UPPSALA UNIVERSITET

UPTEC ES 25031
Examensarbete 30 hp
September 2025

Förutsättningar för framtida implementering av elektriska flygplan på Skellefteå flygplats

En simuleringsstudie och lastprofilering av nya regionala flygnätverk

Jonatan Hallström

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

UPPSALA UNIVERSITET

A simulation study based on future prerequisites for flight networks including electric aviation

Jonatan Hallström

Abstract

The flight-sector is currently seeing electrification trends that will have far-going impacts on the available charging infrastructure at airports, and as result, new regional flight patterns are expected to emerge while the power profiles corresponding to electric aviation will pose complex challenges in terms of guranteed power capacity. As of today, reasearch is carried out to shine light onto how charging infrastructure can be best implemented to support fleets of electric airplanes on Skellefteå airport. Therefore, it is highly relevant to gain fundamental understandings about the underlying dynamics of systems including electric aviation. To do this, the governing factors of those sytems must first be identified, but since electric aviation is still in an early development phase, there are few real-life examples to inspire new reasearch. Simulation models can therefore be useful to gain unforeseen insights but must be constructed with a high level of validity. In this project, a simulation tool was built using MATLAB and two main simulation studies have been carried out. Initially, a new flight-network was made at Skellefteå airport including all the potential flight destinations within the range of the electric airplane Alice from Eviation and the total load profile at the airport was simulated using a basic charging strategy. Subsequently, the four destinations considered to be most relevant were picked to constitute a more realistic case study and multiple charging strategies were applied while analyzing the resulting load profiles of the airplanes.

The results of the simulations indicate strongly that the total power demand of systems including electric aviation is particularly dependent on two major factors: the flight-schedule and the charging strategy applied. It has also become evident that there is a non-trivial correlation between these two and that future simulation studies should put big efforts in constructing systems where flights-schedules and charging strategies are compatible so that power peaks can be minimized. Either way, megawatt peaks are expected and the charging infrastructure at Skellefteå airport is adviced to be dimensioned accordingly.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Jennifer Leijon Ämnesgranskare: Jens Engström

Examinator: Carla Puglia

Populärvetenskaplig sammanfattning

Precis som bilindustrin håller flygsektorn i dagsläget på att elektrifieras och den främsta bakomliggande orsaken till detta är utfasningen av fossila bränslen. Sverige måste ta ansvar för sina koldioxidutsläpp och detta inkluderar även den andel som orsakas av vårt flygande inrikes och utrikes. Därför pågår nu i Sverige flera forskningsinitiativ för att undersöka närmare hur man på bästa möjliga sätt kan skapa förutsättningar för att elektrifiera flygsektorn och ett av dessa är forskningsprojektet YourFlight som är ett samarbete mellan Uppsala universitet och Skellefteå flygplats. Projektet syftar till att undersöka hur elektriska flygplan kan och bör implementeras på Skellefteå flypglats och detta innebär många systemtekniska utmaningar då den tekniska utvecklingen för elektriska flygplan ännu är i ett tidigt skede.

Antalet varianter av elektriska flygplan på marknaden är dock begränsade och den stora utmaningen för flygplatser, Skellefteå flygplats inkluderat, är också att säkerställa att man på flygplatsen kan tillgodose flygplanen med tillräckligt med elektricitet, men detta är lättare sagt än gjort. Inte bara är det tillräckligt att placera rätt laddningsinfrastruktur på marken, forskning verkar tyda på att den momentana elektriciten som behöver tillföras i system som inkluderar elektriska flygplan är så stor att det kan påverka eltillförseln i samhället i övrigt. Därför behöver lösningarna som placeras på flygplatserna vara smart utformade så att de negativa konsekvenserna av den ökade elkonsumtionen minimeras. Detta innebär att de tre mest aktuella lösningarna på bordet, direkt anslutning till elnätet, lokal elgenerering på flyplatsen, samt batterilager troligtvis kommer att behöva samspela för tillgodose elektriska flygplansflottor med el. Eftersom dessa tre system kommer behöva dimensioneras efter en maximal elkapacitet som blir allt dyrare ju större den är är samtidigt strävan att begränsa kostnaden genom att konstruera lösningarna med rätt storlek. Därför behöver man på förhand veta ungefär hur mycket elektricitet som kommer att konsumeras. Men då det i dagsläget finns få verkliga exempel att utgå ifrån kan modeller som kan simulera sådana system visa sig vara mycket användbara verktyg, särskilt för en flygplats som den i Skellefteå som har som uttalat mål att utöka och främja elektrifieringen av flygsektorn.

I den här studien har därför ett simuleringsverktyg skapats för att bistå YourFlight och med detta verktyg som konstruerades i MATLAB har två huvudsakliga simuleringsstudier genomförts. Först skapades ett regionalt flygnätverk med utgånsgpunkt på Skellefteå flygplats för att synliggöra nya potentiella resedestinationer och hur elbehovet faktiskt kan se ut. En fallstudie skapades därefter för att mer ingående analysera hur olika lastprofiler påverkas av att variera laddningstrategier. Resultaten som har producerats i den här studien indikerar starkt att det totala effektbehovet som uppstår i system bestående av elektriska flygplan är särskilt beroende av två faktorer: flygschemat och den momentana effekten som tillämpas vid laddning. Det har även klarnat att det finns en stark korrelation mellan dessa två faktorer och att detta faktum inte bör betraktas som trivialt i framtida simuleringsstudier.

Resultaten från simuleringarna som gjordes visar också på att det i dagsläget finns mycket goda förutsättningar för Skellefteå flygplats att fortsätta vara värdsledande när det kommer till användningen av elektriska flygplan och att det finns fyra resedestinationer till befintliga flygplatser som kan vara av särskilt intresse för att gynna utökat regionalt flygande. Dessa är de två finska flygplatserna i Tammerfors-Birkala och Uleåborg samt i Sverige Umeå flygplats och Sundsvall-Timrå flygplats. Studien indikerar även att effekttopparna som kan uppstå på Skellefteå flygplats om endast fyra elektriska flygplan ska laddas inom ett kort tidsfönster på några timmar kan uppgå till cirka 3.7 MW vilket nästan är 15 gånger högre än flygplatsens basförbrukning. Detta ger en bra bild över ungefär hur mycket el som elektriska flygplan behöver för att laddas effektivt och sammantaget har resultaten bidragit till viktiga insikter.

Exekutiv sammanfattning

Flygsektorn håller på att elektrifieras och därmed förändras regionala resemönster och flygplatsers totala effektbehov. För att säkerställa att elektriska flygplan kan inkluderas på Skellefteå flygplats bedrivs forskning som syftar till att undersöka hur laddningsinfrastruktur kan implementeras för att bistå en framtida elektrisk flygplansflotta. Det är därför relevant att undersöka dynamiken bakom system som innefattar elektriska flygplan och i detta projekt har två huvudsakliga simuleringsstudier genomförts. Först skapades ett regionalt flygnätverk med utgånsgpunkt på Skellefteå flygplats för att synliggöra nya potentiella resedestinationer och hur lastbehovet kan se ut. En fallstudie skapades därefter för att mer ingående analysera hur olika lastprofiler påverkas av att variera laddningstrategier. Resultaten som har producerats i den här studien indikerar starkt att det totala effektbehovet som uppstår i system bestående av elektriska flygplan är särskilt beroende av två faktorer: flygschemat och den momentana effekten som tillämpas vid laddning. Det har även klarnat att det finns en stark korrelation mellan dessa två faktorer och att detta faktum inte bör betraktas som trivialt i framtida simuleringsstudier. Flygschemat som används är avgörande för hur mycket laddningstid som finns tillgodo och därför bör ett sådant konstrueras för att vara kompatibelt med laddningsstrategin som ämnar tillämpas.

Förord

Detta examensarbete har genomförts inom ramen för forskningsprojektet “Flygplatsens möjligheter och utmaningar i utveckling för elflyg, elektrifiering och hållbarhet (YourFlight)” som finansieras av Trafikverket. Projektet har stundtals varit utmanande och jag skulle vilja rikta ett stort tack till några personer som har hjälpt mig. Tack Martin Lindberg för att du tog dig tid att bolla ideer om elflyg och tack Jens Engström för att du som min ämnesgranskare sett till att projektet hållit hög kvalitet. Jag vill rikta ett särskilt tack till min handledare Jennifer Leijon. Tack för all pepp och att du varit väldigt mån om att se till att jag har fått den hjälp som jag har behövt under projektets gång!

Bortsett från två strategiskt valda resttentor i augusti blir detta det sista jag gör efter 5,5 års heltidsstudier i Uppsala. Det här projektet markerar därmed inte bara slutet av min tid på civilingenjörsprogrammet i energisystem men också min tid som student. Jag är oerhört glad över att jag valde att spendera dessa år i Uppsala och jag kan inte tillräckligt uttrycka min tacksamhet till alla fina minnen och vänner som jag har funnit här. Jag hoppas att Uppsala fortsätter att vara en plats i världen som utmärker sig för utbildning och studentliv i världsklass och att man om 500 år fortfarande firar valborg genom att åka flotte nerför Fyrisån eller spenderar tisdagskvällarna på Snerkes. Tack för allt Uppsala!

26 juni 2025, Uppsala

Jonatan Hallström

Innehåll

1 Inledning **1**
1.1 Syfte och frågeställningar . . . 1
1.2 Avgränsningar . . . 2

2 Bakgrund **3**
2.1 YourFlight . . . 3
2.2 Utvecklingspotential av regionala flygplatser . . . 4
2.3 Elektriska flygplan . . . 4
2.4 Elektrifiering av Skellefteå flygplats . . . 5
2.5 Laddningstekniker . . . 5
2.6 Hållbarhetsaspekter & säkerhetsperspektiv . . . 6

3 Teori **8**
3.1 Flygsegment & laddning . . . 8
3.2 Uppskattning av antal avgångar . . . 10

4 Metod **11**
4.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1 . . . 11
4.1.1 Verktyg . . . 11
4.1.2 Indata . . . 11
4.2 Fallstudie . . . 13
4.2.1 Verktyg . . . 13
4.2.2 Indata: Simulering 1 & simulering 2 . . . 15
4.2.3 Indata: Simulering 3 . . . 15

5 Resultat **17**
5.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1 . . . 17
5.2 Fallstudie: Simulering 1 . . . 20
5.3 Fallstudie: Simulering 2 . . . 20
5.4 Fallstudie: Simulering 3 . . . 22

6 Diskussion **24**
6.1 Regionalt flygnätverk . . . 24
6.2 Fallstudie . . . 25
6.2.1 Fallstudie: Simulering 1 & 2 . . . 25
6.2.2 Fallstudie: Simulering 3 . . . 26
6.3 Framtida forskning . . . 26

7 Slutsatser **27**

Bilaga A Bilaga: Matlabkod för regionalt flygnätverk **31**
A.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1 . . . 31

Bilaga B Bilagor: Matlabkod för fallstudie **36**
B.1 Fallstudie: Simulering 1 . . . 36
B.2 Fallstudie: Simulering 2 & 3 . . . 39

1 Inledning

Idag råder globala samförstånd om att man inom transportsektorn, precis som inom andra koldioxidintensiva samhällssektorer, kraftigt måste reducera utsläppen av växthusgaser. Med svensk lagstiftning innebär detta att de totala koldioxidutsläppen år 2030 ska ha minskat med åtminstone 70% jämfört med år 2010 [1]. Detta är ett ambitiöst uppsatt mål som även inkluderar flygsektorn. Enligt Energimyndigheten kommer elektrifiering i detta avseende att vara avgörande och det finns i dagsläget goda förutsättningar för vidare expansion av markbundna elfordon [2]. Däremot så är premisserna för att elektrifiera flygsektorn annorlunda och begränsas ofta av omfattande forskningsgap och bristande förståelse om hur infrastruktur för att stötta eldrivna flygplan, i framtiden kan, och bör, implementeras på flygplatser för att bistå en elektrifierad flygplansflotta. I takt med att det globala flygandet förväntas bli större och att elflygplan blir allt mer teknologiskt avancerade, ökar incitamenten för att utveckla förutsättningarna för att flygsektorn vidare ska elektrifieras [3]. Detta har öppnat upp scenarier där några framtida möjligheter för att implementera elflyg på flygplatser presenteras som alternativ för att stötta nya färdrutter och därmed kan nya regionala flygnätverk komma att vara betydande för att minska flygsektorns totala klimatpåverkan [3].

Transportsektorn står för en stor del av de antropogena koldioxidutsläppen och tack vare höghöjds aspekter har flygsektorn särskilt stor påverkan på atmosfärens och därmed klimatets tillstånd [4]. Det är därför av yttersta vikt att flygsektorn fasar ut användandet av fossila bränslen. Tidigare forskning tyder på att det finns potential att kraftigt reducera koldioxidutsläppen relaterat till flygsektorn genom att implementera elektriska flygplan och att en minskning av de totala koldioxidutsläppen, i förhållande till konventionellt fosdildrivet flyg, varierar mellan 49-88% [5]. Utvecklingen är dock i ett tidigt skede och storskalig användning av elektriska flygplan begränsas i dagsläget av ett flertal tekniska utmaningar som batteriteknik, flygplansdesign och tillräcklig förståelse för flygmönster och tillhörande lastprofiler [6]. I en simuleringsstudie som har gjorts av elektriska flygplan konstaterar man även att det finns ett stort behov av tillförlitliga simuleringsstudier för att förstå hur sådana system fungerar i praktiken [7]. Arbetet som har utförts med denna rapport har därför utformats för att modellera lastprofiler och utmaningar kopplade till elektriska flygplan.

I takt med att effektbehovet på svenska flygplatser förväntas bli både större och mer dynamiskt, ökar behovet av tillförlitliga simuleringsmetoder som kan ligga till grund för hur lokal laddningsinfrastruktur och nätanslutningar ska dimensioneras. Inte bara är det av stor betydelse att lastprofileringen ligger i linje med den framtida elektrifiering som en flygplats ämnar uppnå, men även att den mängd eltillförsel som är tänkt faktiskt kan tillgodoses på ett hållbart och säkert sätt. Det är därför viktigt att även säkerställa att det ökade effektbehovet inte har negativa effekter på det omkringliggande samhället. Det går således att nyansera de största befintliga teknologiska utmaningarna i vägen för att gynna elektrifieringen av flygsektorn men det kan också vara avgörande att problematisera eventuella konsekvenser som kan uppstå längs vägen.

1.1 Syfte och frågeställningar

Det här examensarbetet syftar till att undersöka vilka förutsättningar som i dag finns för att i större omfattning implementera elektriska flygplan på svenska flygplatser och ska därmed fungera som underlag för och bistå forskningsprojektet YourFlight. Detta arbete är därför utformat för att underlätta att nödvändiga systemtekniska lösningar kan implementeras på Skellefteå flygplats och ska även belysa potentiella utmaningar som kan uppstå och relevanta förutsättningar för framtida utveckling. För att uppnå ovanstående mål ska följande frågeställningar

besvaras:

- Hur kan en modell skapas för att på ett tillförlitligt sätt generera simuleringar som kan representera Skellefteå flygplats framtida effektbehov i scenarier där elflyg implementeras?
- Vilka faktorer bör styra hur ett flygschema ska konstrueras och vilken inverkan har ett flygschema för dimensioneringen av system där elektriska flygplan inkluderas?
- Hur mycket kan det totala effektbehovet förväntas öka om Skellefteå flygplats väljer att vara delaktig i elektrifieringen av flygsektorn och hur kan momentana/ enskilda lastprofiler för elektriska flygplan därav se ut?

1.2 Avgränsningar

Arbetet som har utförts i samband med detta examensarbete kommer endast att inkludera information som på ett eller annat sätt har bedömts relevant för implementering av elektriska flygplan på Skellefteå flygplats. Projektet begränsar sig därför till att endast undersöka förutsättningar för ökad elektrifiering och andra energikällor, eller drivmedel, har exkluderats. Simuleringar som producerats baseras enbart med det elektriska flygplanet Alice från Eviation och resultaten inkluderas således bara destinationer inom radien för det flygplanet. Projektet har mynnat ut i flera möjliga lastprofiler kopplade till olika driftscenarier men undersöker inte närmare specifikt hur effekten kan tillgodoses. Alltså, möjliga lösningar som lokal elgenerering eller batterilager inkluderas inte i resultaten. Slutligen bör även nämnas att resultaten som har genererats är beroende antaganden med inneboende osäkerhetsaspekter.

2 Bakgrund

I detta kapitel presenteras relevant bakgrund som behövs för att belysa vilka problemställningar som detta examensarbete behöver förhålla sig till. Här kommer ett flertal aspekter som är viktiga att beakta för att elektrifiera flygsektorn att redogöras för och ställas i kontrast till potentiella utmaningar men också möjligheter. Här presenteras således forskningsprojektet som ligger till grund för det här examensarbetet, hur framtida elektrifiering av flygplatser kan se ut och deras betydelse för globala hållbarhets perspektiv.

2.1 YourFlight

Forskningsprojektet YourFlight syftar till att skapa den kunskap som är nödvändig, för att man, på Skellefteå flygplats, ska kunna ta de steg som behövs för på ett systemövergripande och tekniskt hållbart sätt ska ha förutsättningar för att i hög grad implementera elektriska flygplan [8]. Projektet är också utformat för att undersöka vilka elektriska markbundna fordon som kan behövas och därmed ökar komplexiteten. Projektet är ett samarbete mellan Skellefteå flygplats och Uppsala universitet och finansieras delvis av Trafikverket. Därmed finns ekonomiska incitament för att YourFlight ska utvecklas framgångsrikt, vilket även ligger i linje med politiska direktiv. Enligt allmänna mål inom flygbranschens färdplan ska koldioxidutsläppen relaterade till svenska inrikesflyg vara helt eliminerade till år 2030 medans alla svenska flyg till år 2045 ska vara fullständigt koldioxidneutrala [9]. Dessa är ambitiösa måluppsättningar som ställer stor efterfrågan på relevant forskning. Därför kan YourFlight anses vara en viktig grundsten för att främja den utveckling som behövs och förhoppningsvis kan det också resultera i kunskap som kan ligga till grund för ökad elektrifiering på andra flygplatser i Sverige.

Den grundläggande motiveringen för projektet är att en ökad flygplansflotta kommer medföra att flygplatsens lastprofil förändras och generellt sett blir betydligt större [10]. De förväntade effekttopparna kommer delvis att bli högre men lastprofilen förväntas följaktligen att även vara mer variabel. Detta gör att infrastruktur måste utformas för att tillgodose flygplatsens elbehov med tillförlitliga och säkra metoder vilket skapar komplexa systemtekniska utmaningar och stora forskningsbehov.

YourFlight är utformat för att undersöka hur elförsörjningen på flygplatser kan se ut och därmed presenteras tre huvudsakliga strategier. Elbehovet kan täckas av det lokala elnätet, strategiskt placerade batterilager eller lokal elgenerering och det underliggande syftet blir därför att utforska möjligheterna för hur dessa lösningar kan dimensioneras och implementeras. Således vägleds projektet av följande frågeställningar [8]:

- Hur kan flygplatsen tillgodose behovet av el för allt fler elflyg och elfordon, med batterilager och/eller utbyggnad av elnät lokalt och vilka är dess för- och nackdelar och innovationsmöjligheter?
- Vilka innovationer av batteridrivna elflyg, eVTOL och laddningsinfrastruktur kan bidra till ett hållbart, resilient och elektrifierat resande de kommande åren?
- Vilken inverkan har särskilda nationella förutsättningar på laddningsstrategier för elflyg vid flygplatser och vilka nya strategier kan utvecklas för att bemöta nationella förutsättningar och behov?

Frågeställningarna för det här examensarbetet (se: 1.1 Syfte och frågeställningar) ämnar i enlighet med de officiella formuleringarna för projektet ovan att konkretisera hur några lösningar kan se ut.

2.2 Utvecklingspotential av regionala flygplatser

Regionala flygrutter som utgår från mindre flygplatser upplever inte sällan ett flertal utmaningar som ofta är relaterade till låga passagerarantal och problem med att bibehålla hög konkurrenskraft [11]. En konsekvens av detta kan ibland vara att det blir svårt för enskilda flygbolag att hålla nere driftkostnader och detta kan medföra att hämmande effekter uppstår på lång sikt och att mindre flygplatser hamnar under sina maximala kapaciteter. Det har också observerats att ojämn användning av tillgänglig infrastruktur inom flygsektorn skapar onödiga belastningar på transportsektorn [11]. Dessa effekter bör undvikas.

Regionala flygplatser behöver kraftigt reducera sina koldioxidutsläpp och i takt med att behovet av en mer decentraliserad flygsektor verkar öka öppnas möjligheter upp för alternativa resvägar och tidigare icke förutsedda färdrutter. Denna utveckling möjliggörs delvis av att alternativen till konventionella flygtekniker (som drivs uteslutande av fossila bränslen) ökar stadigt i takt med att relevant forskning bedrivs. Forskning påvisar också att elektriska flygplan som baseras på tekniker för litium jon batterier verkar vara lovande för att över ett mer kortsiktigt perspektiv fasa ut konventionella flyg [12].

2.3 Elektriska flygplan

Forskning tyder på att det går att observera trender som visar på att flygsektorn sakta men säkert är påväg att elektrifieras [13]. System som tidigare har varit hydrauliskt drivna ersätts allt oftare av elektriska system vilket skapar stora möjligheter där relevant forskning inom kraftelektronik och kunskap om hur man på bästa sätt kan implementera dessa elektriska system kommer att vara oumbärligt för att flygsektorn fortsätter att utvecklas. Enligt en studie av Mohammed et al. är de främsta fördelarna med fullständigt elektriskt drivna flygplan att de inte genererar utsläpp av växthusgaser (produktionsprocessen exkluderat såklart) och att de utgör en betydligt mindre störningsfaktor i samhället på grund av att de är avsevärt tystare [14]. Tystare flygtrafik möjliggör även att mindre flygplatser närmare städer kan användas. Elektriska flygplan kan därför anses vara en viktig beståndsdel till färre störningar i samhället och således utgöra alternativ som inte har lika negativa effekter på sociala och ekologiska aspekter. I dessa avseenden blir det därmed tydligt att flygsektorn behöver moderniseras och drastiskt minska den destruktiva påverkan på omvärlden för att inte hämma hållbar utveckling.

Även om utbudet av elektriska flygplan i dagsläget är relativt begränsat finns det företag som specialiserar sig på att driva utvecklingen framåt och producerar flygplan som är anpassade för regionalt flygande. Ett av dessa företag är Eviation som själva har formulerat att sitt huvudsakliga uppdrag är att med hjälp av avancerad teknologi bygga elektriska flygplan som är både iögonfallande och anpassade för att bära passagerare [15]. Eviation är en av de största aktörerna på marknaden för elflyg och underlättar således att en allt större del av transportsektorn kan elektrifieras. Eviation har utvecklat ett fullständigt elektriskt drivet flygplan som heter Alice som kan transportera passagerare och laster [16]. Flygplanet är 20.5 m långt och har ett vingspann på 20.1 m. Alice väger strax över 8 ton och kan transportera laster eller passagerare på upp till 1134 kg och drivs framåt av två motorer lokaliserade på flygplanets bakvingar. Varje motor har en maximal effekt på 700 kW. Eviation påstår att Alice är designat för att snabbt kunna avlastas och tömmas på marken vilket gör flygplanet till ett flexibelt alternativ för regionalt resande och transportering av gods.

Bland andra aktörer på marknaden för den elektriska flygsektorn återfinns även företag som Heart Aerospace som likt Eviation för närvarande har ett elektriskt flygplan, men under utveckling, ES-30 [17]. ES-30 är ett hybridflygplan och är på kortare sträckor helt koldioxidneutral. Modellen är dock ännu inte certifierad för flygning men väntas vara i ett mognare skede in-

om ett par år. Ytterligare alternativ till elektriska flygfordon är eVTOLs som på engelska står för electric vertical take-off and landing [18]. EVTOLs använder elektriska drivsystem för att likt helikoptrar hovra och lämpar sig därför för andra typer av användningsområden än enbart regionalt flygande.

2.4 Elektrifiering av Skellefteå flygplats

I dag finns enbart en inrikes flygrutt på Skellefteå flygplats och det är till Stockholm-Arlanda flygplats. Skellefteå flygplats fungerar idag som en samlingspunkt för utveckling av den elektrifierade flygsektorn. På flygplatsen genomförs tester och implementering av elflyg samt nödvändig infrastruktur för laddning och flygplatsen har rankats som topp tre i världen när det kommer till relevant utveckling för elflyg [19]. Elektriska flygplan finns på plats men ännu inte för kommersiellt flyg. Skellefteå flygplats erbjuder särskilt goda förutsättningar för att testa elflyg under vinterförhållanden och spelar därmed en viktig roll för elektrifiering av flygsektorn både i Sverige och på många andra ställen. På plats finns laddningskapacitet på upp till 1 MW specifikt anpassad för elektriska flygplan och eVTOLS samt batterilager.

Utvecklingen på Skellefteå flygplats drivs delvis fram av Arctic Aviation Hub och organisationen fungerar som en stöttepelare för att nödvändig infrastruktur ska implementeras. De har även initierat ett pilotprogram för elflyg under namnet Green Flight Academy vilket kan förväntas attrahera arbetskraft och vidare utveckla sektorn.

2.5 Laddningstekniker

Enligt forskning som har genomförts på Uppsala universitet och som baseras på grundlig analys av i dagsläget tillgänglig litteratur, kommer ökad användning av elektriska flygplan att fundamentalt förändra hur flygplatser konsumerar elektricitet [20]. Flygplatser kommer att behöva tillgodose en total lastprofil som i hög grad är variabel och har betydligt större effekttoppar i jämförelse med baskonsumtionen. Därför kommer det vara avgörande att på marken implementera nödvändig infrastruktur. Val av lämpliga laddningstekniker är således mycket viktigt i detta avseende. Och i takt med att elektriska flygplan fortsätter att utvecklas kommer laddningstekniker att behövas som är på megawatt nivå och detta styrks bland annat av en tidigare studie som indikerar att ett flygplan med en batterikapacitet på omkring 800 kWh kan resultera i effekttoppar på ca. 2 MW [21].

Tillgängliga laddningstekniker för elektriska fordon verkar i dagsläget kunna se ut på en rad olika sätt och precis som den tekniska utvecklingen av elektriska flygplan är det mest optimala alternativet för laddningstekniker till elflyg ännu inte fullt utarbetat. Enligt Kilicouglu et al. går det baserat på litteraturanalys utröna att det finns laddningstekniker som brett kan uppdelas i tre huvudkategorier: konduktiv laddning, där en fysisk koppling sker mellan laddare och fordonet är en sådan (även benämt *plug-in* på engelska), portabla batterier, samt trådlös laddning som baseras på induktion [22]. En viktig aspekt att beakta vid konduktiv laddning är att laddaren måste kunna föras till flygplanet för att vingspetsarna ska hållas på säkert avstånd från laddningsstationen och det ställer krav på att anslutningen kan ske flexibelt och att laddaren är mobil [21]. Det finns även möjlighet att plug-in laddning kan göras med särskilda laddportar/ laddstationer som har designats för att ta emot flygplanen.

Idag finns förutsättningar för att laddning av elektriska fordon kan ske med induktiva laddningsmetoder där energi överförs trådlöst. Det finns flera tillvägagångssätt för induktiv laddning vilka grovt kan indelas på om den enskilda tekniken baseras på induktiva, kapacitiva eller resonanta egenskaper [22]. Genom att undvika direkt kontakt med fordonet minskar risken kopplat till mekanisk kollision på flygplatsen, säkerheten har potential att öka och laddningsprocessen

kan därmed resultera i att tillgänglig marktid utnyttjas bättre [21]. Dock verkar induktiv laddning, i dagsläget, medföra problem och utmaningar som ofta kopplas till höga kostnader och stora energiförluster under laddningstillfället. Därför är det viktigt för flygplatser att se över huruvida induktiva laddningsmetoder är aktuella när det kommer till att upprätthålla effektivitetsaspekter. Induktiv laddning kan också resultera i elektromagnetiska störningar och kan på så sätt minska säkerheten på en flygplats [21].

Elektriska flygplan kan också laddas med metoder för portabla batterier. I praktiken skulle batteriet på ett flygplan ersättas med ett fulladdat och metoden har stor potential att minimera den totala laddningstiden som kopplas till elflyg. Batterier kan exempelvis laddas på natten med låg effekt och således reducera effekttoppar i elnätet så att ett laddningssystem kan dimensioneras för lägre toppeffekt. Däremot ställs stora krav på kompatibilitet mellan batterier och flygplan och tekniken förutsätter att batterierna på flygplanet är utbytbara [21]. Ska tekniker för portabla batterisystem användas, är det därför absolut nödvändigt att implementering sker i samråd med tillverkaren för flygplanet.

Ett alternativ som idag finns för laddning av elektriska fordon, som kräver hög effekt, är Megawatt Charging System Standard laddare (MCS) och dessa lämpar sig för konduktiva laddningsmetoder. MCS laddare har en maximal kapacitet på 3.75 MW och har märkström på 3000 A samt en 1250 V märkspänning [23]. MCS laddare anses därför vara lämpliga för laddning av tyngre fordon som lastbilar bl.a. och är därmed en viktig teknik för att underlätta omfattande elektrifiering av transportsektorn.

2.6 Hållbarhetsaspekter & säkerhetsperspektiv

Som tidigare har nämnts ovan (i *2.5 Laddningstekniker*) finns rön som pekar på att elektriska flygplan anpassade för regionaltrafik har potential att generera effekttoppar på megawattnivå och därmed drastiskt förändra flygplatsens totala effektbehov i förhållande till den ursprungliga baskonsumtionen. Det kommer att ställa stora krav på flygplatsers förmåga, världen över, att tillhandahålla säker och förnybar elektricitet och enligt en övergripande hållbarhetsbedömning som har gjorts för elektriska flygplan finns störst förbättringspotential, i jämförelse med konventionellt flyg, kopplat till att reducera miljömässig och socioekonomisk påverkan [24]. Detta förutsätter dock att elektriciteten som används härstammar från förnybara energikällor. Det ska även betonas att hela produktionskedjan för elektriska flygplan måste upprätthålla hög standard i samma avseenden och övriga eventuella negativa effekter bör inte försummas, trots att bränslekedjan verkar vara nästintill klimatneutral. Därför blir livscykelanalys ett användbart verktyg för vidare analys.

Enligt forskning i [25] är elflygens livslängd något som bör tas i beaktande men batteriproduktionen pekas ut som den mest osäkra faktorn kopplat till produktionskedjan. Ofta är det olika typer av litium batterier som används och för att fastställa det totala klimatavtrycket krävs komplex dokumentation som innefattar hela livscykeln och denna kan i många fall vara obefintlig eller på något sätt bristfällig. Elflyget Alice från Eviation använder litiumjon batterier och resultat från litteraturanalys indikerar att de kopplade utsläppen varierar mellan 39–200 kg CO_2-ekv. per kWh batterikapacitet [25]. Ett batteri på 800 kWh skulle därmed i värsta fall kunna ha ett klimatavtryck på 160 ton CO_2-ekv. vilket av uppenbarliga skäl inte kan eller ska åsidosättas från ett hållbarhetsperspektiv. Det räcker därför inte att presentera elflyg som ett hållbart alternativ till konventionellt flyg baserat på osäkra grunder och således är det oerhört viktigt att producenter kan redogöra för den kompletta produktionskedjan. Om inte, finns risken att en omfattande elektrifiering av flygsektorn orsakar annars oförutsedda negativa effekter för både miljö och samhälle och detta kan visa sig vara mycket problematiskt.

Utvinning av litium är även problematisk sett ur ett råvaruperspektiv och medför inte sällan en rad utmaningar som inte är gynnsamma för vissa sociala och ekologiska aspekter [26]. Exempelvis uppstår ofta stort motstånd av lokala samhällen för litiumutvinning då det medför att vattenanvändningen ökar drastiskt och att skador uppstår på ekosystem samt närliggande natur, vilket kan påverka andra sektorer negativt som av samhället anses nödvändiga som turism och jordbruk. De ekologiska skador som ofta uppstår i samband med litiumutvinning riskerar alltså att spilla över på sociala aspekter och däribland inräknat lokalbefolkningens välfärd. Baksidorna med gruvdriften kan dock lättas med att nya och förbättrade metoder för litiumutvinning används och att batterier i högre grad återvinns.

Instabilitet i elnätet är en viktigt aspekt att ha i åtanke vid planering av elflyg. Effekttoppar på megawattnivå kan påverka elnätet negativt och för stora variationer riskerar att skada komponenter och hämma säker effektförsörjning [27]. Det är därför viktigt att det finns infrastruktur på plats som kan säkerställa att det omkringliggande elkraftsystemet inte påverkas negativt av för högt belastade lastnoder, som en flygplats med elflyg kan utgöra, och elnätet kan även behöva dimensioneras utefter de nya förutsättningarna. Detta kan medföra höga kostnader och att elförsörjningen för närliggande samhällen blir mer osäker. Flygsektorn behöver dock bli fossilfri och många utvecklingstrender förutser ökad elektrifiering.

3 Teori

3.1 Flygsegment & laddning

För att skapa tillförlitliga lastprofiler kopplade till elektriska flygplan behöver antaganden göras som beskriver hur fordonen dels förbrukar energi och hur de laddas och därmed kommer deras rörelsemönster i luften att behöva analyseras. En flygrutt kan delas upp i tre delar bestående av stigning, marsch och landningsfas och marschenergin kan beräknas enligt

$$e = \frac{E_{full} - \frac{h}{C_r} \cdot P_{max} - E_{res}}{R - \cos(\beta) \cdot V_{climb} \frac{h}{C_r} - \cos(\gamma) \cdot V_{max} t_{des}} \tag{1}$$

där e representerar energiförbrukningen per km flugen sträcka (i antal kWh/km) under marschfasen av en flygning (d.v.s. stigning och landningsfas exkluderat) [28]. Här ska nämnas att (1) inte är dynamisk utan förutsätter att marschhöjden h är konstant genom hela marschdelen av flygningen. Marschenergin beräknas således genom att uppskatta förhållandet mellan energiförbrukningen under flygsegmentet, samt flugen marschsträcka, där batterikapaciteten E_{full} för flygplanet Alice från Eviation är 820 kWh [29]. I Ekvation (1) är stigningshastigheten under stigningsfasen av en flygrutt betecknad med C_r medans P_{max} är flygmotorns maximala effekt. E_{res} är batteriets totala energireserv under flygningen. R representerar den maximala räckvidden på 460 km och med en stigningsvinkel β och en landningsvinkel γ, för en genomsnittlig flygrutt, kan avstånden (i xled) för stigningsfasen respektive landningsfasen beräknas. Detta förutsätter även att antaganden har gjorts om stigningshastigheten V_{climb}, landningshastigheten V_{max} samt tiden det tar att genomföra landningsfasen t_{des} och denna kan beräknas med vetskap om marschhöjden, landningshastigheten och landningsvinkeln.

Ekvation 1 kan därefter användas för att beräkna flygplanets *State of Charge* (SoC) enligt

$$SoC = \frac{E_{full} - \frac{h}{c_r} P_{max} - (Di - (D_C + D_L)) \cdot e}{E_{full}} \tag{2}$$

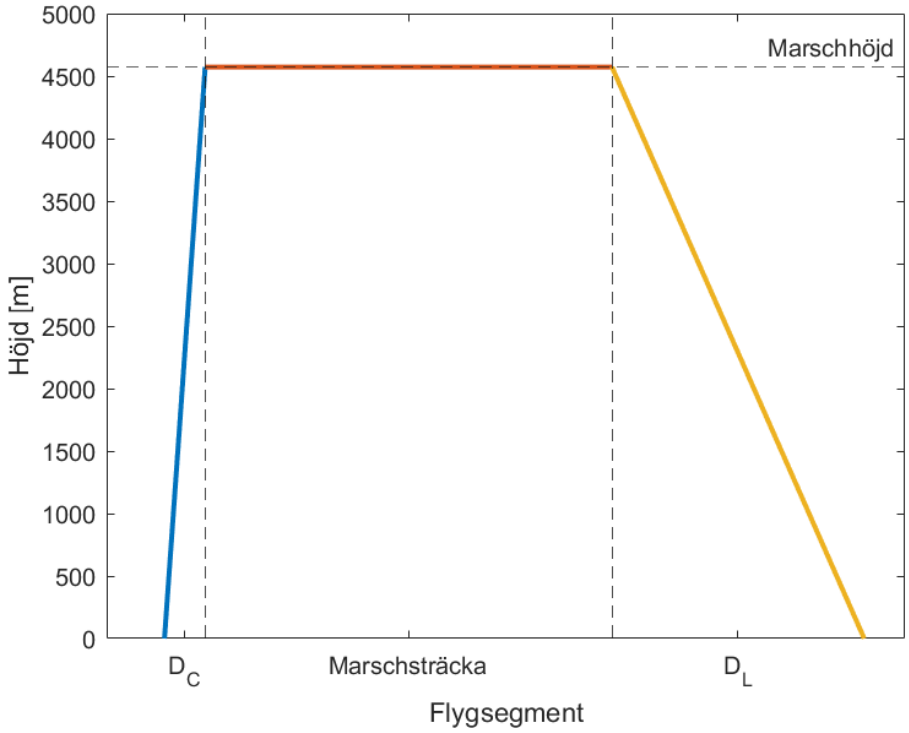
som representerar vilket laddningstillstånd batteriet befinner sig i efter en utförd flygrutt och följdaktligen utgör termerna i Ekvation (2) tillsammans ett uttryck för hur stor andel batteriets tillgängliga energi är i förhållande till batteriets totala kapacitet [30]. Här är D_i flygsträckan för en enskild flygrutt (vilket varierar beroende på destination) och sträckan för stigningsfasen kan beräknas enligt

$$D_C = \cos\beta \cdot V_{climb} \cdot \frac{h}{C_r} \tag{3}$$

medans sträckan för landningsfasen på liknande sätt kan beräknas med följande samband:

$$D_L = \cos\gamma \cdot V_{max} \cdot t_{des} \tag{4}$$

Flygruttens bestående komponenter visualiseras i Figur 2 nedan och visar därmed hur de tre flygsegmenten förhåller sig till varandra. Notera här att marschsträckan är beroende av D_i och således varierar för olika flygrutter.



Figur 1: En generisk flygrutt med marschhöjd på $h = 4572$ m samt med tillhörande stignings och landningssegment.

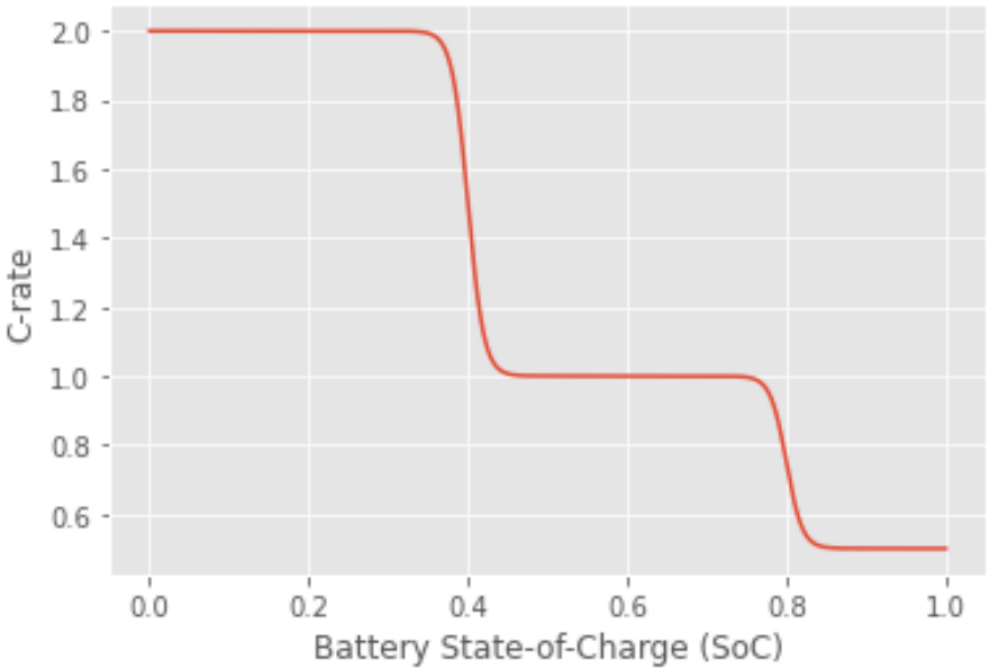
Nu kan batteriets laddningstillstånd och därmed dess SoC, för ett elektrisk flygplan med en specifik flygrutt, användas för att uppskatta en tillhörande lastprofil. Förutsatt att laddningseffekten som tillämpas för att återställa ett fullt batteri är statisk så kan denna uttryckas med

$$P_{charge} = \frac{(1 - SoC) \cdot E_{full}}{t_{still}} \tag{5}$$

där t_{still} är laddningstiden som finns tillgodo på flygplatsen. Ekvation (5) representerar den konstanta effekt som krävs för att fullada flygplanet Alice i ett hypotetiskt laddningsscenario med plug-in laddning.

Laddningsprofilen som bör tillämpas för ett elektriskt flygplan beror på en rad faktorer som precis som tekniken för elflyg är under pågående utvecklingsfas. Det finns därmed inte tillräcklig data i dagsläget för att säkert fastställa hur laddning av elflyg kommer att se ut i ett mognare skede, men i kontrast till Ekvation (5) kan laddningsprofilen potentiellt förväntas vara variabel. Det blir därför relevant att undersöka laddningsprofiler för andra elektriska fordon. I Figur 2 illustreras en vanligt förekommande laddningsstrategi som används för elektriska bilar där effekten som bör tillföras presenteras i form av C-faktorn med avseende på batteriets SoC. C-faktorn uttrycks vanligtvis som en multipel av antalet gånger batteriet för ett elfordon kan fulladda per timme, d.v.s med ett laddningstillstånd från 0-100% [31]. 1C innebär således att batteriet laddar fullt på en timme.

Om ett flygplan anländer med 20% laddning så är den initiala effekten som det ska laddas med motsvarigt till 2C (se Figur 2). För Alice som har en batterikapacitet på 820 kWh är 2C ekvivalent med en laddningseffekt på 1640 kW. I takt med att SoC ökar under laddningen minskar C-faktorn stegvis tills det att batteriet når 100% eller det att laddningstiden tar slut.



Figur 2: Vanligt förekommande C-faktor med avseende på SoC för elbilar. Hämtad från [32].

3.2 Uppskattning av antal avgångar

I ett framtida scenario där nätverk av elektriska flygplan har implementeras på en flygplats kommer det dels vara relevant att skapa en uppfattning om storleken på resandet men också om vilka flygrutter som kan förväntas vara mest trafikerade. Detta är viktigt för att flygplatsen i fråga ska ha goda underlag för planering och möjlighet att avgöra hur många elflyg som kan behövas för en enskild flygrutt. Sådana uppskattningar kan och har tidigare baserats på befolkningsdata i liknande forskningsprojekt där avsikten har varit att beräkna antalet elektriska flygplan som kan behövas [28]. I dessa fall kan antalet passagerare till och från en destination erhållas genom att statistik för befolkningsmängd jämförs med populationen för en redan trafikerad flygdestination. Exempelvis kan för Skellefteå flygplats antalet resande till och från Arlanda flygplats per vecka, PAX_S, användas för att beräkna motsvarande siffra till en godtycklig destination enligt

$$PAX_A = \frac{PAX_S POP_A \cdot \alpha}{POP_S} \tag{6}$$

som då har utgångspunkt i Skellefteå flygplats. I (6) tillämpas förhållandet mellan befolkningsmängden för en destination POP_A och populationen för Stockholm POP_S, samt en skalfaktor på $\alpha = 0.3$. Skalfaktorn baseras i detta fall på att Arlanda är den enda flygplats i Sverige som erbjuder flyg till Skellefteå och förutsätter att 70% av alla passagerare som byter flyg på Arlanda inte har Stockholm som hemort. Antalet förväntade passagerare kan sedan användas med vetskap om passagerarkapaciteten, PAX, för att skapa en uppfattning om hur många flygplan som kan behövas (se Ekvation (7) där EAs är antalet elflyg).

$$EAs = \frac{PAX_A}{PAX} \tag{7}$$

4 Metod

Underrubrikerna som följer kommer att presentera hur resultaten för denna rapport har producerats och vilka tillvägagångssätt som har varit avgörande. Metoddelen av detta examensarbete har delvis utgjorts av ett flertal simuleringar i MATLAB och följaktligen kommer för varje simulering först utformningen av verktyget att motiveras och förklaras varpå indatan för verktyget (modellen) presenteras.

4.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1

4.1.1 Verktyg

I det initiala arbetet som denna rapport grundas på konstruerades ett regionalt flygnätverk med syfte att synliggöra vilka möjligheter och utmaningar som finns för implementering av elektriska flygplan på Skellefteå flygplats. Genom att först analysera hur ett potentiellt lastbehov kunde se ut på flygplatsen uppstod en nödvändighet att undersöka vilka förutsättningar som i dagsläget finns för tillgänglig teknik för elektriska flygplan. Därför genomfördes först en grundlig litteraturstudie. Litteraturstudien resulterade i ett konstaterande att det finns ett stort behov av att skapa tillförlitliga modeller av hur elektriska flygplan påverkar framtida lastbehov [33, 34]. Ett simuleringsverktyg har därför skapats i MATLAB som kan modellera flygplatsens totala lastbehov.

De 17 flygplatser som identifierades inom en radie på 460 km, vilket är räckvidden för det elektriska flygplanet Alice (framtaget av Eviation), ligger till grund för flygnätverket som simuleras i *Simulering 1*. Verktyget, som är framtaget i MATLAB, har därmed utformats för att modellera lasptrofilen på Skellefteå flygplats med utgångspunkten att flygnätverket består av flygrutter som i framtiden kan komma att vara aktuella. De resultat som produceras av *Simulering 1* förutsätter dock inte att samtliga flygsträckor kommer implementeras, utan har istället inkluderats i verktyget för att påvisa eventuella möjligheter och (eller) utmaningar som kan eller kommer att uppstå. Verktyget ska således syfta till att belysa vilka konsekvenser som finns relaterat till att flygflottan på Skellefteå flygplats kan komma att utgöras av en större andel elektriska flygplan i framtiden.

Lastprofilerna som genereras från *Simulering 1* är resultatet av att verktyget placerar de 17 flygplanen i en vektor som representerar avgångstider från Skellefteå Flygplats. Avgångstiderna är placerade med jämna mellanrum mellan kl 6 på morgonen till och med en sista avgångstid som verktyget automatiskt varierar. Den sista avgångstiden är en vektor bestående av heltal mellan 7-10 och således genereras fyra lastprofiler där den första simuleringen förutsätter att alla 17 flygplan avgår mellan klockan 6-7 medans den sista gör detsamma fast mellan klockan 6-10. Intervallet av sista avgångstider går därmed att variera och kan justeras efter behov. Verktyget gör slutligen en uppskattning om hur många avgångar (flygplan) som varje flygrutt kan förväntas ha veckovis och detta baseras delvis på befolkningsdata (se *3.1.2 Indata* nedan).

4.1.2 Indata

I *Simulering 1* simuleras effektbehovet från två huvudkomponenter, den momentana lasten som kommer av att implementera de 17 elektriska flygplanen av sorten Alice samt baskonsumtionen från flygplatsens övriga verksamheter. I Tabell 1 presenteras relevanta flygplansspecifikationer (för det elektriska flygplanet Alice från Eviation) samt data för flygmönstret som verktyget använder för att modellera flygrutterna. Baskonsumtionen i *Simulering 1* baseras på given timdata från Skellefteå flygplats för månaderna december, januari och februari och dessa har använts för att skapa en genomsnittlig vinterdag. För att baskonsumtionen ska vara kompatibel

med lastprofilerna från flygplanen och för att uppnå hög upplösning, finns möjligheten att justera antalet diskreta punkter mellan varje timme. Baserat på linjarisering skapar verktyget nya datapunkter mellan varje enskild timme och för *Simulering 1* är upplösningen satt till en minut (d.v.s 60 datapunkter per timme). Värt att notera här är att det enbart är MATLAB som begränsar hur hög upplösning som är möjlig att ställa in.

Datan som presenteras i Tabell 1 nedan har använts i tidigare forskning och är direkt hämtad från en tdidigare studie utförd på Uppsala universitet [28]. Verktyget förutsätter att laddningstekniken som används är av typen *plug-in* och att ingen ytterligare last tillkommer av själva laddningstillfället. Flygrutterna utgår därmed från, samt begränsas av, att den totala batterikapaciteten E_{full} för Alice är 820 kWh.

Tabell 1: Teknisk flygspecifikation för det elektriska flygplanet Alice från Eviation.

Parameter	Flygplansdata
E_{full}	820 kWh
h	4572 m
P_{max}	1400 kW
C_r	36576 m/h
E_{res}	120 kWh
R	460 km
β	18°
γ	3°
V_{max}	480 km/h

Avstånden mellan Skellefteå flygplats och flygnätverkets resterande flygplatser (vilka presenteras i Tabell 2) har uppskattats med hjälp av Google Maps och används för att beräkna flygplanens respektive SoC. Verktyget beräknar även ett uppskattat antal avgångar/ elektriska flygplan per vecka för varje enskild flygrutt. Detta baseras delvis på statistik för befolkningsmängden för flygplatsernas respektive orter och omkringliggande områden (vilka också presenteras i Tabell 2). För svenska flygplatser har data samlats från Statistiska centralbyrån från december 2023 [35]. För finska flygplatser, med flygnumren 9, 12, 13, 15 och 17 i Tabell 2, har befolkningsdata inhämtats från motsvarande part i Finland från 2023 [36] och för norska flygplatser, med flygnummer 11 och 14, har detta gjorts för år 2023 från [37].

Tabell 2: De 17 flygplatser som har identifierats vara inom 460 km från Skellefteå flypglats med respektive flygnummer samt avstånd (fågelvägen) och befolkning för de 17 orterna. Flygnumret är endast av betydelse för verktygets egen funktion och betecknar flygplatsen i MATLAB.

Flygnr.	Flygplats	Avstånd [km]	Befolkning
1	Kiruna flygplats	358	22433
2	Sundsvall Timrå flygplats	294	99213
3	Luleå flygplats	115	79352
4	Vilhelmina flygplats	202	6263
5	Arvidsjaur flygplats	138	6113
6	Lycksele flygplats	113	12213
7	Umeå flygplats	99	133091
8	Örnsköldsvik flygplats	168	55478
9	Uleåborg flygplats	208	215543
10	Åre Östersund flygplats	359	64881
11	Bodö flygplats	425	53259
12	Tammerfors-Birkala flygplats	380	362128
13	Vasa flygplats	179	70203
14	Mo i Rana flygplats	368	25980
15	Rovaniemi flygplats	308	55635
16	Lapplands flygplats	280	17330
17	Karleby Jakobstads flygplats	142	37591

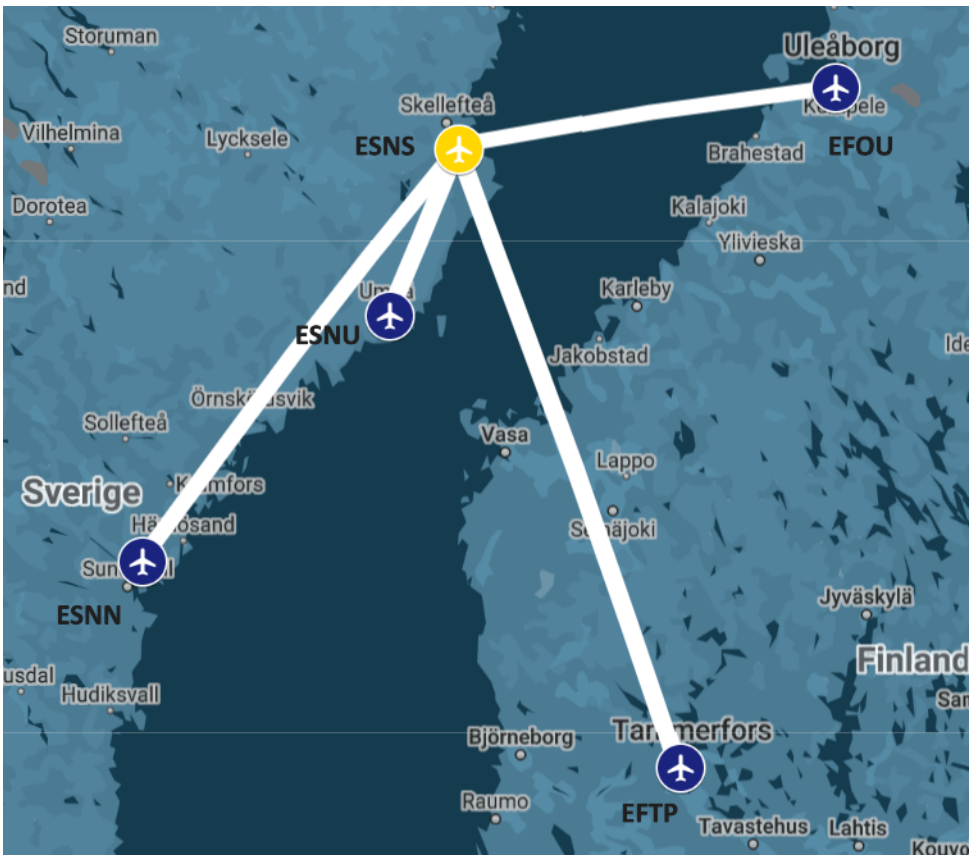
4.2 Fallstudie

4.2.1 Verktyg

Det regionala flygnätverket som skapades för Skellefteå flygplats i föregående rubrik (se *4.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1*), har genererat resultat som indikerar att det finns fyra destinationer (avgångar) som kan komma att vara av särskild betydelse för ökad elektrifiering av den regionala flygsektorn i norra Sverige (se *5.2 Regionalt flygnätverk: Simulering 1* Tabell 7). Två av dessa destinationer återfinns i Finland och resterande två i Sverige. Skellefteå flygplats samt de fyra destinationerna med respektive flygplatsbeteckningar (ICAO) listas nedan:

- ESNS: Skellefteå flygplats
- ESNN: Sundsvall Timrå flygplats
- ESNU: Umeå flygplats
- EFOU: Uleåborg flygplats
- EFTP: Tammerfors-Birkala flygplats

Tillsammans utgör dessa flygplatser punkter i en fallstudie som har genomförts inom denna studie (se Figur 3). Fallstudien har skapats för att undersöka närmare hur ett något mer realistiskt scenario kan se ut och vad den kan ha för implikationer på den totala lastprofilen (effektbehovet) för Skellefteå flygplats, men också för att klargöra samt belysa utmaningar som finns kopplade till olika laddningsstrategier och utformningar av flygscheman.



Figur 3: Fallstudie: De fyra flygrutterna med utgångspunkt på Skellefteå flygplats samt deras respektive flygplatsbeteckningar.

Precis som i föregående kapitel modelleras respektive flygrutt utefter de tekniska förutsättningarna för det elektriska flygplanet Alice från Eviation [16]. Verktyget simulerar därmed lastprofiler för dels de enskilda flygplanen och det sammanlagda effektbehovet samt flygplanens respektive SoC. Varje flygrutt kopplas till ett enskilt flygplan och dessa, samt övrig relevant information för flugrutterna presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: Information för de fyra flygrutterna.

Flygrutt	Flygplan	Tidsåtgång [min]	Energiförbrukning [kWh]	Avstånd [km]
ESNS-ESNN	1	43	430	294
ESNS-ESNU	2	19	145	99
ESNS-EFOU	3	32	308	208
ESNS-EFTP	4	54	556	380

Påpekas bör att flygrutterna i Tabell 3 inte är befintliga flygrutter och för att konstruera ett flygschema behövdes antaganden göras om rimliga tider för flygen att anlända och avgå från Skellefteå. Tidigare forskning inom studien MODELFlyg har påvisat att flygscheman för fallstudier som påminner om denna kan konstrueras utefter anländningstider och avgångstider för högt trafikerade redan befintliga flygrutter [32]. Därför har de flygscheman som skapats i fallstudien dimensionerats baserat på vanligt förekommande sådana tider för flyg mellan Skellefteå flygplats och Arlanda flygplats (Stockholm) [38]. Se dessa tider i Tabell 4. Antagandet gjordes att minst 45 minuter behövs från det att ett flygplan anländer till Skellefteå för att återigen vara startklar för avgångstiderna i Tabell 4. Därför har flygscheman konstruerats för fallstudien så att den senaste anländningstiden inträffar 45 minuter före avgångstiden till Stockholm-Arlanda.

På liknande sätt har avgångstiderna anpassats så att den tidigaste avgångstiden från Skellefteå inträffar 45 efter anländningstiderna för Stockholm-Arlanda flyget.

Tabell 4: Anländningstider på Skellefteå flygplats från Stockholm-Arlanda, samt avgångstider från Skellefteå flygplats till Stockholm-Arlanda för dimensionering av flygscheman.

Anländningstider:	9:25,	19:20
Avgångstider:	9:55,	19:50

4.2.2 Indata: Simulering 1 & simulering 2

Det första flygschemat visas i Tabell 5 och används som indata för de två första simuleringarna i fallstudien. För *Simulering 1* beräknades effektbehovet med Ekvation 5 och därmed genereras statiska lastprofiler för de fyra flygplanen som på förhand vet hur stort intervallet är för tillgänglig laddningstid. Laddningsstrategin som användes för *Simulering 2* tillämpar däremot en dynamisk laddningsprofil som baseras på laddningsdata för elektriska bilar [32] och således är det laddningstillståndet på batteriet som avgör effekten som momentant ska tillföras av en laddare enligt:

$$P_{laddning}(SoC) = \begin{cases} 2C & \text{om: } 0 < SoC \leq 0.4 \\ 1C & \text{om: } 0.4 < SoC \leq 0.8 \\ 0.5C & \text{om: } 0.8 < SoC < 1.0 \end{cases}$$

Tabell 5: Föreslaget flygschema nr. 1. Används för *Simulering 1* och *2*.

Från	Till	Avgångstid (från gate)	Anländningstid (till gate)
EFTP	ESNS	8:16	9:10
ESNN	ESNS	8:22	9:05
EFOU	ESNS	8:28	9:00
ESNU	ESNS	8:36	8:55
ESNS	EFTP	10:10	11:04
ESNS	ESNN	10:15	10:58
ESNS	EFOU	10:20	10:52
ESNS	ESNU	10:25	10:44
EFTP	ESNS	18:11	19:05
ESNN	ESNS	18:17	19:00
EFOU	ESNS	18:23	18:55
ESNU	ESNS	18:31	18:50
ESNS	EFTP	20:05	20:59
ESNS	ESNN	20:10	20:53
ESNS	EFOU	20:15	20:47
ESNS	ESNU	20:20	20:39

4.2.3 Indata: Simulering 3

Det andra flygschemat, som visas i Tabell 6 nedan, används som indata i den tredje simuleringen. Flygschemat justerades på premisserna att det flygplan som förväntas ha lägst SoC när det anländer till Skellefteå flygplats är det som ska anlända först och avgå sist. Lastprofilerna för

Simulering 3 baseras på samma laddningsstrategi som för *Simulering 2*, d.v.s. med dynamisk $P_{laddning}$.

Tabell 6: Föreslaget flygschema nr. 2. Används för *Simulering 3*.

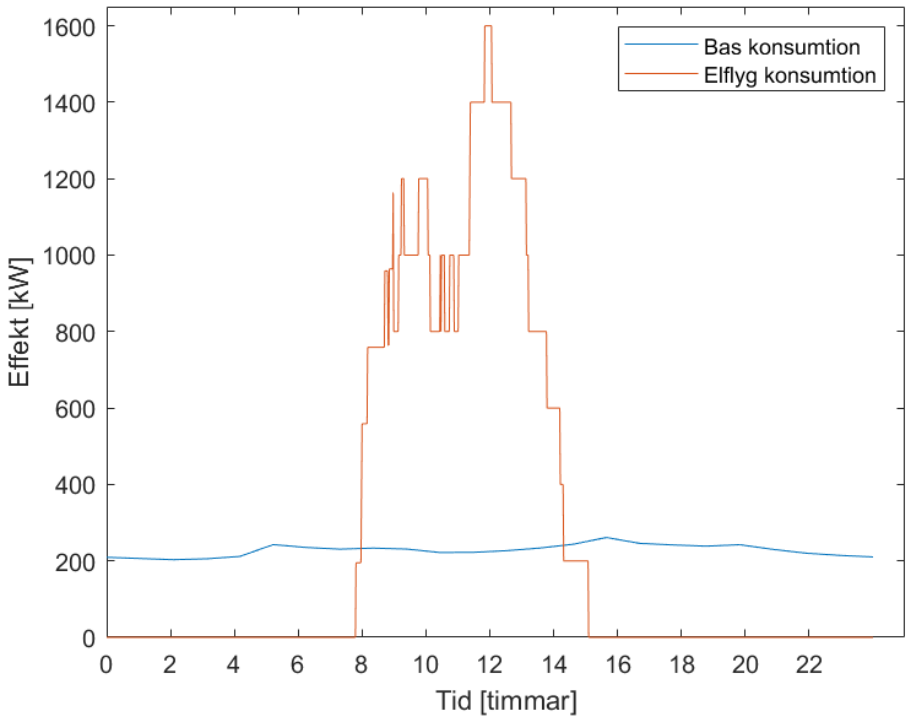
Från	Till	Avgångstid (från gate)	Anländningstid (till gate)
EFTP	ESNS	8:01	8:55
ESNN	ESNS	8:17	9:00
EFOU	ESNS	8:33	9:05
ESNU	ESNS	8:51	9:10
ESNS	EFTP	10:25	11:19
ESNS	ESNN	10:20	11:03
ESNS	EFOU	10:15	10:47
ESNS	ESNU	10:10	10:29
EFTP	ESNS	17:56	18:50
ESNN	ESNS	18:12	18:55
EFOU	ESNS	18:28	19:00
ESNU	ESNS	18:46	19:05
ESNS	EFTP	20:20	21:14
ESNS	ESNN	20:15	20:58
ESNS	EFOU	20:10	20:42
ESNS	ESNU	20:05	20:24

5 Resultat

Nedan presenteras i konsekutiv utförd ordning resultaten som producerats av de simuleringar som genererats i och med detta arbete. Först presenteras således *Simulering 1* av det flygnätverk som har skapats följt av simuleringarna för fallstudien för Skellefteå flygplats.

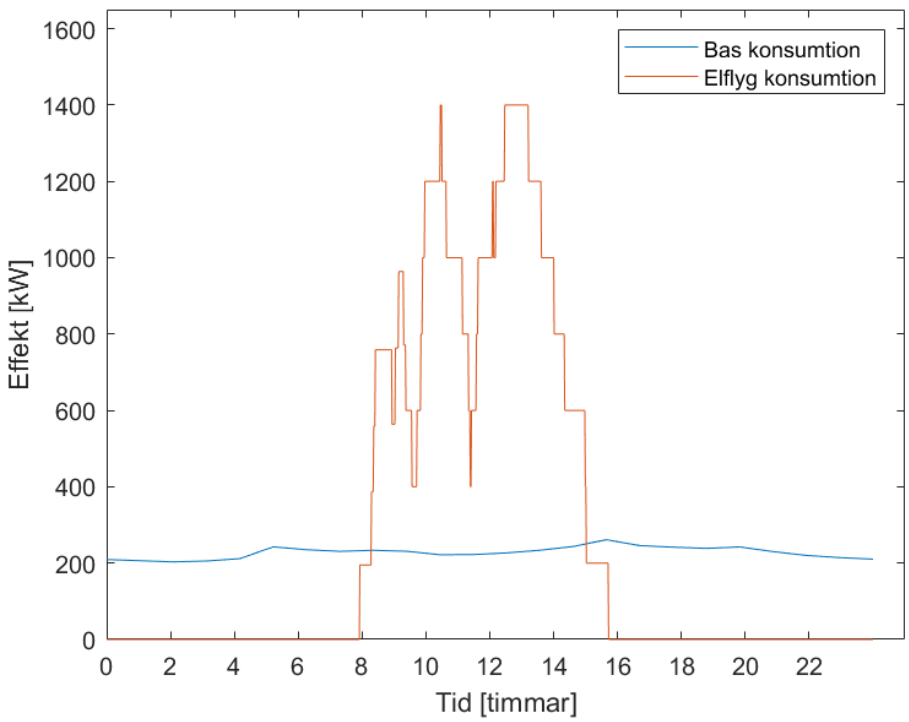
5.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1

Resultaten som har producerats av den första simuleringen presenteras nedan. I Figur 4 illustreras Skellefteå flygplats baskonsumtion samt lastprofilen från de 17 elflygen när samtliga flygplan avgår mellan klockan 6-7 på morgonen. Resultatet synliggör att det uppstår en maximal effekttopp på 1.6 MW runt klockan 12. Observera även att baskonsumtionen inte skiljer sig mellan Figurerna 4-6.



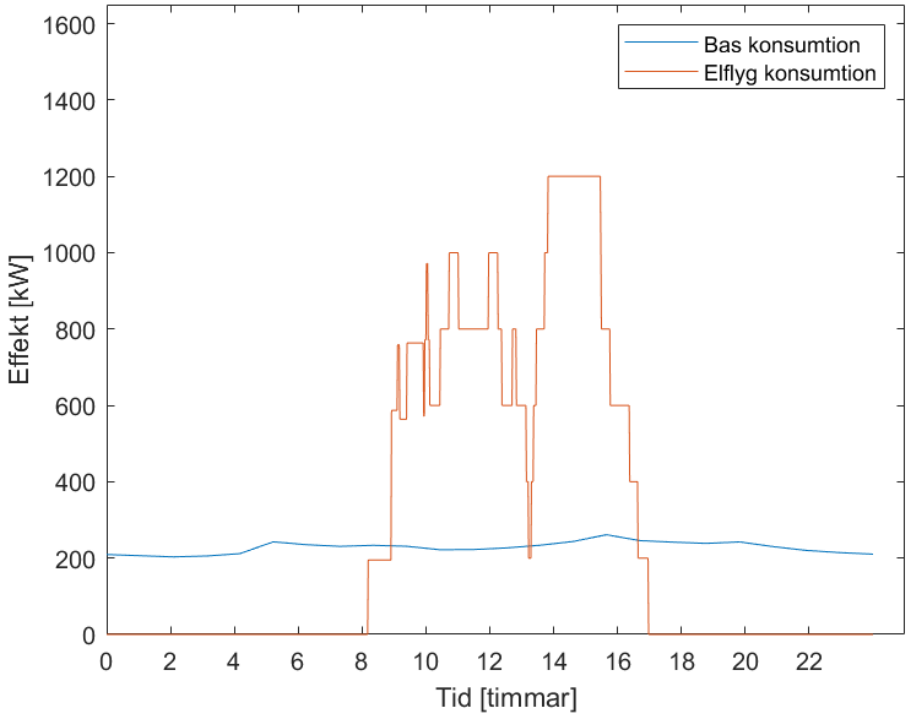
Figur 4: Flygplatsens baskonsumption och effektbehovet från elflyg när sista avgångstid är satt till klockan 07:00.

I Figur 5 illustreras Skellefteå flygplats baskonsumtion samt lastprofilen från de 17 elflygen när samtliga flygplan avgår mellan klockan 6-8 på morgonen. Resultatet synliggör att det uppstår två effekttoppar på 1.4 MW vardera strax efter klockan 10 på morgonen och omkring klockan 13.



Figur 5: Flygplatsens baskonsumption och effektbehovet från elflyg när sista avgångstid är satt till klockan 08:00.

I Figur 6 illustreras Skellefteå flygplats baskonsumtion samt lastprofilen från de 17 elflygen när samtliga flygplan avgår mellan klockan 6-10 på morgonen. Resultatet synliggör att det uppstår en maximal effekttopp på 1.2 MW omkring klockan 14.



Figur 6: Flygplatsens baskonsumption och effektbehovet från elflyg när sista avgångstid är satt till klockan 10:00.

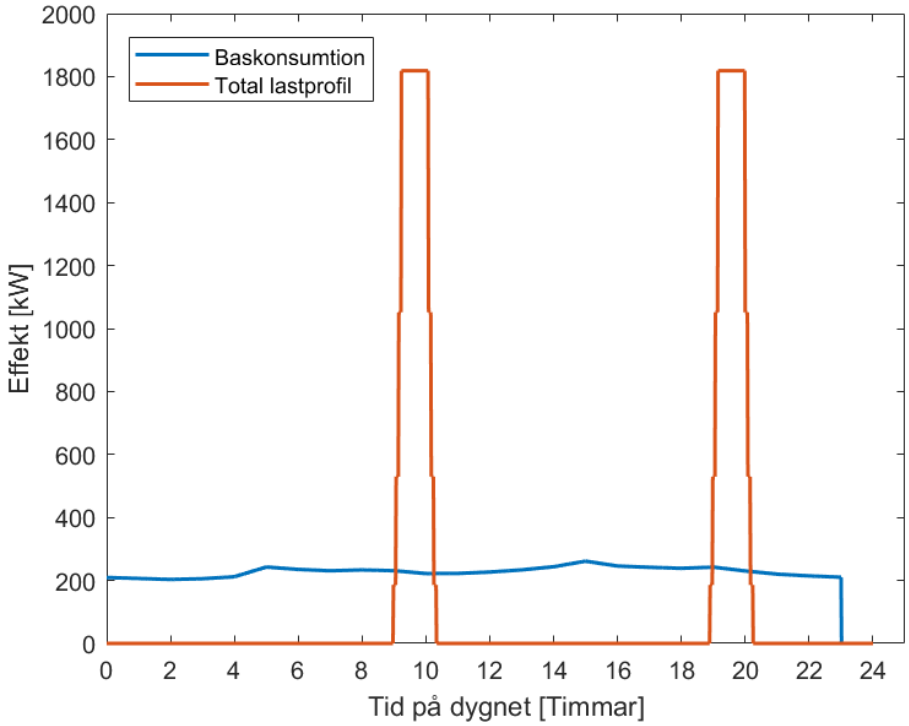
Antalet uppskattade avgångar per vecka för de respektive flygrutterna presenteras i Tabell 7. Beräkningarna som har gjorts påvisar att flest antal avgångar i flygnätverket förväntas vara mellan Skellefteå flygplats till Tammerfors-Birkala flygplats i Finland, samt mellan Skellefteå flygplats till Uleåborg flygplats (Finland).

Tabell 7: Beräknat antal avgångar från Skellefteå flygplats till de 17 respektive flygplatserna i flynätverket veckovis.

Flygplats	Avgångar per vecka
Kiruna flygplats	1
Sundsvall Timrå flygplats	4
Luleå flygplats	3
Vilhelmina flygplats	1
Arvidsjaur flygplats	1
Lycksele flygplats	1
Umeå flygplats	5
Örnsköldsvik flygplats	3
Uleåborg flygplats	8
Åre Östersund flygplats	3
Bodö flygplats	2
Tammerfors-Birkala flygplats	14
Vasa flygplats	3
Mo i Rana flygplats	1
Rovaniemi flygplats	3
Lapplands flygplats	1
Karleby Jakobstads flygplats	2

5.2 Fallstudie: Simulering 1

I Figur 7 nedan visualiseras resultaten för *Simulering 1*. Det totala effektbehovet inom de två intervallen för laddning uppgår maximalt till 1819 kW och i Tabell 8 presenteras de fyra flygplanens respektive bidrag.



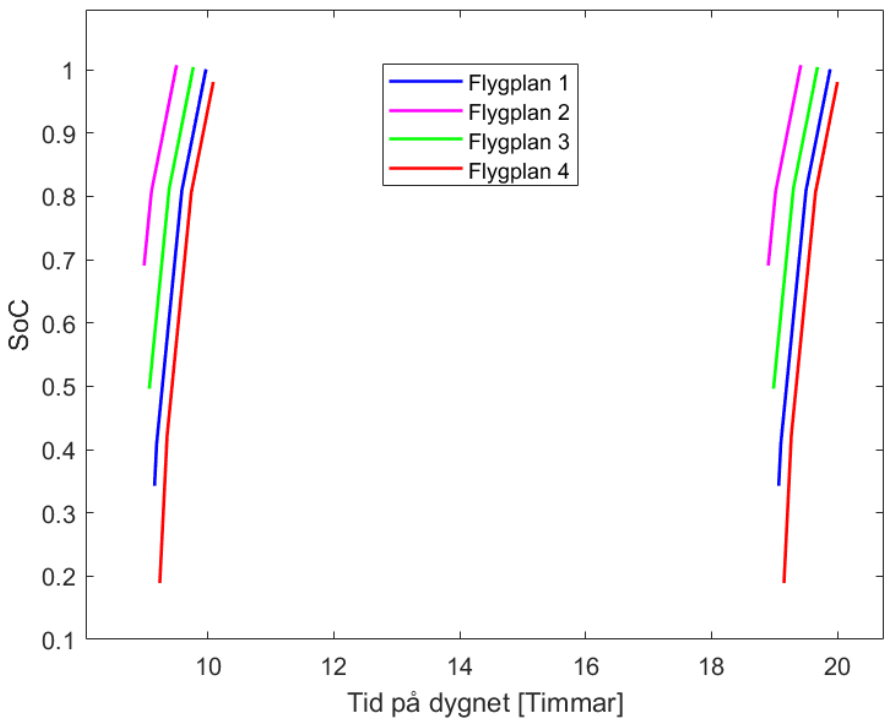
Figur 7: Total lastprofil samt flygplatsens baskonsumtion för Fallstudie: Simulering 1.

Tabell 8: Det konstanta effektbehovet som flygplanen behöver för att inom tidsramen för tillgänglig laddningstid uppnå ett SoC på 100%.

	Flygplan 1	Flygplan 2	Flygplan 3	Flygplan 4
Effekttopp 1 [kW]	522	186	344	767
Effekttopp 2 [kW]	522	186	344	767

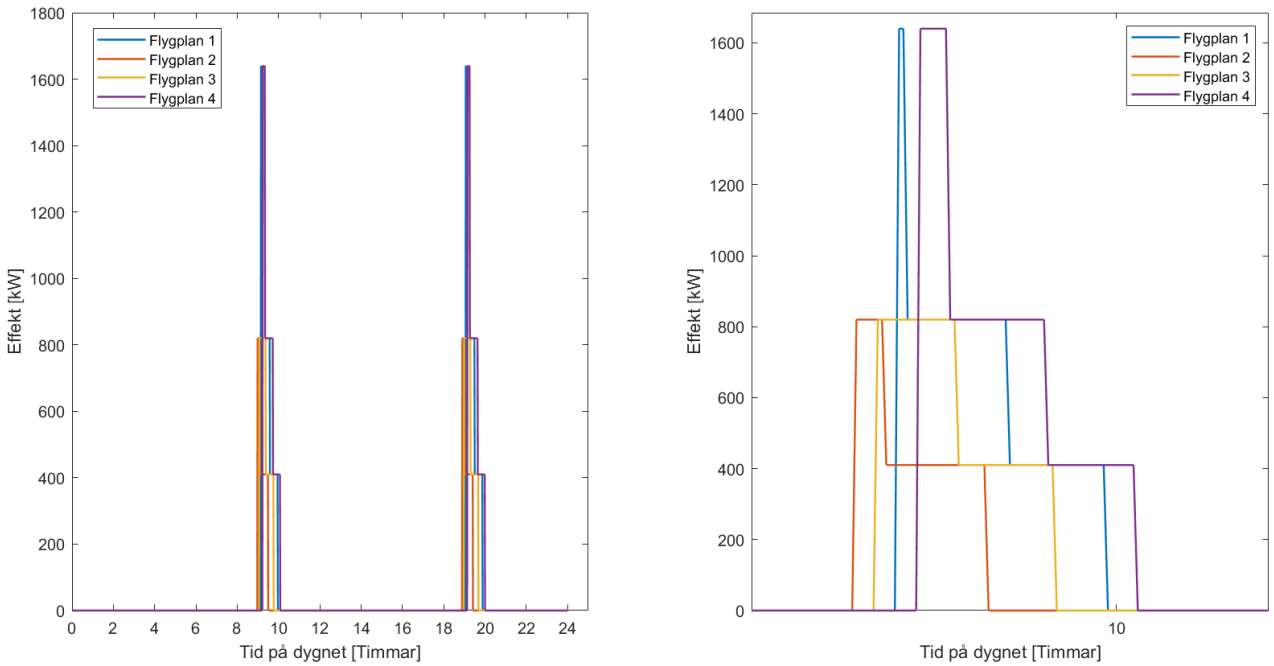
5.3 Fallstudie: Simulering 2

I Figur 8 illustreras laddningstillstånden för de fyra flygplanen med avseende på klockslag för de två laddningstopparna. Resultaten påvisar att samtliga flygplan, förutom flygplan 4, hinner bli fulladdade. Flygplan 4 når ett maximalt laddningstillstånd på 98%.



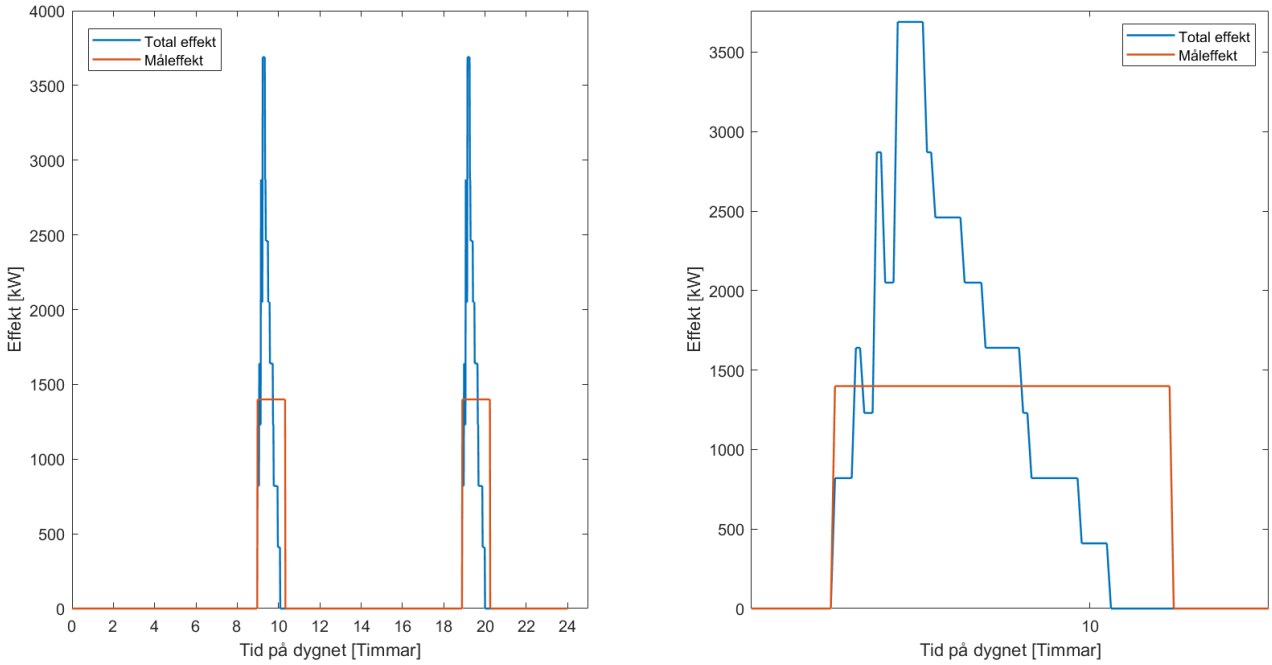
Figur 8: SoC för de fyra flygplanen med avseende på tid på dygnet för *Fallstudie: Simulering 2*.

I Figur 9 presenteras flygplanens respektive lastprofiler under de två laddningstillfällen som uppstår för det första flygschemat (för *Fallstudie: Simulering 2*). Resultatet synliggör att flygplan 1 och 4 har högst effektbehov och att dessa under en kort period uppgår till 1640 kW.



Figur 9: Till vänster: Samtliga flygplans respektive effektbehov under dygnets alla timmar. Till höger: Närbild av de fyra lastprofilerna för första laddningstillfället.

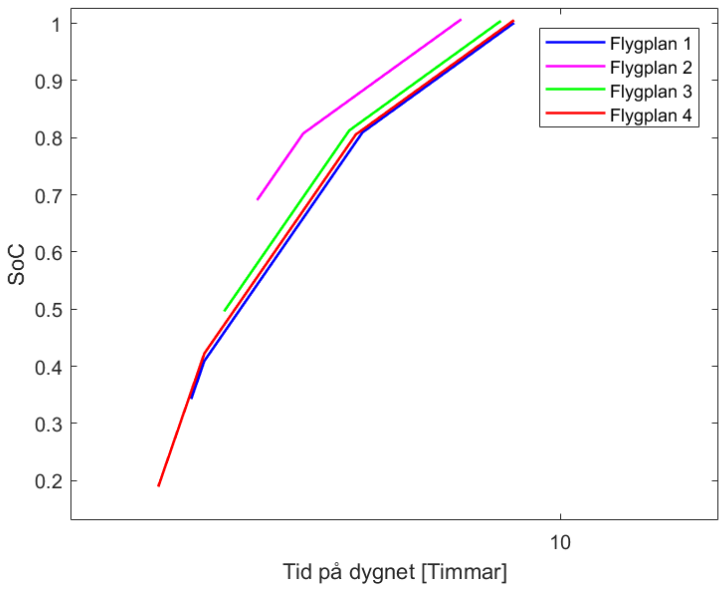
I Figur 10 nedan presenteras den totala lastprofilen från de fyra flygplanen. Den högsta effekttoppen som uppkommer i systemet är 3690 kW.



Figur 10: Till vänster: Flygplanens sammanlagda effektbehov under dygnets alla timmar samt den ideala måleffekten. Till höger: Närbild av flygplanens sammanlagda lastprofiler för första laddningstillfället samt den ideala måleffekten.

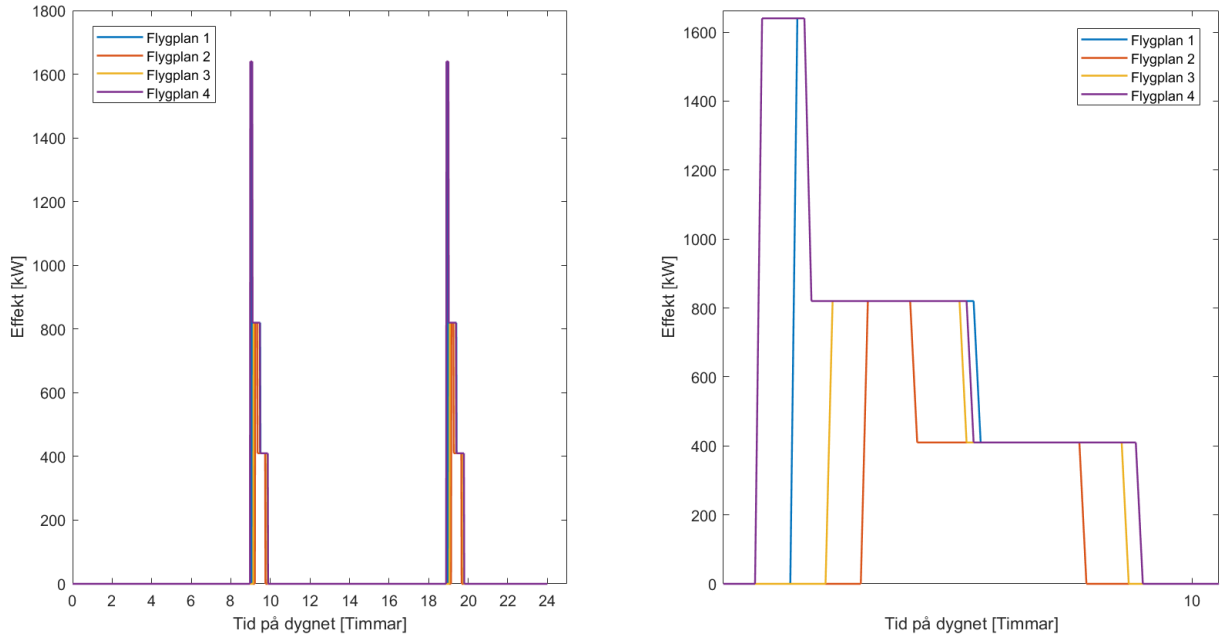
5.4 Fallstudie: Simulering 3

I Figur 11 nedan illustreras laddningstillstånden för de fyra flygplanen med avseende på klockslag för första laddningstoppen. Resultaten påvisar att samtliga flygplan hinner bli fulladdade.

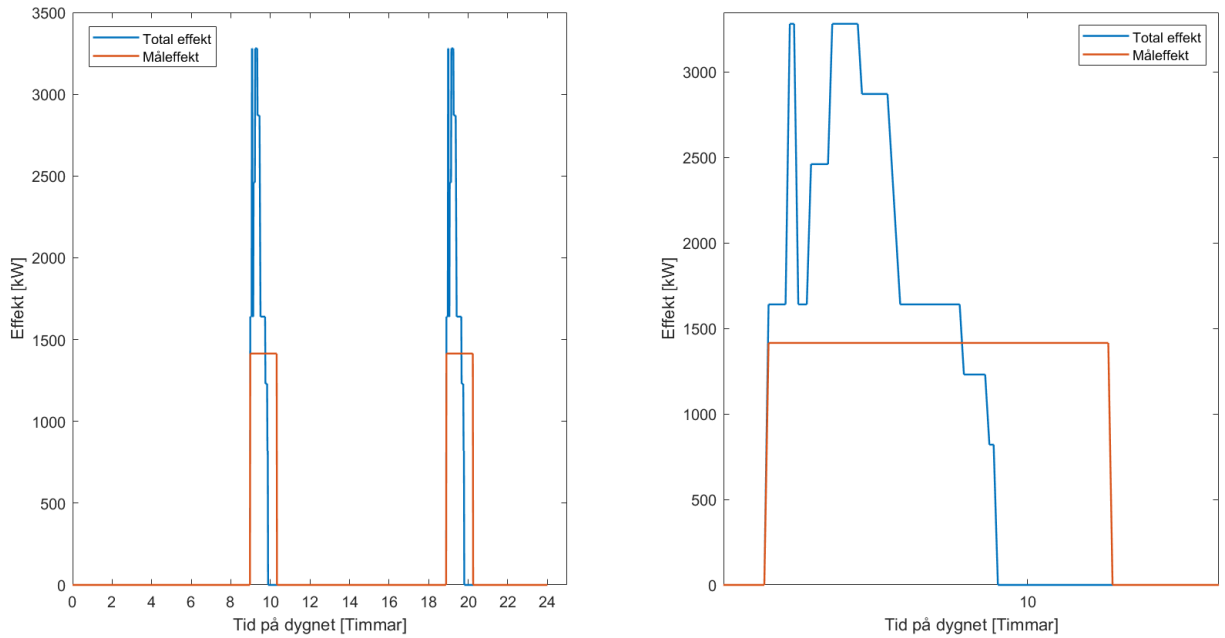


Figur 11: SoC för de fyra flygplanen med avseende på tid på dygnet för den första effekttoppen för *Fallstudie: Simulering 3*.

I Figur 12 presenteras flygplanens respektive lastprofiler under de två laddningstillfällen som uppstår för det andra flygschemat (för *Fallstudie: Simulering 3*). Resultatet synliggör att flygplan 1 och 4 återigen har högst effektbehov och att dessa under en kort period uppgår till 1640 kW. I Figur 13 nedan presenteras den totala lastprofilen från de fyra flygplanen. Den högsta effekttoppen som uppkommer i systemet är 3280 kW.



Figur 12: Till vänster: Samtliga flygplans respektive effektbehov under dygnets alla timmar. Till höger: Närbild av de fyra lastprofilerna för första laddningstillfället.



Figur 13: Till vänster: Flygplanens sammanlagda effektbehov under dygnets alla timmar samt den ideala måleffekten. Till höger: Närbild av flygplanens sammanlagda lastprofiler för första laddningstillfället samt den ideala måleffekten.

6 Diskussion

6.1 Regionalt flygnätverk

Resultaten som har producerats i samband med det regionala flygnätverket (se 5.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1) synliggör att det finns goda förutsättningar för Skellefteå flygplats att implementera nya flygrutter för elflyg i framtiden. Av de sjutton aktuella destinationerna (se Tabell 7) utmärker sig de två finska flygplatserna, Tammerfors-Birkala och Uleåborg, och dessa verkar ha störst potential att utgöra nya flygförbindelser. Resultaten pekar också på att Sundsvall Timrå samt Umeå flygplats kan vara de mest lönsamma alternativen på svensk mark. Mindre flygplatser som i hög grad förlitar sig på inrikesflyg kan uppleva utmaningar som inte sällan kopplas till att bibehålla hög konkurrenskraft (se 2.2 Utvecklingspotential av regionala flygplatser). Skellefteå flygplats kan därför ha särskilt stort behov av att hålla hög passagerarkapacitet på befintliga flygrutter för annars finns vissa risker kopplade till att upprätthålla långsiktig lönsamhet. Att implementera nya destinationer för elflyg och på så sätt underlätta regionalt resande kan därför utgöra särskilt stor utvecklingspotential för en flygplats som Skellefteå flygplats och detta kan i sin tur medföra att de kan upprätthålla hög konkurrenskraft och axla rollen som världsledande innovationscentrum. Skellefteå flygplats verkar vara på god väg för att skapa nödvändiga förutsättningar för nya flygnätverk och redan idag finns infrastruktur för laddning och batterilager på plats (se 2.4 Elektrifiering av Skellefteå flygplats).

Det är dock viktigt att poängtera att de 17 destinationerna som presenteras som alternativ för det regionala flygnätverket i denna rapport har kunnat identifierats genom att flera antaganden har gjorts. Beräkningarna för antalet avgångar i veckan baseras enbart på befolkningsstatistik och tar inte hänsyn till andra faktorer som kan vara av intresse som socioekonomiska aspekter eller demografi. Däremot går det rimligtvis att argumentera för att befolkningsstorlek på omkringliggande områden har stor påverkan på framtida efterfrågan av regionalt flygresande. Det går inte heller att med säkerhet veta begränsningarna för framtida elektriska flygplan. Simuleringarna som har gjorts antar att flygplanet som används är Alice från Eviation och därför har de potentiella flygplatserna varit inom planets räckvidd på 460 km. Det är svårt att avgöra hur den tekniska utvecklingen för elflyg kommer att se ut inom de kommande decennierna men forskning tyder på att flygsektorn är på väg att elektrifieras (se 2.3 Elektriska flygplan). Kanske kommer maxradien för regionala flygnätverk att vara betydligt större.

Lastprofilerna som har genererats i Figur 4 till 6 är det totala effektbehovet som uppstår på Skellefteå flygplats som resultat av att flygplanen avgår med jämna mellanrum i den ordning som presenteras i Tabell 2 och baserat på respektive vändtider kommer tillbaka till flygplatsen för att ladda direkt. I Figur 4 är det maximala effektbehovet som uppstår i systemet 1.6 MW och detta inträffar runt klockan 12 på dagen. När avgångsintervallet blir större visar simuleringarna entydigt på att effekttopparna blir lägre. När den sista avgångstiden istället sätts till klockan 8:00 uppstår två effekttoppar på 1.4 MW (se Figur 5) och när avgångsintervallet ökar till 6:00-10:00 är den maximala effekten i systemet 1.2 MW (se Figur 6). Resultaten kan verka föga förvånande eftersom bredare avgångsintervall "sträcker ut" lastprofilen och ökar mellanrummen för laddning. Däremot visar lastprofilerna att den maximala effekten som uppstår i systemet är starkt beroende av hur flygschemat sätts när det finns flera elektriska flygplan att ta hänsyn till och att laddningsschemat, för verktyget som skapats, är direkt villkorat av flygschemat. Det finns alltså en stark korrelation mellan laddning och avgångstider (flygscheman) för system som inkluderar elektriska flygplan och detta är en icke trivial aspekt för framtida simuleringsmodeller. Det kan även vara en värdefull insikt för Skellefteå flygplats eftersom infrastruktur för eltillförsel delvis behöver dimensioneras baserat på resultat för simulerade effekttoppar.

Lastprofilerna i Figur 4-6 påvisar också att det totala effektbehovet med elflyg kan förväntas va-

ra betydligt större än baskonsumtionen på flygplatsen och detta överensstämmer med tillgänglig litteratur (se 2.6 Hållbarhetsaspekter & säkerhetsperspektiv). Resultaten för de regionala flygnätverket indikerar att endast ett elektriskt flygplan räcker för att under laddningstillfället dubblera flygplatsens totala effektbehov.

6.2 Fallstudie

6.2.1 Fallstudie: Simulering 1 & 2

Av de 17 flygplatser som identifierades i det regionala flygnätverket valdes fyra destinationer ut baserat på flest antal avgångar i veckan. Tillsammans utgör de ett nytt flygnätverk som representerar ett mer verklighetstroget scenario för Skellefteå flygplats och resultaten för fallstudien undersöker närmare hur flygscheman kan konstrueras och syftar även till att generera mer detaljerade lastprofiler. Resultaten från 5.2 Fallstudie Simulering 1 visar att den totala lastprofilen för en effekttopp uppgår till 1819 kW (se Figur 7) och att Flygplan 4 som går till Tammerfors-Birkala flygplats kommer att behöva laddas med den högsta effekten på 767 kW. Resultaten visar den konstanta effekten som varje flygplan behöver laddas med för att fulladdas på tillgänglig laddningstid vilken dimensioneras utefter det första flygschemat i Tabell 5. Laddningseffekterna som presenteras i Tabell 8 ska därför betraktas som den lägsta effekten som behöver tillföras konstant under tiden för tillgänglig laddning men representerar inte nödvändigtvis hur ett laddningsscenario kommer att se ut i praktiken. Denna strategi representerar snarare ett idealt scenario som förutsätter att man på förhand vet exakt hur mycket tillgänglig laddningstid som finns tillgodo och därmed kräver det förutsättningar på flygplatsen där eventuella störningar helt och hållet minimeras. Detta är riskabelt för planeringsaspekter och lämnar inte svängrum för oförutsedda händelser.

Resultaten som har producerats i 5.3 Fallstudie Simulering 2 baseras på samma flygschema som ovan men tillämpar en laddningsstrategi som styrs av flygplanens respektive SoC vid ankomsttid till Skellefteå flygplats. Flygschemat garanterar därför inte att alla flygplan hinner ladda till 100% och detta kan innebära vissa risker i fall där laddningsstrategi och flygschema inte är kompatibla. Däremot indikerar resultaten som presenteras i Figur 8 att samtliga flygplan förutom flygplan 4 hinner ladda fullt. Å andra sidan uppgår SoC för flygplan 4 till 98% vilket räcker för att i detta scenario avgå på den tid som planeras av flygschemat. Detta bekräftar dock att flygschemat bör konstrueras utefter någon korrelation till laddningsstrategin som tillämpas för att helt utesluta sannolikheten att ett flygplan är inte är flygredo vid utsatta avgångstider. Så det finns viss förbättringspotential av verktyget som kan göra simuleringsmodellen mer robust.

De enskilda lastprofilerna för de fyra flygplanen presenteras i Figur 9 och visar att det bara är flypglan 1 och flygplan 2 som momentant uppnår 2C i laddning på 1640 kW. De två övriga flygplanen uppnår maximalt 820 kW med 1C som tillämpad maxeffekt. Samtliga flygplan skulle därför kunna laddas konduktivt med MCS laddare med en maximal effekt på 3.75 MW (se 2.5 Laddningstekniker). I Figur 10 illustreras det totala effektbehovet som uppstår på flygplatsen och denna uppgår till 3690 kW. Detta kan ge Skellefteå flygplats en bild av hur stor kapacitet man kan komma att behöva implementera och fallstudien synliggör hur stora effekttoppar som kan finnas i systemet.

Från Figur 10 går det också att se att måleffekten, på omkring 1.4 MW, är betydligt lägre än den maximala effekten i systemet och om en flygplats enbart utgår efter att minimera den maximala effekten så går det att argumentera för att verkliga laddningsstrategier bör sträva att efterlikna måleffekten. Måleffekten påminner om lastprofilerna som har producerats i 5.2 Fallstudie Simulering 1 och kan antas symbolisera det ideala laddningsscenariot. Måleffekten

vet dock på förhand när laddningsfönster för samtliga flygplan inträffar och jämnar därmed ut laddningen under tidsintervallet då första flygplanet börjar ladda till att det sista planet slutar att ladda.

6.2.2 Fallstudie: Simulering 3

Genom att betrakta resultaten för laddningstillstånden från föregående simulering i Figur 8 som använder flygschema nr. 1 som indata kunde slutsatsen dras att flygschemat troligtvis behövde ta hänsyn till urladdningsdjupet för varje flygplan vid ankomst till Skellefteå flygplats. Därför konstruerades istället flygschema nr. 2 som presenteras i Tabell 6 för Simulering 3. Flygschemat använder samma anländnings och avgångstider som tidigare men har inverterat ordningen som flygplanen anländer och avgår från Skellefteå. Resultatet av detta är att Tammerfors som har längst flygsträcka och därmed har lägst SoC vid ankomst ankommer först och avgår sist och på så sätt får längst laddningstid.

Figur 11 visar att laddningstillstånden för samtliga flygplan uppgår till 100% och när flygplanens enskilda lastprofiler undersöks är den maximala effekten i systemet 1640 kW (se Figur 12), precis som i föregående simulering. Däremot är toppeffekten för den totala lastprofilen 3280 kW vilket är en minskning med 410 kW jämfört med 5.3 Fallstudie: Simulering 2. Detta indikerar att flygscheman med flera flygplan bör konstrueras genom att även ta hänsyn till flygsträckor och därmed flygplanens förväntade laddningstillstånd vid ankomst. Nämnas bör även att verktyget förutsätter att flygplanens respektive SoC vid ankomst endast skiljer sig från varandra baserat på marschsträckan till de fyra destinationerna och tar inte hänsyn till att energiförbrukningen också kan påverkas av övriga faktorer som väderförhållanden eller liknande.

6.3 Framtida forskning

Framtida forskning som kan vara relevant för att förbättra simuleringsverktyg är att undersöka hur olika lastprofiler för enskilda flygplan kan kombineras för att minimera det totala effektbehovet på flygplatser. Frågan blir då hur måleffekten kan uppnås på bästa möjliga sätt för att säkerställa att flygplanen hinner ladda tillräckligt inom fönstret för tillgänglig laddningstid. Det kan därför vara av intresse att undersöka vilka kombinationer av lastkurvor som genererar lägst effekttoppar och kanske kan ett sådant problem angripas genom att identifiera de permutationer som minimerar det totala effektbehovet. Lämpliga laddningsstrategier kan därför kanske produceras genom att betrakta flygnätverk som optimeringsproblem och därför bör framtida forskning inkludera komplexa matematiska modeller som i realtid kan lösa problem och hantera oförutsedda systemavvikelser som kan uppstå på en flygplats. Därför är det också viktigt att forskning bedrivs för att belysa vilka förutsättningar som finns för nödvändig infrastruktur på flygplatsen och detta kan uppdelas i system aspekter och rent tekniska prespektiv.

7 Slutsatser

Resultaten som har producerats i det här examensarbetet indikerar starkt att det totala effektbehovet som uppstår i system bestående av elektriska flygplan är särskilt beroende av två faktorer, flygschemat och laddningsstrategin som appliceras. Därför bör modeller som syftar till att skapa tillförlitliga lastprofileringar för flygplatser med elektriska flygplan konstrueras för att på ett så verklighetstroget sätt som möjligt efterlikna faktiska förutsättningar på flygplatsen.

Flygschemat som används är avgörande för hur mycket laddningstid som finns tillgodo och därför bör ett sådant konstrueras för att vara kompatibelt med laddningsstrategin som ämnar tillämpas. Ett flygschema ska dimensioneras för att möjliggöra tillräckligt med laddningstid mellan anländningstid och avgångstid och bör också ta hänsyn till hur lastprofiler för enskilda flygplan kan kombineras för att minimera effekttoppar. Detta medför att flygplanens laddningstillstånd (SoC) vid ankomst blir en viktig faktor och att den momentana effekten som varje flygplan laddas med bör vara i linje med flygplatsens laddningskapacitet för varje laddningstillfälle.

Det här projektet har också synliggjort att ett simuleringsverktyg kan bli mer robust om flygschemat och laddningsstrategin på något sätt är avhängigt varandra. Om inte finns risken att systemet blir mer sårbart för oförutsedda konsekvenser som kan uppstå på flygplatsen och att flygplanen inte hinner ladda färdigt.

Resultaten visar att det finns potential att reducera effekttoppar i systemet om ett flygschema används som också tar hänsyn till hur olika flygrutter påverkar ett flygplans laddningsbehov vid anländningsstid. Det kan allstå vara fördelaktigt att flygschemat möjliggör längre laddningstid för destinationer längre bort om systemet inkluderar flera flygplan.

Det totala effektbehovet på Skellefteå flygplats kan förväntas öka signifikant om nya flygnätverk med elektriska flygplan implementeras. Resultaten som har producerats i detta projekt visar att enskilda flygplan kommer att behöva laddas med en maximal effekt på 1640 kW och att det totala lastbehovet flygplan uppgår till 3690 kW.

Slutligen kan man baserat på resultaten som har skapats i detta projekt fastslå att det idag finns förutsättningar för att Skellefteå flygplats ska kunna elektrifiera sin flygplansflotta och att det finns flera intressanta alternativ för nya regionala flygnätverk. Fyra destinationer kan vara av särskilt intresse för Skellefteå flygplats och dessa är de två finska flygplatserna i Tammerfors-Birkala och Uleåborg samt Umeå och Sundsvall-Timrå flygplats.

Referenser

[1] S. miljömål, "Utsläpp av växthusgaser till år 2030." https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2030/, 2025. Hämtad: 5/3-2025.

[2] Energimyndigheten, "Utsläpp av växthusgaser till år 2030." https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/ny-analys-fran-energimyndigheten-om-hallbar-elektrifiering/, 2025. Hämtad: 5/3-2025.

[3] J. Eaton, M. Naraghi, and J. G. Boyd, "Regional pathways for all-electric aircraft to reduce aviation sector greenhouse gas emissions," *Applied Energy*, vol. 373, p. 123831, 2024. doi:10.1016/j.apenergy.2024.123831.

[4] U. Blessing and K. P. Extension, "The Future of Electric Aviation: Challenges and Opportunities," vol. 3, pp. 36–40, 09 2024. Hämtad: 22/06-2025.

[5] J. Mukhopadhaya and B. Graver, "Performance Analysis of Regional Electric Aircraft," White paper ICCT Report, International Council on Clean Transportation (ICCT), July 2022. Hämtad: 2025-09-16.

[6] T. Bærheim, J. J. Lamb, J. K. Nøland, and O. S. Burheim, "Potential and Limitations of Battery-Powered All-Electric Regional Flights: A Norwegian Case Study," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 1809–1825, 2023. doi:10.1109/TTE.2022.3200089. Hämtad: 2025-09-16.

[7] A. of the study (CEAS Aeronautical Journal), "Sensitivity analysis of urban air mobility aircraft design and operations including battery charging and swapping," *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 15, no. 2024, pp. 1–15, 2024. doi:10.1007/s13272-024-00725-x. Hämtad: 2025-09-16.

[8] Trafikverket, "Utvecklingsprojekt." https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/ProjektVisaNy.aspx?ProjektId=5293. Hämtad: 5/3-2025.

[9] Fossilfritt Sverige, "Färdplan för Flygbranschen." https://fossilfrittsverige.se/roadmap/flygbranschen/, 2021. Hämtad: 21 april 2025.

[10] Arctic Aviation Hub, "YourFlight – Research and Development of Charging Infrastructure for Electric Aviation." https://arcticaviationhub.com/projects/example-project-two/, 2024. Hämtad: 21 april 2025.

[11] C. Y. Justin, A. P. Payan, and D. N. Mavris, "Integrated fleet assignment and scheduling for environmentally friendly electrified regional air mobility," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 138, p. 103567, 2022. doi:10.1016/j.trc.2022.103567.

[12] N. Thonemann, E. Pierrat, K. M. Dudka, K. Saavedra-Rubio, A. L. S. T. Dragsdahl, and A. Laurent, "Towards sustainable regional aviation: Environmental potential of hybrid-electric aircraft and alternative fuels," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 45, pp. 371–385, 2024. doi:10.1016/j.spc.2024.01.013.

[13] P. Wheeler, "Technology for the more and all electric aircraft of the future," in *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, pp. 1–5, 2016. doi:10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519.

[14] A. A. Mohamed, S. M. A. Aleem, A. Y. Abdelaziz, G. F. Shousha, and A. F. Zobaa, "Electric Aircraft: Progress, Prospects, and Challenges," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2021, pp. 1–20, 2021. doi:10.1155/2021/5519842.

[15] Eviation Aircraft, "Eviation - All-Electric Aircraft." https://www.eviation.com/, 2025. Hämtad: 2025-06-09.

[16] Eviation Aircraft, "Alice – All-Electric Aircraft." https://www.eviation.com/aircraft/, 2025. Hämtad: 2025-05-19.

[17] Heart Aerospace, "Heart Aerospace - Electric Air Travel." https://heartaerospace.com/, 2025. Hämtad: 2025-06-09.

[18] Wikipedia contributors, "Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL)." https://en.wikipedia.org/wiki/EVTOL, 2025. Hämtad: 2025-06-09.

[19] Arctic Aviation Hub, "Skellefteå Airport – The ultimate place to test, develop and commercialise electric aircraft eVTOL and charging solutions." https://arcticaviationhub.com/skelleftea-airport/, 2025. Hämtad: 2025-06-09.

[20] M. Lindberg and J. Leijon, "Electrifying aviation: Innovations and challenges in airport electrification for sustainable flight," *Advances in Applied Energy*, vol. 18, p. 100222, 2025. doi:10.1016/j.adapen.2025.100222.

[21] Y. Liang, G. R. C. Mouli, and P. Bauer, "Charging Technology for Electric Aircraft: State of the Art, Trends, and Challenges," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 3, pp. 6761–6788, 2024. doi:10.1109/TTE.2023.3333536.

[22] H. Kilicoglu and P. Tricoli, "Technical Review and Survey of Future Trends of Power Converters for Fast-Charging Stations of Electric Vehicles," *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5204, 2023. doi:10.3390/en16135204. Open Access; Accessed: 2025-06-09.

[23] J. Schneider, O. Teichert, M. Zähringer, G. Balke, and M. Lienkamp, "The novel Megawatt Charging System standard: Impact on battery size and cell requirements for battery-electric long-haul trucks," *eTransportation*, vol. 17, p. 100253, 2023. doi:10.1016/j.etran.2023.100253.

[24] A. Barke, C. Thies, S. P. Melo, F. Cerdas, C. Herrmann, and T. S. Spengler, "Comparison of conventional and electric passenger aircraft for short-haul flights – A life cycle sustainability assessment," *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 464–469, 2022. doi:10.1016/j.procir.2022.02.077.

[25] M. H. Valland, "Life Cycle Assessment of Electrification of Domestic Aviation in Norway," Master's thesis, NTNU, 2024.

[26] D. B. Agusdinata, J. P. Liu, N. E. Myint, and M. S. Xu, "Socio-Environmental Impacts of Lithium Mineral Extraction: Towards a Research Agenda for a Sustainable Future," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11274, 2021. doi:10.3390/su132011274.

[27] E. D. Amekah, E. W. Ramde, D. A. Quansah, E. Twumasi, S. Meilinger, and T. Schneiders, "Optimal placement and upgrade of solar PV integration in a grid-connected solar photovoltaic system," *Solar Compass*, vol. 12, p. 100099, 2024. doi:10.1016/j.solcom.2024.100099.

[28] M. Lindberg and J. Leijon, "Effects on Airport Operations from a New Regional Electric Flight Network in Northern Scandinavia," in *2024 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles*

International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), pp. 1–6, 2024. doi:10.1109/ESARS-ITEC60450.2024.10819765.

[29] S. van Oosterom and M. Mitici, "Optimizing the battery charging and swapping infrastructure for electric short-haul aircraft—The case of electric flight in Norway," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 155, p. 104313, 2023. doi:10.1016/j.trc.2023.104313.

[30] ScienceDirect, "State of Charge - an overview." https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/state-of-charge, 2025. Hämtad: 2025-05-19.

[31] QuantumScape, "Distinguishing charge rates for next-generation batteries." https://www.quantumscape.com/resources/blog/distinguishing-charge-rates-for-next-generation-batteries/, 11 2021. Hämtad: 2025-05-31.

[32] H. Alfredsson, J. Nyman, J. Nilsson, and I. Staack, "Infrastructure modeling for large-scale introduction of electric aviation," in *35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS35) Oslo, Norway, June 11-15, 2022*, 2022.

[33] Z. Guo, B. Li, G. Taylor, and X. Zhang, "Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles," *eTransportation*, vol. 17, p. 100257, 05 2023. doi:10.1016/j.etran.2023.100257.

[34] C. O'Neil, "Report shows that electric aircraft will need grid upgrades, on-site generation and storage." https://techxplore.com/news/2024-03-electric-aircraft-grid-site-generation.html, Mar. 2024. Hämtad: 2025-05-16.

[35] Statistiska centralbyrån, "Folkmängd i riket, län och kommuner 31 december 2023 och befolkningsförändringar 2023." https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/befolkning-och-levnadsforhallanden/befolkningens-sammansattning-och-utveckling/befolkningsstatistik/pong/tabell-och-diagram/folkmangd-och-befolkningsforandringar---helarsstatistik/folkmangd-i-riket-lan-och-kommuner-31-december-2023-och-befolkningsforandringar-202 2024. Hämtad: 15 maj 2025.

[36] Statistikcentralen (Finland), "Befolkning efter ålder (1-årsklasser), kön och område 1990–2023." https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/sv/StatFin/StatFin__vaerak/statfin_vaerak_pxt_14x5.px/, 2024. Hämtad: 15 maj 2025.

[37] Statistisk sentralbyrå, "Befolkning etter alder og kjønn, 1. januar 2024." https://www.ssb.no/statbank/table/06913, 2025. Hämtad: 15 maj 2025.

[38] SAS Scandinavian Airlines, "Flight Booking — Stockholm to Skellefteå, June 12–16, 2025." https://www.sas.se/book/flights/?search=RT_ARN-SFT-20250612-20250616_a0c0i0y1&view=upsell&bookingFlow=revenue&cepId=YOUNG&sortBy=rec,rec. Hämtad: 2025-05-27.

A Bilaga: Matlabkod för regionalt flygnätverk

A.1 Regionalt flygnätverk: Simulering 1

```
% 2023 effekt data
load('Effekt2023.mat');
jan=P12023;
feb=P22023;
mar=P32023;
apr=P42023;
may=P52023;
jun=P62023;
jul=P72023;
aug=P82023;
sep=P92023;
okt=P102023;
nov=P112023;
dec=P122023;
year=P2023;

xx=zeros(1,24*height(jan));
jan1=table2array(jan);
feb1=table2array(feb);
dec1=table2array(dec);
x=zeros(1,24);
for i=1:24
    x(1,i)=(mean(jan1(:,i))+mean(dec1(:,i))+mean(feb1(:,i)))/3;
end


nov1=table2array(nov);
okt1=table2array(okt);
sep1=table2array(sep);
xfall=zeros(1,24);
for i=1:24
    xfall(1,i)=(mean(sep1(:,i))+mean(okt1(:,i))+mean(nov1(:,i)))/3;
end


% alla 744 timmar i januari
for i=1:31
    xx(1,[(i+1)*24-47:i*24])=jan1(i,[1:24]);
end

%-------------------------------------------------
Efull=820; %kWh
h=4572; %m
Cr=36576; %m/h
Pmax=1400; %kW


Eres=120; %120 kWh
R=460; %km
```

```
B=18; %degrees optimal climb angle
gamma=3; % descent angle
Vmax=480; % km/h
Vclimb=Cr/1000/sin(deg2rad(B)); % 118 km/h
% find tdes descent time
hv=Vmax*sin(deg2rad(gamma)); % 25 km/h
tdes=h/1000/hv; % 0.18 h

e=(Efull-h/Cr*Pmax-Eres)/(R-cos(deg2rad(B))*Vclimb*h/Cr-cos(deg2rad(gamma))*Vmax*tdes); % kWh/km cruise energy

Di=[358 294 115 202 138 113 99 168 208 359 425 380 179 368 308 280 142]; % flight distance to each airport
Soc=zeros(1,17);
Dc=cos(deg2rad(B))*Vclimb*h/Cr;
DL=cos(deg2rad(gamma))*Vmax*tdes;
for m=1:17
    Soc(m)=(Efull-h/Cr*Pmax-(Di(m)-(Dc+DL))*e)/Efull; % State of charge f r elflygets batteri dvs hur m nga % laddning kvar
end

Pcharge=zeros(1,17);
tstill=1; % minimum stand still time
 for n=1:17
     Pcharge(n)=(1-Soc(n))*Efull/tstill; % initial calculations to find reasonable tstill vector
 end
 New_Pcharge=zeros(1,17);
 New_tstill=zeros(1,17);
 for h=1:17
     if Pcharge(h)>200
         New_Pcharge(h)=200;
         New_tstill(h)=(1-Soc(h))*Efull/New_Pcharge(h);
     else
         New_Pcharge(h)=Pcharge(h);
         New_tstill(h)=tstill; % so theese are the calculated charging times for each flight route
     end
 end


a=0.3; % scaling factor
Pop_A=[22433 99213 79352 6263 6113 12213 133091 55478 215543 64881 53259 362128 70203 25980 55635 17330 37591]; % populations of the surrounding area of identified airport
Pop_S=2454821; % befolkning sthlm
PAX_S=347135/52*0.4;

PAX=9; % passengers per EA
PAX_A=zeros(1,17);
EAs=zeros(1,17);
for j=1:17
    PAX_A(j)=PAX_S*Pop_A(j)/Pop_S*a;
```

```
    EAs(j)=PAX_A(j)/PAX;
end
EA=ceil(EAs);
En=New_Pcharge.*New_tstill.*EA;  % weekly energy [kWh], EAs i rounded to the nearest above integer

tc=Dc/(Vclimb*cos(deg2rad(B)));
% tdes= descending time och dessa  r  samma f  r alla rutter
% tid till en destination
t=zeros(1,17);
for h=1:17
    t(h)=(Di(h)-(Dc+DL))/Vmax+tc+tdes; % timmar f  r enkelrutt till en av de 17 destinationerna
end

%-------------------------------------------------


% INPUTS
nr_of_flights=17;
input_step_hour=60;% 20 = 3 minute resolution tex. 60 = 1 min resolution, dvs. 60 steg per timme
delay_time_until_charging=0; % h  r kan man st lla in f rseningstid p  laddning i decimal timmar dvs. tid fr n det att flyget landar till det b rjar laddas
first_final_dep=7;
final_dep=10; % first departure at 6 am and final final at final_dep
ff=input_step_hour*23+1;
Big_power_matrix=zeros(length(first_final_dep:final_dep),ff);
mean_lines=zeros(1,1);



%-------------------------------------------------
for r=first_final_dep:final_dep % note: here 7 is the first final departure
time_for_final_dep=r;

departure_times=[];
 if not(departure_times==0)
     departure_times=departure_times;
 else
     departure_times=[6:(time_for_final_dep-6)/(nr_of_flights-1):time_for_final_dep]; % H  r kan man st lla in avg ngstider f  r de 17 flygen. Tanken  r  att denna ska kunna redigeras fritt och anv ndas  f  r att hitta den optimala vektorn som resulterar i l gst power peaks men som samtidigt uppfyller kraven f  r departures
 end

flights=zeros(nr_of_flights,input_step_hour*23+1); % detta  r  stora matrisen som symboliserar flygens f rh llande till flygplatsen kl 00-23
```

```
vector=zeros(1,nr_of_flights);
charge_time=zeros(1,nr_of_flights);
power=zeros(1,length(flights));

for s=1:nr_of_flights
    flights(s,ceil(input_step_hour*departure_times(s)+1))=1; % departure time at6 am
    vector(s)=(departure_times(s)+2*t(s)+New_tstill(s))/24*length(flights); % calculates time of arrival based on departure time vector i.e time when dum charging starts +1
    flights(s,ceil(vector(s)))=2; % puts the calculated arrival time in nearest above time step and marks it as a 2
    charge_time(s)=(departure_times(s)+2*t(s)+2*New_tstill(s)+delay_time_until_charging)/24*length(flights); % time when charging for plane s ends
    flights(s,ceil(vector(s)+(delay_time_until_charging)/24*length(flights)+1):ceil(charge_time(s)))=3; % Time during charging marks as a 3

    power(1,ceil(vector(s)+(delay_time_until_charging)/24*length(flights)+1):ceil(charge_time(s)))=power(1,ceil(vector(s)+(delay_time_until_charging)/24*length(flights)+1):ceil(charge_time(s)))+New_Pcharge(s);
end

Big_power_matrix(r-(first_final_dep-1),:)=power(1,:);

input_step_per_hour=input_step_hour; % 20 for instance means 20 steps per hour = 3min resolution nu 60 s  1 minut
input_resolution=input_step_per_hour*23+1; % fr n klockan 00-23
new=zeros(1,input_resolution); %denna  r  nytt medeldygn f  r vinter med resolution 3 min/ som nu kan justeras:)

for i=1:24 % Denna loop skapar bara basf rbrukningen i  nskad resolution baserat p  timdatan fr n skellefte  genom att dra en rak linje mellan punkterna
    new(1)=x(1);
    if (i+1)<=24
        new(i*input_step_per_hour+1)=x(i+1);
    end
    y=zeros(1,input_step_per_hour-1);
    for j=1:(input_step_per_hour-1)
        if i<24
            y(j)=[((x(i+1)-x(i))/(input_step_per_hour))*(j)+x(i)];
        end
    end
    if i<24
         new((i*input_step_per_hour+1)-(input_step_per_hour-1):i*input_step_per_hour)=y;
    else
    end
end

```

```
old_scale_xaxis=1:length(new);
new_scale_xaxis=(old_scale_xaxis-1)*24/(input_resolution-1);

figure(r)
plot(new_scale_xaxis,new,new_scale_xaxis,power)
xlabel('Tid [timmar]'); % Change label if needed
legend('Bas konsumtion','Elflyg konsumtion');
ylabel('Effekt [kW]');
xticks(0:2:23);
%yline(mean_lines(r-(first_final_dep-1)))

end
```

B Bilagor: Matlabkod för fallstudie

B.1 Fallstudie: Simulering 1

```
Efull=820; %kWh
h=4572; %m
Cr=36576; %m/h
Pmax=1400; %kW

% Dc och DL mystery?
Eres=120; %120 kWh
R=460; %km
B=18; %degrees optimal climb angle
gamma=3; % descent angle
Vmax=480; % km/h
Vclimb=Cr/1000/sin(deg2rad(B)); % 118 km/h
% find tdes descent time
hv=Vmax*sin(deg2rad(gamma)); % 25 km/h
tdes=h/1000/hv; % 0.18 h

e=(Efull-h/Cr*Pmax-Eres)/(R-cos(deg2rad(B))*Vclimb*h/Cr-cos(deg2rad(
    gamma))*Vmax*tdes); % kWh/km cruise energy
%  r  Dc och DL climbing distance och landing distance???????
    troligtvis...
Di=[358 294 115 202 138 113 99 168 208 359 425 380 179 368 308 280
    142]; % flight distance to each airport
Soc=zeros(1,17);
Dc=cos(deg2rad(B))*Vclimb*h/Cr;
DL=cos(deg2rad(gamma))*Vmax*tdes;
for m=1:17
    Soc(m)=(0.9*Efull-h/Cr*Pmax-(Di(m)-(Dc+DL))*e)/Efull; % State of
        charge f r elflygets batteri dvs hur m nga % laddning kvar
end


tc=Dc/(Vclimb*cos(deg2rad(B)));
t=zeros(1,17);
for h=1:17
    t(h)=(Di(h)-(Dc+DL))/Vmax+tc+tdes; % timmar f r enkelrutt till en
        av de 17 destinationerna
end
durations=[t(2) t(7) t(9) t(12)];
distances=[Di(2) Di(7) Di(9) Di(12)];

input_step_hour=60;

energiforbrukning=distances.*e;
specific_flight_numbers=[2,7,9,12];
SoC=[Soc(2) Soc(7) Soc(9) Soc(12)];
% arr. fr n stockhom-skellefte  att timea (45 min) 9:25, 19:20
% dep. till n gon av destinationerna att timea (45 min): 9:55, 19:50
% % Dessa anv nder jag f r Fallstudie: Simulering 1 och 2
```

```
First_flight_segment_arrivals=[9.0833 8.9167 9.0000 9.1667]; % first arrival times to [9:05 8:55 9:00 9:10] inte i den ordningen dock
First_departure_segment=[10.2500 10.4167 10.3333 10.1667];
Second_flight_segment_arrivals=[19.0000 18.8333 18.9167 19.0833];
Second_departure_segment=[20.1667 20.3333 20.25 20.0833];

% Taxi in  r  3 minuter
Taxiin=3/60; % 0.05 timmar
Taxiut=5/60;

flights=zeros(length(specific_flight_numbers),input_step_hour*24+1); % detta  r  stora matrisen som symboliserar flygens f rh llande till flygplatsen kl 00-24
power=zeros(1,length(flights));
laddprofiler=zeros(2,4);


for s=1:4
    % A 1 symbolizes that the flight has departed from one of the regional
    % airports and is on its way to Skellefte
    flights(s,ceil((First_flight_segment_arrivals(s)-t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights)):ceil(First_flight_segment_arrivals(s)/24*length(flights)))=1;
    flights(s,ceil((First_departure_segment(s)/24*length(flights)):ceil((First_departure_segment(s)+t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights))))=2; % A 2 symbolizes that a flight has departed from Skellefte  and is in the air towards a regional airport, i.e. in the air away from Skellefte
    flights(s,ceil((First_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin)/24*length(flights)+1):ceil((First_departure_segment(s)-Taxiut)/24*length(flights)-1))=3;  % First charging period

    flights(s,ceil((Second_flight_segment_arrivals(s)-t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights)):ceil(Second_flight_segment_arrivals(s)/24*length(flights)))=1;
    flights(s,ceil((Second_departure_segment(s)/24*length(flights)):ceil((Second_departure_segment(s)+t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights))))=2; % A 2 symbolizes that a flight has departed from Skellefte  and is in the air towards a regional airport, i.e. in the air away from Skellefte
    flights(s,ceil((Second_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin)/24*length(flights)+1):ceil((Second_departure_segment(s)-Taxiut)/24*length(flights)-1))=4; % second charging period

    % F  r  fallstudie simulering 1
    laddprofiler(1,s)=(1-SoC(s))*0.9*Efull/((First_departure_segment(s)-Taxiut)-(First_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin));
    laddprofiler(2,s)=(1-SoC(s))*0.9*Efull/((Second_departure_segment(s)-Taxiut)-(Second_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin));

% power vektorn  r  f  r  simulering 1
```

```
    % denna r knar ut power vektorn med den enkla ekvationen f r P_charge
    % och baserat p  flygschemat som styr ladndingstiden
    for ii=1:length(power)
        if flights(s,ii)==3
            power(1,ii)=power(1,ii)+(1-SoC(s))*0.9*Efull/((First_departure_segment(s)-Taxiut)-(First_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin));
        else
        end
    end

    for jj=1:length(power)
        if flights(s,jj)==4
            power(1,jj)=power(1,jj)+(1-SoC(s))*0.9*Efull/((Second_departure_segment(s)-Taxiut)-(Second_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin));
        else
        end
    end



end


input_step_per_hour=input_step_hour; % 20 for instance means 20 steps per hour = 3min resolution nu 60 s  1 minut
input_resolution=input_step_per_hour*24+1; % fr n klockan 00-23
new=zeros(1,input_resolution); %denna  r  nytt medeldygn f r vinter med resolution 3 min/ som nu kan justeras
for i=1:24 % Denna loop skapar bara basf rbrukningen i  nskad resolution baserat p  timdatan fr n skellefte  genom att dra en rak linje mellan punkterna
    new(1)=x(1);
    if (i+1)<=24
        new(i*input_step_per_hour+1)=x(i+1);
    end
    y=zeros(1,input_step_per_hour-1);
    for j=1:(input_step_per_hour-1)
        if i<24
            y(j)=[((x(i+1)-x(i))/(input_step_per_hour))*(j)+x(i)];
        end
    end
    if i<24
         new((i*input_step_per_hour+1)-(input_step_per_hour-1):i*input_step_per_hour)=y;
    else
    end
end
```

```
old_scale_xaxis=1:length(new);
new_scale_xaxis=(old_scale_xaxis-1)*24/(input_resolution-1);

figure()
plot(new_scale_xaxis,new,new_scale_xaxis,power,'LineWidth',1.5)
xlabel('Tid  p   dygnet [Timmar]'); % Change label if needed
legend('Baskonsumtion','Total lastprofil');
ylabel('Effekt [kW]');
xticks(0:2:24);
```

B.2 Fallstudie: Simulering 2 & 3

```
% % Dessa anv nder jag f r Fallstudie: Simulering 2
First_flight_segment_arrivals=[9.0833 8.9167 9.0000 9.1667]; % first arrival times to [9:05 8:55 9:00 9:10] inte i den ordningen dock
First_departure_segment=[10.2500 10.4167 10.3333 10.1667];
Second_flight_segment_arrivals=[19.0000 18.8333 18.9167 19.0833];
Second_departure_segment=[20.1667 20.3333 20.25 20.0833];

% % Dessa anv nder jag f r Fallstudie: Simulering 3
% First_flight_segment_arrivals=[9.000 9.1667 9.0833 8.9167]; % first arrival times to [9:05 8:55 9:00 9:10] inte i den ordningen dock
% First_departure_segment=[10.3333 10.1667 10.25 10.4167];
% Second_flight_segment_arrivals=[18.9167 19.0833 19.0000 18.8333];
% Second_departure_segment=[20.25 20.0833 20.1667 20.3333];



% F r simulering 2 och 3 med variabel soc
power_2c=1640; %kW
power_1c=820; %kW
power_05c=410; %kW


soc_matrix=zeros(4,length(flights));
power_matrix=zeros(4,length(flights));
total_power_matrix=zeros(1,length(flights));

for s=1:4
    % A 1 symbolizes that the flight has departed from one of the regional
    % airports and is on its way to Skellefte
    flights(s,ceil((First_flight_segment_arrivals(s)-t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights)):ceil(First_flight_segment_arrivals(s)/24*length(flights)))=1;
    flights(s,ceil((First_departure_segment(s)/24*length(flights)):ceil((First_departure_segment(s)+t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights))))=2; % A 2 symbolizes that a flight has departed from Skellefte  and is in the air towards a regional airport, i.e. in the air away from Skellefte
```

```
    flights(s,ceil((First_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin)/24*length(flights)+1):ceil((First_departure_segment(s)-Taxiut)/24*length(flights)-1))=3;  % First charging period

    % H r kan det bli aktuellt att justera med Taxi-in och Taxi-out tider!
    flights(s,ceil((Second_flight_segment_arrivals(s)-t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights)):ceil(Second_flight_segment_arrivals(s)/24*length(flights)))=1;
    flights(s,ceil((Second_departure_segment(s)/24*length(flights)):ceil((Second_departure_segment(s)+t(specific_flight_numbers(s)))/24*length(flights))))=2; % A 2 symbolizes that a flight has departed from Skellefte  and is in the air towards a regional airport, i.e. in the air away from Skellefte
    flights(s,ceil((Second_flight_segment_arrivals(s)+Taxiin)/24*length(flights)+1):ceil((Second_departure_segment(s)-Taxiut)/24*length(flights)-1))=4; % second charging period


    % F r fallstudie simulering 2 och 3
    for kk=1:length(soc_matrix)-1
        if flights(s,kk)==3 || flights(s,kk)==4
            %soc_matrix(s,kk)=SoC(s);% s tter initiala socn vid b rjan av laddning
            if flights(s,kk-1)==0 && flights(s,kk)==3
                soc_matrix(s,kk)=SoC(s);
                index3=kk;
            elseif flights(s,kk-1)==0 && flights(s,kk)==4
                soc_matrix(s,kk)=SoC(s);
                index4=kk;
            end

            if soc_matrix(s,kk)<0.4 && soc_matrix(s,kk)> 0
                soc_matrix(s,kk+1)=soc_matrix(s,kk)+(1/input_step_hour*power_2c)/Efull;
                power_matrix(s,kk)=power_2c;
            elseif soc_matrix(s,kk) > 0.4 && soc_matrix(s,kk) < 0.8
                soc_matrix(s,kk+1)=soc_matrix(s,kk)+(1/input_step_hour*power_1c)/Efull;
                power_matrix(s,kk)=power_1c;
            elseif soc_matrix(s,kk) > 0.8 && soc_matrix(s,kk) <= 1
                soc_matrix(s,kk+1)=soc_matrix(s,kk)+(1/input_step_hour*power_05c)/Efull;
                power_matrix(s,kk)=power_05c;
            end
        end
        total_power_matrix(1,kk)=total_power_matrix(1,kk)+power_matrix(s,kk);
    end
end

index_matrix=zeros(4,4);

```

```
for yy=2:length(soc_matrix)-1
    %find(soc_matrix(1,))
    for ss=1:4
        if soc_matrix(ss,yy)==0 && soc_matrix(ss,yy+1)~=0 && flights(ss,yy+1)==3
            index_matrix(ss,1)=yy+1; % start
        elseif soc_matrix(ss,yy)==0 && soc_matrix(ss,yy-1)~=0 && flights(ss,yy-1)==3
            index_matrix(ss,2)=yy-1; % stop
        elseif soc_matrix(ss,yy)==0 && soc_matrix(ss,yy+1)~=0 && flights(ss,yy+1)==4
            index_matrix(ss,3)=yy+1; % start
        elseif soc_matrix(ss,yy)==0 && soc_matrix(ss,yy-1)~=0 && flights(ss,yy-1)==4
            index_matrix(ss,4)=yy-1; % stop
        end
    end
end

index_matrix(4,4)=1200; % egentligen 1200 f r sim 2, men f r sim 3 r den 1188
index_matrix(4,2)=605; % egentligen 605 f r sim2, men f r sim 3 r den 598

soc_matrix(:,1440)=0;



totalenergi=trapz(total_power_matrix)/2; %kWminuter
minuter=605-540; % 65 min
% totalenergy=minuter*peakpower==>
%peakpower=totalenergi/minuter; % s peakpower r nskad effektkurva i formen av en rektangel ! OBS denna blir d mellan tidsintervallet som inte uttnytjar allt tillg nglig tid
% Intervallet f r total tillg nglig laddningstid styr flygschemat och r f r f rsta toppen fr n 540 till 620 dvs fr n 8:58 till 10:20
targetcurve=totalenergi/(620-540);
target=zeros(1,length(total_power_matrix));
target(540:620)=targetcurve;
target(1135:1215)=targetcurve;

targetcurve2=totalenergi/(620-540);
target2=zeros(1,length(total_power_matrix));
target2(540:593)=targetcurve;
target2(1135:1188)=targetcurve;


figure(5)
plot(new_scale_xaxis(1,index_matrix(1,1):index_matrix(1,2)),soc_matrix(1,index_matrix(1,1):index_matrix(1,2)),'b',...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(2,1):index_matrix(2,2)),soc_matrix(2,index_matrix(2,1):index_matrix(2,2)),'m',...
```

```
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(3,1):index_matrix(3,2)),soc_matrix(3,index_matrix(3,1):index_matrix(3,2)),'g',...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(4,1):index_matrix(4,2)),soc_matrix(4,index_matrix(4,1):index_matrix(4,2)),'r',...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(1,3):index_matrix(1,4)),soc_matrix(1,index_matrix(1,3):index_matrix(1,4)),'b',...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(2,3):index_matrix(2,4)),soc_matrix(2,index_matrix(2,3):index_matrix(2,4)),'m', ...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(3,3):index_matrix(3,4)),soc_matrix(3,index_matrix(3,3):index_matrix(3,4)),'g', ...
    new_scale_xaxis(1,index_matrix(4,3):index_matrix(4,4)),soc_matrix(4,index_matrix(4,3):index_matrix(4,4)),'r', 'Linewidth', 1.3);
xticks(0:2:24);
xlim([0 24]);
xlabel('Tid p  dygnet [Timmar]');
ylabel('SoC');
legend('Flygplan 1','Flygplan 2','Flygplan 3','Flygplan 4')

figure();
subplot(1,2,1)
plot(new_scale_xaxis,power_matrix,'LineWidth',1.2);
xticks(0:2:24);
xlabel('Tid p  dygnet [Timmar]')
ylabel('Effekt [kW]')
legend('Flygplan 1','Flygplan 2','Flygplan 3','Flygplan 4');

subplot(1,2,2)
plot(new_scale_xaxis,power_matrix,'LineWidth',1.2);
xticks(0:2:24);
xlabel('Tid p  dygnet [Timmar]')
ylabel('Effekt [kW]')
legend('Flygplan 1','Flygplan 2','Flygplan 3','Flygplan 4');

figure()
subplot(1,2,1)
plot(new_scale_xaxis,total_power_matrix,new_scale_xaxis,target,'LineWidth',1.2);
xticks(0:2:24);
xlabel('Tid p  dygnet [Timmar]')
ylabel('Effekt [kW]');
legend('Total effekt','M leffekt')

subplot(1,2,2)
plot(new_scale_xaxis,total_power_matrix,new_scale_xaxis,target,'LineWidth',1.2);
xticks(0:2:24);
xlabel('Tid p  dygnet [Timmar]')
ylabel('Effekt [kW]');
legend('Total effekt','M leffekt')
```