

SLUTRAPPORT

1 (3)

Datum

Dnr

23-06-01

Projektnr

P2021-90059

Energimyndighetens titel på projektet – svenska	
Resurseffektiva energisystemlösningar för flygplatser med hög andel elflyg (RES-flyg)	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska	
Resource-efficient energy system solutions for airports with high share of electric aviation	
Universitet/högskola/företag	Avdelning/institution
Uppsala universitet	Institutionen för elektroteknik, avdelningen för elektricitetslära
Adress	
Box 65	
Namn på projektledare	
Karin Thomas	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Hampus Alfredsson, Jennifer Leijon, Christoffer Aalhuzien, Jéssica Santos Döhler, Cecilia Boström, Sara Ghaem Sigarchian, Patrik Ollas.	
Nyckelord: 5-7 st	
Elflyg, flygplatser, elbehov, modellering, hållbarhet	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och inkluderar projektdeltagare från Uppsala universitet, RISE Research Institutes of Sweden AB, Skellefteå City Airport AB, samt Swedavia AB. Forskare från Uppsala universitet och RISE har stått för det huvudsakliga genomförandet, projektledning och koordinering. Flera representanter från flygplatserna (Skellefteå Airport och Visby Airport via Swedavia) har bidragit med lokalkännedom och domänkunskap, vilket har varit mycket viktigt för att detta projekt skulle bli lyckat.

Innehållsförteckning

1	Sammanfattning.....	4
2	Summary.....	5
3	Inledning/Bakgrund.....	6
4	Genomförande	7
4.1	Kartläggning av status, pågående projekt och behov	7
4.2	Energibehov och framtida laster på flygplatsen	7
4.2.1	Flygplatsens nuvarande energiförbrukning	7
4.2.2	Energi- och effektbehov vid elektrifiering av flyget	7
4.2.3	Energi- och effektbehov vid ökad elektrifiering av parkerade personbilar	8
4.3	Utmaningar med solcellsanläggningar på flygplatser: En översikt	10
4.3.1	Risk för bländning	13
4.3.2	EMC risker.....	15
4.3.3	Fågel-flygplan kollisioner	15
4.4	Metodik för solcellssystemdesign	16
4.4.1	Design och simulering	16
4.4.2	Bländningsanalys	17
4.5	Tekno-ekonomisk modellering av helt år	19
4.5.1	Modellering av batterilager – storlek och degradering	20
4.5.2	Ekonomisk utvärdering	21
4.6	Intra-dag modell över elektrifierad flygplats	21
4.6.1	Elförbrukning från laddning av elflyg, elbilsladdning och flygplatsens faciliteter	23
4.6.2	Solceller	23
4.6.3	Design av BESS	23
5	Resultat.....	24
5.1	Flygplatsernas nuvarande energianvändning.....	24
5.2	Scenarioutveckling och effektbehov för elflyg	25
5.2.1	Skellefteå Airport	25
5.2.2	Visby Airport	28
5.3	Laddning av parkerade personbilar	31
5.3.1	Skellefteå Airport	31
5.3.2	Visby Airport	33
5.4	PV simulering.....	36
5.4.1	Skellefteå Airport	36
5.4.2	Visby Airport	37
5.5	Bländningsanalys av föreslagna PV system.....	39
5.5.1	Skellefteå Airport	40

5.5.2	Visby Airport	43
5.6	Tekno-ekonomisk helårsutvärdering	46
5.6.1	Visby Airport	46
5.6.2	Skellefteå Airport	49
5.7	Intra-dag modell och hantering av laster	51
5.7.1	Skellefteå Airport	51
5.7.2	Visby Airport	54
6	<i>Diskussion och slutsatser</i>	55
6.1	Energibehov och framtida effektlaster på flygplatsen	55
6.2	Solcellsanläggningar på flygplatser	56
6.3	Styrning av batteriet.....	56
6.4	Jämförelse mellan intra-dag och helårsutvärdering	57
6.5	Fortsatt forskning.....	57
7	<i>Publikationslista</i>	58
8	<i>Referenser, källor</i>	59
9	<i>Bilagor</i>	62
9.1	Bilaga 1	62
9.2	Bilaga 2	62
9.3	Bilaga 3	62
9.4	Bilaga 4	62
9.5	Bilaga 5	62

1 Sammanfattning

Stora delar av samhället ställer om mot ökad elektrifiering, och nu även flygsektorn. Utvecklingen kräver ökad tillgång till elektricitet vid flygplatserna vilket ställer nya krav på infrastruktur och investeringar. Batterielektriska flyg (fortsättningsvis elflyg) kan vara en del av lösningen för att uppnå fossilfria flygtransporter och ökad tillgänglighet i hela landet, men det krävs noggrann planering och ett helhetsperspektiv för att lyckas med introduktionen. Införandet av elflyg kommer innebära förändringar på flygplatserna, detta samtidigt som allt från faciliteter och kringssystem till andra typer av fordon på och runtomkring flygplatserna elektrifieras i allt högre utsträckning.

I detta projekt har simuleringsmodeller utvecklats för att uppskatta flygplatsernas energi- och effektbehov de kommande åren. Särskilt studeras det ökade elbehovet till följd av laddning av såväl elflyg som andra elfordon. Dessutom har projektet inkluderat olika lösningsalternativ för eltillförsel, styrning och effektivt resursutnyttjande. Utöver traditionell elnätanslutning undersöks även potentialen och nyttan med installation av solcellsanläggningar och stationära batterilager vid flygplatserna för att möta det ökade elbehovet. Fallstudier har genomförts vid Visby Airport och Skellefteå Airport, med analys av lämpliga platser för solcellsanläggningar samt eventuella utmaningar kopplat till reflektion och störningar som kan uppstå.

Forskningsprojektet inkluderar även studier av hur man skulle kunna balansera lokal elproduktion, energilagring och elanvändning vid framtidens flygplatser, och vilka ekonomiska incitament som kan finnas för dessa lösningar. Resultaten från projektet indikerar att såväl batterisystem som lokal elgenerering kan bidra till att möta elbehovet från framtidens elflyg nationellt. Nästa steg i forskningen kan vara att vidareutveckla simuleringsmodellerna och att experimentellt verifiera dessa. Därtill kan framtida forskning bidra till en bättre förståelse för både tekniska och ekonomiska aspekter av eldrift inom flygsektorn.

Vi står inför en spännande framtid där elflyg, laddning och batterisystem sannolikt kommer att utvecklas snabbt under kommande år. Att ta del av denna utveckling och följa hur samhället anpassar sig till de nya teknikerna kommer att vara viktigt för att lyckas med omställningen till en mer hållbar och fossilfri flygindustri.

2 Summary

Large parts of society are shifting towards increased electrification, and now also the aviation sector. The development requires increased access to electricity at the airports, which places new demands on infrastructure and investments. Battery-electric flights (hereafter electric flights) can be part of the solution to achieving fossil-free air transport and increased accessibility throughout the country, but it requires careful planning and a holistic perspective to succeed with the introduction. The introduction of electric flights will mean changes at the airports, this at the same time as everything from facilities and surrounding systems to other types of vehicles in and around the airports are increasingly electrified.

In this project, simulation models have been developed to estimate the airports' energy and power needs in the coming years. In particular, the increased need for electricity as a result of charging both electric aircraft and other electric vehicles is studied. In addition, the project has included various solution options for electricity supply, control and efficient resource utilization. In addition to traditional electricity grid connection, the potential and benefit of installing solar cell plants and stationary battery storage at airports is also being investigated to meet the increased electricity demand. Case studies have been carried out at Visby Airport and Skellefteå Airport, with analysis of suitable locations for solar cell installations as well as possible challenges linked to reflection and disturbances that may occur.

The research project also includes studies of how to balance local electricity production, energy storage and electricity use at future airports, and what financial incentives there may be for these solutions. The results from the project indicate that both battery systems and local electricity generation can contribute to meeting the electricity demand from future electric aircraft nationally. The next step in the research may be to further develop the simulation models and to experimentally verify these. In addition, future research can contribute to a better understanding of both technical and economic aspects of electric operation in the aviation sector.

We are facing an exciting future where electric aircraft, charging and battery systems are likely to develop rapidly in the coming years. Taking part in this development and following how society adapts to the new technologies will be important to succeed in the transition to a more sustainable and fossil-free aviation industry.

3 Inledning/Bakgrund

Bakgrunden till detta projekt är den utveckling som idag sker inom flygsektorn, särskilt vad gäller elektrifiering. Flyget förekommer idag i debatter kring dess klimatpåverkan, där exempelvis begreppet flygskam pekar på ett samhällsintresse för förändringar inom flygsektorn de kommande åren. Samtidigt sker en pågående utveckling och design av nya eldrivna batterielektriska flyg. Framtidens elflyg och elfordon kräver dock tillgänglig laddningsinfrastruktur och fortsatt utveckling av batteritekniker. Utvecklingen av flygplatser och elflyg för de kommande åren innebär många möjligheter, men det kvarstår även osäkerheter. Bland dessa osäkerheter finns tekniska aspekter av framtida elflygplan för högre passagerarkapacitet, tillämpningen av laddningssystem, tidsramar och koordinering av laddningsprocesser samt behovet av laddinfrastruktur för elflyg och andra elfordon vid flygplatserna.

Detta projekt handlar om att undersöka och kartlägga förutsättningar för eldrivna flyg och en ökad elektrifiering vid flygplatserna. Hypotesen var att elbehovet ökar signifikant vid flygplatserna till följd av laddning av allt flera olika typer av elfordon, exempelvis laddning av fler och större elflygplan. Målet med projektet är att bidra till en ökad förståelse för elektrifiering av nationella flygplatser och elflygets utveckling under de kommande åren. Detta görs genom att modellera framtida flygplatskoncept. Projektet är ett samarbete mellan Uppsala universitet, RISE, Swedavia med Visby Airport, och Skellefteå Airport. Projektet inkluderar litteraturstudier, utveckling och modellering i simuleringsverktyg, studiebesök vid flygplatserna i Visby och Skellefteå, samt gemensamma workshops. Analys av ett elektrifierat energisystem med solcellsanläggningar, energilagring och elektrifierade fordonsflottor har gjorts för Visby Airport och Skellefteå Airport.

Solceller (PV) har fått ökad uppmärksamhet på grund av deras miljööfördelar, och eftersom flygplatser ofta innehar stora outnyttjade ytor, som öppna fält, tak och parkeringsområden, finns det stor potential för att undersöka möjliga solcellsinstallationer på dessa platser. Emellertid innebär flygplatsernas strikta säkerhetskrav att installation av solceller kan vara mer utmanande jämfört med andra områden. Därför är riskanalys och utarbetandet av begränsningsplaner avgörande delar av sådana projekt. Även om det för närvarande saknas specifika regelverk inom Europa som behandlar säkerhetsaspekterna av solcellsinstallationer på flygplatser, har vissa riktlinjer, policyrapporter och standarder belyst potentiella utmaningar och föreslagit lösningar för att mildra dessa. För att skapa en starkare korrelation mellan elproduktion från solceller och elanvändning installeras ofta ett batterilager, på engelska battery energy storage system (BESS). Utöver detta kan ett BESS bidra med andra tjänster till det lokala elnätet, samt minska eventuella effektoppar, något som antas kunna bli aktuellt med introduktionen av elflygsladdning. Samtidigt har BESS idag en hög investeringskostnad jämfört med förväntade intäkter. Därför finns det ett intresse att utreda återbetalningstider för PV och BESS som används för olika tjänster vid en flygplats.

”If global aviation were a country, it would rank in the top 10 emitters.”

Källa: European Commission. Reducing emissions from aviation. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/528reducing-emissions-aviation_en#links.

4 Genomförande

4.1 Kartläggning av status, pågående projekt och behov

Det finns flera nationella och internationella forskningsprojekt inom elflyg och elektrifiering av flygplatser som antingen är pågående eller avslutade. Därtill finns flera företag och aktörer som arbetar aktivt med att se över möjligheterna för att skapa framtidens elflyg, samt öka elektrifieringen av flygplatserna. Inte minst nationellt finns företag såsom Heart Aerospace, Katla Aero och AirForestry som utvecklar framtidens elflyg för olika miljöer. Vid flera nationella flygplatser tas steg för att exempelvis inkludera solceller på flygplatsen, men här finns ett behov av att ytterligare förstå hur regelverk och säkerhet vid flygplatser påverkas av solceller avseende EMC och reflektioner. Det finns också ett behov av att bättre förstå tekno-ekonomiska perspektiv vad gäller utveckling av flygplatserna mot ökad elektrifiering, exempelvis vilka aktörer som vågar investera i flygplatsutveckling eller elflygsutveckling i ett tidigt skede. Det krävs att forskningen kontinuerligt håller jämna steg med teknikutvecklingen för att förstå hur elflyget kan utvecklas. Det finns ett behov av att se över hur elsystemet på flygplatserna bör dimensioneras framåt samt analysera flyglinjer som kan bli aktuella för elflyget framåt.

4.2 Energibehov och framtida laster på flygplatsen

Energisystemet för flygplatser har modellerats inom projektet. Modellen inkluderar (i) flygplatsernas nuvarande energiförbrukning för exempelvis belysning, värme/kyla, ventilation, servicesystem, och markutrustning, (ii) potentiellt framtida laster vid elektrifiering av flyget, samt (iii) ökad elektrifiering av personbilsflottan och således andelen laddbara bilar på flygplatsens parkering. Forskargrupperna från RISE och Uppsala universitet har tillsammans med representanter från flygplatserna identifierat relevanta datakällor, samt definierat fallstudier och utvecklat simuleringsmodeller för att räkna på framtida energi- och effektbehov.

4.2.1 Flygplatsens nuvarande energiförbrukning

Nuvarande energiförbrukning i form av datafiler med timförbrukning (kWh/h) från respektive flygplats har använts som indata. För Visby Airport har timförbrukningsvärden för perioden 2018-01-01–2019-12-31 använts, och för Skellefteå Airport har perioden 2020-01-01– 2022-10-31 använts. Med data för längre perioder möjliggörs olika typer av scenarioanalyser, samt analys av säsongsvariationer.

4.2.2 Energi- och effektbehov vid elektrifiering av flyget

Idag finns inte något elflyg i kommersiell trafik och således inga data att utgå ifrån. När det gäller operationell prestanda har projektet nyttjat och vidareutvecklat simuleringsmodeller från det tidigare forskningsprojektet MODELflyg. Simuleringsmodellerna är utvecklade för att uppskatta framtida krav på effektkapacitet på minutnivå vid önskade elflygtrafikflöden. Här hanteras schemaläggning och optimering av elflygtrafikflöden, prestanda- och operationell modellering av elflygplan samt simulering av laddningsförfarande på flygplatsen (inklusive algoritmer för smartladdning i syfte att lastutjämna och minska effektoppar). Simuleringarna går i dagsläget endast att genomföra för en typ av elflygplan, vilket är ett batterielektriskt regionalflygplan med 19 säten. För mer detaljerad beskrivning av MODELflyg, se slutrapporten för projektet (Alfredsson et al, 2022).

Initialt förväntas elflyget ha begränsad räckvidd då energidensiteten hos dagens batterier är betydligt lägre än för jetbränsle, dessutom behöves reservkapacitet för att kunna avvika till alternativflygplatser vid exempelvis svåra väderförhållanden. I MODELflyg finns därför implementerat stöd för att testa såväl elektrifiering av befintliga flyglinjer som nya regionala förbindelser.

Under detta projekt har algoritmer för smart laddning av elflyg (från MODELflyg) vidareutvecklats för att kunna styras baserat på eventuell lokal elproduktion. Därtill har möjligheten att använda stationära batterilager vid flygplatserna, för att stötta med effektoppsreducering och lastbalansering, lagts till i modellen. Två möjliga framtidsscenarier har utvecklats för regionalt elflyg, ett för respektive flygplats i projektet. Dessutom görs schemaläggning och simuleringar av energibehov för flyget, samt simulering av resulterande effektbehov vid aggregerad laddning på flygplatserna.

4.2.3 Energi- och effektbehov vid ökad elektrifiering av parkerade personbilar

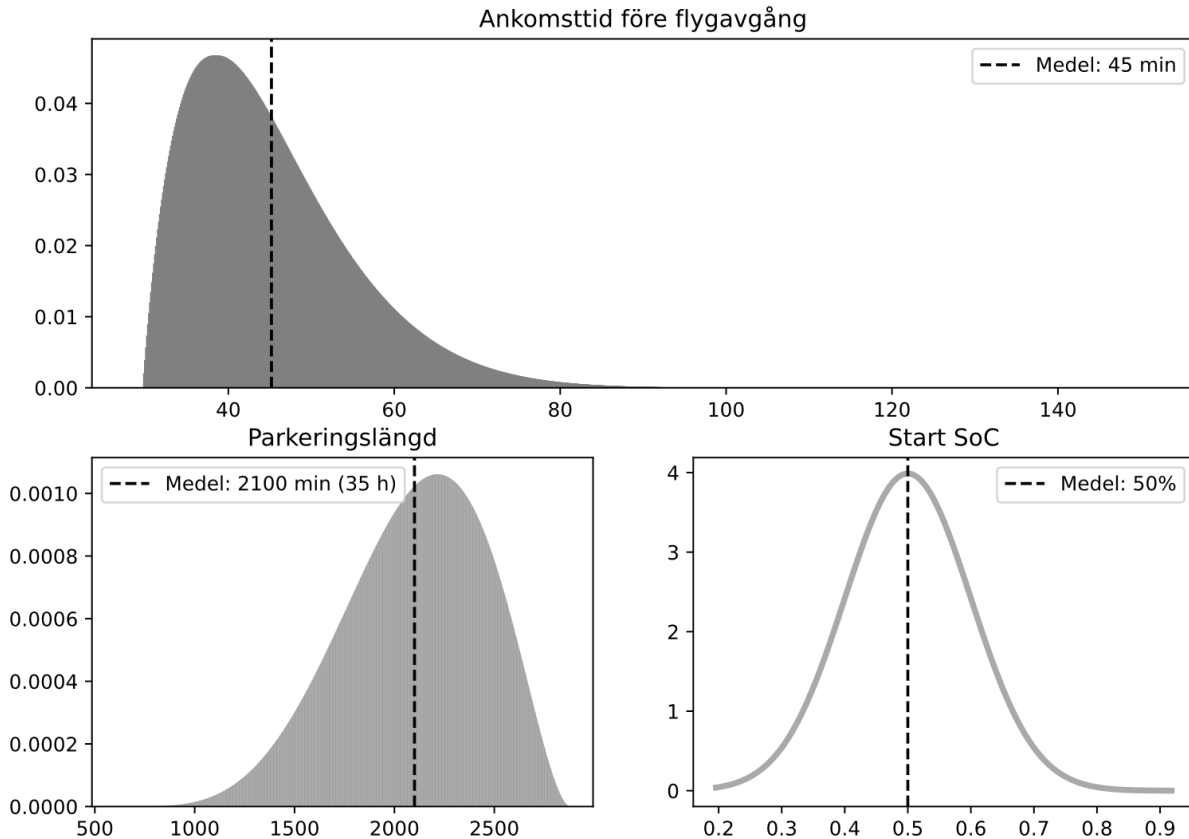
Idag är andelen laddbara personbilar i fordonsflottan relativt låg, ca 9% i januari 2023, enligt Power Circle 2023. Därför finns idag inte tillgång till några större datamängder för parkerade personbilar vid flygplatser. Istället har framtidsscenarier med olika elektrifieringsgrad använts som indata till modellerna i projektet.

Elbilsankomster, parkerings- och laddningsmönster genereras dels utifrån flygets avgångar, dels utifrån antaganden om parkeringsbeteenden. Eftersom bilar, och således även laddbara bilar, ankommer till flygplatsen oavsett om flyget är elektriskt eller ej, så kombineras framtagna elflygscheman delvis med dagens flygavgångar.

Tre huvudsakliga frågeställningar ligger till grund för simuleringsprocessen:

1. Hur många laddbara bilar ankommer till flygplatsens parkering inför varje flygavgång?
2. Hur långt före flygavgången anländer de, hur länge står de parkerade, samt vad är energinivån i dess batterier vid ankomst?
3. Hur sker laddning av fordonen och vad blir det summerade behovet av effektkapacitet?

Tiden för ankomst av en personbil före flygavgång kan variera beroende på flera faktorer såsom förarens preferenser, syftet med resan, storleken på flygplatsen, avståndet mellan parkering och terminal, och liknande. Energinivån i ett laddbart batteripack vid ankomst beror på flera faktorer, inklusive tidpunkt för senaste laddning, mängden laddning vid den tidpunkten, avståndet som bilen har färdats för att nå flygplatsparkeringen, och dess energiförbrukning. För att hantera dessa variationer, används flera fördelningsfunktioner som samplas för N_{EV} fordonsankomster inför varje flygavgång. I genomsnitt antas att bilar anländer 45 minuter före flygavgång till parkeringsplatsen, och en vanlig parkeringstid antas vara 1–2 dygn. Figur 1 visar fördelningsfunktioner som använts för att sampla dessa värden för varje anländande laddbar bil. Energinivån i batteriet vid ankomst är modellerad som en normalfördelning med medelvärde på 50%.



Figur 1: Fördelningsfunktioner som används för att sampla ankomsttid, parkeringslängd och energinivå i batteriet för ankommande elbilar till flygplatsparkeringen.

I simuleringarna antas de parkerade personbilarna antingen ladda med en konstant effekt, motsvarande den angivna märkeffekten för laddarna, tills att batterierna är fulladdade. Alternativt beräknas den konstanta laddeffekt som behövs för att varje bil ska ha ett fulladdat batteri vid parkeringens avslut.

Som en separat frågeställning undersöks även om det är möjligt att använda de laddbara bilarnas batterier som effektstöd på flygplatsen. Detta kallas för vehicle-to-grid (V2G). Från den resulterande laddeffektprofilen för varje bil (enligt simuleringen med angiven märkeffekt) undersöks hur många tidssteg (minutbaserat) som laddplatsen används utan att faktiskt ladda. Upp till detta antal tidssteg testas en algoritm att omvänt ladda ur bilbatteriet med den angivna märkeffekten för laddarna vid olika tidpunkter. Efter varje test simuleras laddningssessionen om, följt av en kontroll av energinivån i batteriet. Om den nya laddningssessionen fortfarande lyckas bibehålla energinivån över en definierad minimumgräns, sparas resultatet. Om den nya laddningssessionen misslyckas att hålla bilbatteriet över minimumgränsen, återställs förändringen. Prioritetsordningen för testerna, det vill säga i vilka tidssteg som urladdning testas först, beror på flygplatsens övriga effektlast (till exempel för egen energianvändning eller för laddning av elflygplan). På detta sätt samordnas urladdning av alla bilar vid tider då övriga effektlasten är höga så mycket som möjligt. Resultaten från detta används inte vidare i systemsimuleringarna, men kan vara intressant i fortsatt forskning.

4.3 Utmaningar med solcellsanläggningar på flygplatser: En översikt

Enligt en rapport från Air Transport Action Group har mer än 100 flygplatser över hela världen installerat solpaneler, se Figur 2 (Air Transport Action Group, 2015).



Figur 2: Flygplatser över hela världen med solkraftverk; Bildkälla: Aviation Climate Solution, Air Transport Action Group (Air Transport Action Group, 2015).

Ett urval av flygplatser och deras installerade solcellskapacitet presenteras i Tabell 1. Det är stor variation på installerad solcellskapacitet som jämförelse har Indianapolis Airport, en installerade effekt på 25 MW medan den största svenska anläggningen för närvarande är Törneby Solpark vid Kalmar Öland Airport med 2,25MW (Svensk Solenergi, 2023) (Kalmar Öland Airport, 2023). Med tanke på antalet flygplatser i Sverige och flygplatsernas tillgängliga utrymmen finns det en potential för att utforska solenergiproduktion vid dessa.

Federal Aviation Administration (FAA) i USA har utarbetat en teknisk rapport som ger vägledning för att utvärdera och implementera solcellsinstallationer på flygplatser (Federal Aviation Administration (FAA), 2018). Vägledningen täcker potentiella utmaningar och oförutsedda problem, inklusive solreflektioner och kommunikationsstörningar. Den tillhandahåller ny information som förenklar granskningsprocessen för FAA-projekt, i syfte att säkerställa att installerade solsystem inte utgör någon risk för flygplatsdrift, flygtrafikledning och piloter. Rapporten presenterar även flera fallstudier som fokuserar på specifika ämnen. Från denna rapport kan man dra slutsatsen att solpaneler kan installeras på flygplatsen med minimal eller ingen påverkan förutsatt att korrekta planerings- och lokaliseringssynpunkter beaktas.

Tabell 1: Exempel på flygplatser med solcellsanläggning

Flygplats	Land	Typ	Nominell effekt (MW)	Areal (ha)	Datum (år)
Indianapolis Airport Solar Park (Ind solar farm, 2023)	USA	Markbaserad	25	74	Två faser 2013/2015
Denver internationella Airport (Ind solar farm, 2023)	USA	Markbaserad	8	17.8	-
Cochins internationella Airport (Sukumaran and Sudhakar, 2017)	Indien	Markbaserad	12	18	2015
London Southend Airport (London Southend Airport, 2023)	Storbritannien	Markbaserad	2.5	3.2	2016
Törneby Solpark i Kalmar Öland Airport (Kalmar Öland Airport, 2023) (Svensk Solenergi, 2023)	Sverige	Markbaserad	2,25	40	2019
Jönköpings Airport (Jönköping Airport, 2023)	Sverige	Takmonterad	0,213	-	-
Ängelholm Helsingborg Airport (Ängelholm Helsingborg Airport, 2023)	Sverige	Takmonterad	-	0,03	2015
Vienna Airport Sustainability Report 2021 (Flughafen Wien AG, 2021)	Österrike	Takmonterad	3.3	1.6	2021
Vienna Airport Sustainability Report 2021 (Flughafen Wien AG, 2021)	Österrike	Markbaserad	24	24	2022

I följande avsnitt presenteras en översikt över potentiella risker i samband med installation av solcellspaneler på flygplatser, tillsammans med förslag på strategier för att minska dessa risker. Flera studier har tagit upp säkerhetsproblem i samband med installation av solcellssystem på flygplatser. Till exempel har Mostafa et al. (Mostafa et al., 2017) och Sreenath et al. (Sreenath et al., 2020) noterat de potentiella riskerna med sådana anläggningar och föreslagit strategier för mildrande åtgärder. Wybo har tagit upp säkerhetsproblem för vid implementeringen av storskaliga solcellsanläggningar på flygplatser (Wybo, 2013). Dessutom har en SWOT-analys utförts med fokus på olika faktorer som kan bidra till projektens framgång vid solcellsinstallation på flygplatser (Sukumaran et al., 2019). Dessa studier visar att potentiella risker effektivt kan minskas genom att följa korrekta procedurer under design, installation och drift. Flera potentiella risker har identifierats som kan orsaka störningar i luftfartsverksamheten, inklusive:

Reflektion från solpaneler	Reflektion av solljus från solcellspaneler kan orsaka tillfällig visuell skada hos flygledare och piloter.
Störningar i kommunikationssystem	Komponenter i solcellssystemet kan störa kommunikationssignalerna på flygplatsen och utgöra en risk för flygtrafiken
Installation av solpaneler i begränsade områden på flygplatsen	Installation av solcellspaneler i begränsade områden kan utgöra en risk för flygplansrörelser och flygplatsverksamheten
Oavsiktligt intrång på PV-områden	I händelse av att ett flygplan kommer av landningsbanan och in på solcellsanläggningsområdet kan det förhindra räddningsteamets arbete och även orsaka ekonomiska förluster.
Avlägsnande av solcellssystemets komponenter	Under extrema väderförhållanden kan delar av PV-systemet, inklusive solcellsmoduler, kablar, växelriktare och monteringsstrukturer, lossna och

	hamna på landningsbanan. Detta kan skapa en farlig situation för flygplan på marken.
Påverkan från fåglar som använder solcellsanläggningsområdet	Solcellsanläggningar kan bli attraktiva för fåglar för skuggning och häckning, vilket ökar sannolikheten för att fåglar och flygplan kolliderar.
Elektriska fel	Solpaneler är en källa till högspänd elektrisk likström (DC) som vid fel kan leda till stötar eller brand på solcellsanläggningsområdet. Detta kan riskera människoliv och skada flygplatsens infrastruktur.
Läckage av giftiga material och gaser från skadade solcellsmoduler	Utsläpp av giftiga material, såsom kadmium, från skadade solcellsmoduler till den omgivande miljön kan utgöra en betydande risk för både människor och djurliv. Vidare utgör potentiella utsläpp av giftiga gaser i händelse av en brand en annan stor risk med solcellsanläggningar.

Sreenath et al. presenterar sannolikheten och allvaret för ovan nämnda risker med hjälp av Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA), en metoden om rekommenderas av International Civil Aviation Organization ICAO (International Civil Aviation Organization, 2013) för säkerhetsbedömning på flygplatser (Sreenath et al., 2020) (International Civil Aviation Organization, 2013). Metoden innebär att man bedömer sannolikheten och allvaret av risker baserat på olika faktorer, såsom sannolikheten för att en händelse inträffar, konsekvenserna av händelsen och vilken inverkan den skulle ha. Risksannolikhet, värderas på en skala från 1 (sällsynt) till 5 (säker) och beskriver möjligheten att en händelse inträffar, visas i Tabell 2.

Tabell 2: Risksannolikhet. (International Civil Aviation Organization, 2013) & (Sreenath et al., 2020)

Risksannolikhet	Beskrivning	Sannolikhet för förekomst
Säker	Förväntas inträffa i de flesta fall	5
Sannolik	Förekommer förmodligen ibland	4
Möjlig	Kan inträffa någon gång	3
Osannolik	Detta kan inträffa någon gång	2
Sällsynt	Kan inträffa i undantagsfall	1

Riskens allvarlighetsgrad avser effekten av en riskhändelse och kan klassificeras som katastrofal, betydande, måttlig, mindre eller obetydlig. Allvarlighetsgraden bestäms av faktorer som dödsfall, personskador, skador på flygplan eller flygplatsegendom, miljöpåverkan och påverkan på flygplatsens rykte. Katastrofala händelser inkluderar förstörelse av flygplan, flera dödsfall eller betydande skador på intäkter eller ekologi. Risker rangordnas från A (högsta prioritet) till E (lägsta prioritet) enligt Tabell 3.

Tabell 3: Riskens allvarlighetsgrad. (Sreenath et al., 2020) & (International Civil Aviation Organization, 2013)

Typ av allvarlighetsgrad	Beskrivning	Rangordning av allvarlighetsgrad
Katastrofal	Total skada på flygplan som leder till mer än ett dödsfall och kolossala förluster av flygplatstillgångar.	A
Betydande	Huvudflygplanssystem fungerar inte vilket resulterar i nödförfarandet för flygning, eventuella skador på passagerare och besättning	B
Måttlig	Delvis fel på luftfartygssystemet och kan leda till onormal tillämpning av flygdriftsförfaranden	C
Mindre	Påverka flygplatsens rutinmässiga rutiner	D
Obetydlig	Ingen betydelse för flygplansrelaterad drift och säkerhet	E

En riskindexmatris, Tabell 4, baserad på allvarlighetsgraden och sannolikheten för varje risk visas i (Sreenath et al., 2020). Vidare presenteras riskacceptans i Tabell 5 som kategoriserar risken som oacceptabel (röd färg), acceptabel efter begränsningsåtgärder (gul) och acceptabel som den är (grön). Risktoleransen kan ändras från oacceptabel till acceptabel om lämpliga åtgärder har vidtagits för att minska riskerna.

Tabell 4: Riskindexmatris (Allvarlighetsgrad * Sannolikhet) (Sreenath et al., 2020)

Risksannolikhet	Riskens allvarlighetsgrad				
	Katastrofal (A)	Betydande (B)	Måttlig (C)	Mindre (D)	Obetydlig (E)
Säker	5A	5B	5C	5D	5E
Sannolik	4A	4B	4C	4D	4E
Möjlig	3A	3B	3C	3D	3E
Osannolik	2A	2B	2C	2D	2E
Sällsynt	1A	1B	1C	1D	1E

Tabell 5: Riskacceptans. (Sreenath et al., 2020)

Färgkod	Riskindex	Beslut om riskacceptans
Röd	5A, 5B, 5C, 4A, 4B, 3A	Oacceptabelt under rådande omständigheter
Gul	5D, 5E, 4C, 4D, 4E, 3B, 3C, 3D, 2A, 2B, 2C, 1A	Acceptabelt efter granskning
Grön	3E, 2D, 2E, 1B, 1C, 1D, 1E	Acceptabelt som det är

Baserat på resultatet av tidigare studier har Sreenath et al. tilldelat ett riskindex (Tabell 6) till de identifierade riskerna som om ingen begränsningsstrategi har implementerats.

Tabell 6: Riskindex av Identifierade risker. (Sreenath et al., 2020)

Identifierade risker	Allvarlighetsgrad	Sannolikhet	Riskindex
Bländning från solcellsmoduler	Hög	Sannolik	4B
Störningar i kommunikationssystem	Hög	Möjlig	3B
Penetration av solcellspaneler i begränsat luftrum	Måttlig	Osannolik	2C
Oavsiktligt intrång i solcellsanläggningsområdet	Måttlig	Möjlig	3C
Avlägsnande av komponenter i solcellssystemet	Låg	Osannolik	2D
Kollision med fåglar vid solcellsanläggningen	Hög	Sannolik	4B
Elektrisk fara från solcellsanläggning	Hög	Osannolik	2B

Baserat på riskbedömningsmatrisen tilldelades det högsta riskindexet solreflektion från solcellsmoduler (4B), störningar i kommunikationssystem (3B) och kollision från fåglar i solcellsanläggningar (4B) som kommer att diskuteras ytterligare.

4.3.1 Risk för bländning

Solreflektion från solpaneler har kategoriserats som en av de största riskerna på flygplatsen. Vid vissa tider på dygnet kan reflektion från solcellsmoduler minska eller störa sikten för piloter eller flygledare (Figur 3). Trots den potentiella risken för flygsäkerheten har många länder inte infört regler som behandlar effekterna av bländning.

Olika faktorer som påverkar förekomsten av bländning från solpaneler på flygplatsen utvärderas i en studie (Sreenath et al., 2021). Placeringen av solcellsanläggningen, solens position, lutningsvinkel, färg och ytstruktur hos solcellsmodulerna nämns som de viktigaste faktorerna som

påverkar bländningen. Olika metoder för att mäta bländning från solcellsanläggningar har presenterats. Studien drog slutsatsen att trots vissa begränsningar (Ho et al., 2011) ger Ho et al-metoden en tillförlitlig indikator för analys av bländning orsakad av solcellsinstallation på flygplatsen. Denna metod är godkänt av FAA i USA och är basen för analysverktyget för solbländning ForgeSolar (ForgeSolar, 2022) som används i denna studie. Mer information om verktyget finns i avsnitt 4.4.1.



Figur 3: PV-reflektion i öppet område

Ett annat sätt att minska bländningsriken är att använda antireflekerande (AR) materialbeläggning. AR-beläggningar kan minska reflektionen till viss del beroende på designspecifikationer. Till exempel har användning av en tunn film av oorganisk oxid i tre lager på ett kiselsubstrat minskat reflektionen från 36% till 4% i våglängdsområdet 300~800 nm (Khan et al., 2019). Även om användning av paneler med AR-beläggning kan vara en partiell lösning för att minska reflektionen, kan det inte helt undvikas, och därför är bländningsanalys nödvändig för att garantera säkerheten på flygplatser. Sammantaget, för att minska potentiella bländningsproblem orsakade av solpaneler på flygplatser rekommenderas följande reducering åtgärder:

- Utför en bländningsanalys för de identifierade platserna
- Använd solpaneler med antireflekerande (AR) och / eller texturerad beläggning
- Om tillämpligt, använd skyddsfilmer eller persienner för kontrolltornet
- Använd specificerade standarder och rekommendationer för design och montering av solpaneler på flygplatsen
- Installera inte solcellsmoduler nära restriktionszonerna på flygplatserna
- Informera flygbranschen om befintliga eller planerade solcellsanläggningen på flygplatsen
- Ändra flygprocedurer för att minimera bländning vid oväntade händelser

4.3.2 EMC risker

I nuläget avråder luftfartsverket installation av solcellsanläggningar inom en radie av 3 kilometer från flygplatsens färd- och manöverområden. På samma sätt avråder de från att installera dessa i närheten av radioanläggningar för luftfart.

Rapporterade incidenter och vetenskapliga rapporter visar att solcellsanläggningar, med deras elektromagnetiska emissioner kan orsaka störningar i radio- och telekommunikationen. En överblick över radiostörningsproblematiken från solcellsanläggningar i såväl Sverige som övriga världen har presenterats i en rapport (Fors et al. 2020). Rapporten pekar på att det inte är klart hur vanligt problemet är och vilka nivåer av störningar det rör sig om för olika typer av anläggningar och tillämpningar.

I en vetenskaplig artikel har elektromagnetiska störningar från solcellsanläggningar på flygledningskommunikation studerats (Stenumgaard and Linder, 2019). Resultaten visar att emissioner från solcellsanläggningar avsevärt kan störa kommunikationssystemet på avstånd kortare än 20–30 meter från Air Traffic Control Tower (ATCT). Även längre avstånd kan orsaka störningar. Därför bör placering av solcellsanläggningar analyseras noggrant för att undvika säkerhetsproblem på flygplatsen.

I en rapport gjord av Elsäkerhetsverket och Försvarsmakten nämns solcellsanläggningar som störningskälla (Elsäkerhetsverket, 2020). Baserad på undersökningar och exempel från verkligheten har flera typer av störningskällor listats i rapporten. Rapportförfattarna har bedömt att EMC-egenskaper kan variera mellan olika solcellsanläggningar och några tydliga brister har upptäckts genom mätningar. Dock har det också nämnts att det finns produkter på marknaden med goda EMC-egenskaper. Kunskapsökning om EMC-störningar, såväl för tillverkare som för leverantörer, behövs. Utredningen framhåller följande åtgärder som måste vidtas:

- Marknaden måste kontrolleras och övervakas regelbunden för att säkerställa att dess aktörer uppfyller EMC-kraven för både individuella komponenter och hela anläggningar.
- De svenska EMC-regelverken när det gäller exempelvis åtkomst och tillträde, kan behöva kompletteringar för att säkerställa att tillsynsmyndigheter har mandat och befogenhet att utföra nödvändiga kontroller.
- Komplettering av befintliga EMC-standarder behövs för att inkludera nya tillämpningar för produkter som kan användas i solcellsanläggningar.

4.3.3 Fågel-flygplan kollisioner

En risk i samband med installationen av PV på flygplatsen ökat antal kollisioner mellan fåglar och flygplan på grund av att omvandling av gräsmarker och tomma områden till solcellsanläggningar kan locka fåglar. En studie utförd av DeVault et al. undersökte omvandlingen av flygplatsgräsmarker till solcellsanläggningar och fann att sådana installationer inte skulle öka risken för kollisioner mellan fåglar och flygplan (DeVault et al., 2014). Baserat på det riskindex som diskuterats tidigare är dock denna risk oacceptabel om begränsningsåtgärder inte vidtas. Därför rekommenderas det att observera fågelaktivitet vid solcellsanläggningar, särskilt under sommar- och regnperioder. Dessutom föreslås installation av avskräckningsanordningar för att undvika fåglar som använder PV anläggningar för skuggning och häckning, vilket ökar

sannolikheten för att fåglar och flygplan kolliderar. Dessa strategier tillsammans med andra strategier presenterade i Tabell 7 kan minska riskerna med solcellsinstallation på flygplatser (Sreenath et al., 2020).

Tabell 7: Begränsningsstrategier för identifierade risker (Sreenath et al., 2020).

Identifierade risker	Föreslagna riskreducerande åtgärder
Penetration av solpaneler i begränsade områden på flygplatsen	<ul style="list-style-type: none"> • Välj en platt eller 0-graders lutning när du installerar solcellsmoduler i närheten av landningsbanor • Undvik landningsbanor och dess omgivning när du väljer en plats för solcellsinstallation.
Oavsiktligt intrång på PV-områden	<ul style="list-style-type: none"> • Öka utrymmet mellan raderna så att räddningsteam kan röra sig fritt inom solcellsanläggningen. • Undvik om möjligt att ha skarpa hörn i solcellspaneler. • Installera barriärer eller stängsel mellan solcellsanläggningen och landningsbanorna
Avlägsnande av komponenter i solcellssystemet	<ul style="list-style-type: none"> • Inspektera skarvar och fästen på solcellsanläggningar regelbundet • Montera ett staket som omger flygplatsens solcellsanläggning
Orsakande av elektrisk fara från solceller	<ul style="list-style-type: none"> • Använd jordkablar inom solcellsanläggningen • Inkludera en DC-brytare • Inspektera och underhåll de elektriska komponenterna i solcellsanläggningen regelbundet

4.4 Metodik för solcellssystemdesign

Inom detta projekt användes ett simuleringsverktyg för att uppskatta elproduktion från solceller samt göra en bländningsbedömning. Använda verktyg och metodiken bakom diskuteras kort i detta avsnitt. Resultaten av simuleringen används som indata för energisystemmodellen. Bländningsanalysen används för att föreslå alternativa PV-designer utan bländning på flygplatser.

4.4.1 Design och simulering

Olika mjukvaruprogram finns tillgängliga för simulering och design av solcellsanläggningar. För närvarande är användningen av dessa verktyg en pålitlig metod för att designa system med en hög precision. Det är dock viktigt att förstå den matematiska grunden bakom verktyget och se till att det är korrekt validerat. Baserat på vår utvärdering och undersökning av tillgängliga verktyg valdes HelioScope från Aurora Inc (HelioScope, 2022).

HelioScope är ett molnbaserat verktyg för modellering av solcellssystem (Guittet and Freeman, 2018). Verktyget är skapat för att simulera elproduktion med solcellsanläggningar för ett visst område baserat på flertalet miljömässiga och tekniska faktorer. Den använder en komponentbaserad modell som simulerar varje elektrisk komponent i solpanelen separat och låter dem interagera realistiskt. Det resulterar i en mer exakt beräkning av förluster och prestandadynamik jämfört med många andra befintliga modeller som ofta förlitar sig på en enda moduls prestanda, samt antar att utdata är proportionell mot fältets storlek och använder typiska antaganden för olika förluster i systemet. Detaljer om den matematiska modellen bakom programvaran finns på HelioScopes hemsida (HelioScope: Mathematical Formulation, 2023).

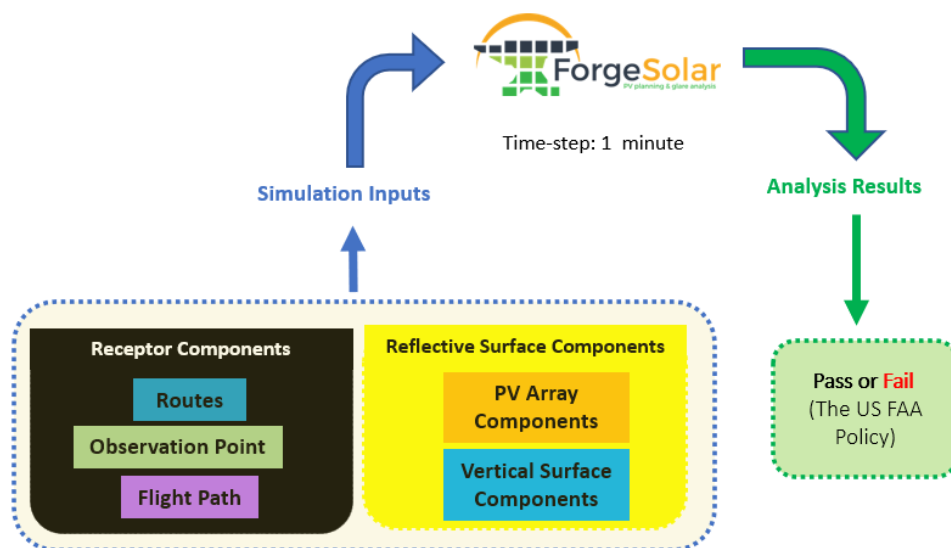
I en mindre studie utförd av USA National Renewable Energy Laboratory (NREL) validerades HelioScope mot uppmätta data (Guittet and Freeman, 2018). Resultaten visar att simuleringsresultat från HelioScope var jämförbara med liknande verktyg med beräknade årliga normaliserade felen från -7,0 % till 4,3 %. Baserat på vår undersökning kan design av solcellssystemet med HelioScope antas resultera i tillförlitliga resultat i den här studien.

4.4.2 Bländningsanalys

Bländningsförutsägelse är avgörande för säker utbyggnad av solcellssystem i flygplatsområden. Mjukvaruverktyg exempelvis ForgeSolar kan användas för att simulera potentiell bländning (ForgeSolar, 2022). Ett mjukvaruprogram kan använda komplexa algoritmer för att utvärdera bländningspåverkan från solcellsinstallationer, året runt, med minutupplösning.

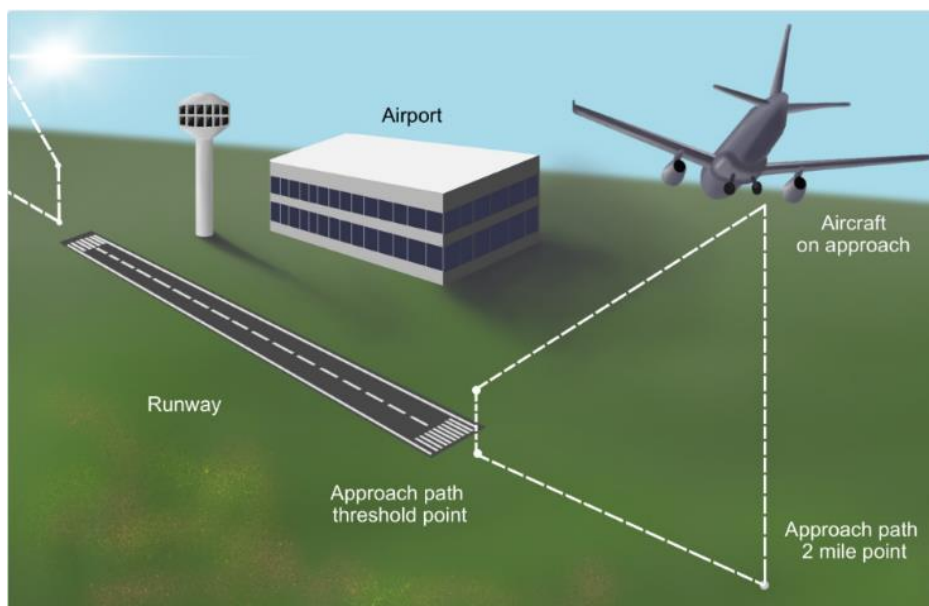
ForgeSolar är en programvara för bedömning och optimering av bländning som förutsäger effekten av bländning från solcellsmoduler på utvalda receptorer och hjälper till att optimera solcellsdesign för att minska bländningsrisker. Det är en kommersiellt licensierad version av programvaran Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT), utvecklad av Sandia National Laboratories (Sandia National Laboratories, 2023), vilken är den första programvaran som godkänts av FAA. ForgeSolar är en förbättring jämfört med SGHAT, med olika förändringar av bländningsbedömningsmetoden och förbättringar av bländningskontrollalgoritmen. Den har dock mer eller mindre samma begränsning som SGHAT och antar klara, soliga dagar, utan atmosfärisk dämpning (Sreenath et al., 2020)

För en korrekt analys är tillförlitliga indata till modellen avgörande. De viktigaste parametrarna som används som indata till ForgeSolar-programvaran i denna studie visas i Figur 4. En kort beskrivning av varje komponent och simuleringsresultat beskrivs här. Utförlig information finns i ForgeSolar Help. (ForgeSolar, 2022)



Figur 4: inmatningsparametrar till ForgeSolar-mjukvaran

Reflective Surface Components inkluderar PV-moduler och vertikala ytor som kan bidra till bländning. Receptor Components inkluderar Routes, Observation Point (OP) och Flight Path som kan utsättas för och påverkas av solbländning. Flight Path kan simulera observatörer som färdas längs olika vägar, såsom järnvägar, vägar och helikopterrutter. OP definieras som platsen för en observatör. Flygledartornet (ATCT) simuleras med denna artikel. 2-miles Flight Path-receptorn (FP) som sträcker sig över 2 miles, efterliknar ett flygplans bana då det följer en rak linje mot landningsbanan (Figur 5)



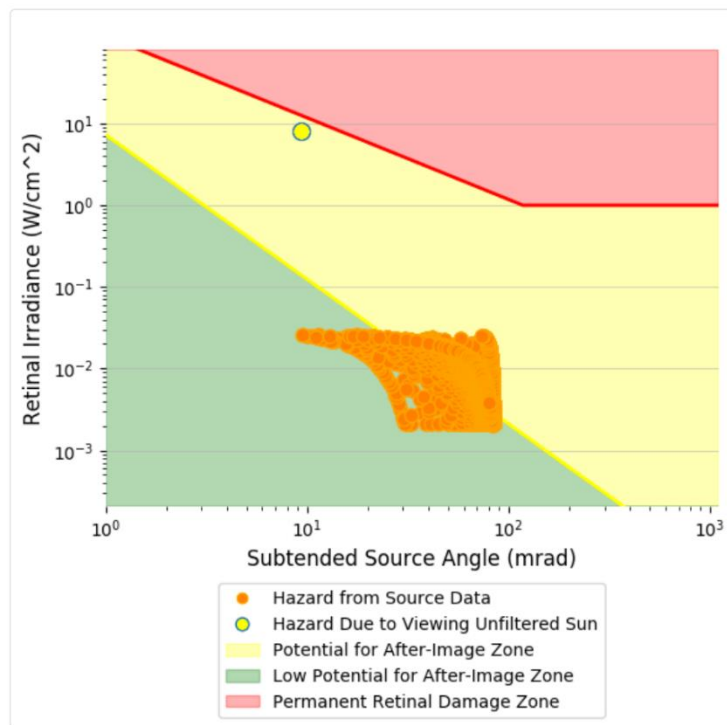
Figur 5: Illustration av flygplan som använder en 2-miles flight path - Bildkällor: ForgeSolar Help

Bländningsriskdiagrammet (Figur 6) visar den potentiella visuella påverkan som orsakas av förutspådd bländning varje minut. X-axeln representerar den subtenderade källvinkeln (eng.: subtended source angle), vilket är vinkeln som täcks av den synliga bländningspunkten. Det är vinkeln mellan de två synlinjerna från en betraktare till de två motsatta kanterna på en förlängd källa, till exempel en ljuskälla eller ett objekt, när den ses från en viss position. Y-axeln representerar den retinala bestrålningen som påverkar observatören. Bländningsriskdiagrammet hjälper till att visualisera effekten av bländning och identifiera dess typ. Diagrammet kartlägger den okulära påverkan mot den subtenderade källvinkeln och retinal irradians.

Den förväntade påverkan av de tre riskzonerna, som representeras av färgerna grönt, gult och rött, har härletts från litteraturen (Ho et al., 2011) och kan hittas i ForgeSolar Help (ForgeSolar, 2022).

Resultaten av analysen, som inkluderar bländningsförutsägelse, består av flera diagram som beskriver den projicerade tidpunkten, varaktigheten och platsen för bländning för varje receptor årligen. Kriterierna för utvärdering av solcellssystemets bländningspåverkan är FAA Glare Policy (Federal Aviation Administration, 2021). Grön bländning har låg potential att orsaka tillfällig efterbild (på engelska: after-image), gul bländning har potential att orsaka tillfällig efterbild och röd bländning kan orsaka permanenta ögonskador. Eftersom solcellsanläggningens reflektioner inte är helt speglande är risken för permanenta ögonskador låg.

FAA-policy från 2013 kräver att ingen bländning av något slag uppstår för flygkontrolltorn, samt endast ”grön” bländning för flygvägar. Den uppdaterade FAA-policy 2021 kräver dock endast det förstnämnda (ForgeSolar, 2022). För att vara på säkra sidan används FAA:s policy från 2013 för bländningsanalysen i detta projekt.



Figur 6: Bländningsrisksdiagram. Bildkälla: ForgeSolar (ForgeSolar, 2022)

4.5 Tekno-ekonomisk modellering av helt år

Med hjälp av uppmätt energianvändning från flygplatserna och modellerade elflyg-, elbils- och PV-profilerna har en tekno-ekonomisk utvärdering gjorts. Syftet med studien är att:

- Kvantifiera konsekvenserna från framtida scenarier med elflyg och elbilsladdning med avseende på energi- och effektbehov från nätet,
- Undersöka vilken nytta solexel kan göra för att minska energibehovet från nätet och möjligheterna att kapa effekttoppar, och
- Undersöka påverkan på elnätet vid användning av stationära batterilager med olika typer av styrningar.

För båda flygplatserna har batterierna styrts på fyra sätt med olika syften:

1. Maximera egenkonsumerad solexel (Fares, 2017) – S_{TZ}
2. Kapning av effekttoppar från nätimport med solexel inkluderat – S_{PS}^{PV}
3. Kapning av effekttoppar utan solexel – S_{PS}
4. En egenframtagen *multi-objective* (S_{MO}) styrning som kombinerar 1) och 2) i syfte att maximera egenkonsumtionen sommartid och kapa effekttoppar vintertid. Här ingår också en säsongsvariation i vilket minsta laddningsinnehåll som eftersträvas.

Mängden solel som används direkt till att täcka lastbehoven (egenkonsumtion) definieras enligt (Luthander, 2015),

$$M(t) = \min(L(t), P(t) + S(t)) \quad (2)$$

där $L(t)$ är lastbehovet, $P(t)$ är elgenerering från solcellsystemet och $S(t)$ är i- och urladdningen från batteriet (positivt= urladdning och negativt = laddning). Andelen PV som används för att täcka lasten beräknas från (2) enligt,

$$\vartheta_{sc} = \frac{\int^T M(t) dt}{\int^T P(t) dt} \quad (3)$$

Ekvation (3) gäller om ingen interaktion sker direkt mellan batteriet och nätet. Om laddningen och urladdning kan ske direkt med nätet kan (3) skrivas om enligt (Ollas, 2018),

$$\vartheta_{sc} = \frac{\int^T M(t) - B(t) dt}{\int^T P(t) dt} \quad (4)$$

där $B(t)$ är interaktionen mellan batteriet och nätet. En relaterad faktor är självförsörjandegraden (eng.: self-sufficiency) som definierar hur stor andel av totala lasten som täcks av el genererad från PV. Genom att byta ut $P(t)$ i nämnaren i (3) och (4) kan man beräkna självförsörjandegraden med respektive utan batteri.

Tabell 8 visar på modelleringsmatrisen för den tekno-ekonomisk utvärderingen av flygplatserna för helåret. Här är S_{ref} det tänkta framtidsscenariet som – förutom referenslasten från avsnitt 4.2 – även inkluderar lastprofilerna för de modellerade elflygen och elbilarna.

Tabell 8: Modelleringsmatris för tekno-ekonomisk utvärdering för helåret.

	S_{BAU}	S_{ref}	S_{PV}	S_{TZ}	S_{MO}	S_{PS}^{PV}	S_{PS}
Referenslast (avsnitt 4.2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elflyg		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elbilar		✓	✓	✓	✓	✓	✓
PV			✓	✓	✓	✓	
Batterilager				✓	✓	✓	✓

4.5.1 Modellering av batterilager – storlek och degradering

Storleksbestämning av batterilagret för respektive flygplats har utgått från två studier för småhus i Sverige (Nyholm, 2016 & Widén, 2009). I (Nyholm, 2016) har man utgått från storleken på solel-anläggningen för att ta fram ett nyckeltal för dimensioneringen av batterilagret enligt

$$RBC = \frac{E_{batt}}{E_{PV}} \quad (5)$$

där E_{batt} är storleken på batteriet och E_{PV} det årliga energiutbytet från solel-anläggningen. Med hjälp av storleken på solel-anläggningen, P_{PV} , och medeleffekten för lasten över året kan en faktor *Array-to-load (ALR)* beräknas från (Widén, 2009) enligt

$$ALR = \frac{P_{PV}}{P_{load}^{avg}}. \quad (6)$$

Med hjälp av den beräknade ALR från (6) och resultaten från varierad batteristorlek i (Nyholm, 2016) kan storleken på batteriet väljas. De modellerade batteristorlekarna för respektive flygplats kan ses i Tabell 9. Effektbegränsningen för upp- och urladdning är satt till 80% av energikapaciteten (0,8C).

Tabell 9 Batteristorlek för respektive flygplats från modellering av helåret.

Flygplats	Batteristorlek [MWh]
Visby Airport	2,2
Skellefteå Airport	1,9

Batteridegraderingen härrör från två faktorer: cyklings- och kalenderåldring. I den här studien har fokus varit på cyklingsåldring som beror av temperatur, tid, *depth-of-discharge* (DoD) och urladdningseffekt. Från (Bloom, 2001 & Wang, 2011) kan den relativa degraderingen beräknas enligt

$$q_{loss}(t) = B \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) A_h(t)^z \quad (7)$$

där R är den allmänna gaskonstanten, T absoluta temperaturen (K) och z *power law factor*. Faktorerna B och E_a har parametriserats i (Wang, 2011) för olika urladdningseffekter och temperaturer. Cyklingsfaktorn, A_h , i (7) beräknas enligt

$$A_h(t) = n(t) \cdot DoD \cdot Q_{batt} \quad (8)$$

där $n(t)$ är cyklingsnumret och Q_{batt} batteriets nominella kapacitet (i Ah).

4.5.2 Ekonomisk utvärdering

Den ekonomiska utvärderingen är gjord med avseende på återbetalningstid (PBP) för soles- och batteriinvesteringen. Återbetalningstiden (PBP) har beräknats med hjälp av payback-metoden enligt

$$PBP = \frac{I_0}{C_i} \quad (9)$$

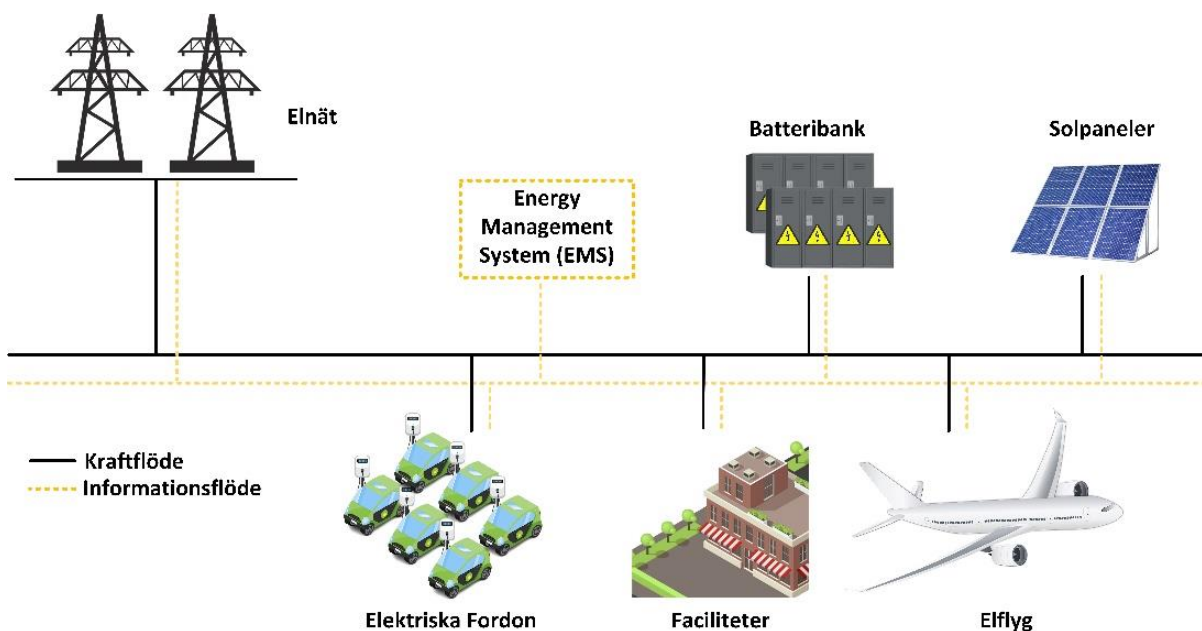
där I_0 är initiala investeringen och C_i det positiva kassaflödet. Det senare är beräknat i förhållande till det framtida referensfallet, S_{ref} , och investeringen inkluderar både solesanläggningen (\$0,635/W) och batterilagret (\$223/kWh). Inkluderandet av soles ger främst en besparing av köpt el från egenkonsumtion (Luthander, 2015) och beroende på vald styrstrategi för batteriet så fås även en besparing i effektkostnaden från en antagen effekttariff (Γ_t) som debiteras utifrån den högsta effekttoppen varje månad. Priset för köpt el är beräknat utifrån NordPools spotpris med tillhörande tillägg samt 25% moms. Värdet av såld soles har likställts med spotpriset för aktuell timme.

4.6 Intra-dag modell över elektrifierad flygplats

För att få en tydlig bild över hur den elektrifierade flygplatsens effekttoppar och elförbrukning kan förändras under ett dygn konstruerades en modell som uppskattade flygplatsens effektbehov från

elnätet. Tidshorizonten för denna modell var ett dygn, där tidsteget mellan två indata-punkter var en minut. Genom att simulera på minutbasis erhålls en bättre förståelse för systemets tekniska aspekter jämfört med timbasis, exempelvis vilka säkringar eller kapacitet som ledarna behöver ha för att förse flygplatsen med tillräcklig effekt.

Intra-dag modellen består av fem olika subsystem, där var och en av dessa symboliserar en viss typ av elförbrukning eller elproduktion. Tre av dessa subsystem var rena laster, nämligen elförbrukningen från laddning av elflyg, elbilsaddning samt flygplatsen med dess faciliteter. Det fjärde subsystemet var elproduktionen från en solcellsanläggning. Det femte och sista subsystemet var ett BESS som antingen krävde el för att ladda eller som kunde förse flygplatsen med effekt vid urladdning. En överskådlig bild över hur intra-dag modellen designas presenteras i Figur 7.



Figur 7: Illustration över Intra-dag modellen för flygplatsen och dess subsystem.

Intra-dag modellen är baserad på liknande indata som den tekno-ekonomiska modellen, dock utfördes vissa modifikationer på indata för att anpassa modellen till en minutbaserad modell. Exempelvis saknades i vissa fall data med tidsupplösning på 1 minut. En beskrivning av hur de olika subsystemen konstruerades samt hur data anpassats för att kunna tillämpas i modellen presenteras i avsnitt 4.6.1, 4.6.2 och 4.6.3.

Med hjälp av intra-dag modellen simulerades fyra olika scenarion. Det första scenariot, kallat referensfall, var en simulering med enbart elkonsumention från flygplatsens faciliteter samt laddning av elfordon och elflyg. Detta scenario togs fram för att kunna jämföra eventuella skillnader när övriga subsystem integrerades i modellen. I scenario två undersöktes hur PV kan påverka flygplatsens belastning på elnätet, och scenario tre när ett BESS anslöts till flygplatsen. Avslutningsvis simulerades scenario fyra där både PV och ett BESS används vid flygplatsen för att undersöka eventuella synergier som de kan ge. I Tabell 10 ges en kort övergripande beskrivning av samtliga scenarion som undersöktes i intra-dag modellen.

Tabell 10: Beskrivning av scenarion som simulerades med Intra-dag-modellen för flygplatserna.

Scenarionamn	Beskrivning	Inkluderade subsystem från Figur 7
Ref	Referensfall av en elektrifierad flygplats	Elflyg, Faciliteter och Elektriska Fordon
Ref + BESS + PV	Elektrifierad flygplats integrerad med PV och ett BESS.	Elflyg, Faciliteter, Elektriska Fordon, Solpaneler och Batteribank
Ref + PV	Elektrifierad flygplats integrerad med PV	Elflyg, Faciliteter och Elektriska Fordon och Solpaneler
Ref + BESS	Elektrifierad flygplats integrerad med ett BESS.	Elflyg, Faciliteter Elektriska Fordon och Batteribank

4.6.1 Elförbrukning från laddning av elflyg, elbilsladdning och flygplatsens faciliteter.

För att få ett mått på elförbrukningen på flygplatsen användes indata för Visby och Skellefteås elförbrukning i kWh, se avsnitt 4.2. Med hjälp av hela datasetet togs en syntetisk lastprofil fram för respektive flygplats. Indata sorterades först in timvis, och därefter identifierades värdet på den 95%-kvantilen för varje timme. Genom detta skapades en höglastprofil för respektive flygplats. Mätpunkterna i höglastprofilen applicerades därefter i 60 tidssteg vardera, detta för att anpassa timdata till minutdata. I denna grupp identifierades därefter värdet på den 95%-kvantilen. Detta gjordes för alla timmar på ett dygn, vilket formade ett höglastscenario för flygplatsens elförbrukning i kWh. För att uppskatta effektbehovet per minut beräknades medeleffekten av varje timme ut och applicerades i 60 tidssteg, eller 60 minuter. För elflyget och elbilsladdningen gjordes inga anpassningar eftersom data redan hade minutupplösning.

4.6.2 Solceller

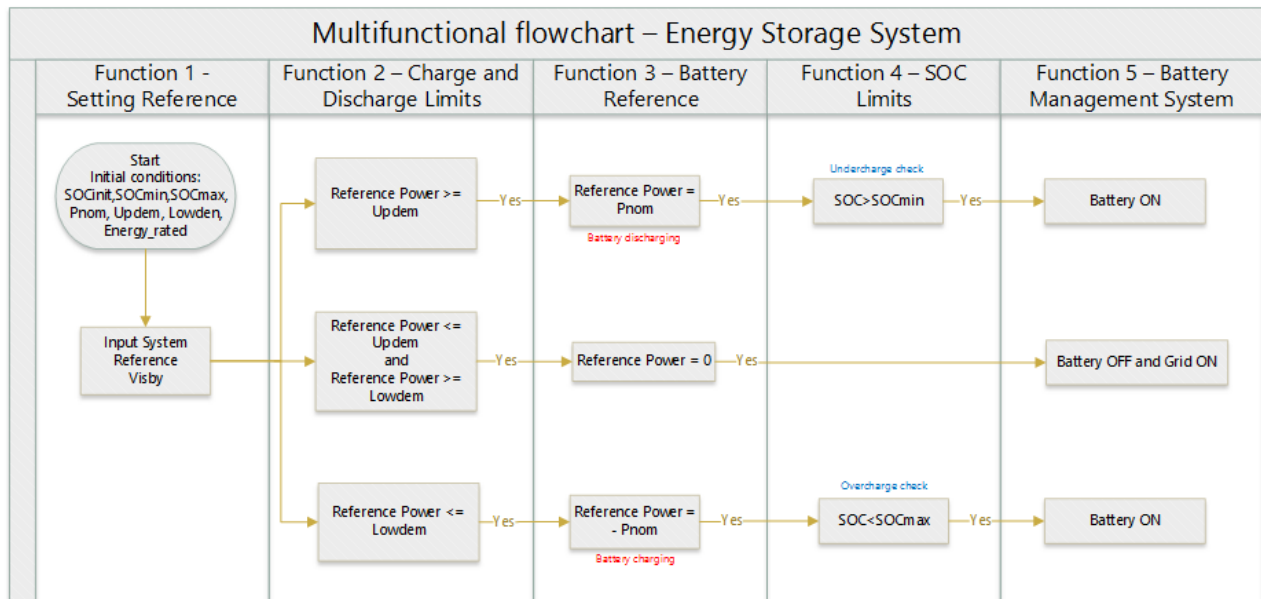
Elproduktionen av solcellerna uppskattades med hjälp av verktyget PVGIS, ett webbaserat verktyg framtaget av *European commission's joint research centre*. Genom detta kunde data erhållas för solinstrålningen per timme över Visby och Skellefteås flygplatser. Solinstrålningen multiplicerades därefter med area på flygplatsen samt värden motsvarande den totala verkningsgraden av solcellerna. Genom detta kunde elproduktionen från solcellerna uppskattas för varje timme under ett dygn. En fördel med att använda denna metod är att en uppskattning för en solcellsanläggnings elproduktion är enkelt att göra, dock blir uppskattningen känslig för valet av solcellernas verkningsgrad. I detta fall fanns möjligheten att validera elproduktionen från solcellerna med den årliga elproduktionen från den tekno-ekonomiska modellen, vilket minskade osäkerheten kring valet av verkningsgrad.

Det sista steget som återstod gällande elproduktionen från solcellerna var att omvandla detta till ett tidssteg på en minut istället för en timme. Detta genomfördes genom att ta den genomsnittliga effekten för en timme på ett dygn och använda detta i 60 tidssteg med en minuts intervall.

4.6.3 Design av BESS

BESS som användes i intra-dag modellen styrs utifrån tre bestämda kriterier. Det första var att batteriet skulle upp- eller urladdas givet en viss elkonsumtion från övriga subsystem. När BESS behövde agera bestämdes av två gränsvärden för effekten, om effektbehovet översteg det övre gränsvärdet urladdades batteriet, om effektbehovet var mindre än det lägre gränsvärdet började det istället att ladda. I händelse att effektbehovet var mellan de två gränsvärdena var BESS inaktivt.

Den effekt som batteriet levererade eller laddade följde en “load follow”-princip, där batteriet enbart balanserade med effekt till närmaste gränsvärde. Det andra kriteriet var att batteriet enbart kunde laddas eller urladdas med en maximal effekt. Sattes denna gräns till exempelvis 200kW kunde batteriet inte leverera mer än 200kW även om mer skulle behövas för att uppfylla det första kriteriet. Det tredje och sista kriteriet var att batteriet enbart fick ha ett State-of-Charge (SoC), uppladdningsnivå relativt total tillgänglig batterikapacitet, inom ett givet intervall. Utifrån dessa tre kriterier arbetade BESS för att minimera toppeffekter från flygplatsen samtidigt som den erhöll ett elöverskott jämfört med början av den simulerade dagen. En illustration över de olika funktionerna av BESS presenteras i Figur 8.

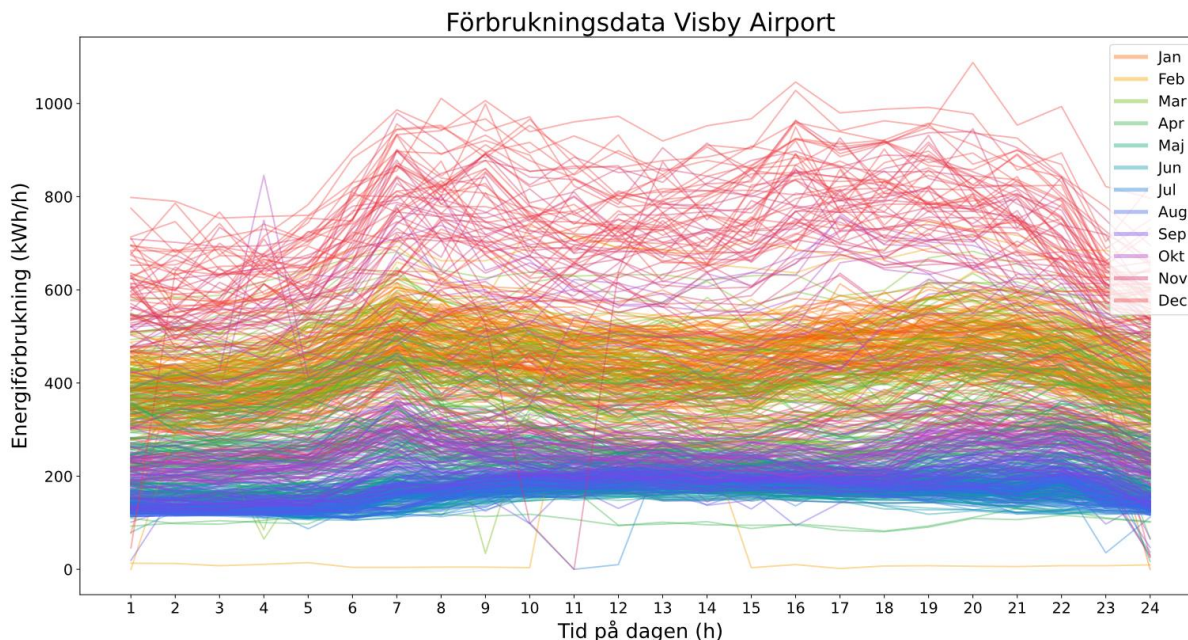


Figur 8: Flödesschema över funktionerna för BESS.

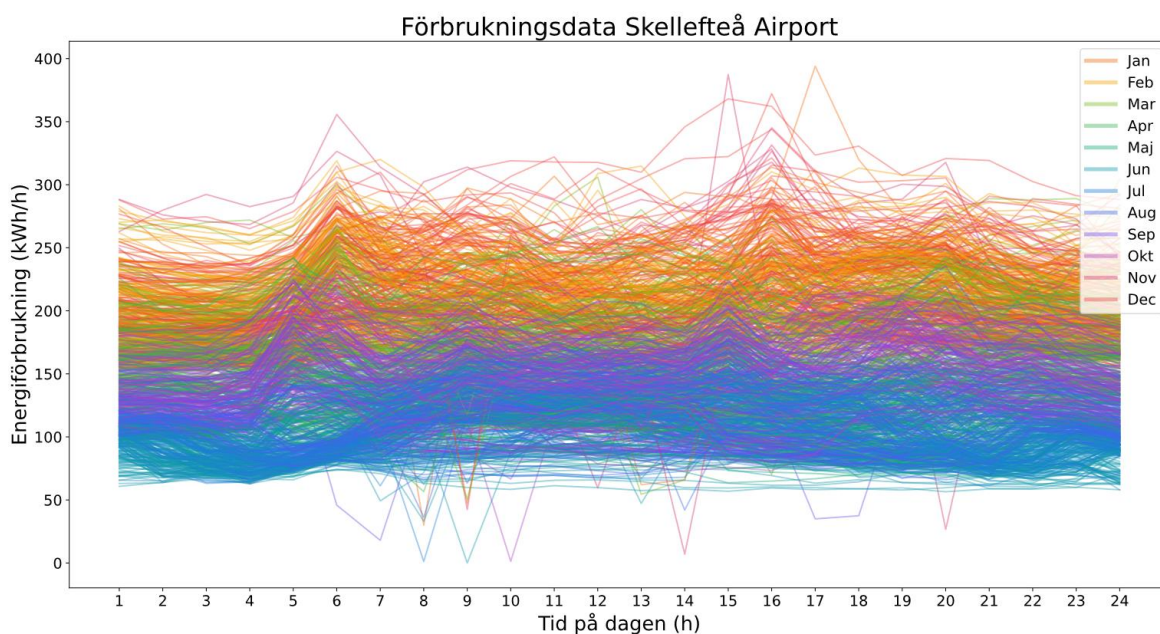
5 Resultat

5.1 Flygplatsernas nuvarande energianvändning

I Figur 9 och Figur 10 visas erhållna data för timförbrukning för Visby Airport under perioden (2018-01-01–2019-12-31) respektive Skellefteå Airport (2020-01-01– 2022-10-31). Färkodningen visar vilken månad på året som varje datum och dess ingående värden tillhör. Dessa data används som underlag för ”business-as-usual” scenarier för flygplatserna i fortsatta energisystemsimuleringar.



Figur 9: Timvis energiförbrukning [kWh/h] för perioden 2018-01-01–2019-12-31 enligt erhållet data från Visby Airport.



Figur 10: Timvis energiförbrukning [kWh/h] för perioden 2020-01-01–2022-10-30 enligt erhållet data från Skellefteå Airport.

5.2 Scenarioutveckling och effektbehov för elflyg

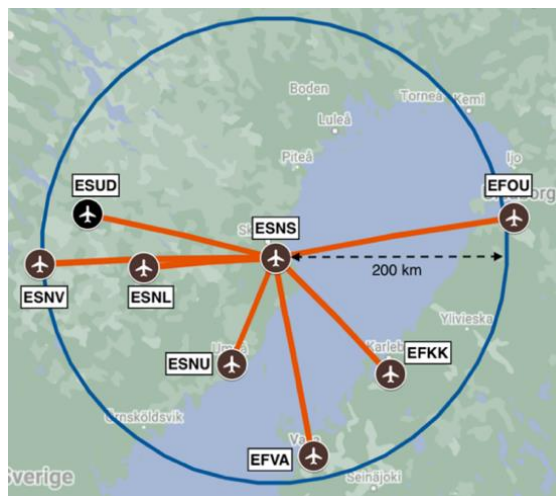
5.2.1 Skellefteå Airport

I dagsläget är flygförbindelsen med Stockholm mest förekommande, vilket är en flygsträcka på cirka 600 km och därmed sannolikt för långt för långt för elflygets initiala räckvidd. Av denna anledning har elflygscenariot för Skellefteå Airport konstruerats utifrån hypotesen om att ett delvis helt nytt regionalt resbehov skulle kunna uppstå längs de sju föreslagna förbindelserna i Figur 11, snarare

än att ersätta delar av dagens flygresor med elflyg. Dock har schemalaggningsen av elflyget gjorts med hänsyn till att befintlig förbindelse med Stockholm fortfarande kommer göra Skellefteå Airport till en viktig anslutningspunkt där resenärer vill byta flyg.

Förbindelser med följande flygplatser (Namn; ICAO-kod) undersöks för Skellefteå Airport (ICAO-kod: ESNS);

- Umeå; ESNU,
- Vilhelmina-Sagadal; ESNV,
- Storuman; ESUD,
- Lycksele; ESNL,
- Vasa; EFVA,
- Uleåborg; EFOU,
- Karleby-Jakobstad; EFKK



Figur 11: Elflygförbindelser i framtaget scenario med Skellefteå Airport som regional hubb.

I Tabell 11 nedan syns distans samt resulterande flygtid och energiförbrukning per förbindelse i föreslaget system. Värden är erhållna med hjälp av MODELflyg.

Tabell 11: Simulerad flygsträcka, flygtid och energiförbrukning för elflygförbindelserna med Skellefteå Airport. *Error! Reference source not found.*

Förbindelse	Distans (km)	Flygtid (minuter)	Energiförbrukning (kWh)
ESNS – ESNU	108	30	193
ESNS – ESNV	218	48	378
ESNS – ESUD	178	41	311
ESNS – ESNL	122	32	219
ESNS – EFVA	193	44	330
ESNS – EFOU	222	49	377
ESNS – EFKK	153	37	266

Totalt simulerades 12 flygningar per riktning och dygn, vilket uppskattningsvis skulle kunna möta en efterfrågan motsvarande cirka 150–200 resenärer per riktning och dygn beroende på beläggningen av elflygplanen. Ett antal ”typiska” ankomst- och avgångstider för dagens förbindelser med Stockholm har identifierats enligt Tabell 12 vilka delvis styr schemalaggningsen (Skellefteå Airport, 2023). Ett minimum på 30 minuter har antagits för att inkommande resenärer med elflyget ska ges möjlighet att hinna byta till flyg vidare mot Stockholm, eller omvänt för att inkommande resenärer från Stockholm ska hinna byta till elflyg. I Tabell 11 syns att flygtiden på inkluderade elflygförbindelser är som mest cirka 50 minuter, denna siffra har använts för att ”baklänges” räkna ut när elflygen senast måste avgå för att resenärerna ska hinna med byte till flyg mot Stockholm vid ankomst till Skellefteå Airport i Tabell 12.

Tabell 12: Exempel på existerande avgångs- och ankomsttider till/från Stockholm, samt resulterande villkor för när elflyget får ankomma respektive avgå från Skellefteå Airport för att resenärer ska hinna med byte.

AVGÅNGAR			
Tid	Till	Senast ankommande elflyg ESNS	Senast avgående elflyg från orter
09.50	Stockholm	09.20	08.30
19.30	Stockholm	19.10	18.20
ANKOMSTER			
Tid	Från	Tidigast avgående elflyg ESNS	
09.20	Stockholm	09.50	
19.00	Stockholm	19.30	

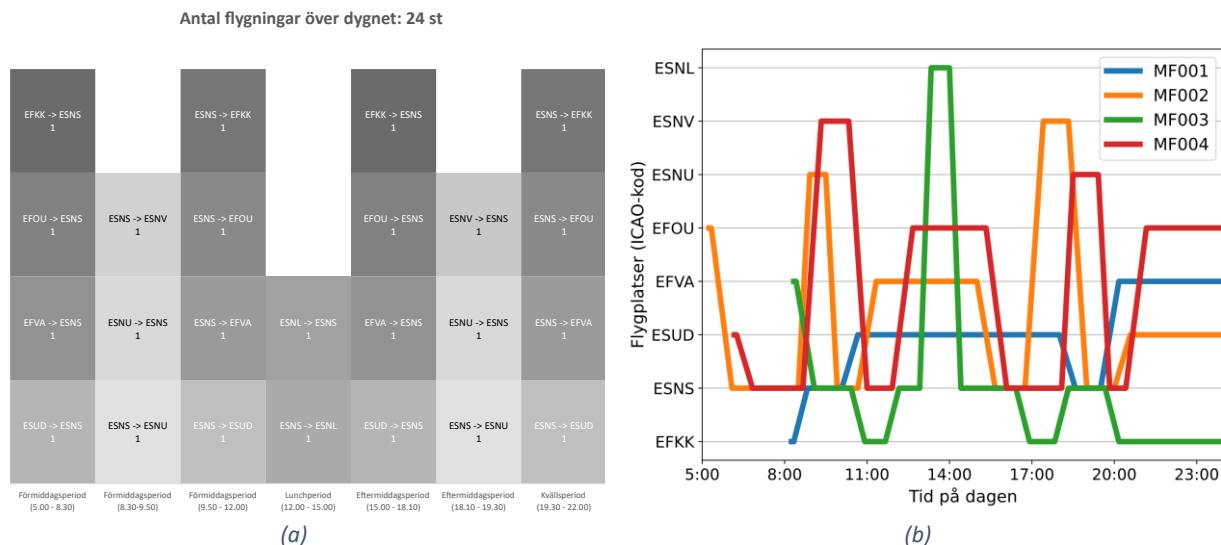
För några av de inkluderade flygplatserna finns det redan idag andra inrikesförbindelser med Stockholm. Exempelvis har Umeå Airport direktflyg till både Stockholm Arlanda och Bromma (Swedavia Airports, 2023a), och flygbolaget Amapola har befintliga förbindelser med Stockholm Arlanda via Lycksele och Vilhelmina (Amapola, 2023). Följaktligen anses inte schemaläggning av nytt elflyg till/från dessa orter behöva synka med utgående och inkommande flyg till/från Stockholm på Skellefteå Airport, utan kan istället spridas ut för att minska risken att många elflygplan behöver laddas samtidigt.

I tidigare nämnda MODELflyg finns det inbyggt stöd för schemaläggning av elflygtrafik genom matematisk optimering. Denna optimering tar som input en fördelning som beskriver hur många flygningar som önskas, på vilka förbindelser, och inom vilka tidsperioder på dygnet (Figur 12a). Målfunktionen för optimeringen är att uppfylla denna ”efterfrågan” på flygningar med så få elflygplan som möjligt, vilket indirekt betyder att flygplanen är i luften så mycket som möjligt och får således högre nyttjande. Mer detaljer om denna optimeringsmodell finns i slutrapporten för MODELflyg (Alfredsson et al, 2022). I Figur 12b ges en representation av resulterande optimerad schemaläggning. Som syns krävdes i detta scenario fyra elflygplan (MF001-MF004) för att lyckas möta önskad efterfrågan enligt önskad fördelning. Flygningar representeras av diagonala linjer mellan flygplatser, medan turnaround-tid vid destination (möjlig tid för laddning) representeras av horisontella linjer på en och samma flygplats. Schemaläggningen sker bland annat med hänsyn till att alla flygplan ska hinna ladda färdigt före nästa avgång.

Laddning simuleras med tre olika metoder; (i) oberoende snabbbladdning, där flygplanen laddar med maximalt tillåten hastighet (C-rate) från ankomst till dess att batteriet är fulladdat, (ii) smartladdning, där en heuristisk algoritm iterativt begränsar den effekt som laddarna ger ifrån sig i varje given tidpunkt med målsättningen att begränsa det summerade effekt-taket på flygplatsen till en definierad målkurva, och (iii) där ett stationärt batterilager adderats till smartladdningen för att stötta med effekt då smartladdningen inte lyckas nå målkurvan. Målkurvan i sig kan designas på olika vis för att uppnå önskad distribution av lastkurvan på flygplatsen, exempelvis genom att styra mer mot tider då lokal elproduktion är hög, om det finns. Mer information om laddningsmetoderna och hur de kan anpassas finns att läsa i (Alfredsson et al, 2022).

I Figur 13 syns aggregerade lastkurvor för Skellefteå Airport för laddning av besökande elflygplan. Oberoende snabbbladdning representeras som grå kurva, endast smartladdning som grön, och smartladdning plus stationärt batterilager (BESS) som röd. Dessa kurvor representerar alltså den

effekt som det omkringliggande elnätet kommer belastas för att möta laddningsbehovet. Den svarta linjen representerar BESS upp-/urladdningseffekter, där urladdning framförallt syns under de tidsperioder då effekttoppar fortfarande återstår efter smartladdning. I Figur 14 syns hur SoC-nivån i BESS varierar under dagen som resultat av upp-/urladdningsmönstret. För analysen valdes här ett BESS med kapaciteten 500 kWh och maximala upp-/urladdningseffekter på 500 kW (=1C), samt ett startvärde på 50% SoC i början av dagen.

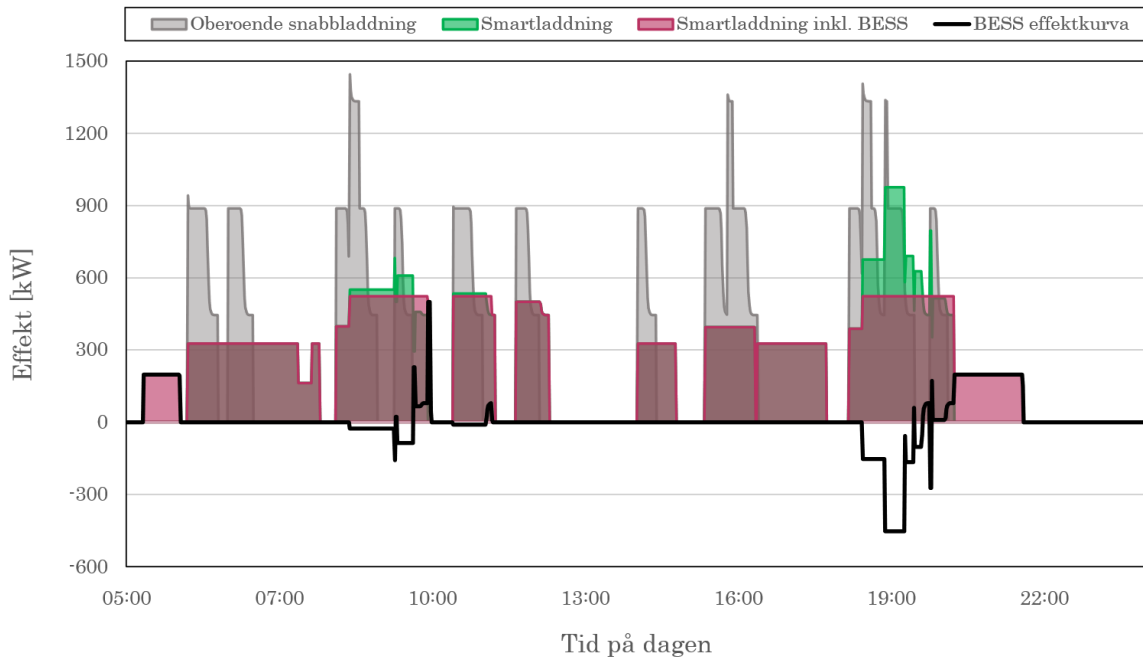


Figur 12: (a) Önskat behov av flygningar per förbindelse och tidperiod för Skellefteå Airport fallstudien, samt (b) resulterande optimerat flygschema för att möta önskat behov med så få elflygplan som möjligt.

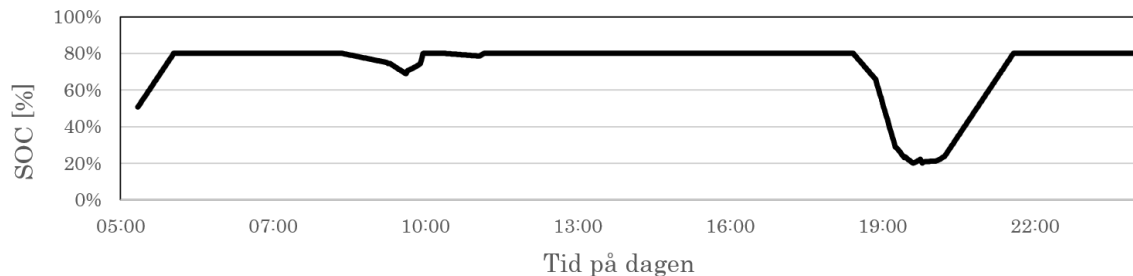
I scenariot med oberoende snabbbladdning observeras en maximal effekttopp på drygt 1,4 MW. Med smartladdning kunde effekttopparna reduceras bortsett från under kvällsperioden då maximalt cirka 1,0 MW syns. Med stöd från BESS kunde effektlasten reduceras ytterligare till maximalt cirka 0,5 MW. Eftersom elflygladdning endast är en del i det energisystem som ingår i simuleringarna, där även styrstrategier med BESS och lokal elproduktion undersöks på systemnivå, så har ”worst-case” resultatet för oberoende snabbbladdning i Figur 13 använts som input till övriga modelleringstudier.

5.2.2 Visby Airport

För Visby Airport har ett liknande framtidsscenario för elflyget tagits fram, som involverar dels existerande flygförbindelse med Stockholm Bromma (ESSB), dels fem nya förbindelser med Stockholm Skavsta (ESKN), Norrköping-Kungsängen (ESSP), Linköping/SAAB (ESSL), Västervik (ESSW), samt Kalmar (ESMQ). I scenariot undersöks ett schema med 16 elflygningar per dag och riktning (ger totalt 32 elflygningar). I Figur 15 syns önskad fördelning av elflygningar för detta scenario.



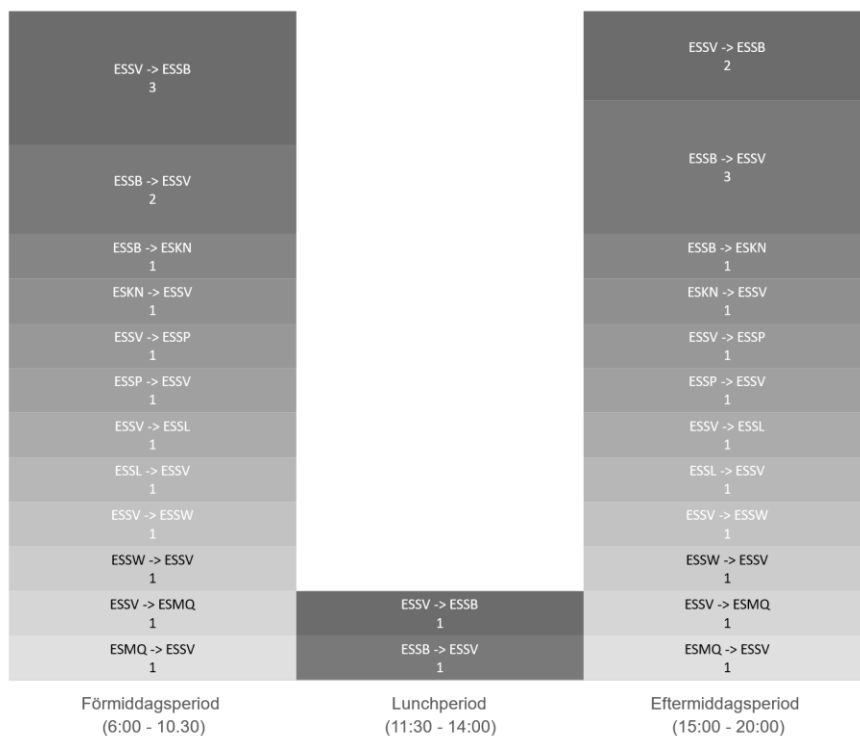
Figur 13: Resulterande aggregerat effektbehov från elnät över dygnet för laddning av elflygplan på Skellefteå Airport. Presenterat med tre olika metoder (oberoende snabbbladdning, smartladdning och smartladdning inkl. BESS). Vid nyttjande av BESS visas även dess effektkurva (upp-/urladdningsmönster).



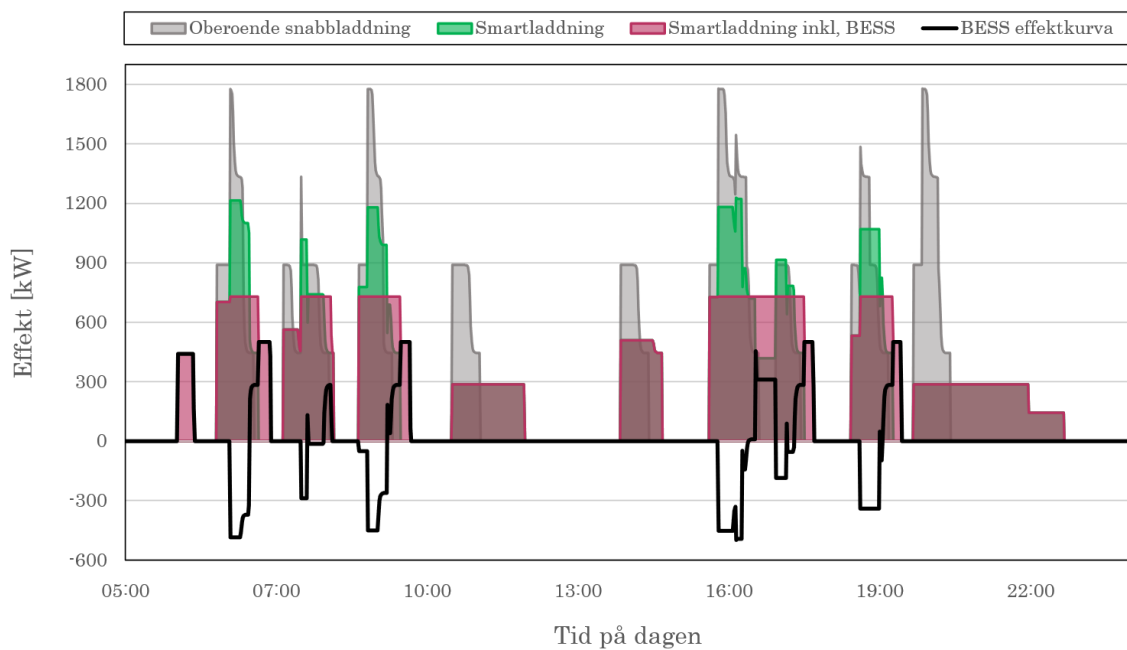
Figur 14: Resulterande SoC-kurva över dygnet för BESS på Skellefteå Airport i det fall som det nyttjas i samband med smartladdning av elflyget. Specifikationerna för BESS är 500 kWh och 1C maximal upp-/urladdningshastighet.

Samma metoder som för Skellefteå Airport har använts för att skapa scenariot även här (fördelning av önskad efterfrågan, optimering av schemaläggning, flyg- och laddningssimuleringar). Resulterande lastkurvor för Visby Airport i exemplet för denna rapport syns i Figur 16, där oberoende snabbbladdning krävde maximalt cirka 1,8 MW. Användande av smartladdning resulterade i maximalt drygt 1,2 MW, medan tillägg av BESS begränsa lastkurvan till maximalt 0,75 MW (även här användes ett BESS med 500 kWh kapacitet och 500 kW maximal upp-/urladdningseffekt). Vidare syns i Figur 17 hur SoC nivån hos BESS varierar under dagen som resultat av upp-/urladdningsmönstret (även här användes 50% som startvärde för SoC-nivån).

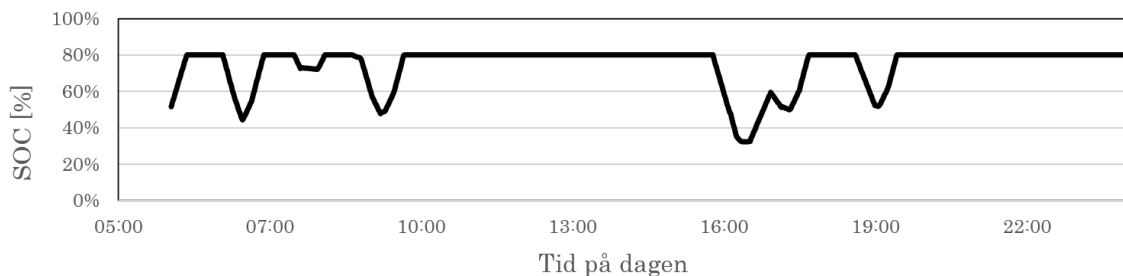
Antal flygningar över dygnet: 32 st



Figur 15: Önskat behov av flygningar per förbindelse och tidperiod för Visby Airport fallstudien.



Figur 16: Resultande aggregerat effektbehov från elnät över dygnet för laddning av elflygplan på Visby Airport. Presenterat med tre olika metoder (oberoende snabbladdning, smartladdning och smartladdning inkl. BESS). Vid nyttjande av BESS visas även dess effektkurva (upp-/urladdningsmönster).



Figur 17: Resultande SoC-kurva över dygnet för BESS på Skellefteå Airport i det fall som det nyttjas i samband med smartladdning av elflyget. Specifikationerna för BESS är 500 kWh och 1C maximal upp-/urladdningshastighet.

5.3 Laddning av parkerade personbilar

5.3.1 Skellefteå Airport

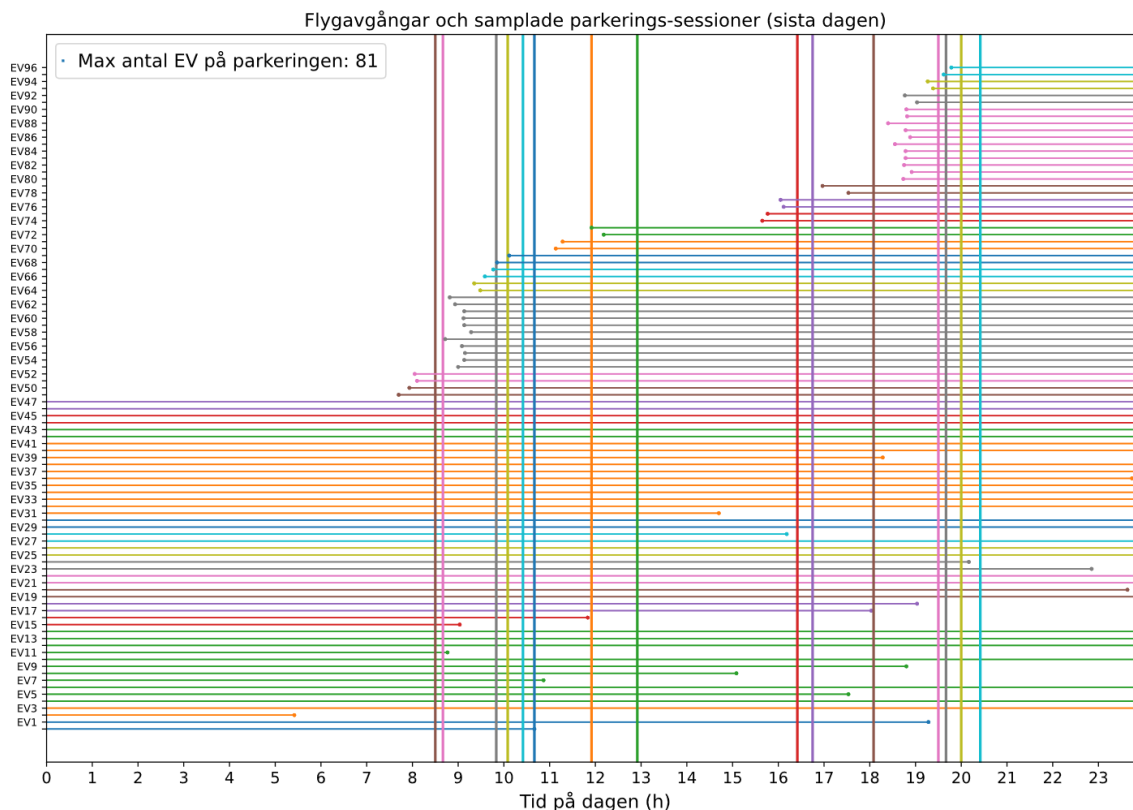
För Skellefteå Airport har värden enligt Tabell 13 använts i (1) för att beräkna antalet laddbara bilar som ankommer till flygplatsparkeringen inför varje flygavgång. Ett framtidsscenario testas där 25% av bilflottan är elektrifierad. Övriga parametervärden är antaganden utifrån statistik eller i dialog med flygplatsrepresentanter. Med dessa parametervärden fås antal ankommande elbilar per flygavgång (N_{EV}) i (11) respektive (2) inför avgångar med konventionella (dagens) flygplan respektive mindre elflygplan.

Tabell 13: Parametervärden för Skellefteå Airport som används för beräkning av antal ankommande elbilar inför respektive flygavgång.

Parameter	Värde
$N_{seat,ac}$	Konventionella flygplan; 180 (typiskt Airbus A320)
	Elflygplan; 19
CF_{ac}	65%
$S_{pax,veh}$	50%
$N_{pax,veh}$	1,4
S_e	25%

För att ta fram ett avgångsschema för flyget som ligger till grund för sampling av ankommande laddbara bilar används tidigare utvecklade elflygscenarier samt avgångstider för befintligt flyg till Stockholm (se avsnitt 5.2.1). Inför varje flygavgång samplas N_{EV} laddbara bilar utifrån fördelningsfunktionerna i Figur 1. I Figur 18 presenteras resultaten av parkeringsmönster i en simulering där 25% av personbilsflottan är elektrifierad, vilket betyder att i genomsnitt var fjärde bil som anländer till flygplatsen är laddbar. De vertikala färgade linjerna representerar tidpunkter för flygavgångar, medan de horisontella färgade linjerna representerar parkeringssessioner för ankommande laddbara bilar. Dagen som visas i figuren är den sista dagen i simuleringen, eftersom parkeringssessioner kan sträcka sig över flera dagar och sista dagen definieras som dagen då alla parkeringssessioner som påbörjades första dagen har avslutats. Det antas att varje dag har samma flygschema för att möjliggöra sampling av nya parkeringssessioner för varje dag och därmed ta hänsyn till det totala antalet samtidiga parkeringssessioner. Figuren visar att det som mest finns 81

laddbara bilar parkerade på flygplatsen samtidigt, vilket innebär att det skulle krävas lika många laddare (eller laddningsuttag) för att kunna ladda alla bilar samtidigt.



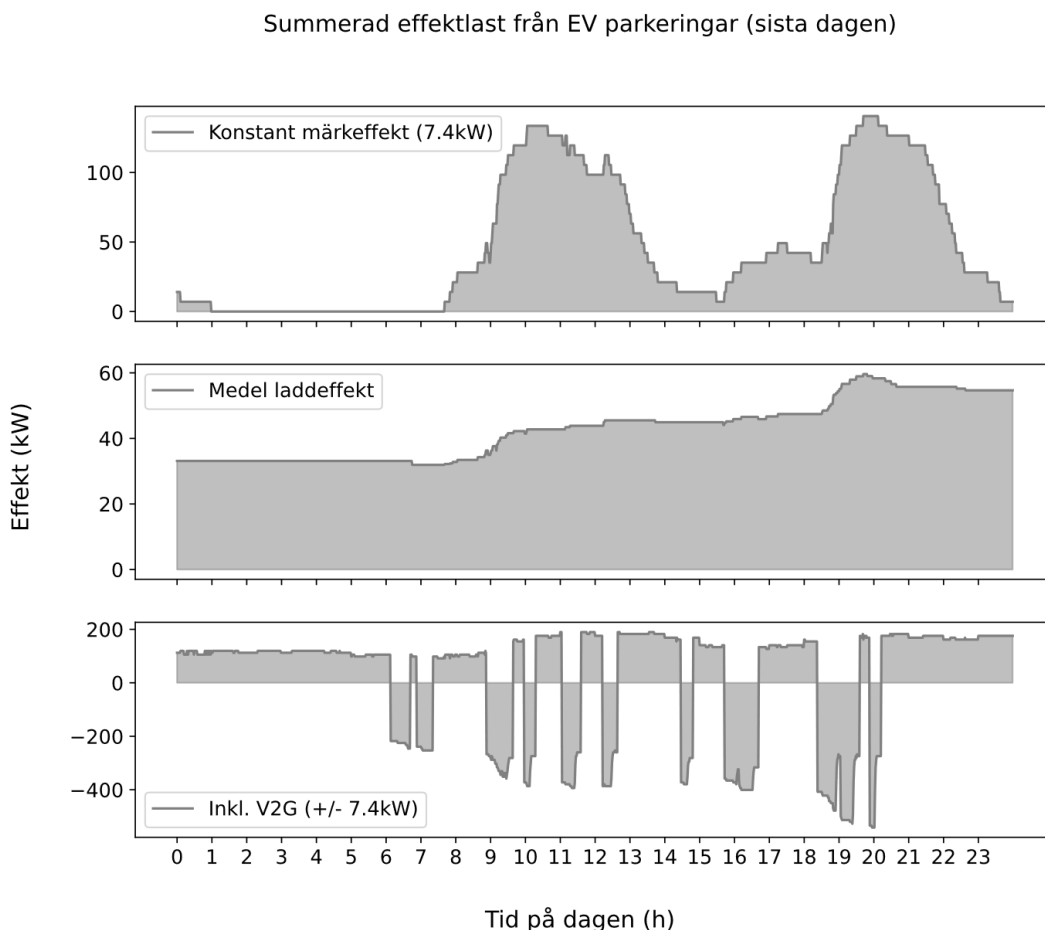
Figur 18: Resulterande parkeringsschema för laddbara bilar på Skellefteå Airport. Baserat på antal ankommande elbilar per flygavgång och flygschemat för fallstudien.

I dialog med flygplatsen framgår att det idag står runt 250 respektive 350–400 personbilar parkerade vintertid respektive sommartid på flygplatsen. Om de maximalt 81 överlappande parkeringssessionerna med laddbara bilar ovan representerar cirka 25% av bilflottan så blir den totala summan 324 ($81/0,25$), men kan variera beroende på hur parkeringsmönstret ser ut för alla fordon.

För beräkning av energibehov vid ankomst används samplat SoC-värde från normalfördelningskurvan i Figur 1, samt ett viktat medel för batteristorlek baserat på statistik gällande de 10 vanligast förekommande elbilarna i Sverige idag (Power Circle, 2023) och standard batteristorlekar för respektive (Electric Vehicle Database, 2023). Uppladdning simuleras enligt tre olika strategier för varje parkerad laddbar bil i mängden, följt av en summering av all laddning per tidssteg (minutbaserat) över hela dygnet, se Figur 19. Angiven märkeffekt för laddare är i beräkningarna satt till 7,4 kW, samt att förluster mellan laddare och bilbatteri är satt till 5%. Detta resulterar alltså i en maximal netto-effekttillförsel på 7,03 kW per bilbatteri.

Lastkurvorna för de olika laddningsstrategierna visar hur flygplatsens behov av effektkapacitet uppskattningsvis skulle variera över dygnet för att möjliggöra elbilsladdning. I det fall då samtliga

laddbara bilar använder laddarnas angivna märkeffekt från parkeringens start tills fulladdat batteri så blir resulterande maximala effektlast cirka 140–150 kW. Om varje bil istället laddar med precis den effekt som krävs för att ha ett fulladdat batteri vid parkeringstidens slut ("medel" i Figur 19) så sprids lastkurvan ut och maximalt nås en effektlast på cirka 60 kW. Slutligen syns att samordnad urladdning (V2G) av bilarnas batterier om möjligt skulle kunna stötta flygplatsen med upp till 500 kW (indikerat som negativt värde) vid tillfällena då andra laster är höga. Detta dock på bekostnad av att fler bilar behöver laddas samtidigt vid andra tider och vi ser uppskattningsvis en maximal effektlast på strax över den förstnämnda metoden. För V2G-alternativet används 20% som minsta acceptabla SoC-nivå i bilarnas batterier, samt att varje bil fortfarande ska ha fullt batteri (definierat som SoC = 90%) då parkeringen avslutas, enligt beskriven metodik i avsnitt 4.2.



Figur 19: Resultande effektkurvor för laddning av parkerade elbilar på Skellefteå Airport enligt parkeringsschemat i Figur 18. Resultatet för tre olika laddningsstrategier presenteras (laddning med konstant märkeffekt, medel laddeffekt, samt laddning med konstant märkeffekt inklusive V2G).

5.3.2 Visby Airport

För Visby Airport har parametervärden enligt Tabell 14 använts i (1) för att beräkna antalet laddbara bilar som ankommer till flygplatsparkeringen inför varje flygavgång. Ett framtidsscenario testas där 25% av bilflottan är elektrifierad. Övriga parametervärden är antaganden utifrån statistik eller i dialog med flygplatsrepresentanter. Med dessa parametervärden

resulterar avrundat uppåt antal ankommande elbilar per flygavgång (N_{EV}) i (4) respektive (1) inför avgångar med konventionella (dagens) flygplan respektive mindre elflygplan.

Tabell 14: Parametervärden för Visby Airport som används för beräkning av antal ankommande elbilar inför respektive flygavgång.

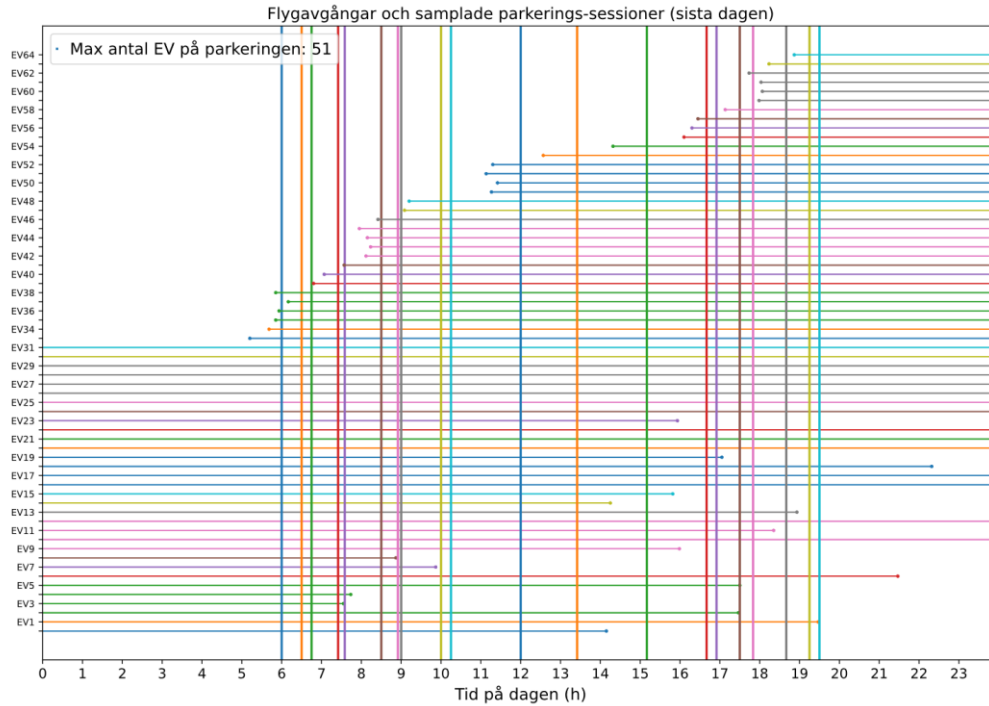
Parameter	Värde
$N_{seat,ac}$	Konventionella flygplan; 72 (typiskt ATR-72)
	Elflygplan; 19
CF_{ac}	70%
$S_{pax,veh}$	40%
$N_{pax,veh}$	1,4
S_e	25%

Avgångsschemat för flyget som ligger till grund för sampling av ankommande laddbara bilar är en kombination av utvecklade elflygscenario (avsnitt 5.2.2) och existerande avgångstider för en ”typisk” dag på Visby Airport (Swedavia Airports, 2023b). Då fallet Visby Airport har modellerats utifrån ersättning av delar av dagens flygtrafik med elflyg, så plockar simuleringsmodellen bort den mängd av dagens flygavgångar som kan ersättas baserat på antal resenärer. Avgångar som ligger väldigt nära de föreslagna nya avgångarna med elflyg plockas bort först, detta för att sprida ut schemat.

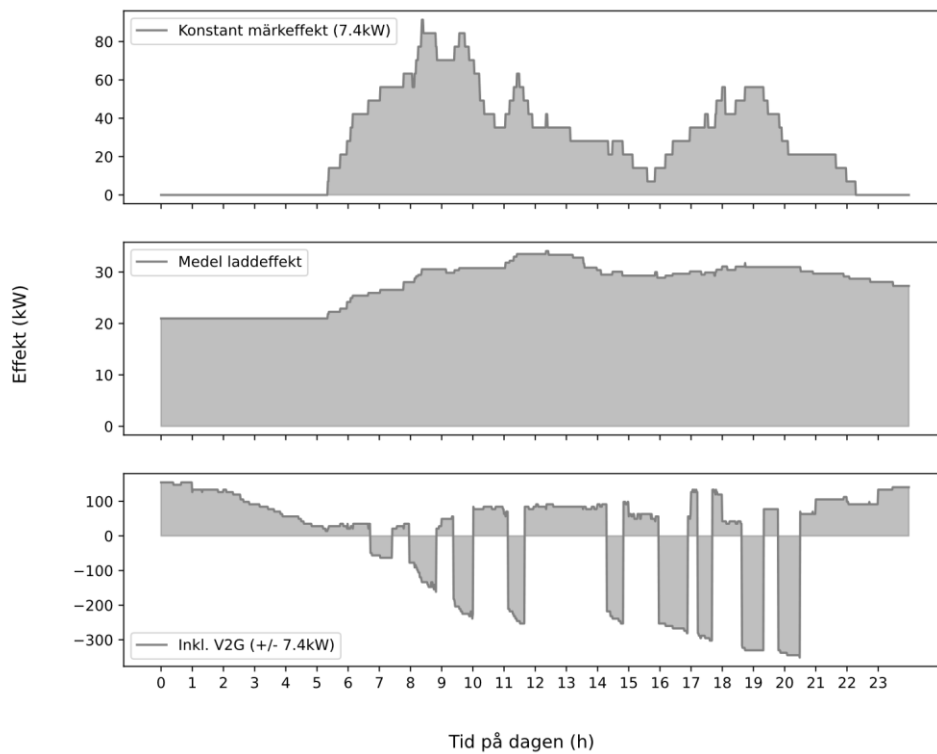
I Figur 20 presenteras resultaten av parkeringsmönster i en simulering där 25% av personbilsflottan är elektrifierad. Figuren visar att det som mest fanns 51 laddbara bilar parkerade på flygplatsen samtidigt, vilket innebär att det skulle krävas lika många laddare (eller laddningsuttag) för att kunna ladda alla bilar samtidigt.

I dialog med flygplatsen framgår att det idag finns runt 340 parkeringsplatser, varav normalt cirka hälften uppskattningsvis är ockuperade samtidigt en typisk dag, alltså 170. Om de maximalt 51 överlappande parkeringssessionerna ovan representerar cirka 25% av bilflottan så blir den totala summan 204 ($51/0,25$), men kan variera beroende på hur parkeringsmönstret ser ut för alla fordon. Detta är något över 170, men anses tills vidare ligga inom rimliga gränser för fortsatt analys.

Beräkning av energibehov och efterföljande laddningssimuleringar för respektive parkerad bil genomförs på samma sätt som beskrivet i avsnitt 5.3.1. Lastkurvorna för de olika laddningsstrategierna syns i Figur 21. I det fall då samtliga laddbara bilar använder laddarnas angivna märkeffekt från parkeringens start tills fulladdat batteri så blir resulterande maximala effektlast cirka 90–100 kW. Om varje bil istället laddar med precis den effekt som krävs för att ha ett fulladdat batteri vid parkeringstidens slut (”medel” i Figur 21) så sprids lastkurvan ut och maximalt nås en effektlast på cirka 35 kW. Slutligen syns att samordnad urladdning (V2G) av bilarnas batterier om möjligt skulle kunna stötta flygplatsen med upp till 300–350 kW (indikerat som negativt värde) vid tillfällena då andra laster är höga.



Figur 20: Resultande parkeringsschema för laddbara bilar på Visby Airport. Baserat på antal ankommande elbilar per flygavgång och flygschemat för fallstudien.



Figur 21: Resultande effektkurvor för laddning av parkerade elbilar på Skellefteå Airport enligt parkeringsschemat i Figur 20. Resultatet för tre olika laddningsstrategier presenteras (laddning med konstant märkeffekt, medel laddeffekt, samt laddning med konstant märkeffekt inklusive V2G).

5.4 PV simulering

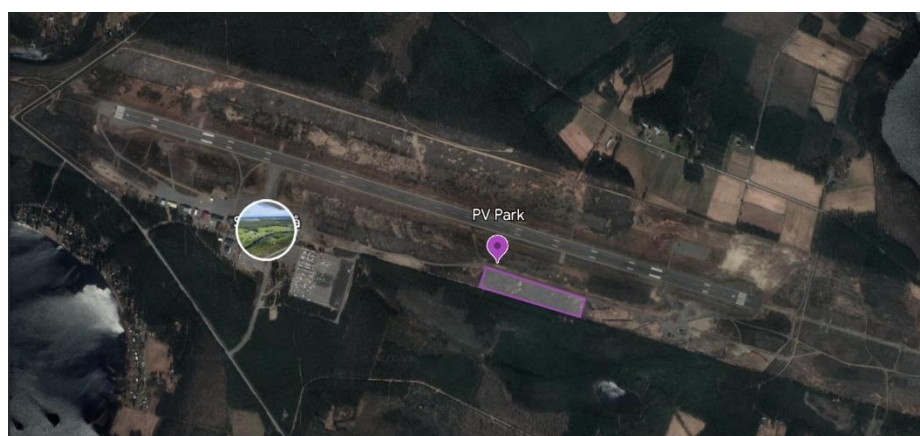
För varje flygplats designades PV-system med hjälp av HelioScope-verktyg. Simuleringens utdata fungerar som indata för energisystemmodellen som inkluderar batterilagring och fungerar under olika styrstrategier. Typical Meteorological Year (TMY), 10km Grid, meteonorm weather data set valdes. För samtliga studerade PV-system i denna rapport har samma typ av PV-paneler använts, vilka specificeras i Tabell 15.

Tabell 15: PV-modulspecifikationer

Specifikationer	Värde
Panelens mått (m)	1046 x 1559
Panelyta (m ²)	1.63
Effekt (W)	370
Panelens effektivitet (%)	22.7

5.4.1 Skellefteå Airport

Skellefteå Airport ligger i norra Sverige, med geografiska koordinaterna latitud 64°37' "N, longitud 21°05" E. Det valda området som visas i Figur 22 täcker totalt 30 000 m². PV-modulerna har placerats rakt söderut (azimutvinkel på 180°) och en fast lutningsvinkel på 35°.



Figur 22: PV Installation på Skellefteå Aiport

Ett avstånd mellan raderna på 6 m väljs, för att minimera skuggning mellan raderna och för att säkerställa optimal produktionskapacitet. Dessa specifikationer visas i Tabell 16.

Tabell 16: Layout av solcellsanläggning – Skellefteå Airport

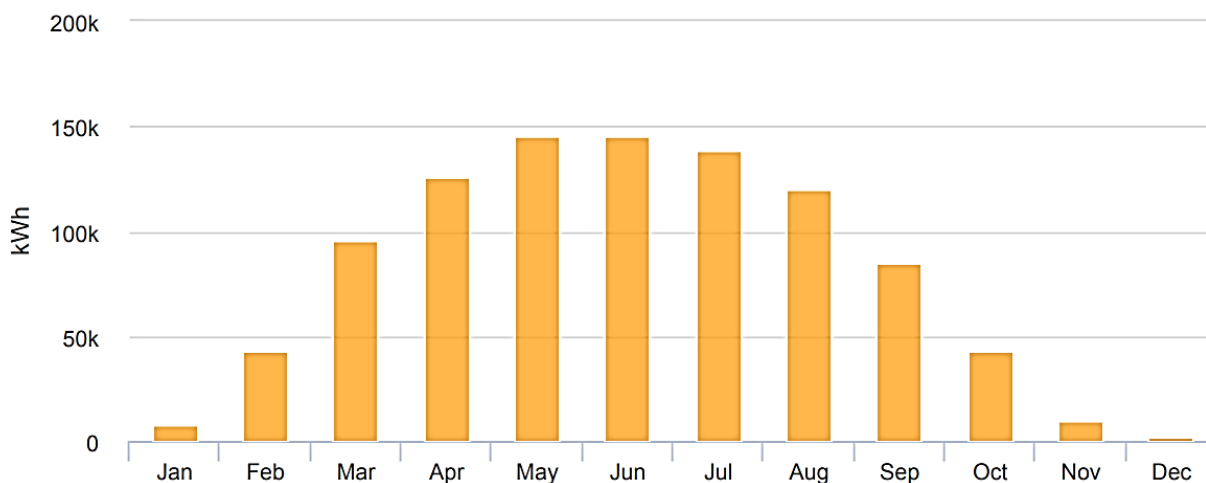
Total yta (m ²)	30 000
Antal moduler	2632
Avstånd mellan rader (m)	6
Lutningsvinkel (grad)	35°
Azimutvinkel (grad)	180°

Tabell 17 presenterar simuleringsresultaten för solcellsanläggningen på Skellefteå Airport, som har en total effekt på 974 kW, en årsproduktion på 959,6 MWh, ett energi/effektförhållande på 985 kWh/kWp och ett DC/AC-förhållande på 0,97 för växelriktaren.

Tabell 17: PV- simuleringsresultat – Skellefteå Airport

Total moduleffekt (kW)	974
Årlig produktion (MWh)	959,6
Energi/effekt-förhållande (kWh/kWp)	985
DC/AC-förhållande växelriktare	0,97
Prestationsgrad (%)	84,3
Skuggningsförlust (%)	3,4

Figur 23 illustrerar den månatliga elproduktionen för PV-systemet, vilket visar variationen i systemets produktion under året.



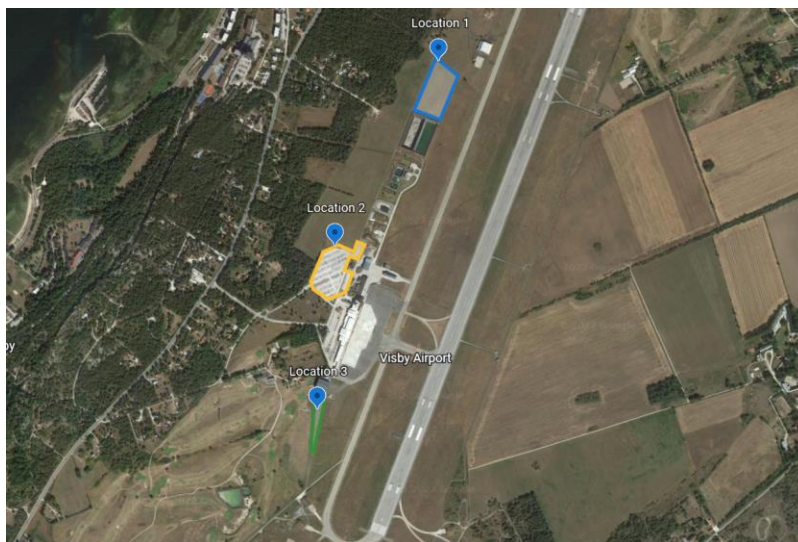
Figur 23: Månatlig elproduktion - PV System - Skellefteå Airport

5.4.2 Visby Airport

Visby Airport ligger på Gotland i Östersjön, och dess exakta geografiska koordinater är latitud 57°39' "N, longitud 18°20" E. Under ett besök på flygplatsen identifierades tre potentiella platser för installation av solcellsanläggningar som visas i Figur 24.

Tre alternativ utformades för flygplatsen:

- Plats 1: större markbaserad solcellspark
- Plats 2: takinstallation av solcellsmoduler på parkeringsplats
- Plats 3: mindre markbaserad solcellspark



Figur 24: Tre potentiella platser på Visby Airport

De tre PV-designerna visas i Figur 25. Den totala ytan för varje solcellsanläggning, antalet moduler och lutningsvinklar visas i Tabell 18. I de två markmonterade PV-systemen (plats 1 och 3) är solcellsmodulerna konstruerade för att vända rakt söderut (azimutvinkel på 180°), en fast lutningsvinkel på 35° och ett mellanrumsavstånd på 4 m.



Figur 25: PV-design i plats 1 (vänster), plats 2 (mitten) och plats 3 (höger)

På plats 2 antas PV-moduler installeras på taket av de för närvarande tillgängliga parkeringsplatserna. PV-modulernas lutningsvinkel är 5°, men azimutvinklarna för de installerade solpanelerna är samma som riktningen för de befintliga parkeringsplatserna, vilka är 156° (970 kW), 110° (146 kW) och 21° (38 kW).

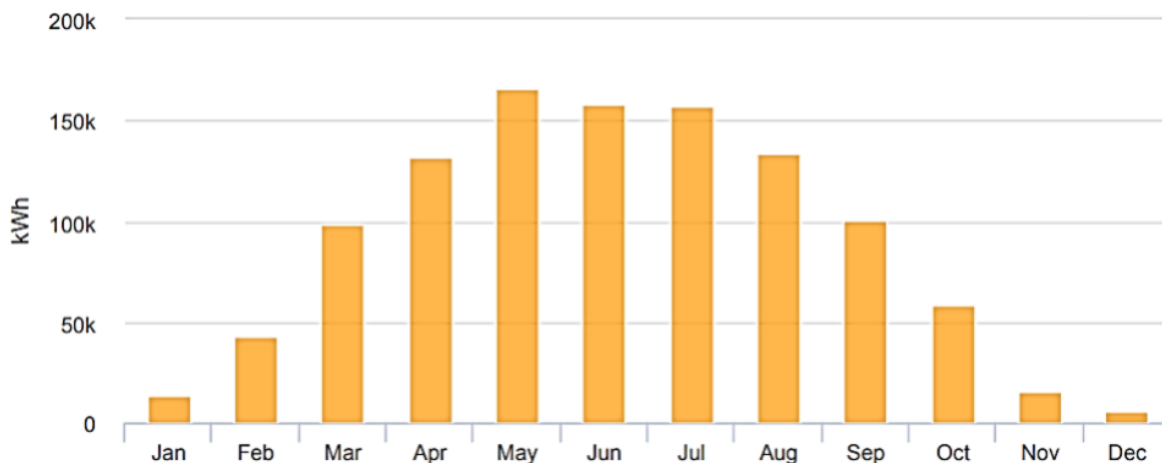
Tabell 18: Layout av solcellsanläggningar – Visby Airport

Plats	Plats 1	Plats 2	Plats 3
Total yta (m²)	12 732	6968	2880
Antal moduler	2632	3168	556
Avstånd mellan rader (m)	4	- (tak)	4
Lutningsvinkel (grad)	35°	5°	35°
Azimutvinkel (grad)	180°	156°, 110°, 21°	180°

Resultaten från simuleringen av dessa tre solcellsanläggningar visas i Tabell 19, där den högsta årliga produktionen tillhör plats 2 och den lägsta till plats 3. På grund av högre årlig elproduktion på plats 1 och dess potential att tillhandahålla en relativt hög effektkapacitet på flygplatsen, används denna som input till fortsatta energisystemsimuleringar. Eftersom den ligger längre bort från flygplatsen så innebär den även lägre risk för EMC jämfört med andra platser. Solcellsanläggningen vid plats 1 har en total effekt på 974 kW, en årlig produktionskapacitet på 1083 MWh, ett energi/effekt-förhållande på 1112 kWh/kWp och ett DC/AC-förhållande på 0,97 för växelriktaren. Den månatliga elproduktionen från PV-systemet på plats 1 visas i Figur 26, vilket ger insikter om variationen i systemets produktion under året.

Tabell 19: PV-simuleringsresultat – Visby Airport

	Plats 1	Plats 2	Plats 3
Total moduleffekt (kW)	974	1172	206
Årlig produktion (MWh)	1083	1125	230
Energi/effekt-förhållande (kWh/kWp)	1112	960	1116
DC/AC-förhållande växelriktare	0,97	0,99	1,03
Prestationsgrad (%)	82,7	85,3	83
Skuggningsförlust (%)	4,3	0,1	4



Figur 26 Månatlig elproduktion – PV system - plats 1 - Visby Airport

5.5 Bländningsanalys av föreslagna PV system

I detta kapitel presenteras resultaten av den bländningsanalys som utförts på Visby- och Skellefteå Airport. Analysen utfördes med hjälp av mjukvaruverktyget ForgeSolar som beskrivs i avsnitt 4.4.2. Genom att identifiera potentiella bländningskällor och utvärdera deras påverkan kan flygplatsen vidta åtgärder för att minimera eller eliminera bländning, och därigenom förbättra säkerheten för luftfartsverksamheten. Optimeringsresultaten kan föreslå nya lutnings- och orienteringsvinklar för solcellssystemet som ger alternativa PV-designer på samma plats med låg bländningseffekt.

5.5.1 Skellefteå Airport

Bländningsanalys för solcellssystemen som visas i Figur 27 på Skellefteå Airport utförs. Simuleringskomponenterna inklusive PV-Array, flygledningstornet som observationspunkt, 2 rutter (vägar nära flygplatserna) och två flygvägar ges till verktyget. Specifikationer för ATCT och landningsbanor ges av flygplatsens tjänstemän som även finns tillgängliga i [AROWeb](#) (AROWEB - IAIP ESNS SKELLEFTEÅ, 2023) visas i Tabell 20.



Figur 27: Placering av solcellsanläggningen (vänster) och simuleringskomponenter (höger) på Skellefteå Airport

Tabell 20: Specifikation av start- och landningsbanor och ATCT på Skellefteå Airport

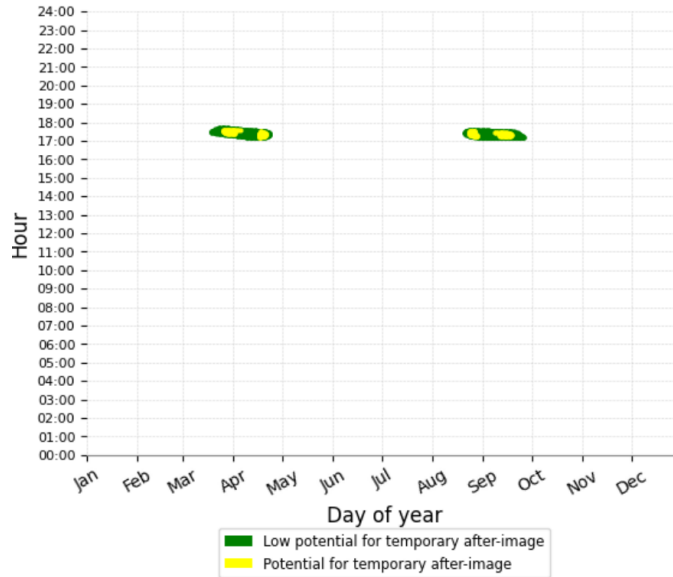
Komponenter	Specifikation (Skellefteå)
Landningsbana 10	<ul style="list-style-type: none"> Riktning 100 grader – Landning från väst Glide slope: 3 grader Flyghöjd över tröskel: 15,24 m Markhöjd (över havet): 48,3 m
Landningsbana 28	<ul style="list-style-type: none"> Riktning 280 grader – Landning från öster Glide slope: 3 grader Flyghöjd över tröskel: 15,24 m Markhöjd (över havet): 37,4 m .
ATCT	<ul style="list-style-type: none"> Höjd: 18 m

De signifikanta resultaten av bländningsanalysen sammanfattas i Tabell 21. Det finns ingen bländningspåverkan på ATCT-receptorn, men PV-Array genererar 1117 minuter av grön bländning samt 313 minuter av gul bländning som påverkar Landningsbana 28. Således, baserat på nuvarande design, är placeringen av solcellsanläggningen inte uppfyller kraven i FAA-policyn och är inte lämplig på grund av bländning. Det är dock avgörande att bedöma bländningspåverkan på Landningsbana 28 innan platsen avfärdas. En ny PV design med rätt orientering och lutningsvinklar kan uppfylla kraven i FAA-policyn på samma plats.

Tabell 21: Bländningspåverkan som skapas av PV-Array – Skellefteå Airport

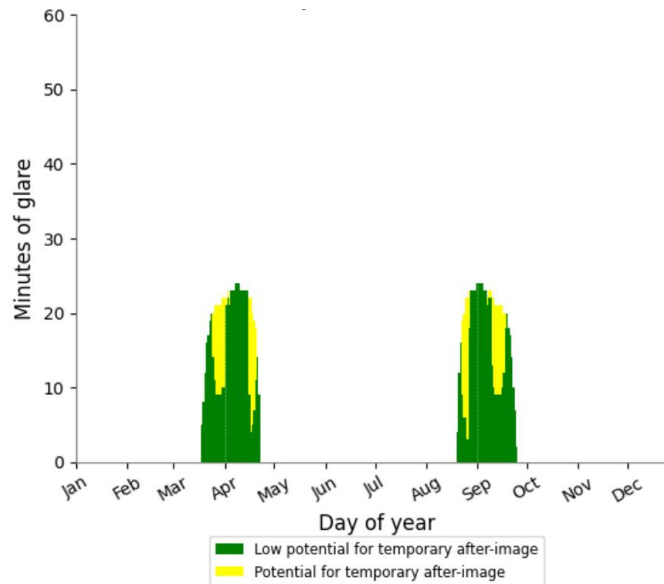
Solcellsanläggning	Receptor	Årlig grön bländning (min)	Årlig gul bländning (min)
PV-Array	Landningsbana 10	0	0
	Landningsbana 28	1117	313
	ATCT	0	0

Figur 28 visar den förväntade tidpunkten för bländning under året som kan påverka Landningsbana 28. Y-axeln anger tidpunkter på dagen, medan x-axeln representerar tiden på året. Förekomsterna klassificeras utifrån deras beräknade inverkan på ögonen och tilldelas därefter färgkoder. Den förväntade bländningen inträffar primärt mellan 17:00 och 18:00 och därför bör extra försiktighet vidtas under dessa timmar.



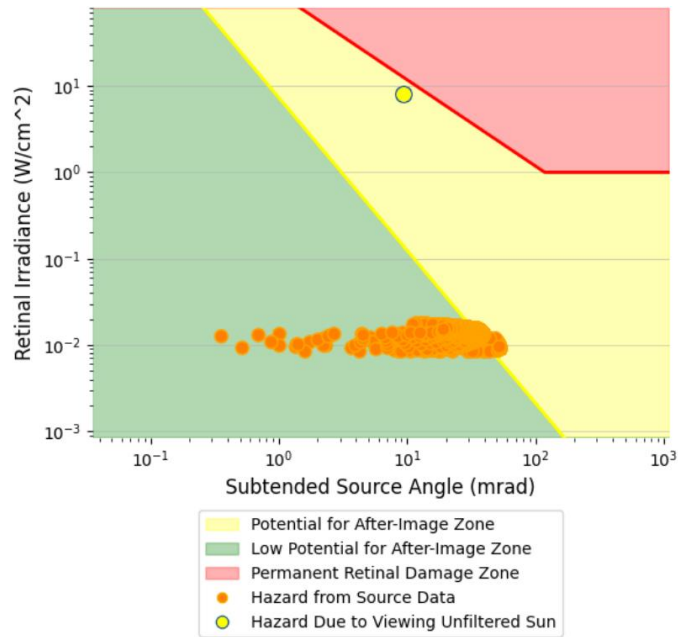
Figur 28: Årlig förväntad bländning – påverkan på Landningsbana 28-Skellefteå Airport

Den dagliga bländningstiden (Figur 29) illustrerar de förväntade minuterna av bländning per dag under hela året. Både grön och gul bländning varar mindre än 30 minuter vilket sker främst i mars, april, augusti och september.



Figur 29: Daglig bländningstid – påverkan på Landningsbana 28-Skellefteå Airport

Bländningsriskdiagrammet (Figur 30), visualiserar effekten av bländning. Retinal irradians för PV-Array faller inom två regioner, gul och grön.



Figur 30: Bländningsriskdiagram - Landningsbana 28 – Skellefteå Airport

Tilt → Orient ↓	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0°	60.0%	54.1%	48.6%	43.5%	38.8%	34.2%	30.0%	26.2%	22.8%	19.9%
10°	60.0%	54.1%	48.8%	43.8%	39.1%	34.6%	30.5%	26.7%	23.4%	20.6%
20°	60.0%	54.4%	49.3%	44.5%	39.9%	35.7%	31.7%	28.2%	25.0%	22.5%
30°	60.0%	54.8%	50.1%	45.6%	41.4%	37.5%	33.8%	30.6%	27.8%	25.9%
40°	60.0%	55.4%	51.2%	47.2%	43.4%	39.9%	36.8%	34.0%	31.9%	30.6%
50°	60.0%	56.1%	52.5%	49.1%	46.0%	43.1%	40.5%	38.6%	37.2%	36.1%
60°	60.0%	56.9%	54.1%	51.5%	49.0%	46.9%	45.3%	44.0%	43.0%	42.2%
70°	60.0%	57.9%	55.9%	54.2%	52.7%	51.5%	50.6%	49.8%	49.2%	48.7%
80°	60.0%	58.9%	58.0%	57.2%	56.6%	56.3%	56.0%	55.9%	55.7%	55.4%
90°	60.0%	60.0%	60.1%	60.4%	60.7%	61.2%	61.6%	62.0%	62.2%	62.3%
100°	60.0%	61.1%	62.3%	63.5%	64.7%	66.0%	67.1%	68.0%	68.7%	69.1%
110°	60.0%	62.2%	64.4%	66.5%	68.6%	70.6%	72.3%	73.8%	74.8%	75.6%
120°	60.0%	63.2%	66.3%	69.3%	72.2%	74.8%	77.2%	79.1%	80.6%	81.6%
130°	60.0%	64.1%	68.0%	71.8%	75.4%	78.6%	81.4%	83.8%	85.6%	87.0%
140°	60.0%	64.8%	69.5%	74.0%	78.1%	81.8%	85.1%	87.8%	90.0%	91.5%
150°	60.0%	65.4%	70.7%	75.7%	80.3%	84.4%	88.0%	91.0%	93.4%	95.2%
160°	60.0%	65.9%	71.6%	77.0%	81.9%	86.3%	90.1%	93.4%	96.0%	97.8%
170°	60.0%	66.2%	72.1%	77.7%	82.8%	87.4%	91.4%	94.8%	97.5%	99.5%
180°	60.0%	66.3%	72.3%	77.9%	83.2%	87.8%	91.8%	95.2%	98.0%	100.0%

Tilt → Orient ↓	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
240°	60.0%	63.1%	66.3%	69.3%	72.2%	74.8%	77.1%	79.0%	80.5%	81.5%
250°	60.0%	62.1%	64.4%	66.5%	68.6%	70.5%	72.2%	73.7%	74.7%	75.5%
260°	60.0%	61.1%	62.2%	63.5%	64.7%	65.9%	67.0%	67.9%	68.6%	69.0%
270°	60.0%	60.0%	60.1%	60.3%	60.7%	61.1%	61.5%	61.9%	62.1%	62.2%
280°	60.0%	58.9%	58.0%	57.2%	56.6%	56.2%	56.0%	55.8%	55.6%	55.3%
290°	60.0%	57.9%	55.9%	54.1%	52.6%	51.4%	50.5%	49.8%	49.2%	48.6%
300°	60.0%	56.9%	54.1%	51.4%	49.0%	46.9%	45.2%	44.0%	43.0%	42.1%
310°	60.0%	56.1%	52.5%	49.1%	45.9%	43.0%	40.5%	38.6%	37.1%	36.0%
320°	60.0%	55.3%	51.1%	47.1%	43.4%	39.9%	36.7%	34.0%	31.9%	30.5%
330°	60.0%	54.8%	50.1%	45.6%	41.4%	37.4%	33.8%	30.6%	27.8%	25.9%
340°	60.0%	54.4%	49.3%	44.5%	39.9%	35.7%	31.7%	28.1%	25.0%	22.5%
350°	60.0%	54.1%	48.8%	43.8%	39.0%	34.6%	30.5%	26.7%	23.3%	20.6%
360°	60.0%	54.1%	48.6%	43.5%	38.8%	34.2%	30.0%	26.2%	22.8%	19.9%

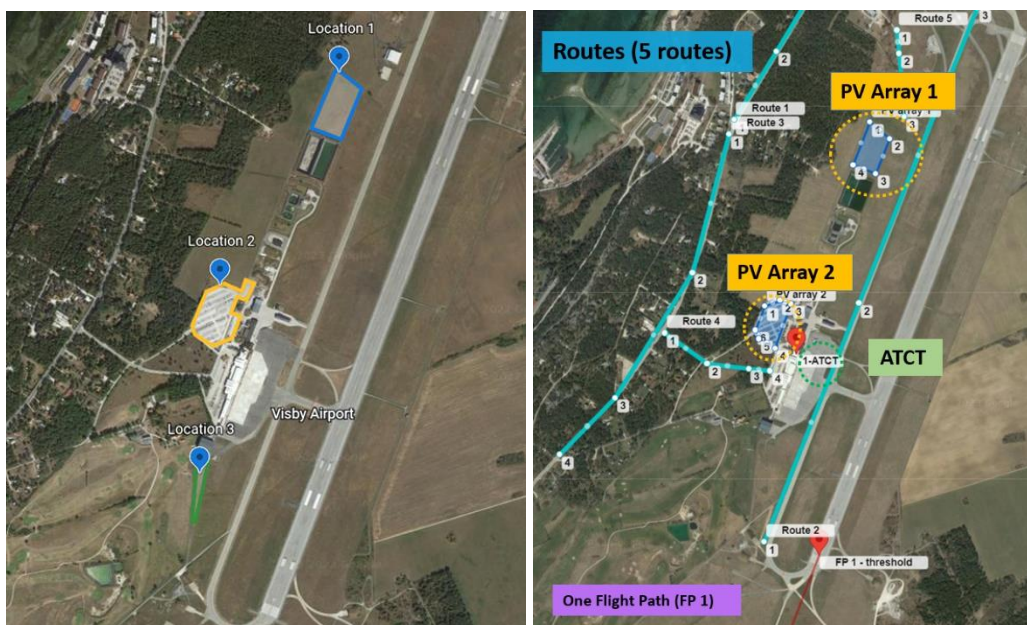
Figur 31: Optimeringsresultat– Skellefteå Airport

Efterlevnad av 2013 FAA:s policy är ett bra sätt att säkerställa en minimal bländningsrisk. Denna policy kräver ingen bländning av något slag för flygledningstorn (s) och endast grön bländning för Flight Path. De alternativa PV-designerna som föreslås av ForgeSolar-optimeringen visas i Figur 31. Den blå färgen indikerar överensstämmelse med FAA-policyn och den röda färgen indikerar att designen inte överensstämmer med FAA-policyn. Genom att använda optimeringsresultaten är

det möjligt att bestämma en lämplig lutningsvinkel och orientering för ett PV-system som uppfyller FAA-kraven. Till exempel att behålla samma lutningsvinkel (35°) och ändra PV-orienteringen till 150 kan vara en alternativ lösning.

5.5.2 Visby Airport

Bländningsanalysen utfördes för solcellsanläggningar på plats 1 och plats 2 för Visby Airport, se Figur 32. Simuleringskomponenterna inklusive PV-system, ATCT som observationspunkt, 5 rutter (vägar nära flygplatserna) och två landningsbanor gavs till verktyget. Specifikationer för ATCT och landningsbanor tillhandahålls av flygplatsens tjänstemän (Tabell 22) och finns även tillgängliga i [AROWeb](#) som är LfV:s system för självbriefing (AROWEB - IAIP ESSV VISBY, 2023).



Figur 32 solcellsanläggningar på plats 1 och plats 2 på Visby Airport (vänster), simuleringskomponenter (höger)

Tabell 22: Specifikation av Landningsbanor och ATCT på Visby Airport

Komponenter	Specifikation (Visby)
Landningsbana 03	<ul style="list-style-type: none"> Riktning 27 grader - nordost Glide slope: 3 grader Flyghöjd över tröskel: 15,24 m Markhöjd (över havet): 42,6 m
Landningsbana 21	<ul style="list-style-type: none"> Riktning 207 grader – sydväst Glide slope: 3 grader Flyghöjd över tröskel: 17,37 m Markhöjd (över havet): 41,7 m
ATCT	Höjd: 24 m

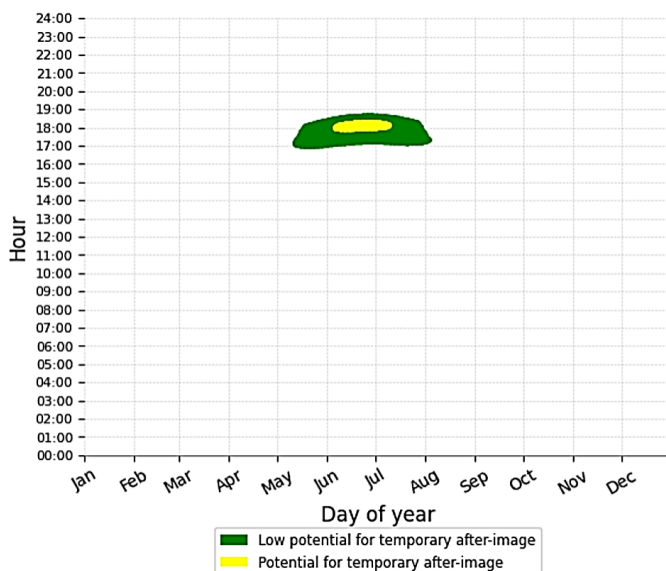
Tabell 23 sammanfattar de viktigaste resultaten av bländningsanalysen. Resultaten indikerar att PV-Array 1 inte producerar någon bländning för Landningsbana och ATCT, vilket gör denna plats lämplig för den föreslagna PV-designen. PV-Array 2 producerar dock 5673 minuter av grön

bländning med låg potential att orsaka tillfällig efterbild samt 586 minuter av gul bländning med potential att orsaka tillfällig efterbild på ATCT. Därför är placeringen av PV-Array 2 inte lämplig för PV-systemet med den nuvarande givna systemdesignen. Innan PV-Array 2 avvisas är det viktigt att utvärdera omfattningen och svårighetsgraden av den genererade bländningen och avgöra om den kan mildras. I många fall kan bländningsoptimeringsverktyget föreslå nya PV-designalternativ för samma plats baserat på optimeringsresultaten.

Tabell 23: Bländningspåverkan som skapas av solpaneler

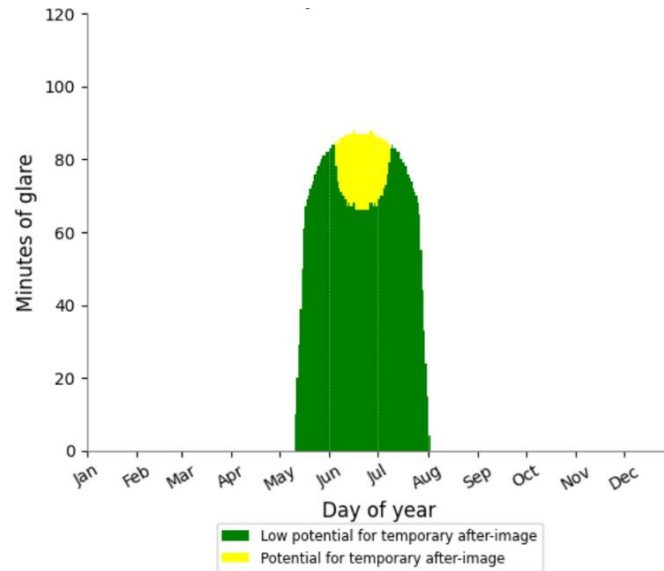
Solcellsanläggning	Receptor	Årlig grön bländning (min)	Årlig gul bländning (min)
PV-Array 1	Landningsbanor	0	0
	ATCT	0	0
PV-Array 2	Landningsbanor	0	0
	ATCT	5673	586

Bländningseffekten av PV-Array 2 för ATCT illustreras i nedan figurer. Diagrammet för årliga bländningsincidenter (Figur 33) illustrerar de uppskattade tidpunkterna för dag och år då bländning förväntas uppstå för ATCT. X-axeln representerar tiderna på året, medan y-axeln representerar tiderna på dygnet. Incidensen kategoriseras efter deras projicerade inflytande på ögonen och färgkods därefter. Den prognostiserade bländningen inträffar huvudsakligen mellan kl. 16.00. och 19:00, vilket är en specifik tidsram för dagen. Under denna tidsperiod bör såväl piloter som flygledare vara extra försiktiga.



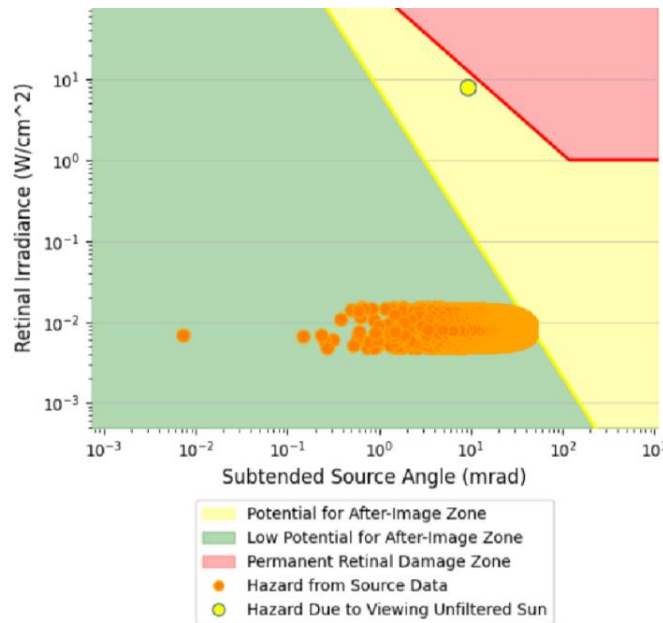
Figur 33: Årlig förväntad bländning - PV Array 2 och ATCT – Visby Airport

Den dagliga bländningstiden (Figur 34) uppskattar den dagliga bländningstiden för hela året. Det har beräknats genom att summera de förväntade minuterna av bländning. Både de gula och gröna bländningarna kvarstår i cirka 90 minuter. Den gula bländningen är synlig i juni och juli, medan den gröna bländningen är synlig från maj till augusti.



Figur 34: Bländningstid per dag – PV Array 2 och ATCT – Visby Airport

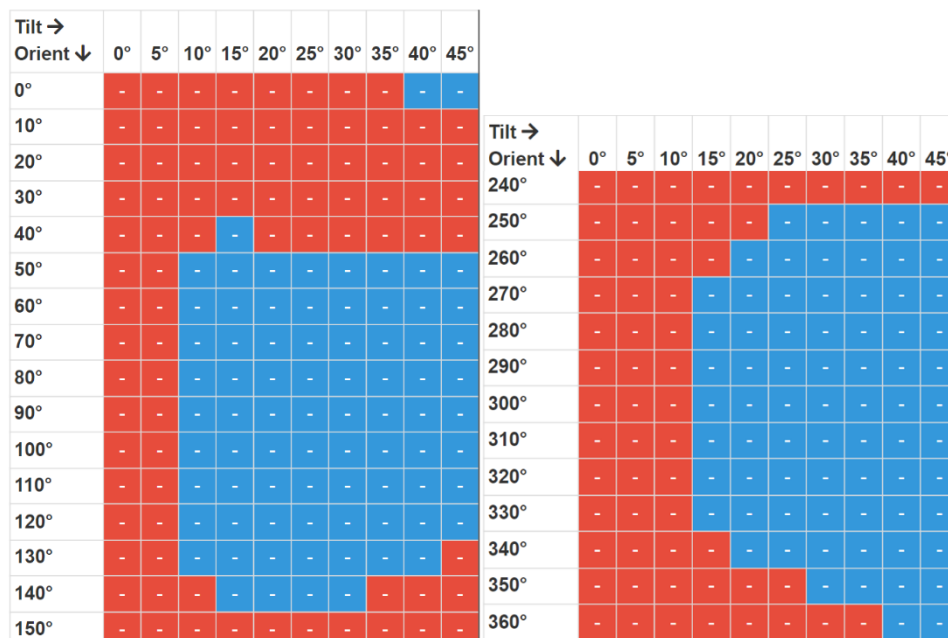
Bländningsriskdiagrammet (Figur 35) visar att den retinala strålningen som orsakas av PV-Array 2 ligger i två gula och gröna områden.



Figur 35: Bländningsrisksdiagram - PV Array 2 och ATCT – Visby Airport

2013 FAA Glare Policy kräver ingen bländning av något slag för flygledningstorn och därför misslyckas PV-Array 2 att passera policyn. ForgeSolar-optimeringsverktyget kan dock rekommendera alternativa PV-systemdesigner med nya orienteringar och lutningsvinklar som säkerställer att denna policy följs. Optimeringsresultatet visas i Figur 36. Den blå färgen indikerar överensstämmelse med FAA-policyn men den röda färgen indikerar att designen inte överensstämmer med FAA-policyn. Optimeringsresultaten som presenteras i denna figur kan

användas för att bestämma en lämplig lutningsvinkel och orientering för ett alternativt solcellssystem som uppfyller FAA-policykraven. Till exempel kan solpaneler installerade på en parkeringsplats med en taklutningsvinkel på 10° och orientering på 130° vara ett alternativ med låg bländning.



Figur 36: Optimeringsresultat PV-Array 2 och ATCT – Visby Airport

5.6 Tekno-ekonomisk helårsutvärdering

En tekno-ekonomisk utvärdering av Skellefteå Airport och Visby Airport har gjorts med hjälp av metoden från avsnitt 4.3. Syftet är att undersöka hur det ökade energibehovet i ett framtida scenario med el-flyg och el-bilar kan mötas om man inkluderar PV och batterilager. Även undersöka hur de olika styrstrategierna för batteriet påverkar resultaten.

5.6.1 Visby Airport

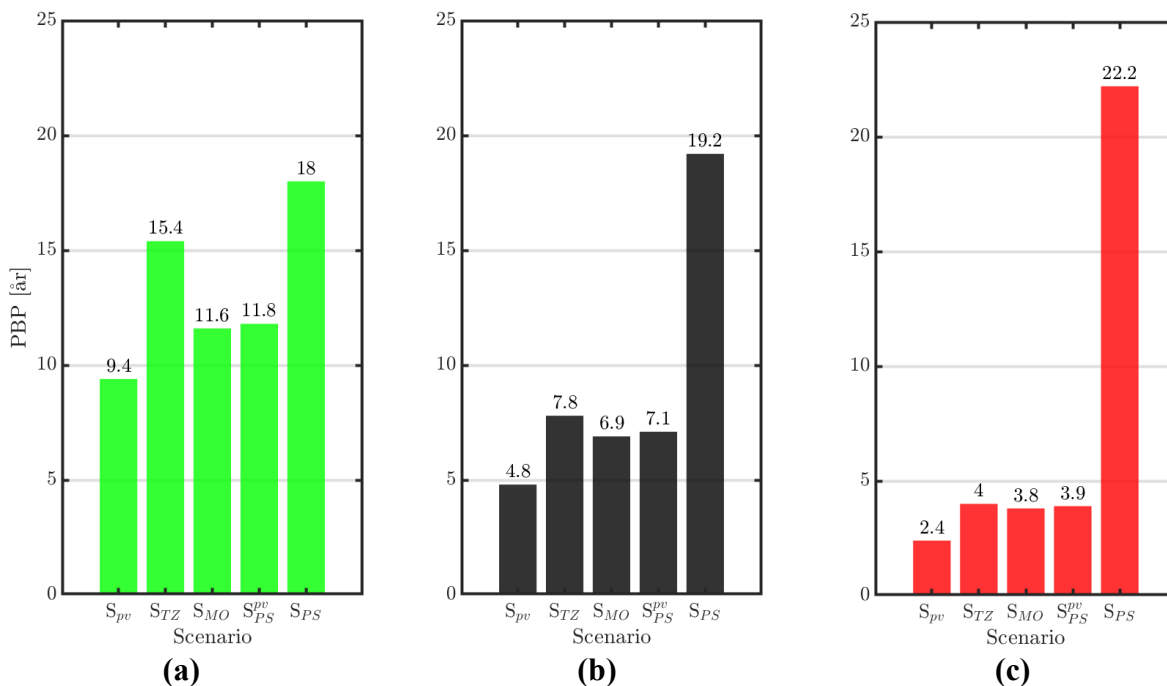
I det modellerade framtidsscenarioet S_{ref} med både el-flyg och el-bilar ökar det årliga energibehovet med 89% (2349 MWh/år) jämfört med dagens energibehov S_{BAU} (2629 MWh/år). Effektmässigt innebär det kombinerade fallet med både el-flyg och el-bilar en ökning av den högsta toppen över året med över 1 MWh/h, från nuvarande högsta toppen på 749 kWh/h. I och med att dagens anslutning mot nätet har en maximal begränsning på 1 MW skulle ett framtida scenario med el-flyg och el-bilar kräva tekniska lösningar. Tabell 24 visar resultaten från helårsmodelleringen för de olika scenarierna. Noterbart är att samtliga scenarier med el-flyg och el-bilar ger en toppeffekt över nuvarande gräns och att enbart solel (S_{pv}) och batteristyrning för ökad egenkonsumtion (S_{TZ}) ger marginell skillnad i toppeffekt (-59 kW). Då styrningen för S_{TZ} inte är tänkt för effektkapning så är den noterade minskningen en tillfällighet då toppeffekten från lasten sker samtidigt som en PV-generering på 59 kW. Egenkonsumtionen (SC) utan batterilager (S_{pv}) är redan relativt hög (80,0%) för den valda PV-anläggningen (se avsnitt 5.4) medens självförsörjandegraden (SS) är relativt låg (17,5%). För fallen med batterilager kan en noterbar ökning ses för S_{TZ} och den egenutvecklade styrningen (S_{MO}), där det i det första fallet innebär att i stort sett all PV används

för att täcka lastbehovet (98,3% SC) – motsvarande en årlig reduktion av nätbehovet på 1049 MWh jämfört med S_{ref} . För batteristyrning enbart med syfte att kapa effekttoppar (S_{PS}^{pv}) är ökningen av SC marginell jämfört med S_{pv} .

Tabell 24: Resultatsummering från helårsmodellering av Visby Airport.

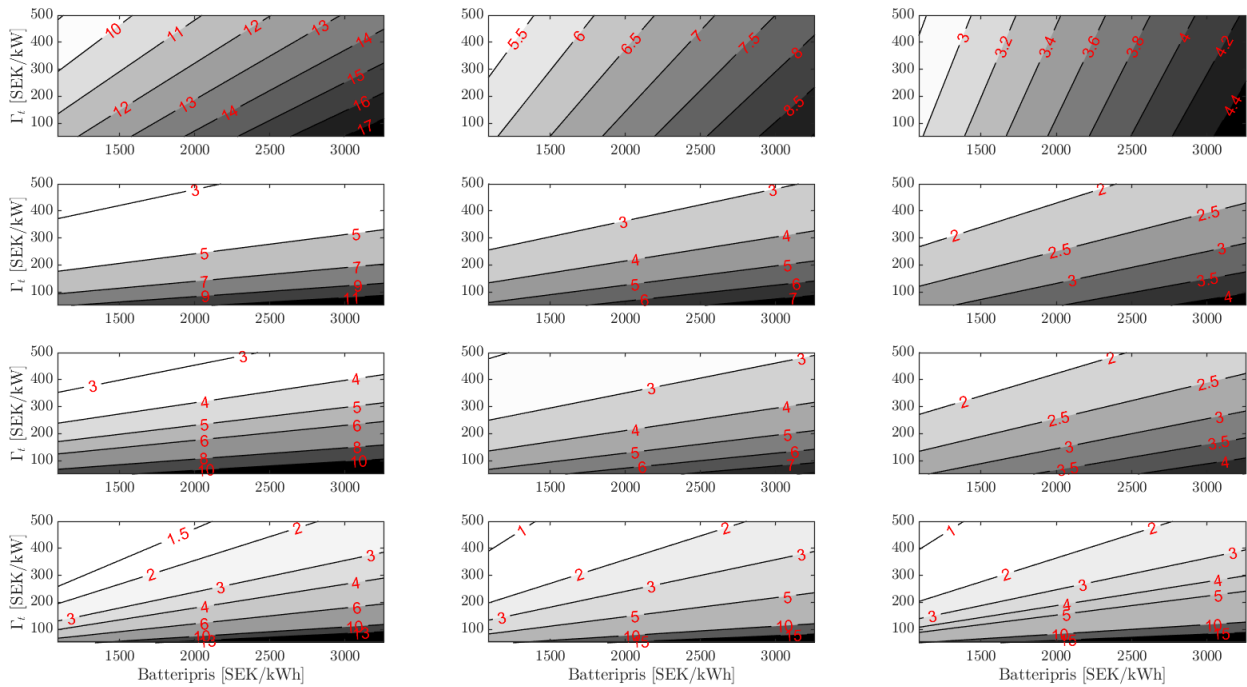
	S_{BAU}	S_{ref}	S_{pv}	S_{TZ}	S_{MO}	S_{PS}^{pv}	S_{PS}
Lastbehov [MWh/år]	2629	4978	4978	4978	4978	4978	4978
Nätbehov [MWh/år]	2629	4978	4108	3929	4019	4107	5003
Toppeffekt [kW]	749	1766	1707	1707	1192	1192	1233
SC [%]	-	-	80,0	98,3	88,6	80,4	-
SS [%]	-	-	17,5	21,5	19,4	17,6	-

Det positiva kassaflödet för PBP-beräkningarna utgår dels från skillnaden i årlig el-räkning – beräknat från mängden köpt och såld el jämfört med S_{ref} – och skillnaden i effektkostnaden. I referensfallet sätts effekttariffen Γ_i till 50 SEK/kWh. För att studera inverkan från en ändring i el-priset har tre fall modellerats – spotpriset från NordPool på timbasis samt en halvering och dubbling av timpriserna. Figur 37 visar PBP från (9) för halverat tim-pris (Figur 37a), nuvarande tim-pris (Figur 37b) och ett dubblerat tim-pris (Figur 37c). Med den antagna effekttariffen så kommer en majoritet av kostnadsbesparingen från mängden köpt el och PBP är därför väldigt känslig för antagandet om el-priset. Som tidigare nämnt sker i stort sett ingen effektkapning med enbart PV (1,8% kostnadsbesparing från effektkapning) och PBP är därför direkt korrelerat till el-priset. För det nominella batteripriset (\$223/kWh) ger också scenariot utan batteri lägst PBP. Den egenutvecklade styrningen (S_{MO}) ger näst lägst PBP med 17,8% av besparingen från effektkapning i normalfallet. Scenariot med enbart effektkapning utan PV (S_{PS}) ger högst PBP och som noterat i Tabell 24 fås ett högre nätbehov eftersom laddningen sker därifrån.



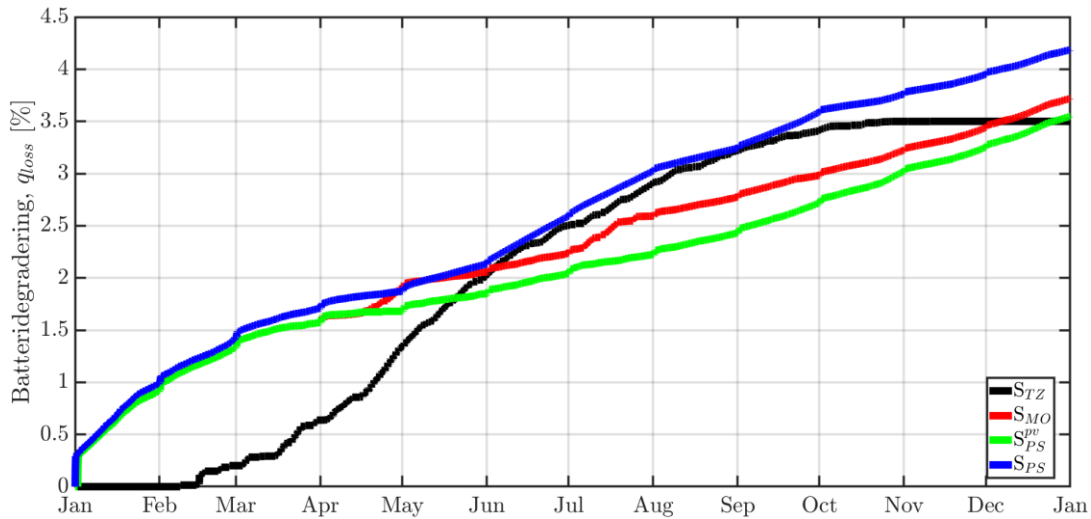
Figur 37: PBP beräknat för (a): halverat spotpris, (b): nuvarande spotpris och (c): dubbling av spotpriset.

För att ytterligare undersöka känsligheten för PBP har batteripriset och effekttariffen (Γ_t) också varierats – utöver timpriset för el. Figur 38 visar hur PBP varierar med el-pris (vänster till höger), effekttariff (Γ_t) och batteripris. På samma sätt som i Figur 37 visas nuvarande timpris i mitten, halverat pris till vänster och dubblerat till höger. Här kan man tydligt se att PBP för S_{TZ} främst beror av batteripriset från de – relativt sett – brantare PBP-lutningarna, detta eftersom andelen intäkter från effektkapningen är begränsad (se ovan). Noterbart är också att PBP för S_{PS} – med enbart effektkapning – kan resultera i relativt korta PBP beroende på effekttariffen.



Figur 38: Känslighetsanalys av PBP med varierande elpris (vänster till höger), effekttariff (Γ_t) och batteripris. Rad 1: S_{TZ} , rad 2: S_{MO} , rad 3: S_{PS}^{PV} och rad 4: S_{PS} .

Batteridegraderingen från cyklingsåldring har beräknats med hjälp av (7) och (8) för de fyra styrstrategierna och modelleringen av Visby Airport. Figur 39 visar hur den relativa minskningen av lagringskapacitet som funktion av battericyklning, q_{loss} , ser ut för de fyra styrningarna. För S_{TZ} – som förlitar sig på överskott från PV för laddning – sker i stort sett ingen degradering under vintern då batteriet står tomt och ej utnyttjas. Till skillnad från de andra styrningarna som jobbar över hela året – främst med effektkapning vintertid. I absoluta tal ligger den årliga kapacitetsminskningen mellan 3,5–4,2% för de fyra styrningarna. Den resulterande degraderingen bör tas i beaktning i den ekonomiska utvärderingen av systemet.



Figur 39: Batteridegradering för de fyra styrstrategierna från Visby Airport.

5.6.2 Skellefteå Airport

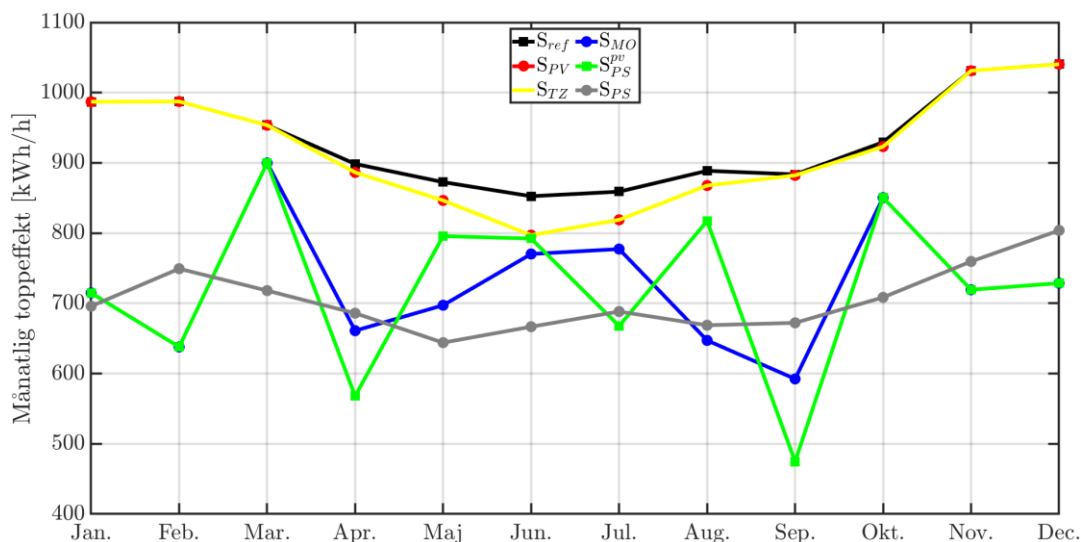
På samma sätt som för Visby Airport visar Tabell 25 en summering av årsprestandan för Skellefteå Airport. Noterbart är att inkluderande av el-flyg och el-bilar enligt de scenarier som beskrivs ovan ökar energi- och toppeffektbehovet med 155 (2126 MWh/år), respektive 180% (669 kW). Även att de effektkapande batteristyrningarna (S_{TZ} — S_{PS}) marginellt bidrar till att reducera toppeffektbehovet.

Tabell 25 Resultatsummering från helårsmodellering av Skellefteå Airport.

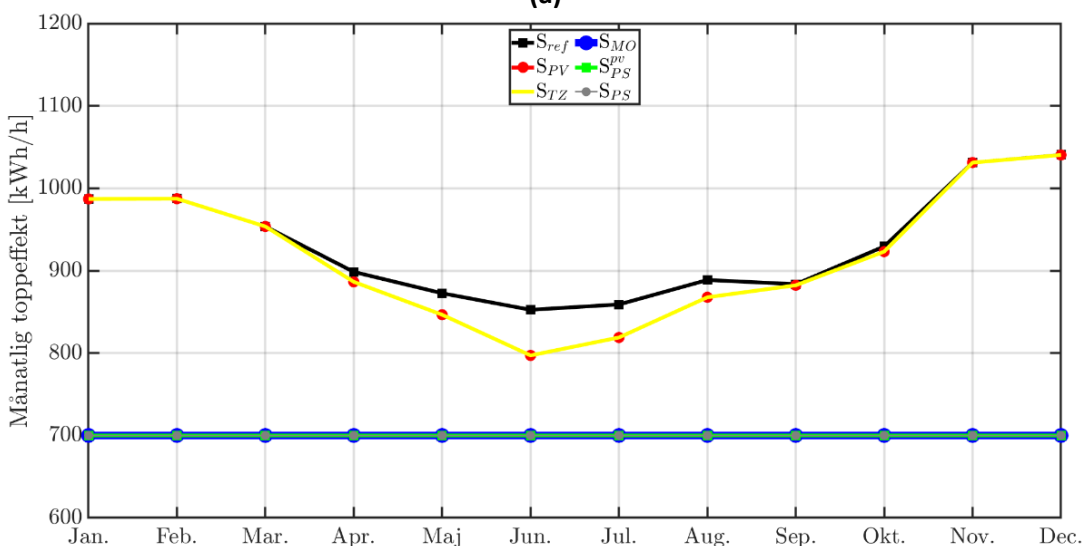
	S_{BAU}	S_{ref}	S_{pv}	S_{TZ}	S_{MO}	S_{PS}^{pv}	S_{PS}
Lastbehov [MWh/år]	1373	3499	3499	3499	3499	3499	3499
Nätbehov [MWh/år]	1373	3499	2701	2563	2636	2709	3522
Toppeffekt [kW]	372	1041	1040	1040	900	900	804
SC [%]	-	-	82,7	98,6	90,7	83,3	-
SS [%]	-	-	22,8	27,2	25,0	23,0	-

Figur 40 visar månatliga toppeffekten för respektive batteristyrning i två scenarier: Figur 40a utan någon hänsyn till övre effektgräns för kapning¹ och Figur 40b med en effektgräns för kapning på 700 kW. Utan någon effektgräns kommer styrningarna att försöka kapa effekttopparna löpande för de timvärden som överskrider tidigare månadens toppnotering. Konsekvensen av denna styrning kan bli att försök att kapa relativt låga efterföljande toppar tömmer batteriet och att en senare högre topp missas. Med vetskap över hur toppeffekterna ser ut månadsvis har en undre gräns för effektkapning satts till 700 kW i Figur 40b. Detta betyder att toppar under 700 kW inte kapats. Resultaten för de effektkapande styrningarna blir en jämn profil över hela året, jämfört med resultaten i Figur 40a.

¹ Som standard har ingen effektgräns används (om inget annat anges). Detta gäller även resultaten för Visby Airport.



(a)



(b)

Figur 40 Månatliga toppeffekter för respektive batteristyrning från Skellefteå Airport.

Tabell 26 visar årlig batteridegradering och aggregerad effektkapning med och utan styrning mot fördefinierad effektgräns för kapning. Noterbart är att S_{MO} och S_{PS}^{pv} har ett lägre batterislitage när de jobbar mot en fördefinierad effektgräns samt att den aggregerade effektkapningen över året är högre² vid styrning mot en fördefinierad effektgräns.

Tabell 26 Årlig batteridegradering (q_{loss}) och aggregerad effektkapning för olika batteristyrningar och jämförelse med och utan fördefinierad effektgräns.

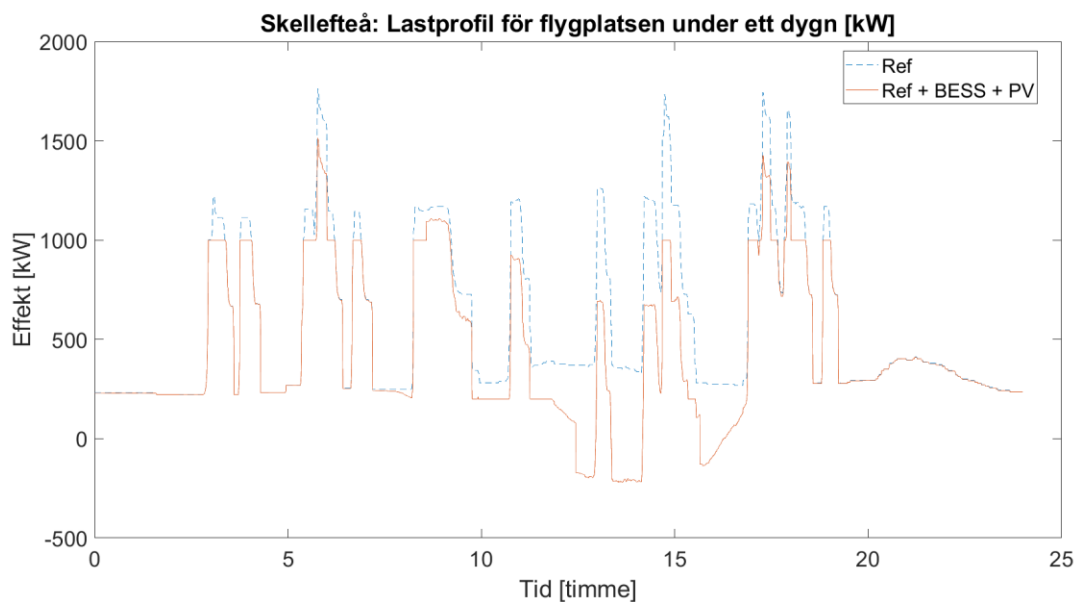
	S_{TZ}	S_{MO}	S_{PS}^{pv}	S_{PS}
q_{loss} (utan effektgräns)	3,24%	4,00%	4,12%	4,08%
q_{loss} (>700 kW)	3,24%	3,72%	3,72%	4,35%
Σ effektkapning (utan effektgräns)	0,16 MW	2,35 MW	2,39 MW	2,54 MW
Σ effektkapning (>700 kW)	0,16 MW	2,78 MW	2,78 MW	2,78 MW

² Gäller för de styrningarna som inkluderar effektkapning, alltså inte S_{TZ} .

5.7 Intra-dag modell och hantering av laster

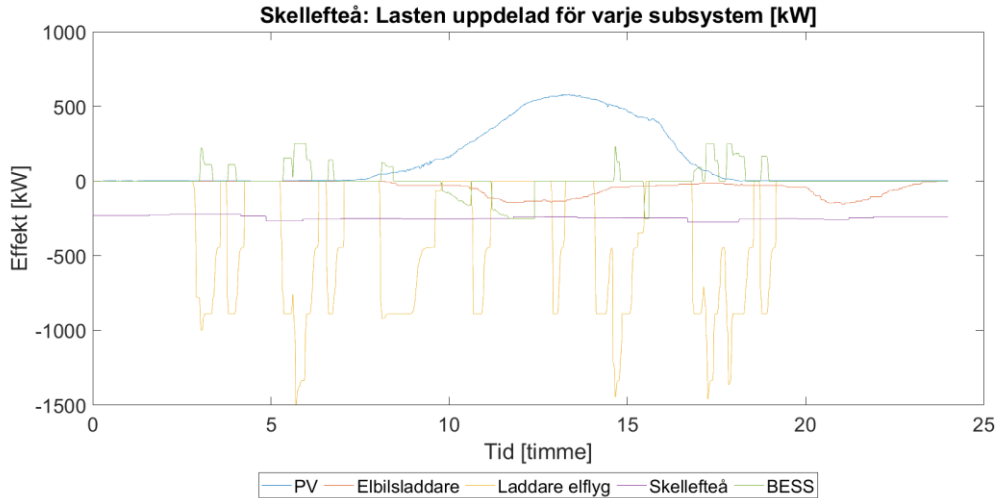
5.7.1 Skellefteå Airport

I Figur 41 presenteras elförbrukningen under ett dygn av Skellefteå Airport med scenario *Ref + PV + BESS*. I simuleringen sattes gränsen för urladdning av BESS till 1 MW, gränsen för uppladdning till 200 kW och maximala laddning- och urladdningseffekten till 250 kW. Batteriets storlek valdes att ha en kapacitet på 500 kWh. I Figur 41 kan observeras att vissa effekttoppar överstiger gränsvärdet på 1 MW, detta innebär att elproduktionen från PV och den maximala urladdningseffekten inte är tillräcklig för att begränsa hela flygplatsens last till 1 MW. I detta scenario sker detta tre gånger under dagen. Dessa toppar blir dock lägre än i referensfallet, med en minskning av 250 kW av den högst belastningen under dagen. Orsaken till detta att 250 kW är den maximala urladdningseffekten för batteriet i detta scenario samtidigt som ingen elproduktion kommer från solcellerna. En högre urladdningseffekt skulle kunna tillämpas då dessa effekttopparna sällan pågår längre än en timme, vilket resulterar i ytterligare minskningar av effekttopparna. Detta bör dock övervägas mot det ökade slitaget av BESS och om detta resulterar i högre kostnader jämfört med nyttan och besparingar från minskade toppeffekter. Ett BESS med högre batterikapacitet kan också vara intressant att utreda med tanke på att flygplatsens effektbehov ibland är negativt, sänder ut effekt på elnätet, på grund av elproduktion från solcellerna. En större BESS möjliggör att mer producerad el på plats kan gynna flygplatsen, något som kan vara ett billigare alternativ jämfört med att sälja den på elmarknaden.



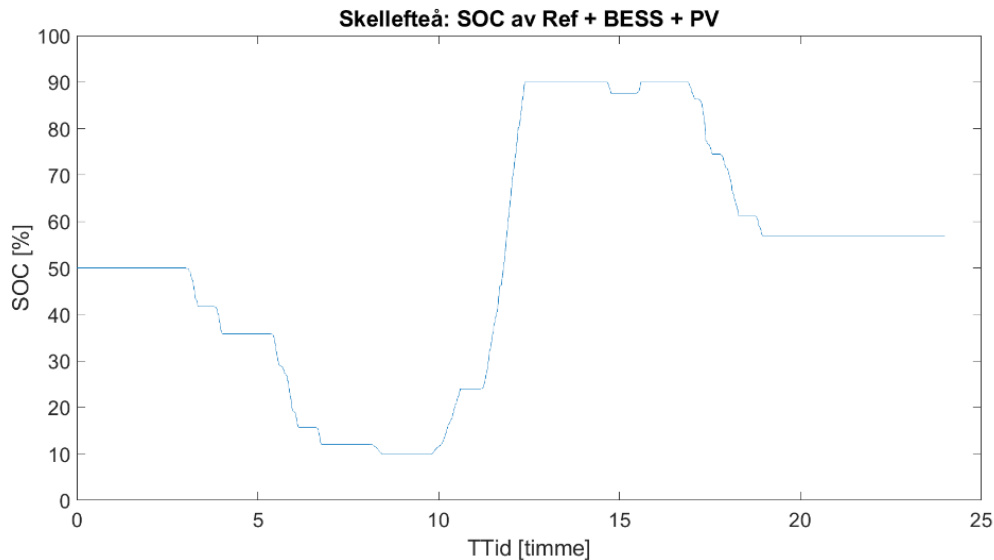
Figur 41: Effektbehovet av Skellefteå Airport under ett dygn från elnätet för scenario *Ref + BESS + PV*.

I Figur 42 presenteras förbrukning och produktion av eleffekt från varje separat subsystem från scenariot *Ref + PV + BESS*. Positiva värden innebär att subsystemet tillför effekt till flygplatsen, medan negativa värden innebär att subsystemet konsumerar effekt. Det som går att observera i jämförelsen mellan lasterna är att effektbehovet från laddning av elflyg är markant större jämfört med övrig belastning. En annan intressant observation är att de flesta av effekttopparna från laddningen av elflyg sker i början och slutet av dagen när elproduktionen från solcellerna är låg.



Figur 42: Lastprofiler över ett dygn uppdelat i varje subsystem för Skellefteå Airport för scenario Ref + PV + BESS. Ett positivt värde innebär tillförsel av effekt till systemet, medan ett negativt innebär konsumtion av effekt.

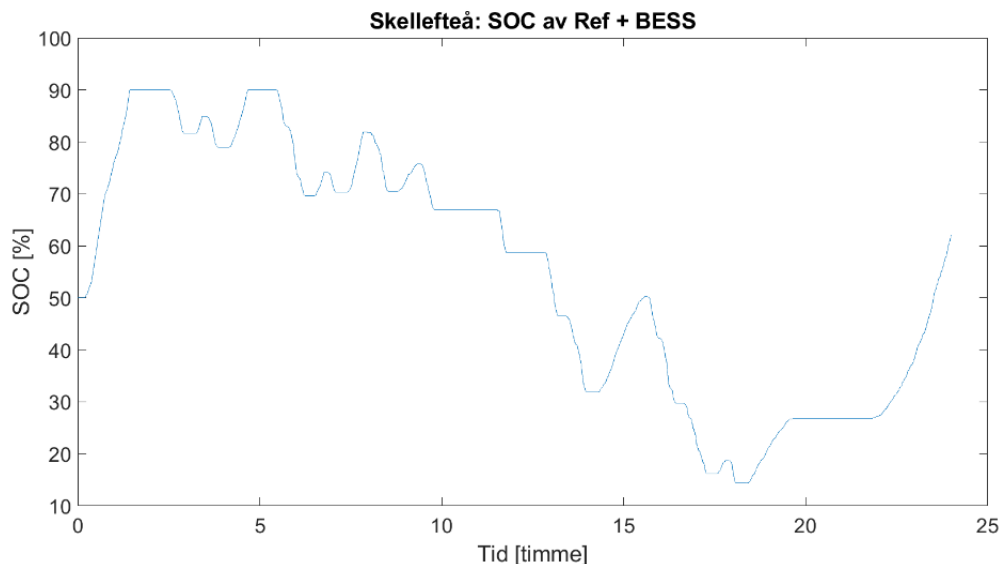
Figur 43 visar hur batteriets SoC ändras över en dag. Med givna begränsningar på batteriet och elkonsumtionen för hela flygplatsen laddas batteriet ut bitvis under dagen, med en större uppladdningssession under dagen. Orsaker till att uppladdningen av BESS sker mitt på dagen är sannolikt för att detta är då elproduktionen från PV är som störst samtidigt som elflygsladdningen inte har sina största effekttoppar just då. Systemet kan också tolkas som stabilt eftersom SoC i slutet av dagen är något högre än vad den initialt var i början av simuleringen. Detta resultat är dock känsligt och beroende av att det är en solig dag.



Figur 43: SoC för BESS för scenario Ref + PV + BESS. Eftersom nettoladdningen över dagen är positiv kan lösningen ses som stabil.

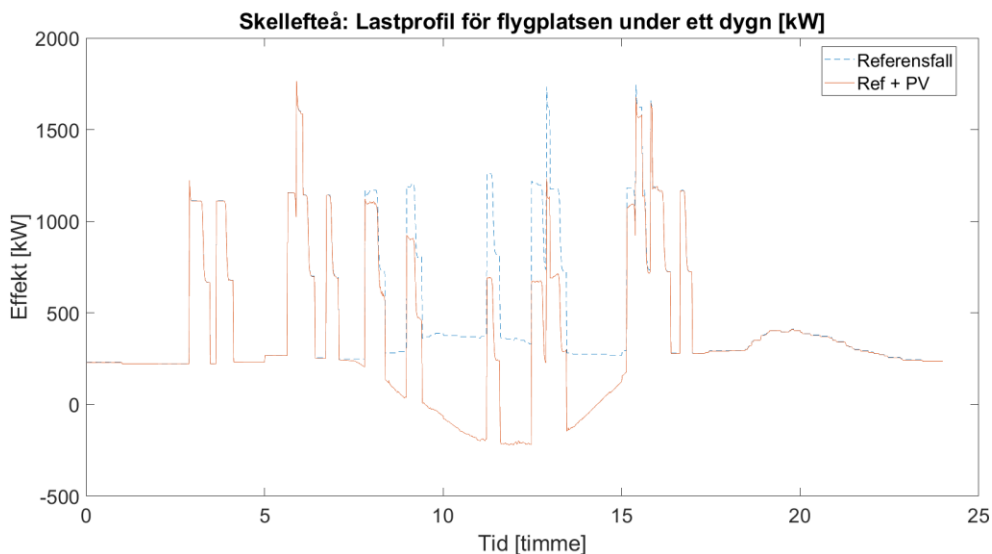
I händelse att det är en dag med i stort sett ingen elproduktion alls blir beteendet annorlunda för BESS, vilket representeras av fallet i Figur 44. BESS kan fortfarande designas som ett stabilt

system, dock kräver detta att gränsvärdet för när BESS tillåts ladda höjs till en hög nivå jämfört med scenario *Ref + PV + BESS*.



Figur 44: SoC för för BESS för scenario *Ref + BESS*. Eftersom nettoladdningen över dagen är positiv kan lösningen ses som stabil.

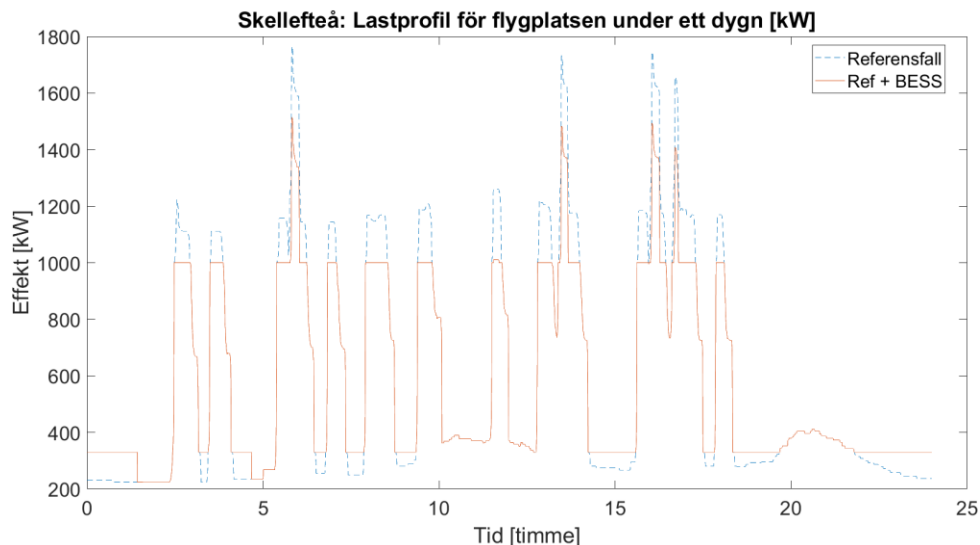
I Figur 45 presenteras en jämförelse av referenslasten samt lasten då PV har installerats vid flygplatsen. De främsta resultaten som kan observeras i Figur 45 är att PV lyckas minska elbehovet från elnätet, dock finns det en mismatchning mellan elproduktionen från PV och effekttopparna. Detta innebär att toppeffekten under den simulerade dagen i stort sett är densamma oavsett om PV installeras eller ej.



Figur 45: Effektbehovet av Skellefteå Airport under ett dygn från elnätet för scenario *Ref + PV*.

I Figur 46 visas resultaten från scenario *Ref + BESS*, där enbart ett BESS integrerades vid flygplatsen. I detta fall ses att ett BESS lyckas att minska toppeffekterna, men precis som i fallen

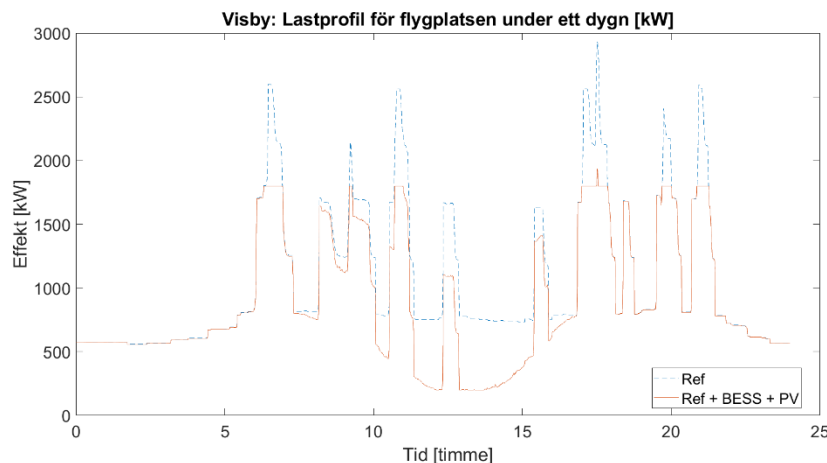
med med både PV och BESS finns inte tillräckligt med effekt för att reducera toppeffekterna till det önskade värdet 1 MW.



Figur 46: Effektbehovet av Skellefteå Airport under ett dygn från elnätet för scenario Ref + BESS.

5.7.2 Visby Airport

För simulering med Visby Airport sattes gränsvärde för laddning och urladdning av BESS till 200 kW respektive 1.8 MW, detta eftersom Visby Airport är en större flygplats jämfört med Skellefteå och har ett högre effektbehov. Batterikapaciteten för BESS sattes till 2 MWh och det maximala effektuttaget valdes till 1 MW. I figur 47 presenteras effektbehovet från elnätet scenario Ref + BESS + PV för Visby Airport. De resultat och slutsatser som kunde identifieras från simuleringar av Skellefteå Airport var densamma som för Visby Airport, där exempelvis en kombination av BESS och PV reducerar de flesta effekttoppar till det valda gränsvärdet på 1.8 MW.



Figur 47: Effektbehovet av Skellefteå Airport under ett dygn från elnätet för scenario Ref + BESS+PV.

För de olika scenarion som togs fram sågs liknande trender för Visby Airport som för Skellefteå Airport.

6 Diskussion och slutsatser

Övergripande för detta projekt är att flera separata simuleringsmoduler utvecklats för att förstå energisystemet på flygplatsen, vilka krav som kan komma att ställas vid ökad elektrifiering, samt hur dessa krav kan mötas med olika typer av systemlösningar. Under projektets genomförande har projektparterna kontinuerligt samarbetat för att se till så att rätt typ av resultat produceras och kan kommuniceras mellan simuleringsmodulerna i den utsträckning som behövs. Genom den förståelse som skapats för de olika delsystemen inom projektet kan således fortsatt forskning även fokusera på utveckling av ett heltäckande, gemensamt simuleringsverktyg. Vidare är de metoder som utvecklats i hög utsträckning generiska och kommer således kunna användas framöver för att göra liknande analyser för andra flygplatser. I fortsatt forskning är det även intressant att undersöka vilken roll framtidens flygplats kan spela då den utvecklas från en naturlig nod i våra transport- och logistikkedjor, till en komponent i det lokala och regionala energisystemet.

Litteraturstudier och översikt av pågående projekt visar att det är mycket som händer inom området elflyg och elektrifiering av flygplatser. Det finns ett ökat allmänintresse och forskningsintresse för området. Samtidigt finns en viss tillbakagång i målsättningar för helt eldrivna passagerarflyg, till delvis eldrivna passagerarflyg. Denna studie indikerar att företag eller aktörer kan ha utgått ifrån en målsättning om ett helt elektrifierat flyg, men sedan bytt till exempelvis hybridlösningar för flyget eller ha förkortat den uppskattade sträcka som hybridflyget eller elflyget kan åka. Omprövningen av idéer kan tyda på att företag tar mindre men kanske mer konkreta steg framåt i teknikutvecklingen. Samtidigt är ambitionen som beskrivs i rapporter och som nationella målsättningar fortfarande höga för att tillse att utsläppen av fossila bränslen minskar från flygen. Det noteras att elflyget pekas ut som en av flera olika möjliga lösningar för att minska utsläppen från flygsektorn och att minska flygskammen. Även utvecklingen av flygplatserna, med exempelvis förnybar elproduktion lokalt, signalerar att det finns stora intressen i att bemöta den kritik som flygsektorn har fått avseende utsläpp och även ett intresse att bidra till hållbar elproduktion. Under pandemiåren visade det sig att flygandet i Sverige kunde minskas drastiskt och därmed även utsläppen från flygen. Den temporära förändringen i resebeteende har dock sedan pandemin återgått till ett ökat resande, där flyget är en naturlig del i Sverige. Under arbetets gång har det ökande intresset för elflyg och flygplatsutveckling märkts av. Dessutom har det förändrade omvärldsläget påverkat fokusområdena i forskning och utveckling. Målet är fortfarande att öka flygets hållbarhet, och samtidigt att tillse god säkerhet, såväl för passagerare som för samhället i stort. Säkerhetsbehovet vid flygplatser, vid kritisk infrastruktur rörande exempelvis elproduktion, och för säker transport har uppmärksammats. Dessutom har eldrivna drönares koppling till säkerhetsläget varit aktuellt under projektets gång. Säker och resiliert tillgång till elektricitet, vid kritiska infrastruktur som flygplatser, har diskuterats under projektiden. Säkerhetsaspekter och datasäkerhet avseende exempelvis elflyg, drönare, laddning av elfordon, flygplatser, elanvändning och elproduktion, är något som fortsatt är aktuellt att studera.

6.1 Energibehov och framtida effektlaster på flygplatsen

Simuleringsunderlagen för såväl laddning av elflyg som elbilar är dels dygnsbaserade, dels bygger de på antaganden om möjliga framtidsscenarioer om hur elektrifieringen kan tänkas utvecklas. Således är även resulterande effektlaster på flygplatserna baserat på de undersökta scenarierna i

respektive fallstudie (Visby och Skellefteå). Dessa är framtagna och/eller avstämnda i dialog med flygplatserna gällande exempelvis lämpliga framtida elflygförbindelser, men för att få en bättre bild krävs sannolik utredning av fler scenarier samt utökad dialog med exempelvis flygbolagen som ska driva flyglinjetrafiken. Vidare hanteras resulterande laster från elflyg- och elbilsladdning repetitivt per dag för genomförande av helårsutvärderingar, vilket också introducerar viss osäkerhet då saker som flygscheman kan komma att variera (exempelvis är Visby en känd semesterort som har betydligt högre flygaktivitet under sommarhalvåret).

Ett flertal metoder för smart styrning av laddning i syfte att undersöka möjligheterna att reducera behovet av effektkapacitet på flygplatsen finns representerade i delresultat som presenteras. Dessa är dock av karaktären regelbaserade eller heuristiska algoritmer och således görs ingen optimering specifikt för laddningen. Optimering görs istället senare i helårsutvärderingen genom styrning av stationära batterilager i kombination med lokal elproduktion för att på olika vis möta de effekt- och energibehov som uppstår. Oaktat detta så pekar resultaten trots allt på att smart styrning kommer vara viktigt i avseendet att minska kraven på exempelvis installerad effektkapacitet vid flygplatsen för att möta elektrifiering av flyget och andra transporter.

6.2 Solcellsanläggningar på flygplatser

Ett ökande antal flygplatser väljer att installera solcellspaneler tack vare deras miljövänliga fördelar. Emellertid kan det vara mer utmanande att installera solceller på flygplatser på grund av de höga säkerhetskraven. Solpaneler kan orsaka problem som till exempel bländning och elektromagnetiska störningar. Detta kräver noggranna riskanalyser och begränsningsplaner för att säkerställa att installationerna inte påverkar flygplatsdrift, flygtrafikledning och piloter. Dessutom behövs komplettering av standarder, och regelverk måste kontrolleras och övervakas regelbundet för att minska riskerna med solcellsanläggningar på flygplatser.

6.3 Styrning av batteriet

Lönsamheten för batteriinvesteringen har beräknats utifrån två inkomstkällor: minskad köpt energi och reducerade effekttoppar. Ett batteri kan göra mycket mer än så! Tidigare studier (Stephan, 2016 & Han, 2022) har visat på potentialen för samkörning av tjänster för att dels öka utnyttjandegraden, dels generera fler inkomstkällor. Exempel på andra styrningar som skulle kunna fungera ihop med de som testats här är: prisarbitrage (köpa el när det är billigt och använda när det är dyrt) och stödtjänster för el-nätet, exempelvis genom frekvensreglering. I dagsläget finns goda ekonomiska incitament för att upplåta sitt batteri till frekvensreglering. Principen bygger dock på att man upplåter sitt batteri till tredje part under en förbestämd tid och att batteriet under den tiden blir indisponibelt för annan användning. Om det primära syftet med batteriet i en flygplatskontext är att tillgodose det ökade energi- och effektbehovet är därmed denna tjänst mindre lämpad. Är syftet med batteriet primärt en ekonomisk investering så kan stödtjänsterna dock ses som ett lämpligt alternativt. Framför allt i och med att man har rådighet att själv bestämma när man vill vara med och reglera, i kombination med att lasterna på flygplatsen – framför allt elflyg och el-bilar – till viss mån är förutsägbara och baserade på ankomster och avgångar.

6.4 Jämförelse mellan intra-dag och helårsutvärdering

Resultaten från simuleringsmodellerna som simulerade elbehovet för flygplatserna under en dag respektive ett helt år visar på några intressanta skillnader. Ett tydligt exempel är den maximala effekttopparna som bägge modellerna redovisar i figur 41 och figur 40b.

Toppeffekten som redovisas med helårsmodellen i figur 40b visar en maximal effekt på 1041 kW, medan motsvarande värde för intra-dag modellen är närmare 1800 kW. Förvisso finns det vissa olikheter mellan modellerna som kan påverka, men upplösningen av data mellan modellerna har sannolikt en stor inverkan på värdet på effekttopparna. Effekttopparna för systemet är sällan längre än en timme, och detta innebär att kortare effekttoppar jämnas ut när medeleffekten över en timme beräknas. Genom att simulera med kortare tidssteg, som in intradag-modellen. Kan dessa effekttoppar uppskattas mer precist, och det ger en inblick i det effektbehov som kan behövas på en elektrifierad flygplats över en dag. Däremot kan modellen för helårutvärdering utföra skattningar på energibehovet över lägre tidsperiod, eller undersöka skillnader över årstider. Detta kan vara till en fördel vid estimering av batteristorleken som krävs vid flygplatsen, samt när exempelvis hänsyn bör tas för ekonomiska aspekter. Modellerna fungerar som ett komplement till varandra för att ta hänsyn till både den momentana påverkan på elnätet från flygplatsen samt strategiska och ekonomiska aspekter under längre tid.

6.5 Fortsatt forskning

I de scenarion som använts i innevarande studier har flyget och dess laddmönster tagits fram med syfte att motsvara nuvarande schema för avgångar och ankomster. En intressant vidareutveckling av detta vore att undersöka hur mycket flexibilitet som finns att ändra på flygtider för att maximera laddningen av elflyg under dagtid.

Ett annat förslag till vidare studier kan vara att ta fasta på förutsägbarheten av lastbehovet och undersöka vidare vilka kombinationer av batteristyrningar som lämpar sig bäst för en flygplats.

De föreslagna effektkapningsstyrningarna i detta arbete jobbar kontinuerligt för att hålla nere topparna. Detta kan innebära att ett försök att hålla nere en relativt låg topp i början av månaden riskerar att tömma batteriet helt för att sedan inte kunna kapa en betydligt större topp senare. I exemplet från Skellefteå Airport demonstrerades konsekvensen av att styra mot en fördefinierad effektgräns – detta bygger dock på att man har kännedom om rimlig nivå. Ett förslag till vidare studier är också att variera den fördefinierade gränsen över året. För båda flygplatserna finns ett tydligt temperaturberoende i lastbehovet – varför det vore lämpligt att variera gränser kontinuerligt över året för att få en bättre utnyttjandegrad av batteriet och även öka lönsamheten.

7 Publikationslista

Publicerad och muntligen presenterad konferensartikel. Konferensartikeln handlar om projektet som helhet och det då pågående arbetet med att modellera en flygplats, med fallstudierna för Visby- och Skellefteå Airport.

- Leijon, J., Hagman, J., Alfredsson, H., Sigarchian, S.G., Ollas, P., Aalhuizen, C., Döhler, J.S, Boström, C., Thomas, K. "*Airports with increased electrification – an ongoing project with case studies in Sweden*", 35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS35) Oslo, Norway, June 11-15, 2022.

Pågående arbete med manus för två journalartiklar (S_n), den ena om Matlab-modellen för en teknoekonomisk utvärdering av Visby Airport, och den andra om Matlab/Simulink-modellen och simulering av en dag på Visby Airport.

[S1]: Ollas, P., Sigarchian, S.G., Alfredsson, H., Leijon, J., Döhler, J.S., Aalhuizen, C., Thiringer, T., Thomas, K. "*Evaluating the role of solar photovoltaic and battery storage in supporting electrical aviation and vehicle infrastructure at Visby airport*".

[S2]: Leijon, J., Aalhuizen, C., Döhler, J.S., Boström, C., Alfredsson, H., Sigarchian S.G., Ollas, P., Nyman, J., Thomas, K. "*Electrification of airports with a significant number of electric aircraft and electric vehicles to be charged locally*".

Konferensartikel som presenteras i juni 2023. Konferensartikeln handlar om de metoder som utvecklats inom projektet gällande smartladdning av elflygplan på flygplatsen.

- [K1]: Alfredsson, H., Ollas, P., Sigarchian, S.G., Aalhuizen, C., Leijon, J., Thomas, K. "*Transportation Goes Electric – Exploring the Potential of Smart Charging Strategies for Airports*", 36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36), Sacramento, USA, June 11-14, 2023.

Projektet har även spridits i populärvetenskapliga sammanhang. En populärvetenskaplig beskrivning av projektet publicerades på avdelningen för elektricitetsläras hemsida:

(<https://www.elektroteknik.uu.se/forskning/elektricitetslara/forskningsomraden/laddning-av-elflyg/> länk använd 2023-04-27). En journalist vid Uppsala universitet intervjuade dessutom två av projektdeltagarna och publicerade en artikel som relaterar till forskningsprojektet (<https://www.uu.se/nyheter/artikel?id=20592&typ=artikel&lang=sv> länk använd 2023-04-27).

8 Referenser, källor

Alfredsson, H., Nyman, J., Joborn, M., Staack, I., & Petit, O. (2022). Infrastrukturmodellering för storskalig introduktion av elflyg och flygtrafikledning (MODELflyg). Hämtad från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59990>

Amapola (2023). Destinationer, Arlanda Airport (ARN). Tillgänglig på: <https://amapola.nu/south-lapland-airport-vhm/arlanda-airport-arn.html> (Hämtad: 14 mars 2023)

AROWEB - IAIP ESNS SKELLEFTEÅ (2023). Tillgänglig på: <https://www.aro.lfv.se/Editorial/View/IAIP?folderId=53> [Hämtad: 20 mars 2023].

AROWEB - IAIP ESSV VISBY (2023). Tillgänglig på: <https://www.aro.lfv.se/Editorial/View/IAIP?folderId=69> [Hämtad: 20 mars 2023].

Aviation Climate Solution (2015). ATAG Air Transport Action Group. Tillgänglig på: https://aviationbenefits.org/media/125796/Aviation-Climate-Solutions_WEB.pdf [Hämtad: 12 april 2023].

Bloom, I., Cole, B. W., Sohn, J. J., Jones, S. A., Polzin, E. G., Battaglia, V. S., ... & Case, H. L. (2001). An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of power sources*, 101(2), 238-247.

DeVault, T. L., Seamans, T. W., Schmidt, J. A., Belant, J. L., Blackwell, B. F., Mooers, N., Tyson, L. A. and van Pelt, L. (2014) Bird use of solar photovoltaic installations at US airports: Implications for aviation safety, *Landscape and Urban Planning*, 122, pp. 122–128. DOI:10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.11.017.

Electric Vehicle Database (2023). Usable battery capacity of full electric vehicles. Tillgänglig på: <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car> (Hämtad: 10 februari 2023)

Elsäkerhetsverket (2020). Elektromagnetiska störningar - regeringsuppdrag. Tillgänglig på: www.elsakerhetsverket.se

Fares, Robert L., and Michael E. Webber. "The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility." *Nature Energy* 2.2 (2017): 1-10.

Federal Aviation Administration (2021). Federal Aviation Administration Policy: Review of Solar Energy System Projects on Federally-Obligated Airports. Tillgänglig på: <https://www.federalregister.gov/d/2021-09862> [Hämtad: 6 april 2023].

Federal Aviation Administration (FAA) (2018). FAA Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports.

Flughafen Wien AG (2021). Vienna Airport's Sustainability Report 2021.

ForgeSolar (2022). Tillgänglig på: <https://www.forgesolar.com/> [Hämtad: 31 mars 2023].

Fors, K., Linder, S. and Ranström, O. T. (2020) Radiostörningar från solcellsanläggningar Kartläggning av störningsproblematik i Sverige och omvärlden.

Guittet, D. L. and Freeman, J. M. (2018) Validation of Photovoltaic Modeling Tool HelioScope Against Measured Data. Tillgänglig på: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72155.pdf>. [Hämtad: 17 oktober 2022].

Han, X., Garrison, J., & Hug, G. (2022). Techno-economic analysis of PV-battery systems in Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112028.

HelioScope (2022). Tillgänglig på: <https://helioscope.aurorasolar.com/>[Hämtad: 31 mars 2023].

HelioScope: Mathematical Formulation (2023). Tillgänglig på: <https://app.helioscope.com/documentation/mathematical-formulation> [Hämtad: 28 mars 2023].

Ho, C. K., Ghanbari, C. M. and Diver, R. B. (2011). Methodology to assess potential glint and glare hazards from concentrating solar power plants: Analytical models and experimental validation, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 133 (3). DOI:10.1115/1.4004349.

Ind solar farm (2023). Tillgänglig på: <https://indsolarfarm.com/> [Hämtad: 19 mars 2023].

International Civil Aviation Organization (2013). Safety Management Manual (SMM).

Jönköping Airport (2023). Tillgänglig på: <https://jonkopingsairport.se/nyheter/solen-tar-battre-andu-tror> [Hämtad: 20 mars 2023].

Kalmar Öland Airport (2023). Tillgänglig på: <https://kalmarolandairport.se/hallbarhet/torneby-solpark/> [Hämtad: 20 mars 2023].

Khan, S. B., Irfan, S., Zhuanghao, Z. and Lee, S. L. (2019). Influence of refractive index on antireflectance efficiency of thin films, *Materials*, 12 (9). DOI:10.3390/ma12091483.

London Southend Airport (2023). Tillgänglig på: <https://southendairport.com/corporate/environmental-responsibility/> [Hämtad: 20 mars 2023].

Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review." *Applied energy* 142 (2015): 80-94.

Mostafa, M. F. A., Aleem, S. H. E. A. and Zobaa, A. F. (2017). Risk assessment and possible mitigation solutions for using solar photovoltaic at airports, in: 2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 81–88.

Nyholm, E., Goop, J., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2016). Solar photovoltaic-battery systems in Swedish households–Self-consumption and self-sufficiency. *Applied energy*, 183, 148-159.

Ollas, P., Persson, J., Markusson, C., & Alfadel, U. "Impact of battery sizing on self-consumption, self-sufficiency and peak power demand for a low energy single-family house with PV production in Sweden." 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). IEEE, 2018.

Power Circle (2023). Elbilsstatistik, Sveriges nationella statistik för elbilar och laddinfrastruktur. Tillgänglig på: <https://www.elbilsstatistik.se/> (Hämtad: 5 mars 2023)

Sandia National Laboratories (2023). Tillgänglig på: <https://www.sandia.gov/> [Hämtad: 28 mars 2023].

Skellefteå Airport (2023). Tillgänglig på: <https://skellefteairport.se/> (Hämtad: 6 mars 2023)

Sreenath, S., Sudhakar, K. and Yusop, A. F. (2020). Solar photovoltaics in airport: Risk assessment and mitigation strategies, *Environmental Impact Assessment Review*, 84, pp. 106418. DOI:10.1016/J.EIAR.2020.106418.

Sreenath, S., Sudhakar, K. and Yusop, A. F. (2021). Solar PV in the airport environment: A review of glare assessment approaches & metrics, *Solar Energy*, 216, pp. 439–451. DOI:10.1016/J.SOLENER.2021.01.023.

Stephan, A., Battke, B., Beuse, M. D., Clausdeinken, J. H., & Schmidt, T. S. (2016). Limiting the public cost of stationary battery deployment by combining applications. *Nature Energy*, 1(7), 1-9.

Stenumgaard, P. and Linder, S. (2019). Interference Impact from Solar-Panel Systems on Air Traffic Control Communications, in: 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. Barcelona, Spain, pp. 1044–1048.

Sukumaran, S. and Sudhakar, K. (2017). Fully solar powered airport: A case study of Cochin International airport, *Journal of Air Transport Management*, 62, pp. 176–188. DOI:10.1016/J.JAIRTRAMAN.2017.04.004.

Sukumaran, S., Sudhakar, K., Sreenath, S. and Yusop, A. F. (2019). SWOT Analysis of Solar PV Systems in Airport Environment, *International Journal on Emerging Technologies*, 10 (2), pp. 1–07.

Svensk Solenergi (2023). Tillgänglig på: <https://svensksolenergi.se/om-solenergi/anlaggningar/solcellsparker/> [Hämtad: 20 mars 2023].

Swedavia Airports (2023a). Umeå Airport, Destinationer. Tillgänglig på: <https://www.swedavia.se/umea/destinationer/> (Hämtad: 5 mars 2023)

Swedavia Airports (2023b). Visby Airport. Avgångar. Tillgänglig på: <https://www.swedavia.se/visby/avgangar/> (Hämtad: 10 februari 2023)

Wang, J., Liu, P., Hicks-Garner, J., Sherman, E., Soukiazian, S., Verbrugge, M., ... & Finamore, P. (2011). Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of power sources*, 196(8), 3942-3948.

Widén, J., Wäckelgård, E., & Lund, P. D. (2009). Options for improving the load matching capability of distributed photovoltaics: Methodology and application to high-latitude data. *Solar Energy*, 83(11), 1953-1966.

Wybo, J. (2013). Large-scale photovoltaic systems in airports areas: safety concerns, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp. 402–410. DOI:10.1016/J.RSER.2013.01.009.

Ängelholm Helsingborg Airport (2023). Tillgänglig på: <https://www.angelholmhelsingborgairport.se/miljo/solceller/> [Hämtad: 20 mars 2023].

9 Bilagor

9.1 Bilaga 1

Separat dokument ”*KÄNSLIG INFORMATION. Översikt.pdf*”.

9.2 Bilaga 2

Separat dokument ”*KÄNSLIG INFORMATION. Konferensartikel K1.pdf*”.

9.3 Bilaga 3

Separat dokument ”*KÄNSLIG INFORMATION. Manuskript S1.pdf*”

9.4 Bilaga 4

Separat dokument ”*KÄNSLIG INFORMATION. Påbörjat manuskript S2.pdf*”

9.5 Bilaga 5

Separat dokument ”*KÄNSLIG INFORMATION. Simulering av Visby med intradagmodell.pdf*”