (medelvärde alla veckor för båda riktningarna). Turbopropflygplanen flyger inte lika högt som turbofläkt och får därför allmänt längre faser på höjd. Inflygningen (sjunkfasen) är normalt längre än utflygningen (stigfasen) räknat från cruise då sjunkfasen sker med flackare vinkel än stigfasen. Det enda undantaget i analysen är sträckan Bromma – Sturup (turbofläkt) där utflygningen är längre (26 km) än sjunkfasen. In- och utflygningsprocedurers<sup>8</sup> utformning nära flygplatserna (i TMA) bestämmer i allt väsentligt vilken horisontell sträcka som trafiken kommer följa. Den vertikala effektiviteten varierar med trafikbelastningen, se stycket om vertikala ineffektiviteter.



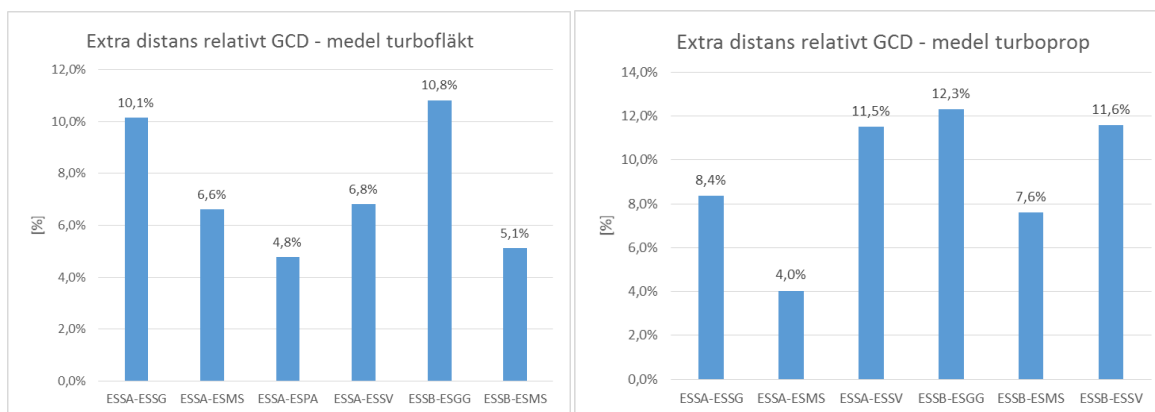
Figur 6. Längden på de analyserade flygningarna fördelat på stig-, höjd- och sjunkfaserna. Turbofläkt till vänster, turbopropplan till höger. Siffran under staplarna är antalet analyserade radarspår. Medelvärde för alla flygningar (båda riktningarna).

I en europeisk kontext är de svenska förlängningarna inte anmärkningsvärda på något sätt, snarare kortare än på de flesta platser på den europeiska kontinenten, se Eurocontrols "Performance Review Report" [Eurocontrol]. I den öppna publikationen är det inte helt enkelt att utläsa verkliga förlängningar då de uttrycks i längd (km) för "en-route" men ofta i minuter kopplat till start och landning. År 2009 redovisades från Eurocontrol att medelflygnings förlängning "en route" i Europa var 48 km, ca 5 %. Av denna förlängning var 32 km förlängning på höjd medan 15 km räknas som "TMA-interface". För stigning och plané har sedan många av de stora flygplatserna i Europa mycket långa förlängningar jämfört med de Svenska flygplatserna.

### Extra flugen distans – relativt storcirkelavstånd

De kortaste flygvägsförlängningarna återfinns normalt på längre sträckorna då förlängningar som görs i samband med start och landning blir en lägre andel av hela flygningens längd i relativa termer. Detta stämmer även i denna analys med lägst värden på sträckorna Arlanda – Sturup (4 %) och Arlanda – Luleå (4,8 %). Förlängningen relativt storcirkeldistansen varierar mellan 4 – 12 % (medelvärde) för de analyserade flygplatsparen. För kortare flygningar är det mer konstruktionen på luftrummet och belastningen som styr förlängningarna och i underlaget är det sträckan Bromma till Landvetter som har det längsta förlängningarna (12,3%).

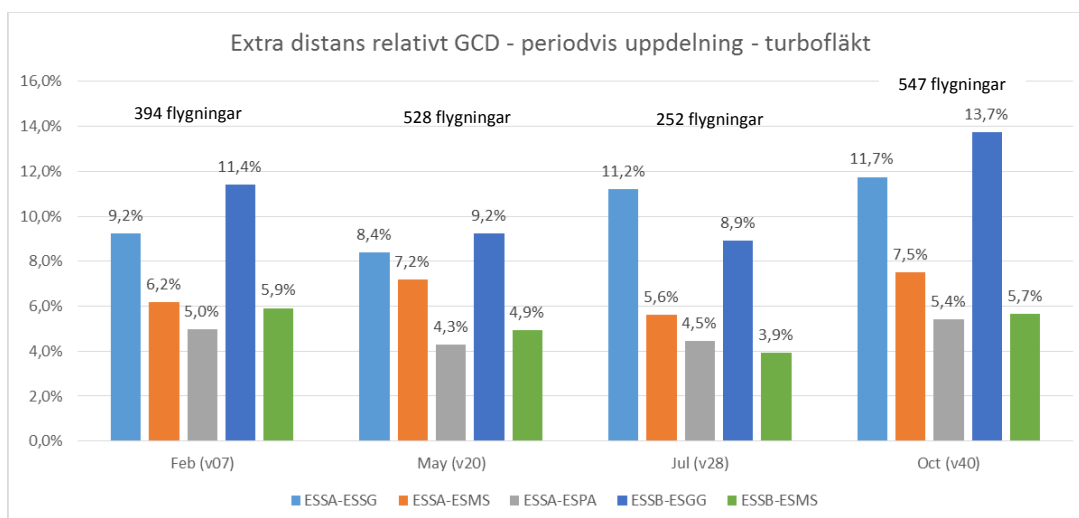
<sup>8</sup> Inflygningsprocedurer betecknas STAR – "Standard Arrival Route" och utflygning SID – "Standard Instrument Departure". Både SID och STAR börjar och slutar normalt på TMA-områdets kant och är ungefär lika långa.

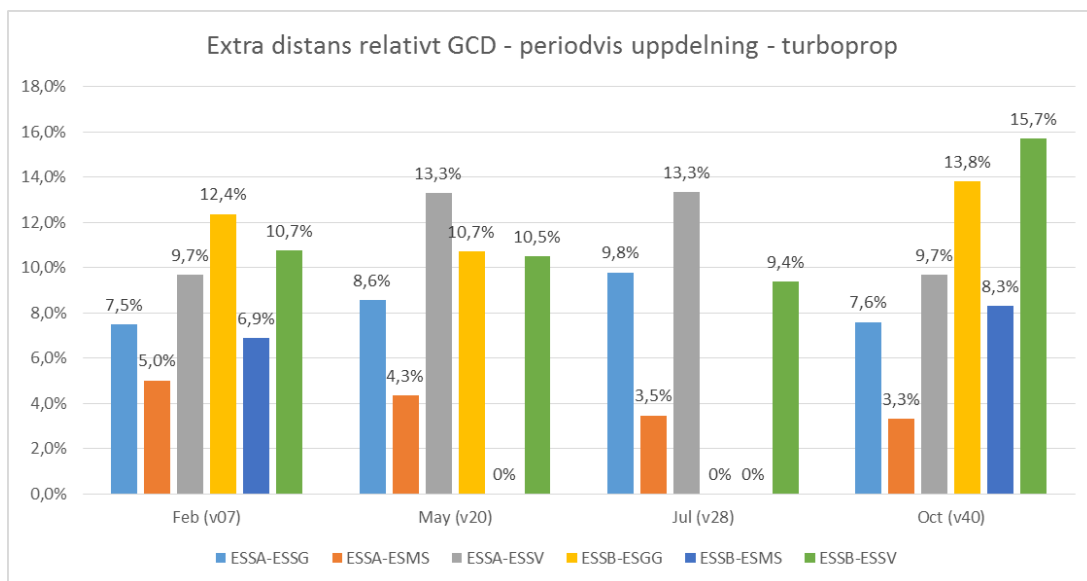


Figur 7. Extra distans relativt storcirkeldistansen [%] Turbofläkt till vänster, turbopropplan till höger. Medelvärde för alla flygningar (båda riktningarna)

En analys av den extra distansens fördelning över de olika veckorna visar en viss koppling till antal rörelser för respektive vecka. De längsta flygningarna sker för turbofläkt genomgående i oktober då antalet rörelser är som högst. Som figur 3 visar är det som flest rörelser i april/maj respektive september/oktober för inrikestrafiken. Att förlängningarna blir som längst i oktober jämfört med maj i undersökningen kan ha meteorologiska förklaringar, detta är dock inget som är undersökt vidare.

Bilden är inte lika tydlig för turbopropflygplanen där underlaget är mindre och vissa sträckor trafikeras inte alla veckor (se tabell 1). För turbopropflygplan återfinns analysens både högsta och lägsta värde för extra flugen distans i oktober. För Arlanda till Sturup endast 3,3% i förlängning medan Bromma – Visby uppvisar 15,7% i extra flugen distans.





Figur 8. Extra distans relativt storcirkeldistansen [%] fördelat på analyserade veckor och sträckor (båda riktningarna). Turboplän i översta figuren och turbopropplan i nedersta figuren.

Bromma sticker ut i underlaget med allmänt längre stidfaser jämfört med Arlanda. I fallet Bromma – Sturup är stigdelen längre än sjunkfasen vilket är ovanligt. Kombinationen Arlanda och Brommas närhet till varandra kräver en del avvägningar som gör det svårt att undvika en del av ineffektiviteten i de nu gällande in- och utflygningsrutinerna.

En studie från 2014 (Reynolds) baserat på FDR-data (4220 flygningar) beräknar medelförlängningen i Europa till 14 % relativt storcirkeln (57 nm där medelvärdet på GCD-längden är 415 nm). Fördelningen i faser för förlängningen i denna studie tillskrevs 16 % "departure", 37 % "En-route", 25 % "Holding and vectoring" och 22 % "Arrival Procedure".

### Analys i skillnader mellan ankommande och avgående trafik

Målsättningen med studien är att titta på flygvägsförlängningar för inrikesflyget. Därför är radarspårerna som analyserats för båda riktningarna för respektive flygplats-par. Ingen djupare analys är gjord av skillnaderna mellan riktningen på flygningen. Självklart har de större flygplatserna Bromma och Arlanda längre ut- och inflygningsvägar och en detaljerad analys skulle kunna ge mer information om särskild ineffektivitet i dessa flöden. För sträckorna Bromma – Landvetter och Arlanda – Luleå är dock medelvärdet av alla spår uppdelat på riktning listat i tabellen nedan. Resultatet visar att stigning från, och plané till, Bromma och Arlanda (som väntat) är längre än motsvarande värden för Landvetter respektive Luleå. Skillnaden i flygtid är dock liten vilket tyder på att bolagen anpassar sin flygning med olika flyghöjder och hastigheter för att hålla tidtabellen.

**Tabell 2. Uppdelning på riktning för sträckorna Bromma – Landvetter och Arlanda – Luleå för total flygtid, distans i stigning respektive plané.**

	Total flygtid [minuter]	Distans stigning [km]	Distans På höjd [km]	Distans plané [km]
Landvetter -> Bromma	43,9	155,7	71,5	191,8
Bromma -> Landvetter	42,8	175,5	95,5	151,0
<b>Skillnad</b>	1,1	-19,7	-24,0	40,9

	Total flygtid [minuter]	Distans stigning [km]	Distans På höjd [km]	Distans plané [km]
Luleå -> Arlanda	63,5	171,5	305,5	246,1
Arlanda -> Luleå	61,9	187,0	295,7	235,3
Skillnad	1,7	-15,4	9,8	10,8

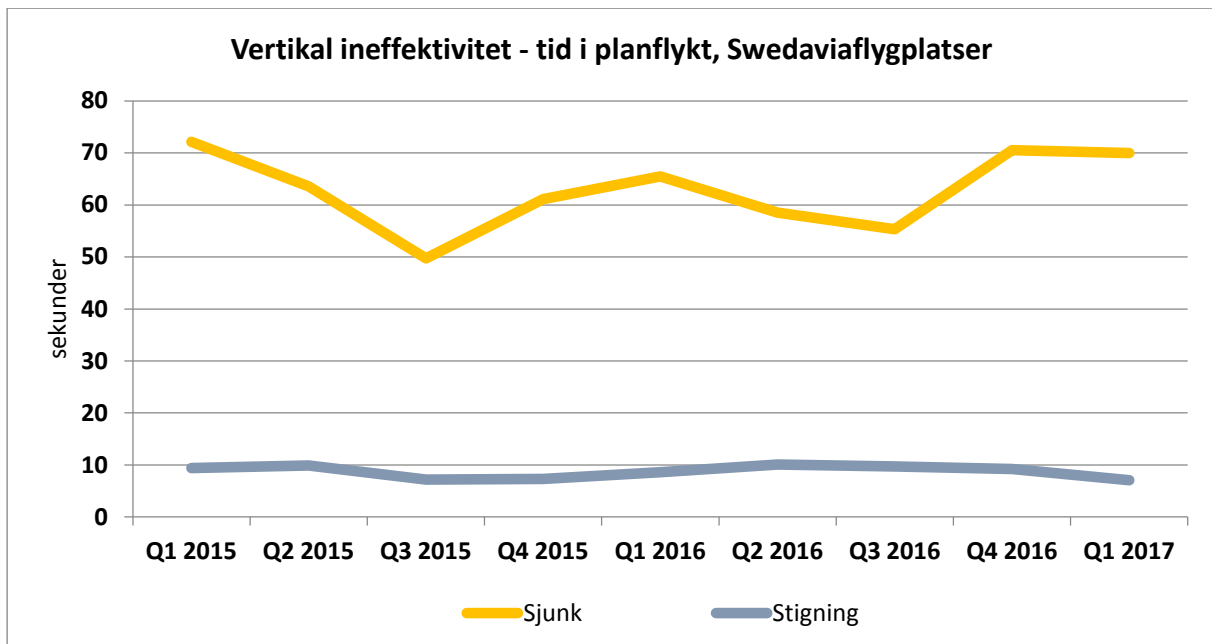
### Vertikal ineffektivitet

En bränsleoptimal in- och utflygning sker med en kontinuerlig sjunkprofil från flyghöjd på sträcka ner till angörande av slutlig inflygning in mot landningsbanan, respektive en kontinuerlig stigprofil hela vägen upp till flyghöjd på sträcka. Pga. begränsningar i luftrummet, behovet av separation till annan trafik, väderförhållanden, brister i flygplanens flygprofilberäkningar och andra faktorer måste ibland stig och sjunkfasen avbrytas för en sträcka flygning i planflykt. Att flyga planflykt på lägre höjder än den planerade flyghöjden på sträcka ökar bränsleförbrukning och utsläpp eftersom luften är tätare på lägre höjder. För en typisk jetflygmaskin är bränsleförbrukningen ca 80 % högre på 4000 fot jämfört med 36.000 fot. Ju längre och lägre en planflyktsfas är, desto större ökning av utsläpp.

Analysen av radarspår i denna studie inkluderar inga beräkningar av den vertikala ineffektiviteten. Vertikal ineffektivitet finns heller inte med i FOI3-modellen. LFV mäter dock kontinuerligt den vertikala ineffektiviteten i svenskt luftrum, bl.a. i form av genomsnittlig tid i planflykt under sjunk- och stigfasen vid nio av Swedavias flygplatser (Stockholm Arlanda, Stockholm Bromma, Göteborg Landvetter, Malmö Sturup, Umeå, Visby, Åre Östersund, Luleå och Ronneby).

Mätningarna visar att det under sjunkfasen sker drygt 60 sekunders planflykt i genomsnitt, och under stigfasen knappt 10 sekunders planflykt. Mängden planflykt varierar mellan de nio flygplatserna, och vid Bromma är den vertikala ineffektiviteten störst. Vid Bromma är planflykten drygt 120 sekunder under sjunkfasen och drygt 20 sekunder under stigfasen i genomsnitt. Att ineffektiviteten är störst vid Bromma beror på närheten till Arlanda och att trafiken till/från Bromma av separationsskäl ibland måste hållas under trafiken till/från Arlanda. Höjderna på vilken planflykt förekommer varierar också.

Hur stor bränsle- och utsläppspåverkan den vertikala ineffektiviteten har är dock inget som beräknas av LFV. Framtida studier skulle kunna titta närmare på denna effekt, t.ex. i närmare samarbete med flygbolagen. Även här skulle BADA-modellen, som i projektet implementerats i LFVs GAIA-system, kunna användas.



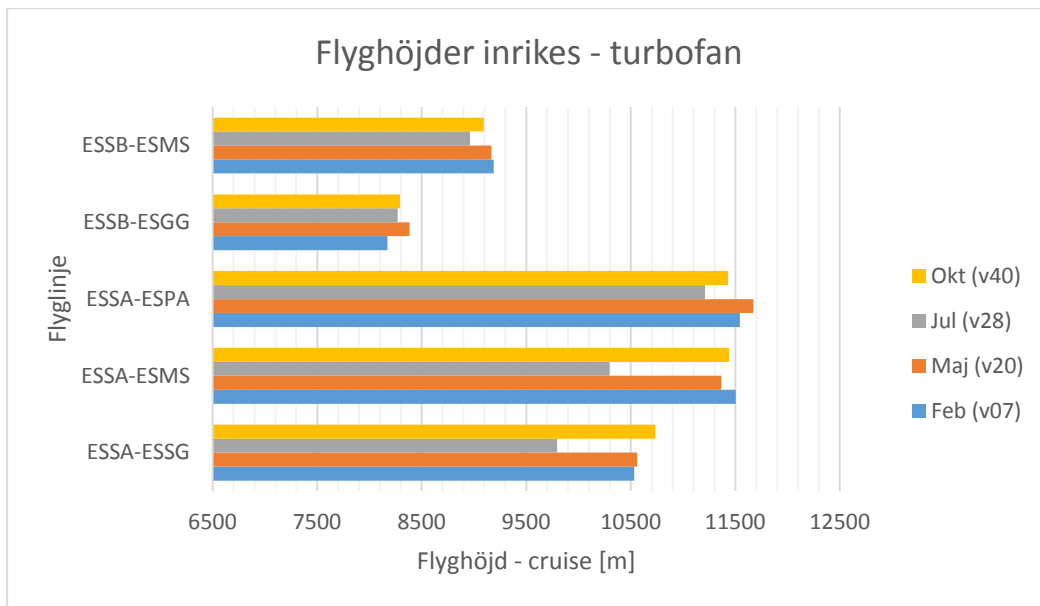
Figur 9. Vertikal ineffektivitet i antal sekunder i planflykt under stig- och sjunkfas vid nio Swedaviaflygplatser.

## Flyghöjd

Vid färdplanering av en flygning tar besättningen hänsyn till en mängd faktorer som exempelvis lastvikten (antal passagerare), väder och eventuella luftrum eller flygplatsspecifika begränsningar som råder för aktuell flygning. Mängden reservbränsle som behövs ombord kan variera med prognostiserat väder för flygningen.

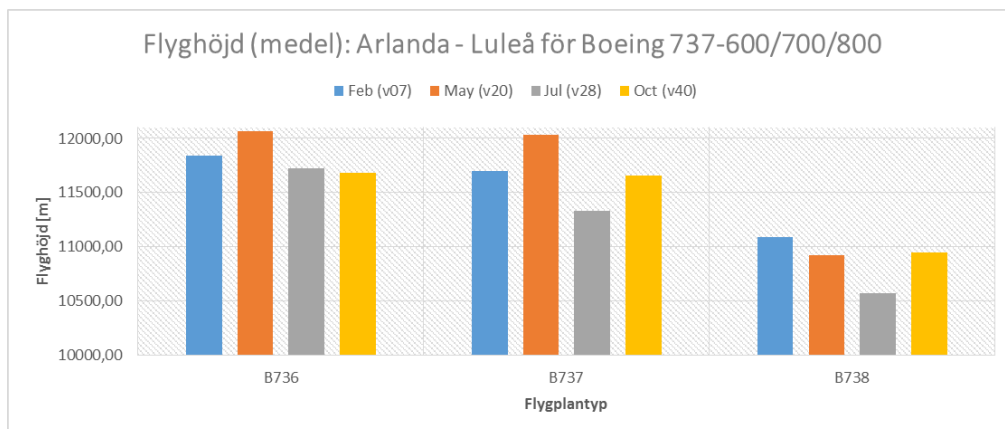
Alla faktorer som påverkar startvikten har en påverkan på vad som är optimal flyghöjd för en given sträcka med viss last. Besättningen beskriver sin önskade flyghöjd i en färdplan och under flygningen är det, beroende på trafiksituation, flygtrafiktjänsten som försöker uppfylla dessa önskemål utan att det kommer i konflikt med flygsäkerheten. Vid kortare flygningar kan bränslet räcka till flera flygningar (retur eller till annan destination). I dessa fall blir också en bränslepriset en faktor som tas med i flygbolagens optimeringsalgoritm, dvs. var ska flygplanet tankas (och med hur mycket) för att minimera bränslekostnaden.

När flygplan utvecklas görs i designprocessen avvägningar mellan lastförmåga, bränsleekonomi, hastighet och räckvidd för några tänkta användarfall. Detta leder sedan till en specifik design av flygplanet och det får då en optimal flyghöjd inte variera så mycket. I radarspårsanalysen syns detta tydligt på sträckorna Bromma – Sturup och Bromma – Landvetter som trafikeras med något mindre jetflygplan med en annan design jämfört med övriga sträckor där Boeings 737-familj är helt dominerande. Figur 7 visar medelvärdet av alla flyghöjder på de analyserade sträckorna.



Figur 10. Flyghöjd [m] fördelat på analyserade sträckor och veckor.

Vid en mer detaljerad analys syns att variationen i flyghöjden är typberoende även inom samma serier, exempelvis Boeing 737 familjen (600/700/800) som illustreras i figur 8 för sträckan Arlanda – Luleå.



Figur 11. Flyghöjder (Cruise) för Boeing 737-600/700/800.

I figur 7 och figur 8 är det tydligt att sommartid är flyghöjderna lägre än för övrig tid på året. Någon entydig förklaring till detta fenomen har inte identifierats. Det skulle behövas en djupare analys av hur flygplanets planeringssystem (FMS – Flight Management System) gör avvägningar mellan bland annat startvikt, meteorologiska förhållanden och de optimerings principer som flygbolagen programmerar in för att hålla kostnaderna nere. Här kan t.ex. kort flygtid vara prioriterat och påverka val av flyghöjd. B736 och B738 har likadana vingar (vingyta) men B738 är i övrigt större och tyngre och därför sämre aerodynamiska egenskaper. En djupare analys av skillnaderna i figur 7 – 8 ryms inte inom ramen för detta projekt, men kan vara intressant att studera vidare inom fortsatta forskningsprojekt.

## Anpassning av resultaten till FOI3-metoden

Ett viktigt resultat av studien är faktiskt flygna distanser på de analyserade sträckorna. Att metodmässigt föra in detta i beräkningsmodellen kan göras på flera sätt. Det är möjligt att i modellkörningen korrigeras med "rätt distans" vid beräkningarna i modellen. Vetenskapligt är detta dock inte en bra ansats att blanda den fysikaliska modelleringen av en optimal flygning (som FOI3-modellen är, se [Hasselrot]) med verkliga data endast för delar av underlaget. Det är en bättre metod att post-processa resultaten av FOI3-modellen med resultaten från undersökningen i denna studie.

De förlängningar som räknats fram gäller endast de sträckor som analyserats. Frågan är hur representativa de är för andra sträckor i landet?

Idealt skulle alla sträckor förses med en förlängning för att få ett mått på den samlade extra flygna distansen. Förlängningarna i distans bör sedan viktas mot antal rörelser (per sträcka) för att erhålla ett representativt medelvärde<sup>9</sup>.

ICAO/CAEP har tagit fram en empirisk formel för extra flugen distans.

$$\frac{Actual}{GCD} = 0,999$$

En analys visar att skillnaderna mellan "Actual" och verkliga spårlängder för de sträckor vi analyserat är mellan -3 % och +4 %.

Metodmässigt använder vi ICAO/CAEP:s formel på alla inrikes sträckor utom de där vi har verkliga siffror. För att få en balanserad viktning används antal flygningar som vikt vid medelvärdesbildningen.

Resultatet blir då att den samlade flygna distansen inrikes är 7,8 % längre än den beräknade som baseras på storcirkelavståndet. Detta är ett av huvudresultaten från vår studie.

Hur proportionell är distansförlängningen med bränsleförbrukningen? Detta beror på i vilken fas förlängningarna uppstår, det är stor skillnad på bränsleförbrukningen (gaspådraget) mellan sjunkfasen jämfört med faserna i stigning eller planflykt. Flygplanen stiger till sin marschhöjd på ungefär samma sätt (och tid) oavsett flugen riktning. Om stigningen skett i en ogynnsam riktning måste fasen på höjd bli längre (och bränsleåtgången kommer öka), likaså om flygplanet av någon anledning tvingas till planflykt under sin stigfas så kommer bränsleförbrukningen öka då planflykt sker på en lägre höjd än den tilltänkta.

Med FOI3-metoden är det enkelt att beräkna bränsleökningen för att flyga en längre sträcka. Ett sådant resultat blir dock inte helt relevant för denna studie då en förlängning främst omhändertas genom en längre fas på en högre höjd i FOI3-modellen. Efter en analys av detaljerna i figur 6 (absolut längd) och underläggande data gör vi bedömningen att förlängningar i stigfaser, på höjd och sjunkfaser sammantaget genererar minst lika stor ökning i bränsleförbrukningen, sannolikt högre.

Detta antagande skulle behöva analyseras djupare med analys av te. x. FDR-data. Det finns studier (Reynolds 2014) som också är baserade på radarspår och modellering med Piano-modellen som för Europa visar att en ökning i lateral flugen sträcka (procent av GCD) genererar en nästan dubbelt så stor ökning av bränsleförbrukningen. För Europa beräknades en 13 % förlängning (lateralt jämfört

---

<sup>9</sup> Om någon sträcka har väldigt långa extra flygvägar men samtidigt trafikeras väldigt sällan skulle denna förlängning få oproportionerligt stor vikt med en aritmetisk medelvärdesbildning.



med GCD) att motsvara en ökning av förbrukat bränsle med 23 %. Så vi bedömer att vårt antagande är konservativt och inte överdriver den ökande bränsleförbrukningen.

Analysen av radarspår ger goda möjligheter att kontrollera de andra antaganden som ingår i FOI3-modellen, kopplat till maximal flyghöjd och längden på de olika faserna av flygningen. Den uppskattning av felkällor i rapporten som beskriver FOI3-modellen [Hasselrot] stämmer i stort vid jämförelse med radarspår.

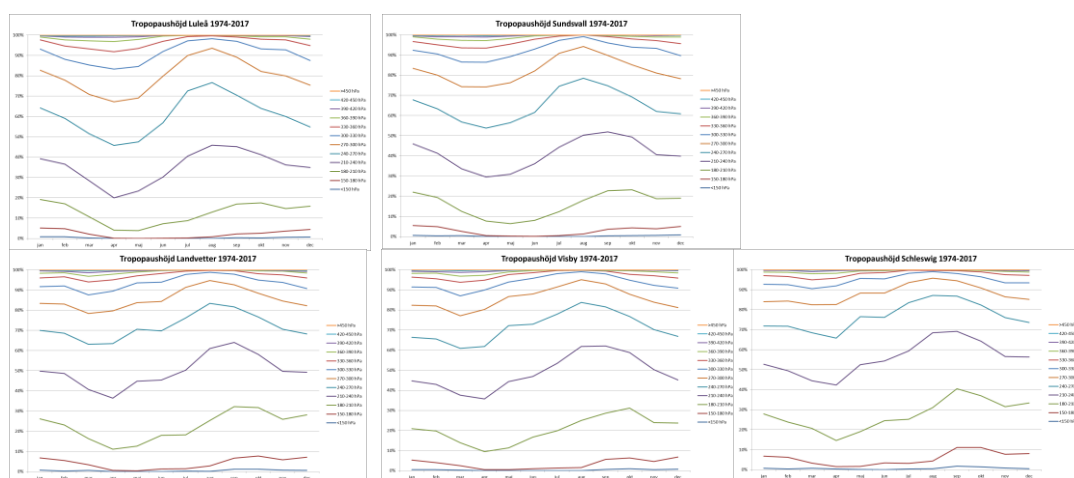
## I vilken omfattning flyger inrikestrafiken i stratosfären?

Flygets klimatpåverkan, utöver den direkta effekten från utsläpp av koldioxid, är starkt kopplat till om emissionerna sker under eller över tropopausen. En mängd faktorer som kopplar till atmosfärskemi, strålning och dynamik bestämmer hur stora dessa effekter är. Processerna sker (och påverkar) på olika tidskalor. Se te. x. referenserna [Lee] och [Azar].

Tropopausen är det luftskikt som skiljer stratosfären från den lägre troposfären. I stratosfären ökar temperaturen med höjden, i troposfären avtar (i medeltal) temperaturen med höjden och tropopausens höjd definieras som den höjd där temperaturen upphör att avta med höjden för att sedan kontinuerligt öka. I den så kallade standardatmosfären ligger tropopausen på 11,5 km höjd med en temperatur på  $-56,5^{\circ}\text{C}$ .

Sonderingar av atmosfärens vertikala skiktning genomförs med ballonger regelmässigt av vädertjänster världen över. Informationen utgör mycket viktig indata för numeriska väderprognoser. I denna studie har underlag från ballongsonderingar från Luleå, Sundsvall, Visby, Landvetter och Schleswig analyserats<sup>10</sup>. Data från 1974 fram till 2017 har använts för att göra statistik (klimatologi) på tropopausens årsvisa höjdfördelning<sup>11</sup>.

Tropopausens höjd är normalt sett representativ för ett förhållandevis stort område runt observationsplatsen på samma latitud. Detta är också tydligt i underlaget där exempelvis Landvetter och Visby i stor sett uppvisar samma klimatologiska fördelning i både relativa och absoluta termer för tropopaushöjdens fördelning över året.



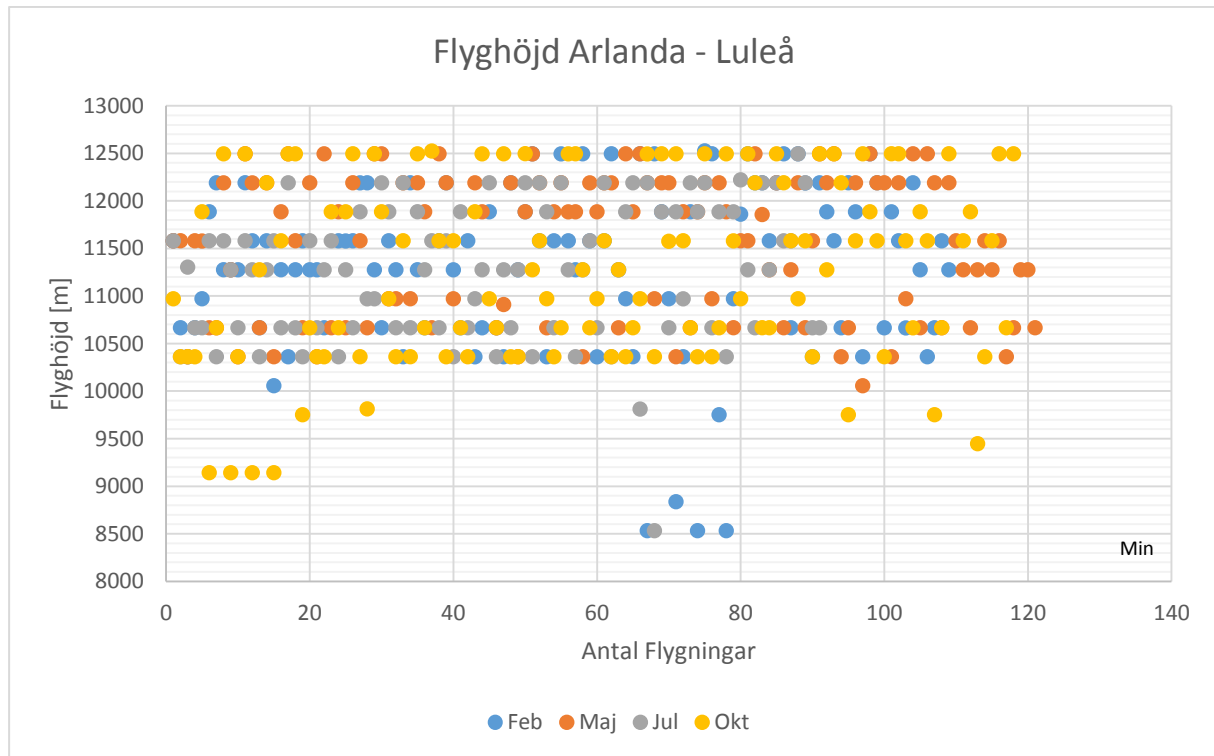
Figur 12. Tropopausens höjd fördelat på 12 olika höjdivtervall för varje månad. Linjerna visar hur stor del av observationerna (%) som ligger i respektive intervall. Intervallen uttrycks här i lufttryck (hPa) som avtar med höjden och de översätts i höjd enligt  $<150$  hPa ( $<13490$  m),  $150-180$  hPa ( $13490-12430$  m),  $180-210$  hPa ( $13490-12430$  m),  $210-240$  hPa ( $11454-10611$  m),  $240-270$  hPa ( $10610-9848$  m),  $270-300$  hPa ( $9847-9151$  m),  $300-330$  hPa ( $8507-7912$  m),  $330-360$  hPa ( $7911-7354$  m),  $360-390$  hPa ( $7353-6829$  m),  $420-450$  hPa ( $6828-6335$  m),  $>450$  hPa ( $<6335$  m).

En noggrannare studie av fördelningen av flyghöjder kopplat till tropopaushöjden görs för sträckan Arlanda – Luleå. Sträckan har det längsta höjdsegmentet (medelvärde 302 km, se figur 4) i det

<sup>10</sup> Data kommer från Modell och Studiesektionen vid Forsvarsmaktens Meteorologiska och Oceanografiska Centrum, ref Peter Löfwenberg.

<sup>11</sup> Typiskt ingår ca 30 000 observationer i underlaget för varje plats

analyserade underlaget. Detta betyder att flygningar Arlanda – Luleå under ca 20 minuter befinner sig i planflykt på hög höjd. I figur 12 är varje flygning på sträckan plottad.

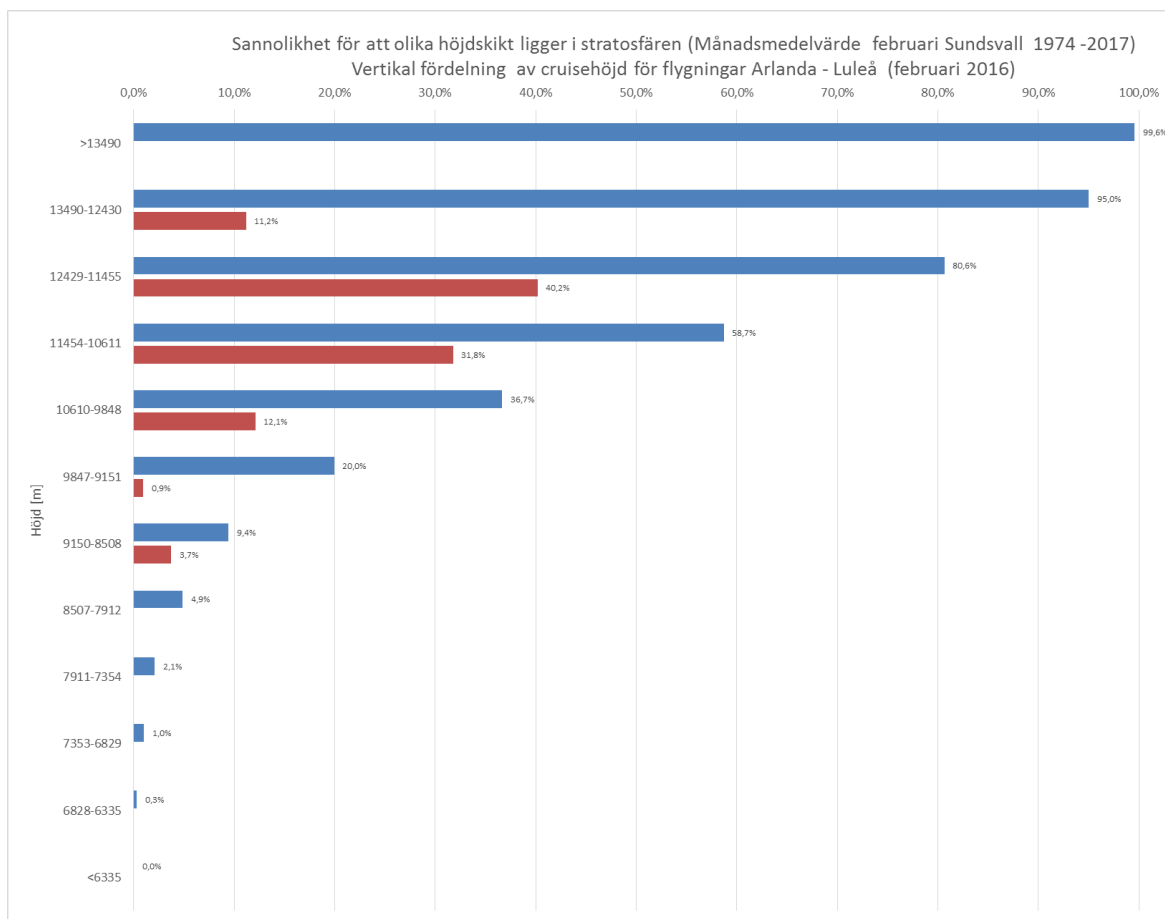


Figur 13. Flyghöjder sträckan Arlanda – Luleå fördelar på de fyra undersökta veckorna.

Sundsvalls sondering är mycket representativ för flygningar mellan Arlanda och Luleå. I figur 13 syns i blå staplar den klimatologiska sannolikheten för att ett visst skikt ligger i stratosfären (över tropopausen) baserat på sonderingsunderlaget för Sundsvall (februari månad). I röda staplar syns hur trafiken fördelat sig vertikalt för februari (samma som de blå punkterna i figur 12). Det klimatologiska medelvärdet som vi använder i denna studie är att föredra framför att använda aktuell veckas observationer som kan variera avsevärt beroende på väderläge. En ovanligt kall eller varm atmosfär skulle påverka resultaten mycket. Syftet här är en att få en uppfattning om hur ofta trafiken går över/under tropopausen. Skulle klimateffekten från varje enskild flygning studeras bör helst aktuellt väder paras ihop med respektive flygning. Detta ligger utanför denna studie men skulle vara ett möjlig fortsatt arbete, se te. x [Grewe] och [Matthes] i referenslistan.

En sammanlagd sannolikhet för att flygningarna på denna sträcka sker i stratosfären syns i tabellen nedan tillsammans med sannolikheten för att flygningarna sker i det skikt där tropopausen ligger.

Arlanda – Luleå "cruise"	Februari	Maj	Juli	Oktober
Sannolikhet för flygning i stratosfären	67 %	82 %	38 %	61 %
Sannolikhet för flygning i samma skikt som tropopausen	16 %	13 %	28 %	17 %



Figur 14. Blå staplar. Sannolikhet för att olika höjdsnitt ligger i stratosfären (Månadsmedelvärde februari Sundsvall 1974 -2017). Röda staplar. Vertikal fördelning av flyghöjd sträckan Arlanda - Luleå (februari 2016)

I maj är tropopausens höjd som lägst och därför sker då ca 80 % av all flygning på höjd i stratosfären. Sommartid när tropopausen ligger högt, och som vår undersökning visar, trafiken går något lägre är siffran bara 38 %. Höst och vinter är siffran 61 % (oktober) respektive 67 % (februari).

För flygningar till Umeå, Skellefteå och Kiruna med B737-familjen från Stockholm bedöms dessa resultat vara representativa. Längden på planflyktssegmenten mellan Arlanda och Sturup respektive Landvetter är cirka hälften av de till Luleå. I detta område är också tropopausklimatologin lik Sundsvall i årstidsvariation men med generellt högre tropopaus vilket sammantaget ger något lägre andel flygningar i stratosfären.

Trafiken från Bromma med turbofläktflygplan sker med andra flygplanstyper som flyger på lägre höjder ("by design") och är sällan över 9000 meter vilket betyder att dessa flygningar avsevärt mer sällan går i stratosfären, uppskattningsvis 5 – 10 % av tiden som ett årsmedelvärde.

De flesta turbopropflygplanen i analysen är av mindre typ och är inte designade för flygning på de höjder där tropopausen normalt ligger. Ett fåtal flygningar i analysen sker med större turbopropflygplan på något längre sträckor. Exempelvis finns 11 flygningar Bromma – Landvetter med flyghöjd på 8280 meter (medelvärde). Detta innebär att flygningar med denna flygplanstyp skulle gå i stratosfären ca 3,5 % av tiden i maj när tropopausen är som lägst.

## Bränsleförbrukning

En enklare jämförelse av bränsleförbrukningen mellan FOI3 och BADA har genomförts inom ramen för projektet.

### BADA

Beräkningen av bränsleförbrukning med hjälp av BADA-modellen har gjorts baserat på BADA version 3.13.1 [1].

De atmosfäriska förhållandena har beräknats med ekvationerna i kap 3.1 i användarmanualen för BADA ver. 3.13 tillsammans med indata i GRIB<sup>12</sup> format, från WAF<sup>13</sup> London. Atmosfäriska förhållanden har tillsammans med radardata (fart, höjd, acceleration, etc.) använts för att beräkna luftmotstånd (ekvation 3.6-5) samt motorernas dragkraft (ekvation 3.2-1). Eftersom det inte finns någon källa till flygplanets aktuella vikt har referensvärdet i BADA-databasen använts. Slutligen har dragkraften använts för beräkning av bränsleförbrukningen med hjälp av ekvationerna i 3.9.

Validering av implementationen har gjorts mot implementationen i flygtrafikledningssimulatorens Narsim och givit identiska resultat. Validering av BADA-modellens överensstämmelse med verklig bränsleförbrukning har gjorts genom jämförelse med verklig data från några tiotal flygningar med SAS, Norwegian och Malmö Aviation. Dessa data har visat på ganska god överensstämmelse för några vanliga flygplanstyper (olika typer av Boeing 737 och Airbus 320). BADA ger generellt något högre bränsleförbrukning än vad verkliga data visar men med en avvikelse under 10 %. För flygplanstyperna Avro RJ-85 och RJ-100 har BADA-modellen i version 3.13.1 givit extremt låga värden för bränsleförbrukning, ca 55 – 60 % av verklig förbrukning. Men också 60 – 65 % jämfört med en tidigare version av BADA (version 3.8). Det är därför rimligt att anta att BADA version 3.13 innehåller felaktigheter för just dessa flygplantyper, och därför har värdena för dessa två flygplanstyper räknats upp med motsvarande procent. Generellt har tillgången på verklig data varit begränsad för att göra en fullständig validering av BADA.

Utöver brister i BADA-modellen finns det flera felkällor/brister i det indata som använts vid beräkningar. Framförallt finns det ingen källa till varje flygnings faktiska vikt, som varierar mycket beroende på bränslemängd och nyttolast. Vidare är det relativt glest mellan mätpunkterna i det väderdata vi har tillgång till, med en mätpunkt per 1,25 grader, latitud så väl som longitud, och 13 lager i höjddled (fördelat på höjder mellan 5 000 och 53 000 fot). Vindar och jetströmmar kan variera även mellan ganska små höjdsikt. Även radardata har begränsningar i noggrannhet och upplösning som kan utgöra felkällor i beräkningar av aktuell dragkraft.

### FOI3

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. FOI3-metoden 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 CO<sub>2</sub>, CO, HC (uppdelat i CH<sub>4</sub> och NMVOC), NO<sub>x</sub> (samt andel N<sub>2</sub>O) och SO<sub>2</sub>.

<sup>12</sup> Standardformat för data från numeriska vädermodeller

<sup>13</sup> World Area Forecast Center – Meteorologiska kontoret ansvariga för flygvädertjänst i Europa, designerat av ICAO.

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

FOI3 modellen baseras på bränsleförbrukningen (och emissioner av CO, HC och NOX) för en flygning beräknas som summan av nio olika delar av flygningen. Detta illustreras av nedanstående exempel där FC betyder Fuel Consumption:

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

FOI3-modellen erhåller sina resultat genom interpolation mellan ett antal datapunkter som i sin tur kommer från detaljerade körningar (fysikalisk modellering) i programvaran PIANO [Simons]. I FOI3-modellen har varje flygplanstyp endast en konfiguration (antal stolar) och en motortyp. Exempelvis modelleras B737-800 med nedanstående grunddata.

[aircraft.info](http://aircraft.info).

ICAO\_id: 'B738'  
Aircraft\_Configuration: 'B737-800, Cabin Factor 65%'  
Engine: 'CFM56-7B20/2'  
Engine\_Category: 'Turbofan'  
No\_of\_engines: 2  
Mass\_max\_Takeoff: 70534  
Mass\_Empty: 41413  
Max\_Payload: 14696  
**Max\_Pax: 162**

De detaljerade körningarna i PIANO görs med antagande om kabinfaktor på 65 %. I de underlag FOI erhåller från Transportstyrelsen finns information om verklig kabinfaktor och en kompensation till denna sker i FOI3-modellen. FOI3-modellen antar en idealisk, helt rak flygning med optimal flyghöjd och ingen vind och underskattar därför bränsleförbrukningen.

### Jämförelser FOI3 – BADA

I tabellen nedan jämförs FOI3-modellen och BADA för några av sträckorna som ingått i radarspårsanalysen. Noteras bör då att BADA-resultaten är från de radarspår som använts medan FOI3-modellen använts med storcirkelavstånd mellan orterna och ett konstant tillägg på 7,8 %.

Skillnaderna i bränsleförbrukning mellan modellerna är för Boeing 737 familjen mellan -5 % och +28 % med större skillnader ju längre distanserna är. För sträckan Arlanda – Visby som i stort sett bara innehåller stigning och plané är skillnaderna små. Detta antyder att modellerna har olika syn på förbrukningen på höjd.

FOI har i andra studier haft tillgång till FDR-data<sup>14</sup> med verkliga bränsleförbrukning kunnat konstatera att skillnaderna mellan två flygningar på sträckan Umeå – Arlanda med B737-600 skiljde sig åt med 15 % (280 kg). Att enstaka flygningar skiljer sig så mycket är inte onormalt utan beror på en mängd

<sup>14</sup> Flight Data Record – Exakta data med verkligt bränsleflöde genom motorerna från flygplanets system (svarta lådan)

faktorer kopplade till just den specifika flygningen, exempelvis startriktning, meteorologiska faktorer (vind) och trafikläget och exempelvis möjligheten att genomföra en "grön inflygning".

Syftet med BADA är att på sikt bygga in ett mått på aktuell bränsleförbrukning i GAIA-systemet, givetvis behöver de felkällor som identifierats korrigeras men vissa fel i absoluta förbrukningen är inte så allvarligt så länge de relativa förhållandena mellan flygplan är korrekt. Om modellen går rätt i relativa termer går det att uttala sig om ifall de åtgärder som vidtas ökar eller minskar förbrukningen i systemet.

Flygplan Typ	Från	Till	BADA [kg]	FOI3 (+7,8 %) [kg]	Skillnad [kg]
B736	Arlanda	Landvetter	2209	1811	398
B738	Arlanda	Landvetter	2347	1919	428
B736	Arlanda	Sturup	2605	2137	468
B738	Arlanda	Sturup	2765	2330	434
B736	Arlanda	Luleå	3070	2403	667
B738	Arlanda	Luleå	3315	2664	651
B736	Arlanda	Visby	1307	1372	-66
B738	Arlanda	Visby	1556	1421	135

FOI3-modellen används främst för att beräkna emissioner som underlag till klimatrapporeringen. Då är det av vikt att de absoluta värdena blir så bra som möjligt. FOI har via flygbolag fått tillgång till några få referensvärden på bränsleförbrukningen. Data är då årsmedelvärden för en typ, på en sträcka och mätt från "gate till gate" och innehåller således alla faser av flygningen och får betraktas som "sanningen". Dessa två underlag visar att FOI-modellen (med tillägg) ligger ca 5% under redovisad förbrukning på dessa två sträckor.

## Slutsatser

Målsättningarna med projektet var att:

- Analysera radarspår för att undersöka verkligt flygna sträckor (inrikes)
- En analys av flyghöjd för trafiken och dess relation till tropopausens höjd
- Jämföra bränsleförbrukningen mellan FOI3 modellen och BADA-modellen

### Verkligt flugen sträcka och flyghöjder

En av de viktigare slutsatserna i projektet är att faktisk flygväg är mellan 4-12% längre än storcirkeldistansen mellan orterna. Resultatet är inte oväntat men viktigt för att det bl. a. ger möjligheter att bättre beräkna bränsleförbrukning och emissioner från flygtrafik. Vidare är det ett viktigt underlag för att kunna utvärdera eventuella ändringar i luftrum kopplat till in- och utflygningsrutiner eller hur ökad (minskad) trafik påverkar flygna distanser.

Ingen djupare analys av detaljerna i radarspårerna kopplat till respektive flygplats är gjord. Det som är tydligt i både den horisontella och vertikala analysen är att Brommas närhet till Arlanda gör att Bromma har flera av de längsta flygvägsförlängningarna och en del ineffektivitet kopplat till sina procedurer. Även detta är väl känt men med denna studie går det att kvantifiera dessa och jämföra hur eventuella ändringar förbättrar eller försämrar effektiviteten.

Analysen visar också på att trots olika längder på in och utflygning beroende på storlek på flygplats så kompenserar flygbolagen för de olika förlängningarna genom att anpassa höjd och fart för att hålla tidtabellen. Detta är sannolikt en av de viktigare parametrarna vid färdplanering

Ett viktat medelvärde på flygvägsförlängningarna i inrikestrafiken 2016 är 7,8 %. Då har de uppmätta förlängningarna kompletterats med förlängningar från en empirisk formel utvecklad av ICAO/CAEP. En konservativ bedömning är att ökningen i förbränt bränsle är minst lika stor som flygvägsförlängningarna.

Flyghöjderna (cruise) för inrikestrafiken kännetecknas av förhållandevis korta sträckor för turbofläktflygplan, något längre (men på lägre höjd) segment för turbopropflygplan. Det finns en tydlig säsongvariation med lägre flyghöjder sommartid, där det kan finnas en koppling till den mindre volymen trafik (rörelser och antal passagerare, se figur 3), men en djupare analys krävs för att kunna förklara de lägre flyghöjderna.

### Inrikestrafiken och flygning i stratosfären

Baserat på flyghöjderna från radarspårerna och det klimatologiska värdet på tropopaushöjden har en mer detaljerad studie gjorts för sträckan Arlanda – Luleå. Då data från sonderingarna är beräknade i vissa höjdintervall går det bara redovisa sannolikheten för att flygningen går i stratosfären, eller att den sker i samma skikt som troposfären, i förhållande till dessa intervall. Resultaten redovisas i tabellen nedan.

Arlanda – Luleå "cruise" (302 km)	Februari	Maj	Juli	Oktober
Sannolikhet för flygning i stratosfären	67 %	82 %	38 %	61 %
Sannolikhet för flygning i samma skikt som tropopausen	16 %	13 %	28 %	17 %



Resultaten är representativa för inrikes sträckorna från Arlanda till Skellefteå och norrut med B737-familjen. För trafiken i södra och mellersta Sverige är tiden på cruisehöjd mindre och i kortare segment (100 – 150 km). Vidare är höjden på tropopausen något högre (klimatologiskt), så sannolikheterna för att trafiken går i stratosfären är något lägre.

Trafiken från Bromma med turbofläktflygplan sker med andra flygplanstyper som flyger på lägre höjder ("by design") och är sällan över 9000 meter vilket betyder att dessa flygningar avsevärt mer sällan går i stratosfären, uppskattningsvis 5 – 10 % av tiden som ett årsmedelvärde.

### Bränslejämförelser FOI3 - BADA

Implementeringen av BADA-modellen i LFs radaranalysverktyg GAIA innebär möjligheter att mer exakt beräkna bränsle- och utsläppseffekter av luftrumsförändringar och andra förändringar av ATM-systemet. Dock finns det en del felkällor och brister i BADA-modellen som behöver åtgärdas/justeras. Det krävs också bättre kvalitet på andra data, t.ex. vinddata och uppgifter om flygningarnas vikt, för att resultatet ska bli mer användbart.

FOI3 modellen kan använda de beräknade flygvägsförlängningarna för att justera utdata från bränsle- och emissionsberäkningar.

### Fortsatt arbete

Radarspårsdata är mycket användbart och kan användas för fortsatta studier av:

- Detaljstudier av vilka parametrar som egentligen styr färdplaneringen. Vilka avvägningar görs mellan punktlighet, bränsleförbrukning, kostnader för en route-avgifter (relevant för flygningar utanför svenskt luftrum) och meteorologi.
- Studera klimatpåverkan i detalj för flygningar med verkligt väder för varje flygning.
- Detaljstudera in – utflygning från flygplatser
- Detaljstudera hur stor bränsle- och utsläppspåverkan den vertikala ineffektiviteten har
- Analysen av flygning på höjd kopplat till klimatpåverkan bör färdigställas för alla sträckor i underlaget.
- Analys av klimatpåverkan från en-route trafik.

### Projektets uppskattning till

Projektet har finansierats av forskningsmedel från Transportstyrelsen. Vi vill också tacka Försvarmaktens Meteorologiska och Oceanografiska Centrum som bistått med de klimatologiska underlagen. Vidare också ett tack till Henrik Ekstrand, pilot och doktorand vid Chalmers för konstruktiva synpunkter på delar av analysen i studien.

## Referenser

Hasselrot, A., Mårtensson, T. (2013): Beräkning av avgasemissioner från flygtrafik, beskrivning av FOI3-metoden, FOI-R-3677-SE.

Eurocontrol., Performance Review Report; *An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2012*; <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/prr-2012.pdf>

Lee, D.S., et al., Aviation and global climate change in the 21st century, Atmospheric Environment (2009).

Reynolds, T.G, Air traffic management performance assessment using flight inefficiency metrics, Transport Policy 34(2014) pp 63 – 74., 2014 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.019>)

Matthes, S.: Climate-optimised flight planning – REACT4C in Innovation for a Sustainable Aviation in a Global Environment, Proceedings of the Sixth European Aeronautics Days 2011, IOS Press & European Union, ISBN 978-92-79-22968-8, 2012.

Grewe, V., Frömming, C., Matthes, S., Brinkop, S., Ponater, M., Dietmüller, S., Jöckel, P., Garny, H., Tsati, E., Dahlmann, K., Søvde, O. A., Fuglestvedt, J., Berntsen, T. K., Shine, K. P., Irvine, E. A., Champougny, T., and Hullah, P.: Aircraft routing with minimal climate impact: the REACT4C climate cost function modelling approach (V1.0), Geosci. Model Dev., 7, 175-201, doi:10.5194/gmd-7-175-2014, 2014.

Azar, C. & Johansson, Valuing the non-CO2 climate impacts of aviation D.J.A. Climatic Change (2012) 111: 559. doi:10.1007/s10584-011-0168-8

[1] USER MANUAL FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) REVISION 3.13, EEC Technical/Scientific Report No. 15/04/02-43, EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE

Simons, D. (1997) PIANO, Project Interactive Analysis and Optimisation, Lissys Ltd, Woodhouse Eaves, UK .  
Se även [www.piano.aero](http://www.piano.aero) .