

# Slutrapport projekt OPNOP

*Stockholm, 16 november 2021*

## Sammanfattning

OPNOP (OPerational Noise OPtimization) är ett projekt som genomförts inom ramen för Centrum för hållbar luftfart vid Kungliga Tekniska Högskolan. Projektet har finansierats av Trafikverket.

Syftet med OPNOP har varit att öka kunskapen kring hur olika bullergenererande källor på landande flygplan påverkar olika områden på marken under inflygningen. Projektet har också sökt att öka kunskapen kring möjligheter att styra uppkomsten av buller från dessa källor genom att flygplanet flygs något annorlunda med hänsyn till fart och tidpunkt för utfällning av klaffar och landningsställ. Den primära forskningsfrågan har varit; att om det med flygoperationella procedurer går att göra så att buller antingen flyttas från ett geografiskt område till ett annat under inflygningssektorn, eller att bullret minimeras vid ett specifikt område på marken, detta trots att flygplanet fortsatt flyger samma väg genom luften och över marken.

Projektets syfte har uppnåtts genom att flygdata som registrerats ombord på flygplan från flygbolaget Novair har samlats in vid inflygningar till en av landningsbanorna vid Stockholm Arlanda flygplats. Under inflygningsvägen har buller även samlats in med mikrofoner på marken. Därefter har flygoperationella data från flygplanen matchats med insamlad bullerdata. Efter analys och slutsatser från det första steget i projektet har därefter insamlad data från det tidigare projektet Brantare analyserats och bullerberäknats för att bekräfta de slutsatser som gjorts efter projektets första fas.

Slutsatsen är att det finns möjligheter att påverka bullerexponeringen av olika områden under inflygningsstråket till en flygplats. Fortsatt forskning på fler flygplanstyper krävs dock för att fastställa vilken reell förändring på buller ändrade flygoperativa rekommendationer kan få.

OPNOP har byggt på samverkan med övriga projekt inom Centrum för Hållbar Luftfart.

OPNOP har tagit del av resultat från andra projekt såsom ULLA, SAFT, ANT och CIDER samtidigt som OPNOP har bistått övriga projekt inom centrumet med deras behov av flygdata och flygoperativ kompetens.

## Summary

OPNOP (OPerational Noise OPTimization) is a project carried out within the framework of the Centre for Sustainable Aviation at the Royal Institute of Technology. The project has been financed by the Swedish Transport Administration, Trafikverket.

The purpose of OPNOP has been to increase knowledge about how different noise-generating sources on landing aircraft affect different areas on the ground during the approach. The project has also sought to increase knowledge about opportunities to control the generation of noise from these sources by flying the aircraft slightly differently with regard to speed and time for extension of flaps and landing gear. The primary research question has been; that if operational procedures can be used to ensure that noise is either moved from one geographical area to another beneath the approach sector, or that noise is minimized at a specific area on the ground, even though the aircraft continues to fly the same path through the air and above the ground.

The purpose of the project has been achieved by collecting flight data registered on board aircraft from the airline Novair during approaches to one of the runways at Stockholm Arlanda Airport where microphones have been deployed by the ULLA project, which is also operated within the Centre for Sustainable Aviation. Subsequently, flight operational data from the aircraft were matched with collected noise data from the ground. After analysis and conclusions from the first step in the project, data from the previous project Brantare was analyzed and noise calculated to verify or refute the conclusions made after analysis of collected noise data. The overall conclusion is that with flight operational recommendations, there are opportunities to influence the noise exposure of different areas beneath the approach path to an airport. However, further research on more aircraft types, is needed to determine what real change in noise changed flight operating recommendations can have.

OPNOP has built on collaboration with other projects within the Centre for Sustainable Aviation. OPNOP has received results from other projects such as ULLA, SAFT, ANT and CIDER, and OPNOP has assisted other projects within the centre with their needs for flight data and flight operational competence.

# Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	2
Summary .....	3
1 Projektbeskrivning.....	5
2 Genomfört arbete .....	6
2.1 Projektledning .....	6
2.2 Påverkan av covid-19.....	6
3 Analys och resultat .....	6
3.1 Analys av buller- och flygdata .....	6
3.2 Analys bränsleförbrukning och CO <sub>2</sub> .....	9
3.3 Spridning av resultat.....	9
4 Slutsatser .....	9
5 Framtida arbete.....	10
6 Bilagor.....	10
6.1 Bilaga 1 – Konferensbidrag Inter-Noise 2021.....	10

## Projektdeltagare

### **KTH**

*(Huvudsökande)*

Per Näsman

Institutionen för

fastigheter och

byggande

KTH Royal Institute of

Technology

100 44 Stockholm

### **Vernamack AB**

*(Projektledare)*

Bengt Moberg

Box 357

101 27 Stockholm

### **Natmer AB**

Johan Rignér

Vasseurs Väg 16

182 39 Danderyd

### **Novas Airlines AB,**

**(Novair)**

Ulrika Ziverts

Box 45439

104 31 Stockholm

# 1 Projektbeskrivning

OPNOP (Operational Noise Optimization) har varit ett 24 månader långt projekt som möjliggjorts genom Centrum för hållbar luftfart (CSA) vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) och finansierats av Trafikverket. Beslut om genomförande av projektet fattades av Trafikverket 2019-10-10.

Projektgruppen har varit en sammansättning av personer med bred erfarenhet och kunskap: Per Näsman (KTH) är senior forskare inom datahantering och statistisk analys; Bengt Moberg (Vernamack AB) och Johan Rignér (Natmer AB) med forskarbakgrund och flygoperativ erfarenhet; Andreas Linnér och Ulrika Ziverts (Novair) båda med flygoperativ erfarenhet och den senare också med erfarenhet av databearbetning av flygoperativa data.

Syftet med OPNOP har varit att öka kunskapen kring hur olika bullergenererande källor på landande flygplan påverkar olika områden på marken under den senare delen av inflygningen. Projektet har också sökt att öka kunskapen kring möjligheter att styra uppkomsten av buller från dessa källor genom att flygplanet flygs något annorlunda med hänsyn till fart och tidpunkt för utfällning av klaffar och landningsställ. Att göra så kan möjliggöra att buller antingen flyttas från ett geografiskt område till ett annat under inflygningssektorn eller att bullret minimeras vid ett specifikt område på marken. Detta trots att flygplanet fortsatt flyger samma väg genom luften och över marken.

Projektets syfte har att uppnåts genom att flygdata som registrerats ombord på flygplan från flygbolaget Novair samlats in vid inflygningar till en av landningsbanorna vid Arlanda flygplats. Under denna inflygningsväg har mikrofoner varit utplacerade av projektet ULLA som också drivs inom ramen för Centrum för hållbar luftfart vid KTH. Därefter har data från flygplanen matchats med insamlad bullerdata från samma flygningar. Efter analys och slutsatser från det första steget i projektet har därefter tidigare insamlad data från det tidigare projektet Brantare analyserats och bullerberäknats för att verifiera eller vederlägga de slutsatser som gjorts efter analys av insamlad bullerdata.

Den samlade slutsatsen är att det med flygoperationella rekommendationer finns möjligheter att påverka bullerexponeringen av olika områden under inflygningsstråket till en flygplats. Fortsatt forskning krävs dock för att fastställa vilken reell förändring på buller ändrade flygoperativa rekommendationer kan få.

OPNOPs vetenskapliga resultat redovisas i enlighet med forskningsansökan till Trafikverket dels i ett konferensbidrag till konferensen Internoise 2021 och dels som en referentgranskad vetenskaplig artikel. Projektet som sådant samt resultat och slutsatser har även redovisats vid Centrum för hållbar luftfarts årliga workshop 2019 och 2020.

OPNOP har byggt på samverkan med andra projekt inom Centrum för hållbar luftfart. Samverkan har skett dels genom att OPNOP tagit del av resultat från andra projekt (ULLA, SAFT, ANT och CIDER). OPNOP har bistått övriga projekt inom centrumet med deras behov av flygdata och flygoperativ kompetens. Genom att flygdata kanaliseras genom projekt OPNOP på detta sätt har erforderliga krav på sekretess och integritet avseende flygdatahantering kunnat uppnås.

## 2 Genomfört arbete

### 2.1 Projektledning

Projektet har administrativt förvaltas av KTH som varit kontaktpunkt och avtalspart mot Trafikverket. Övriga deltagare i projektet har fungerat som leverantörer till KTH. Det praktiska arbetet har dock letts av Vernamack AB som fungerat som projektledare inom projektet. Under projektets gång har nio kvartalsvisa uppföljningsmöten hållits och normalt har samtliga projektparter deltagit. Vid ett möte har dessutom projektet ULLA som också drivs inom ramen för CSA deltagit.

### 2.2 Påverkan av covid-19

Då covid-19-pandemin drabbade världen påverkades också OPNOP-projektet av denna. Flygbolaget Novair som deltagit i projektet som leverantör av flygoperationell data till projektet drabbades extremt hårt av det uteblivna resandet och det var oklart om bolaget skulle överleva eller likt andra flygbolag gå i konkurs. För att säkra tillgång till flygoperationell data levererade därför Novair all data de vid tillfället (mars 2020) hade tillgängligt. Data kunde inte levereras i det format som från början önskats men efter en arbetsinsats från Novair och Vernamack kunde data ändå användas inom projektet. Totalt levererade Novair data från 178 flygningar med deras flygplan Airbus A321 Neo. Av dessa flygningar bedömdes initialt 123 stycken vara användbara inom projektet. I slutändan konstaterades dock att endast 113 var användbara. Vid projektets början var målet 150 stycken flygningar. Sammantaget kan konstateras att pandemin innebar ett merarbete i projektet men att den ändå bara marginellt påverkade projektets genomförande och resultat.

## 3 Analys och resultat

### 3.1 Analys av buller- och flygdata

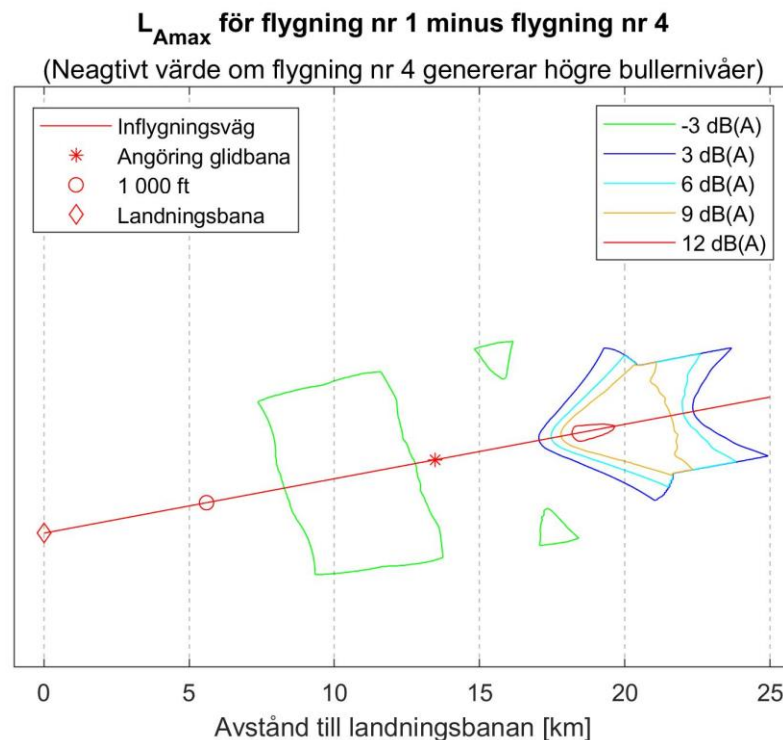
Flygoperationellt data från de sammanlagt 178 levererade flygningarna från Novair rensades först från flygningar med ofullständiga data eller där bullerdata inte fanns tillgängligt. De kvarvarande 113 flygningarna analyserades sedan ur ett flygoperationellt perspektiv med avseende på hur klaffar och landningsställ fälldes ut under de genomförda inflygningarna. Därefter jämfördes dessa data med de data från nära 1 400 flygningar som tidigare erhållits vid det vid CSA genomförda projektet Brantare. Baserat på att det fanns en stark korrelation mellan tidigare data från Brantare och det data som samlats in för OPNOP så bedömdes all data från de 113 flygningarna kunna användas. Därför samordnades insamlad flygoperationella data med bullerdata insamlat av ULLA-projektet. En analys av den totala mängden data genomfördes därefter i nära samarbete med ULLA-projektet. Resultatet från denna del av projektet finns redovisat i bilaga 1 nedan.

Kortfattat kan sägas att resultatet av OPNOPs första del visade att det fanns variationer i de olika flygningarnas anflygningshastighet och att dessa variationer syntes vara kopplade till bullret på marken. Särskilt noterades detta vid utfällning av landningsstället. Det konstaterades också att relevanta maxbullernivåer ( $> 40\text{db(A)}$ ) i huvudsak uppstod under de sista 25 kilometrarna av inflygningen.

Slutsatserna efter den första halvan av projektet ledde fram till att det data som fanns tillgängligt från Brantare-projektet analyserades med avseende på det som bedömdes vara intressant för OPNOP. Därefter genomfördes simuleringar och bullerberäkningar för de sista 25 km av inflygningen för representativa flygningar från Brantare-projektet vilka landat på bana 26 vid Stockholm-Arlanda flygplats. Dessa simuleringar och bullerberäkningar besvarade i viss mån den primära forskningsfråga

OPNOP haft att besvara; går det med flygoperationella procedurer göra så att buller antingen flyttas från ett geografiskt område till ett annat under inflygningssektorn, eller så att bullret minimeras vid ett specifikt område på marken, detta trots att flygplanet fortsatt flyger samma väg genom luften och över marken.

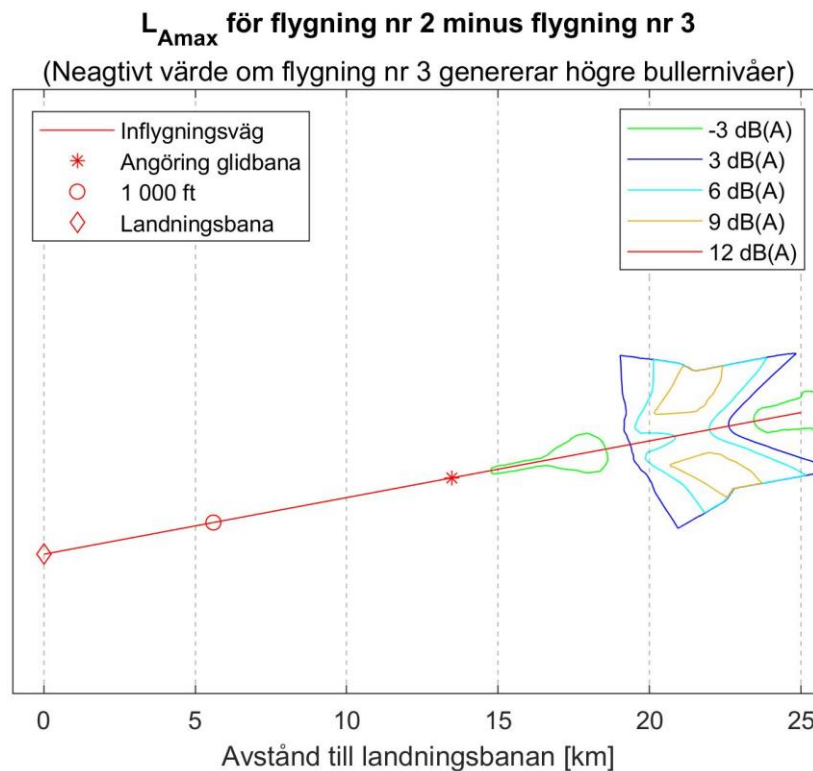
Det konstaterades att flygplan som tillåts flyga så länge som möjligt med så stor hastighet att de inte behöver använda någon form av klaffar förrän så sent som möjligt under de sista 25 km av inflygningen genererar mindre buller än flygplan som måste använda klaffar tidigare under inflygningen. Bullerdifferensen kan för den aktuella flygplanstypen bli så stor som 12dB(A) i vissa sektorer under inflygningsvägen. Om inflygningshastigheten blir alltför hög finns dock en risk att bullret ökar under den senare delen av inflygningen. Dock blir denna senare bullerökning signifikant lägre än den tidigare bullerminskningen. I figur 1 nedan redovisas kurvor över de skillnader i buller som kan uppstå genom att två flygningar (benämnda flygning 1 respektive flygning 4) med samma flygoperationella förutsättningar från en punkt 25 km före landning på bana 26 vid Arlanda tillåts operera på två olika sätt.



Figur 1. Jämförelse av buller mellan flygning 1 och flygning 4. Flygning nr 1 tvingas reducera fart tidigt under inflygningen och behöver därför fälla ut framkantsklaffarna. Detta skapar luftmotstånd som kompenseras med dragkraft från motorerna. Den samlade effekten blir att både aerodynamiskt buller och buller från motorerna uppstår. Den andra flygningen (flygning nr 4) tillåts flyga med högre fart under inflygningens första halva och farten reduceras därefter med hjälp av luftmotstånd från klaffar och landningsställ under den andra halvan av inflygningen. Dessa fälls då ut tidigare än vad flygning 1 behövde göra. Eftersom farten reduceras är motorerna i tomgång varför det ökande bullret i huvudsak är aerodynamiskt buller.

De två valda flygningarna i exemplet är inte några extremfall. Bägge flögs väl inom ramen för vad som är att betrakta som normalt operationellt förfarande, vilket är väl definierat i manualerna för flygplanstypen. Flygningarna har dock valts som exempel för att de kan betraktas som karakteristiska för två olika sätt att flyga en inflygning. I det samlade materialet finns dock en stor variation av olika typer av operationellt förfarande. Men mer än 90 % av det totala antalet flygningar ligger inom den flygoperationella ram som flygning 1 respektive flygning 4 nedan kan anses definiera.

Som exempel på den komplexitet det de facto är att försöka jämföra olika flygoperationella scenarion kan i figur 2 nedan ses en jämförelse mellan två flygningar (med samma operationella förutsättningar som flygning 1 och 4) där den ena (flygning 2) i huvudsak opereras som flygning 1 i det ovanstående exemplet och den andra (flygning 3) i huvudsak opereras som flygning 4 men väljer ett något annorlunda utnyttjande av motoreffekt och utfällning av klaffar, vilket resulterar i en annorlunda bullerutbredning. Orsaken till det annorlunda handhavandet av flygning 3 gick inte att utröna vid granskning av de flygparametrar som samlats in.



Figur 2. Jämförelse av buller mellan flygning 2 och flygning 3. Flygning 2 har reducerat farten tidigt under inflygningen (24 km före landning) och behöver därför fälla ut framkantsklaffarna. Detta skapar luftmotstånd som kompenseras med dragkraft från motorerna. På grund av detta genereras både aerodynamiskt buller och buller från motorerna. Den andra flygningen (flygning 3) ökar (omotiverat?) farten något när den har 24 km kvar till landning vilket genererar motorbuller men den behöver inte använda framkantsklaffarna. Flygning 3 fäller därefter ut framkantsklaffarna 19 km före landning och måste då använda motorerna från 18 till 15 km före landning för att bibehålla hög fart. Flygning 2 väljer istället att fälla ut bakkantsklaffarna och reducera farten något. Efter angöring till glidbanan (vid \*) opereras flygningarna i stort sett likadant.



## 3.2 Analys bränsleförbrukning och CO<sub>2</sub>

Sammantaget kan från samtliga scenarier konstateras att ju längre flygplan kan tillåtas hålla så hög fart att de inte behöver ta ut någon form av klaff (i detta fall 220 knop = 407 km/h) desto mindre bränsle går det åt för inflygningen och därmed släpps även mindre mängd CO<sub>2</sub> ut. För flygning 1 i exemplet ovan krävdes 97 kg bränsle för inflygningens sista 25 km och för flygning 4 krävdes 83 kg för samma sträcka. Det innebär att i detta fall så släppte flygning 1 ut 44 kg mer CO<sub>2</sub> än flygning 4.

## 3.3 Spridning av resultat

Projektets status och resultat har presenterats vid nedanstående tillfällen:

- Presentation Inter-noise 2021, Washington, augusti 2021.
- CSA workshop 2019, 2020.
- CSA-avstämningsmöten, kvartalsvis.

Konferensbidraget till Inter-noise 2021 har publicerats och finns som bilaga till denna rapport.

I tillägg till det har en vetenskaplig artikel skrivits. Den är ännu inte publicerad och kan av upphovsrättsliga skäl inte bifogas denna rapport. Så fort den är publicerad kommer den dock biläggas slutrapporten.

## 4 Slutsatser

Att enkelt beskriva hur bullret kring en flygplats påverkas av flygoperationella procedurer är en komplicerad uppgift. I analysen förekommer ett stort antal variabler som i flera led har beroende av varandra. Beroende på flygplanets vikt kan exempelvis behovet av användning av klaffar innebära att en högre fart är att föredra om målet är att undvika användning av klaff under en tidigare del av inflygningen. Detta kan i sin tur innebära att farten då flygplanet senare under inflygningen angör den slutliga inflygningen, dvs. sjunker längs glidbanan, blir högre och mer klaff och utfällning av landningsställ måste ske tidigare, vilket i sin tur genererar mer buller. Det kan därför konstateras att det med största sannolikhet inte finns någon universell metod för att minimera buller som fungerar i alla situationer. För den i projektet undersökta flygplanstypen kan dock konstateras att:

- Med avseende på bränsleförbrukning och utsläpp av CO<sub>2</sub> så är det lämpligt att låta flygplanen flyga så länge som möjligt med en fart något över den fart som gör att piloterna inte behöver fälla ut någon form av klaffar.
- Då klaffar fälls ut tidigt under de sista 25 km av inflygningen så skapas både aerodynamiskt buller och buller från motorerna vilket påverkar överflugna områden på marken avsevärt. I vissa områden >12 dB(A).
- Om landningsställ fälls ut tidigt under den slutliga delen av inflygningen för att reducera farten (dvs. strax efter att flygplanet anslutit till glidbanan) så genereras i större utsträckning fartberoende aerodynamiskt buller >3 dB(A) men < 6dB(A) än om landningsstället istället fälls ut antingen senare under inflygningen eller i lägre hastighet.

Sammanfattningsvis kan sägas att det med stöd av flygoperationella procedurer bör finnas möjligheter att påverka bullernivån på marken under vissa delar av en inflygning. Beroende på hur procedurerna utformas så kan det dock finnas en risk för att det bullret ökar under andra delar av inflygningen.

## 5 Framtida arbete

Som en följd av erfarenheterna från OPNOP föreslås följande områden vara värdefulla att undersöka vidare

- Engagera fler flygbolag med fler olika flygplanstyper så att flygdata kan erhållas även från dessa och koppla därefter flygdata med bullermätningar på marken.
- Vid jämförelse av flygoperationella data och uppmätt buller på marken konstaterades att det vore önskvärt med fler mikrofoner på marken över ett större mätområde.
- Genomför i samarbete med flygtrafikledning både simulatorförsök och praktiska försök där ankommande flygplan tillåts hålla den fart de behöver för att slippa fälla ut någon form av klaffar i ett tidigt skede.
- Kartlägg om det finns ett behov av att styra bullret till önskvärda geografiska lägen vid flygplatser.
- Undersök hur stort fartöverskott det är lämpligt att ha för att undvika kraftiga motorpådrag då klaffar eller landningsställ fälls ut utan att fartöverskottet medför kraftigt aerodynamiskt buller.

## 6 Bilagor

Projektets resultat presenteras primärt i ett konferensbidrag samt i form av en vetenskaplig artikel. Till denna slutrapport är bilagt konferensbidraget som redovisades vid Inter-noise 2021. Projektets vetenskapliga artikel kan av upphovsrättsliga skäl ännu inte biläggas, men när den har publicerats kommer den att läggas till slutrapporten.

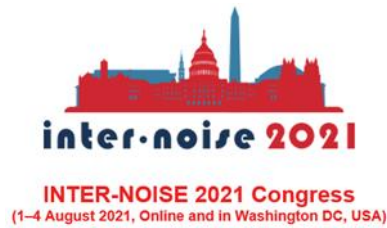
### 6.1 Bilaga 1 – Konferensbidrag Inter-noise 2021

Se nedan

Stockholm 2021-11-16

Bengt Moberg, projektledare

Vernamack AB



## Operational noise optimization of aircraft approaches

Bengt Moberg<sup>1</sup>  
Vernamack AB  
Box 357, 101 27 Stockholm, Sweden

Anders Johansson<sup>2</sup>  
KTH Royal Institute of Technology  
100 44 Stockholm, Sweden

Johan Rignér<sup>3</sup>  
Natmer AB  
Vasseurs väg 16, 182 39 Danderyd, Sweden

Per Näsman<sup>4</sup>  
KTH Royal Institute of Technology  
100 44 Stockholm, Sweden

### ABSTRACT

**The characteristics of an aircraft as a noise source changes as the pilots slow the aircraft down and extend flaps and landing gear in preparation for landing. In the OPNOP project, the possibility to use this variation in noise generation to minimize noise at a specified location is examined. Such analysis requires an increased understanding about aircraft noise generation as the aircraft changes configuration and speed during the approach, where theoretical models available can be overly simplistic and of little use for this purpose. Using flight data from 113 Airbus A321 flights, and corresponding noise measurements on the ground, this study reports on the findings forming the foundation on which further analysis will be conducted. Findings relate to: a comparison between models and actual measurements, the distance variability to the runway for various flap selections and extension of the landing gear as well as a comparison between flight data and on-ground noise measurements. Captured data suggest that it should be possible to use speed and configuration recommendations to reduce noise over selected approach areas. Future research will include scenario generation and incorporate flight data from an earlier study to increase validity.**

---

<sup>1</sup> [bengt.moberg@vernamack.se](mailto:bengt.moberg@vernamack.se)

<sup>2</sup> [aebjo@kth.se](mailto:aebjo@kth.se)

<sup>3</sup> [johan.rigner@natmer.se](mailto:johan.rigner@natmer.se)

<sup>4</sup> [per.nasman@abe.kth.se](mailto:per.nasman@abe.kth.se)

## 1 INTRODUCTION

Noise from aircraft taking off or landing at an airport is often a nuisance for nearby residents. This disturbance can either be a source of minor irritation, or it can give rise to diagnosable diseases [1] [2]. These illnesses can in turn lead to costs both for the individual as well as for the society. Consequently, it is desired to minimize both the noise as such, as well as try to reduce the number of people affected by the noise. Ideally, aircraft noise should be directed to an area where there is a higher acceptance of noise, or where the overall health impact is minimized. For example, to an already noisy industrial area or over a noisy city center instead of in a quieter recreation area where few people stay but where the peace and quiet has a greater value, or overhead residential areas where sleep disturbance may have a large health impact [3].

However, the way aircraft fly in and out of airports is normally regulated by the International Civil Aviation Organization (ICAO) as implemented by various national, or international, regulatory bodies. During the approach, aircraft normally follow a Standard Arrival Route (STAR), possibly followed by intermediate radar vectors by the air traffic controller, to the final approach segment. Although the current regulatory environment does allow curved approaches, most of the final approaches are carried out in a straight line extending out from the landing runway. This means that the area where the noise is generated during an approach is largely fixed. However, the pilots have a certain amount of freedom to decide when to extend flaps/slats and the landing gear during the approach. Since the extension of slats, flaps and the landing gear creates air resistance, both aerodynamic noise as well as thrust requirements are affected, influencing the characteristics of the aircraft as a noise source [4] [5].

ICAO recommends noise abatement operational procedures as one measure in its guidance material to aircraft noise management and refers to the construction of operational procedures as one means to reduce noise [6]. The actual manual on construction on procedures [7] is however of a general nature and can be interpreted in a wide manner. Operational restrictions for arriving aircraft are not widely used as a tool for noise reduction. According to Boeing's airport database of 651 airports around the world as of 2011, 80% had implemented operational procedures for noise reduction, but only 20% had implemented such operational procedures for arriving traffic [8]. The situation was similar six years later [9]. The efficiency of the procedures can also be questioned, and actual noise reductions are more of an effect of improved aircraft technology rather than operational noise mitigation measures [10].

The overall purpose of the OPNOP project is to explore if, and to what extent, it is possible to minimize the amount of noise over identified noise sensitive areas under the final approach path using speed control and suggested aircraft configurations. Analyzing flight data and ground noise measurements, the aim of the research for this paper is to investigate how aircraft speed, the extension of flaps/slats and the landing gear during the latter part of the approach affects the noise from the aircraft type Airbus A321-251N, popularly known as A321 Neo, and to explore to what extent any correlations can be used for further analysis.

### 1.1 Aircraft approaches

Following the cruise phase, a descent from the cruise altitude followed by an approach must be performed in order to land at the destination airport. The ideal approach, minimizing fuel consumption, is a continuous descent from the top of descent at optimum speed, with engines at idle all the way until the extensions of slats, flaps and landing gear as late as possible

during the final approach. When the final approach speed is reached some thrust from the engines to maintain the desired landing speed is usually required. That fuel optimal descent and approach is only possible to perform when the exact still air distance to be flown during the descent and approach is known in advance. When altitude constraints, or other limitations are implemented, the optimal descent profile cannot be maintained. That is often the case at large airports with a lot of departing and arriving traffic, requiring air traffic control (ATC) to sequence traffic using radar vectors, speed control and segments of level flight.

The most common final approach at major airports is conducted using the instrument landing system (ILS), where the aircraft is guided horizontally by the localizer signals (LOC) and vertically by the glide slope signals (GS).

## **1.2 Regulatory limitations**

A pilot performing an approach into a runway must adhere to several regulatory restrictions. The approach path to fly is designed according to a regulatory framework based on ICAO annexes as implemented in the country of operations. The pilot must also operate according to the individual airlines SOP, which is based both on requirements in the ICAO annexes, the aircraft specific Flight Crew Operations Manual (FCOM) from the airframe manufacturer, adopted by the airline, and the legislation in the country of where the aircraft operator is registered. Normally the aircraft should not be operated faster than 250 knots of indicated airspeed below an altitude of 10 000 feet (ft) and the aircraft shall be established in landing configuration at the correct speed, rate of descent and along the intended flightpath at a height of 1 000 ft above the landing runway threshold, the latter height to be reduced to 500 ft if the pilot have the landing runway in sight at 1 000 ft. [11] [12].

## **1.3 The individual pilot's impact on the approach**

To reach the desired landing speed (depending on aircraft weight, landing configuration etc.) the pilots need to slow the aircraft down by (a combination of) less thrust, level flight segments and increased drag generation. Following the ILS glide slope, drag is created by extension of the leading-edge flaps or slats, trailing edge flaps and ultimately the landing gear. Speedbrakes can also be used. How an approach is flown is partly dependent on the individual pilot's preferences, but ATC speed restrictions and current weather will influence when different slats/flaps/gear/engine thrust configurations are selected. Even during similar pre-existing conditions, such as weather and aircraft mass, the resulting environmental noise will differ between various approaches, even when conducted by the same pilot.

It has been noted in earlier research that each pilot builds a mental plan of the approach he/she is going to fly, and that personal preferences might affect how the aircraft is flown within the boundaries of the SOP [13]. This plan is continuously updated and adjusted during the execution of the approach.

# **2 METHOD**

## **2.1 On ground noise measurements**

To study the noise on the ground, a suitable runway at Stockholm Arlanda airport was identified. At the airport, landings are mainly performed on four runways (RWYs 01L, 01R, 19L and 26). Runway 26 was chosen over the other runways. The area beneath the selected ILS approach is not affected by road traffic noise and consist primarily of flat terrain without hills or dense forest areas, which could affect the actual measurements or lead to difficulties accessing the measuring equipment for service and maintenance.

Selection of measurement points was made after assessment by two pilots with flight operational expertise from the aircraft type to be studied and based on results from previous studies according to where extension of flaps and landing gear could be expected to take place. Three measuring points were chosen, 13 400 meters (m), 11 800 m and 9 300 m respectively from the landing runway threshold point. Microphone height above ground was 1.2 m.

Measuring equipment, consisting of an omni-directional electret-condenser microphone with built in sound card, wind cover, Raspberry Pi computer, solar panel, battery and GSM module for communication. The measurement equipment was placed at the selected points, which for practical reasons were partly offset to the runway extended centerline. Noise from overflying aircraft was recorded with a sample rate of 48 kHz and 24 bit-depth. The recorded noise was saved as one-third octave band time-histories covering the range 25 Hertz (Hz) - 20 kHz and with 125 milliseconds (time-average "fast") time step for calculation of sound pressure levels. For analysis, A-weighted sound pressure levels were calculated for each measuring point based on the frequency range 50 Hz to 8 kHz and with an applied running average converting the time-histories to time-average "slow".

## **2.2 Flight Data**

From overflying A321 Neos, aircraft data was collected from one of the aircraft's flight data recorders (FDR-data). 198 flights were documented, all of which landed on the selected runway. Data were retrieved for 82 parameters. The collected parameters included: position for slat, position for flap, position for landing gear, engine rpm.  $N_1$  resp.  $N_2$  for the engines, current fuel consumption, etc.

To be able to use the collected parameters for research purposes, a confidentiality agreement was signed between the airline and the researchers involved in the study.

## **2.3 Statistical processing**

Collected noise and aircraft data were processed in a database that included simultaneous data from both noise measurements and aircraft data joined in a single data file. In total simultaneous data was available for 113 flights.

Pearson correlation coefficient was used in order to test interdependence between variables. In addition to that, descriptive statistics was used to present the data. All analyses were carried out on the IBM's SPSS Statistics System (SPSS), and the 5% level of significance was considered. In the case of a statistically significant result, the probability value (p-value) is given.

## **2.4 Flight operational aspects**

To evaluate the possibilities to extend slats, flaps and gear during different parts of an approach, the FCOM (or equivalent document) was reviewed for the aircraft types in question. Also, the Aircraft Noise and Performance (ANP) database from Eurocontrol was reviewed for the same reason.

## **2.5 Theoretical noise calculation**

In order to have a baseline to compare the noise measurements with, two theoretical noise calculations were performed. One calculation was performed using the ECAC doc 29 model and the ANP-database as a reference. The other calculation was performed using the Airbus's Performance Engineer's Program (PEP).

### 3 RESULTS

#### 3.1 Analytical noise calculations

In the ANP-database, the description of how flaps and landing gear are extended is limited and not in accordance with the FCOM [14] for the A321 Neo. The ANP describes the aircraft to be flown with idle thrust and in clean configuration, i.e. with flaps fully retracted and the landing gear up until a height of 2 003 ft. Below 2 003 ft the aircraft is described to be flown with flaps fully extended, landing gear down and a specific amount of thrust until landing. If approach noise calculations are performed in accordance with the ECAC Doc 29 using the ANP-database, an  $L_{Amax}$  increase of 1.4 db(A) directly beneath the aircraft will be the result when the landing gear and landing flaps are extended.

When approach noise calculations were performed using the PEP the difference in  $L_{Amax}$  is an increase of 1.2 db(A) directly beneath the aircraft when only the landing gear is extended at 2 003 ft.

From the PEP calculations an increase in engine rpm ( $N_1$ ) from 36% to 45% was calculated when the landing gear was selected down. When landing flaps were selected the  $N_1$  increased by 1 percentage point resulting in a change in  $L_{Amax}$  of less than 0.1 db(A).

#### 3.2 Flight operational results

All flights examined were operated within the limits described in the aircraft FCOM. For the flights examined, initial flap setting, which is the extension of leading-edge slats only, (F1) were extended the earliest 68 kilometers (km) before landing runway threshold and the latest 15 km before the landing runway threshold. The average point of extension was 27 km before the landing runway threshold (see Figure 1). The intermediate flap setting (F2) was chosen the earliest 40 km before the landing runway threshold and the latest 6.1 km before the landing runway threshold. The average point of extension was 15 km before the landing runway threshold.

The landing gear (LG) was extended the earliest 21 km before the landing runway threshold and the latest 7.4 km before the landing runway threshold. The average point of extension was 10 km before the landing runway threshold at an average height of 560 m, which is equivalent to 1 840 ft on a 3.0° glide slope.

The final flap setting for landing (F3) was extended the earliest 14 km before the landing runway threshold and the latest 4.5 km before the landing runway threshold. The average extension was 7.8 km before the landing runway threshold and at an average height of 420 m, which is equivalent to 1 390 ft.

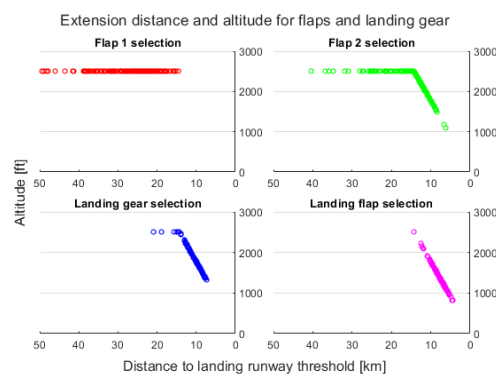


Figure 1. Remaining distance to the landing runway threshold when any flap selection was performed or when the landing gear was selected down for landing.

### 3.3 Noise measurements

Since there were no microphones at distances greater than 13 km before the landing runway threshold, no measurements were recorded for the aircraft flying in clean configuration or for the extension phase from clean aircraft to the F1 configuration.

The results from the noise measurement on ground are summarized in Figures 2 - 4, where the maximum noise levels experienced at each measurement point is shown for each flight where a valid measurement could be achieved, and FDR-data was collected. Based on FDR-data, it is also shown in what configuration the aircraft was flown at the time of the measurement.

Maximum noise levels recorded on the ground increased when the IAS of the aircraft increased. However, this was only the case when the aircraft were flying either with the initial or intermediate flap settings, F1 or F2. When the landing gear was in the down and locked position there is a significant correlation between increased maximum noise on ground with reduced airspeed. (See Figure 4 and Table 1).

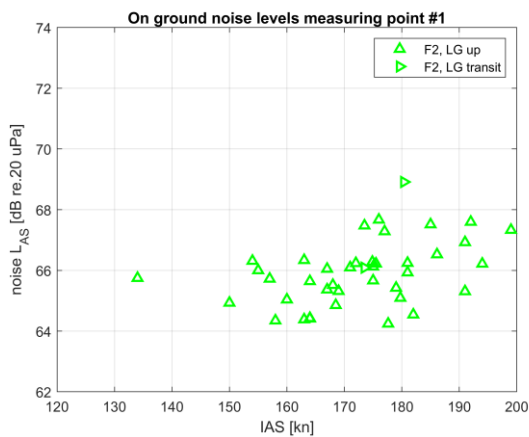


Figure 2. On ground noise levels at measuring point #1.

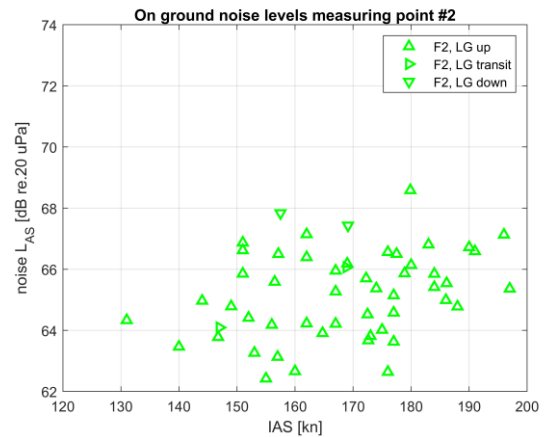


Figure 3. On ground noise levels at measuring point #2.

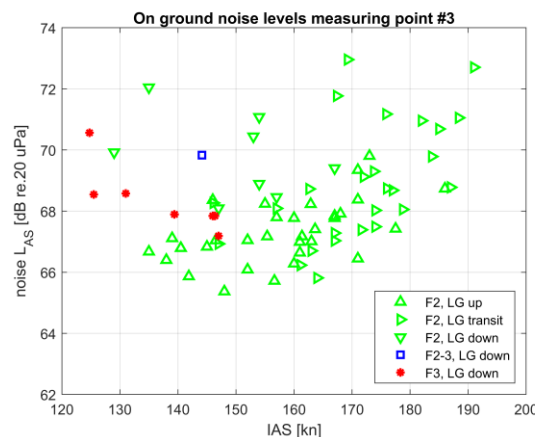


Figure 4. On ground noise levels at measuring point #3.



Table 1. Correlation between IAS and noise measured on ground for flights with flaps and landing gear in landing configuration at measuring point #3.

		dB(A)
<b>IAS</b>	Pearson Correlation	-.815*
	Sig. (2-tailed)	.026
	N	7

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Since the aircraft was passing over the noise measuring stations at different altitudes, and since the measuring stations are not located exactly beneath the flight path, a difference in measured noise levels for two identical sources can be expected. The theoretical difference in dB(A), in the analyzed frequency interval of 50 – 1 000 Hz, was calculated to be 0.16 dB due to the difference in distance and 0.19 dB due to the combined effect of both distance and atmospheric attenuation between station 1 and 2. The same results between stations 1 and 3 are 2.3 dB and 2.6 dB, and between stations 2 and 3, 2.1 dB and 2.5 dB respectively. Differences in average noise levels are listed in Table 2 below.

Table 2. Average noise levels in different configurations at the three measurement stations.

	<b>F2 Gear up</b>	<b>F2 Gear in transit</b>	<b>F2 Gear down</b>	<b>F3 Gear down</b>
<b>Measuring point #1</b>	65.9	67.5	N/A	N/A
<b>Measuring point #2</b>	65.1	65.1	67.6	N/A
<b>Measuring point #3</b>	67.3	68.9	69.8	68.4

#### 4 DISCUSSION

Increased noise levels when speed increases is expected [4] [15]. This can be related to increased noise from the engines, increased aerodynamic noise or a combination of both. Increased noise correlated with a reduced speed, as were the case for the recorded flights in landing configuration was however not anticipated. There can be several reasons for this increase. It can be either mechanical or aerodynamic noise related to the extension process as such. It can also be aerodynamic noise from the landing gear itself, even though unlikely as noise then should be decreased when the speed is reduced. Or it can be noise from the engines when higher thrust is required due to the extra drag from the landing gear itself, or the extension process where the opening of landing gear doors cause even extra drag. In the cases where the speed is low and the increased noise levels are due to increased noise from the engines, there can be at least two plausible explanations for this. A heavy aircraft already at low speed will require more thrust due to the increased drag caused by the landing gear. Another possible explanation can be that a very light aircraft will be slowed down too much by the drag of the landing gear and flaps since a light aircraft contains a relatively low amount of kinetic energy. That lack of kinetic energy must then be compensated by the use of engine thrust.

In this stage of the OPNOP-project the focus is not to identify exactly what the source of the noise is, even if that also is of importance. It is rather to identify where during an approach noise events take place that can be attributed to a specific operational procedure or event.

As an increased noise level when the gear is down is in accordance with the description in the ANP-database and from the engineering software for the aircraft type studied the results are expected. The negative correlation to aircraft speed is however interesting to investigate further.

Furthermore, the area where the landing gear is selected down stretches over 14 kilometers along the approach path. Hence, the distribution of changes in the noise pattern can therefore be expected over that full flight segment. Consequently, noise reductions could potentially be directed and controlled over that segment if operational recommendations or limitations were implemented. The possibilities for such noise reductions measures will be explored during the next phase of the OPNOP-project.

## 5 CONCLUSIONS

The noise difference between aircraft in landing configuration and aircraft in clean configuration is larger than can be expected from analytical calculations.

Initial and intermediate flaps are extended over large distances along the flight path.

Landing gear and landing flaps are extended over a distance of 14 km and can cause increased noise levels along all that distance.

It is likely that there are possibilities to reduce noise over affected areas by implementing recommendations or limitations regarding either aircraft speed or when the landing gear and landing flaps should be selected.

### 5.1 Further research within project OPNOP

- Further analysis on individual cases when noise is increased when the aircraft is in landing configuration will be performed. Focus will be on speed control and dependencies on aircraft weight.
- Different operational scenarios will be evaluated depending on the location of noise sensitive areas relative to the landing runway threshold.
- Data from earlier research containing data from more than 1 300 flights will be incorporated in the material to investigate how the aircraft are operated around the time of the landing gear down selection.

## 6 ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the Centre for Sustainable Aviation (CSA) at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

## 7 REFERENCES

- 1 A. Seidler, M. Wagner and M. D. P. Schubert, Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease - A case-control study based on secondary data, *International Journal of Hygiene and Environmental Health* **219**, pp. 749-758, (2016).
- 2 M. Basner, M. Brink, A. Bristow, Y. de Kluizenaar, L. Finegold, J. Hong, R. Klæboe, P. Sörqvist, T. Leroux, A. Liebl, T. Matsui, D. Schwela, M. Sliwinska-Kowalska and S. A. Janssen, ICEBN review of research on the biological effects of noise 2011-2014, *Noise & Health Mar-Apr* **17(75)**, pp. 57-82, (2015).

- 3 World Health Organization, *Environmental noise guidelines for the European region*, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, (2018).
- 4 S. Guerin, U. Michel, H. Siller, U. Finke and G. Saueressig, *Airbus A319 database from dedicated flyover measurements to investigate noise abatement procedures*, Monterey, California, (2005).
- 5 M. Snellen, R. Merino-Martínez and D. G. Simons, Assessment of noise variability of landing aircraft using phased microphone array, *Journal of Aircraft*, **54(6)**, November - December (2017).
- 6 ICAO, *DOC 9829 Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management Ed 2*, Montreal, Canada, ICAO, (2008).
- 7 ICAO, *ICAO Doc 8168, Vol II Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, 7th ed.*, Montreal, Canada ICAO, (2020).
- 8 Boeing, *Airport Noise and Emissions Regulations*, (2011). [Online]. Available: <http://www.boeing.com/commercial/noise/list.page>.
- 9 A. Rodríguez-Díaz, B. Adenso-Díaz and P. González-Torre, A review of the impact of noise restrictions at airports, *Transportation Research Part D*, **50**, pp. 144-153, (2017).
- 10 G. Alonso, A. Benito and L. Boto, The efficiency of noise mitigation measures at European airports, in *WCTR 2016*, Shanghai, (2016).
- 11 EASA, *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Authority, Organisation and Operations Requirements for Aerodromes*, European Aviation Safety Agency, Köln, (2020).
- 12 European Union, *Official Journal of the European Union*, 25 10 2012. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02012R0965-20201231>. [Accessed 31 12 2020].
- 13 B. Moberg, J. Rignér, P. Näsman and P. Ulfvengren, Approximation of pilot operational behavior affecting noise footprint in steep approaches, *Noise Control Engineering Journal*, **68(2)**, 179-198, (2019).
- 14 Airbus Industrie, *Flight Crew Operating Manual A319/A320/A321*, Blagnac, France, Airbus Industrie, (2020).
- 15 Airbus Industries, *Getting to grips with aircraft noise*, Blagnac, France, Airbus, (2003).