



LUNDS
UNIVERSITET

Harmoniserad elektrifiering av luftfarten

Regionala flygplatsers och lokala nätbolags roll i omställningen till
kommersiellt elflyg

Annie Olofsson

Examensarbete på Civilingenjörsnivå
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola | Lunds Universitet



Förord

Examensarbetet är avslutningen på en fem år lång civilingenjörsutbildning i Ekosystemteknik för Energivetenskapliga Institutionen vid Lunds Tekniska Högskola med inriktning Energisystem. Rapporten har genomförts tillsammans med Sweco i Stockholm under hösten 2020.

Främst vill jag tacka LTH:s Per-Olof Johansson Kallioniemi och Swecos Magnus Lindén, vilka har agerat både handledare och diskussionspartners under arbetes gång. Jag vill även tacka andra kollegor och anställda på Sweco och LTH som bistått med insikter, kompetens och kommentarer.

Slutligen riktas ett stort tack till Härjeåns energi och Härjedalens flygplats i Sveg vilka möjliggjort examensarbete genom att tillhandahålla underlag för den genomförda fallstudien.

Januari 2021, Stockholm

Annie Olofsson

Examensarbete på Civilingenjörsnivå

ISRN LUTMDN/TMHP-21/5467-SE

ISSN 0282-1990

© 2021 Annie Olofsson samt Energivetenskaper

Energihushållning

Institutionen för Energivetenskaper

Lunds Universitet - Lunds Tekniska Högskola

Box 118, 221 00 Lund

www.energy.lth.se

Sammanfattning

Elektrifieringstrenden inom transportsektorn tycks under hösten ha lämnat marken; elflyg anses vara ett av svaren på hur luftfarten skall reducera sin omdebatterade klimatpåverkan i framtiden. En ökning av tunga elektrifierade fordon, inklusive flyg, resulterar i konsekvenser för elsystemet sett till ökat effektbehov och nya lastprofiler. Examensarbetet ämnar således undersöka vilken roll regionala flygplatser kan komma att spela i energiomställningen. En roll med avseende på ökat effektbehov för elflyg men också som producent av förnyelsebar el i form av solceller. Vidare hur dessa två åtgärder kan komma att öppna upp för både synergier utmaningar på systemnivå.

En dynamisk simuleringsmodell utvecklades för flygplatsers elenergi balans med olika framtidsscenario med avseende på solet och elflyg. En modellen som sedan applicerades på Härjedalens flygplats för att besvara rapportens frågeställningar:

- Scenario *Solet*: Hur skulle en nätansluten solcellsanläggning i anslutning till flygplatser kunna utformas och optimeras sett till årlig täckningsgrad av befintlig elanvändning? Vilka utmaningar finns sett till flygplatser och anslutande elnätet?
- Scenario *Flyg-el*: Vilken inverkan förväntas en implementering av elektrifierade kommersiella flyg ha på regionala flygplatser samt deras lastprofil?
- Scenario *Systemlösning*: Hur väl möter produktion av en solcellsanläggning en flygplats lastprofil när elektrifierade flyg inkluderas baserat på årlig täckningsgrad? Vilka systemnyttor och utmaningar uppstår?

Solceller kan i begränsad mån tillgodose ett ökat effektbehovet från laddning av elflyg där anläggningens storlek och säsongvariation utgör avgörande parametrar. Vidare påvisas att en lastprofil med stundtals höga effekttoppar i mindre utsträckning tillgodoser elanvändning sett till täckningsgrad och solkraft. Effekttoppar vilka delvis kan reduceras med batterilager. Vidare identifieras flygplatser som lämpliga producenter av förnyelsebar el i form av solkraft med avseende på tillgängliga ytor med lågt andrahandsvärde.

En markant förändrad lastprofil för flygplatser påvisas om samtlig kommersiell lufttrafik elektrifieras. Eviations elektrifierade flygplan Alice utgjorde indata i simuleringsmodellen för rapporten och har en batterikapacitet på 920 kWh (reserv inkluderad). Varje laddningstillfälle utgjorde effekttoppar på cirka 10 gånger den nuvarande elanvändningen.

En ny aktör med intressen i elmarknaden identifierades i rapporten i form av flygbolag. Vid en kommersiell elflygsimplementering uppstår ekonomiska incitament till att bidra med låga och stabila elpriser. Då elpriset står i direkt koppling till elflygets bränslekostnader. Genom att investera i solceller och batterilager i anslutning till flygplatser säkerställs inte bara redundans utan möjliggör även sänkta marginalkostnader för flygbränsle.

Nyckelord: Solceller, Elektrifiering, Elflyg, Batterilager, Laddning, Lastprofil

Abstract

The electrification trend within the transport sector seems to have left the ground. This is due to an ongoing commercialization of all-electric aircrafts with the aim to reduce the well debated climate impact from aviation. The expansion of heavy battery-driven vehicles in our society are at the same time causing an increasing need of flexibilization and capacity from the power system. This paper aims to investigate the role of regional airports part to play in the ongoing energy transition, due to not only a new expected load profile from electric aviation but also as a facilitator of renewable energy. Moreover, how the combination of these two can result in synergies as well as challenges at a system level.

A dynamic simulation model where developed for different scenarios due to future power supply of airports. Then applied to a case study of Hjärjedalens Airport to answer the thesis statement issues which are as follows:

- Scenario *Solar power*: How would a grid connected PV-facility in connection to airports be designed due to the present load profile on a yearly basis? What challenges are there, due to installation and grid connection?
- Scenario *Aviation power*: What impact are to be expected on airports from an implementation of commercial electric aviation and how does it affect the load profile?
- Scenario *System solution*: In what extent can solar power meet the airports expected load profile with electric aviation included on a yearly basis? What are the consequential synergies and challenges?

Solar power can in limited extent supply the increase in power demand where the size of the PV-facility and seasonal variations are key factors. Further results show that a load profile with large momentarily power peaks have a lower degree of self-sufficiency due to PV-facilities optimized on yearly consumption. Battery storage is identified as one possible solution at to some extent reduce those power peaks. Furthermore, are airports identified as potential producers of solar power to the power system when the amount of available land with low second-hand value are considered.

The result shows a clear change in the airports load-profile if all commercial flights where electrified. Calculations in the report are based on Eviations electrified air-craft Alice which has a battery capacity of 920 kWh (IFR included). Each charging resulted in power peaks ten times the normal electricity consumption.

A new actor with new interests is identified for the power market in the paper, airlines. If (or when) a commercialization of electric aircrafts occurs economic incentives will emerge to contribute to low and stable electricity price. As the electricity price will be directly related to fuel costs for electric aviation. Therefore, by investing in solar power and battery storage in connection to airports there are not only a gain due to redundancy but also to ensure lowered marginal cost for fuel.

Innehållsförteckning

1 Inledning	7
1.1 Bakgrund	8
1.1.1 Elsystemet	8
1.1.2 Luftfartssektorn	10
1.2 Syfte & Frågeställning	12
1.3 Avgränsningar	13
1.4 Disposition	14
2 Teori	15
2.1 Elnätets uppbyggnad och utformning	15
2.2 Elkvalitet	16
2.3 Flygplatsers roll i energiomställningen	18
2.3.1 Flygplatser och elförsörjning	18
2.3.2 Solel	20
2.3.2.1 Beräkningar solelsproduktion	20
2.3.2.2 Solel och elkvalitet	26
2.3.2.3 Solel och batterilager	27
2.3.3 Flygplatser och elektrifierade flyg	28
2.3.3.1 Elflyget Alice	29
3 Metod	31
3.1 Simuleringsmodell	31
3.1.1 Basscenario	32
3.1.2 Modelluppbyggnad	32
3.1.4 Scenari <i>Solel</i>	34
3.1.5 Scenari <i>Flyg-el</i>	37
3.1.6 Scenari <i>Systemlösning</i>	40
3.2 Fallstudie	44
3.2.1 Härjedalens flygplats	44
3.2.2 Härjeåns nät AB	46
3.2.3 Omgivning	47
3.2.4 Parametrar för solcellsanläggning	47
4 Resultat & Analys Del I	48
4.1 Resultat Basscenario	48
4.2 Resultat scenari <i>Solel</i>	49
4.3 Resultat scenari <i>Flyg-el</i>	54
4.4 Analys scenari <i>Solel</i> & scenari <i>Flyg-el</i>	56
5 Resultat & Analys Del II	59
5.1 Resultat scenari <i>Systemlösning</i>	59
5.2 Analys scenari <i>Systemlösning</i>	67

6	Diskussion	70
6.1	Frågeställningar	70
6.1.1	Scenario <i>Solel</i>	70
6.1.2	Scenario Flyg-el	71
6.1.3	Scenario Systemlösning	72
6.2	Metod	73
7	Slutsatser	76
8	Framtidsutsikt	77
9	Referenser	78
10	Appendix	83
	Bilaga 1 – Översikt Svegs flygplats	83
	Bilaga 2 – Översikt för ett exempel av simuleringsmodellens utseende	84

Ordlista & Nyckelbegrepp

- *Lastprofil* – Hur elanvändning varierar över tid.
- *Prosument* – Aktör på elmarknaden som både producerar och använder el.
- *Täckningsgrad* – I vilken utsträckning en prosument tillgodogör sin egen elanvändning.
- *Redundans* – Ett systems förmåga att fungera även om vissa delar bortkopplas eller skadas.
- *Elflyg* – I detta sammanhang flygplan vilka förses med elkraft från batterier.
- *Trefas* – Elsystem uppbyggt på tre spänningsfaser.
- *Nominell systemspänning* – Vilken spänning ett system identifieras med.
- *Referensspänning* – Utgörs av den nominella systemspänningen, om inte annat anges.
- *Effektivvärde* – Den ström eller växelspanning vilken krävs för att få motsvarande effekt i en likströmskrets med samma resistans. Används för beräkning av effekt i växelströmkretsar.
- *Effekt* – För att tillgodose användarbehovet vid varje tidpunkt krävs det att effektbalansen upprätthålls, vilket innebär att det alltid skall finnas tillräckligt med tillgängligt arbete i systemet (Uniper 2020).
- *Energiproduktion* – Samtliga produktionsanläggningar i systemet producerar elenergi som transporteras ut till elanvändare över hela året, med andra ord effekt över tid (Byman 2016).
- *Spänning* - För ett fungerande elsystem måste spänningen hållas konstant annars riskeras skador på anläggningar och apparater (Byman 2016). Konstant spänning är även avgörande för energiöverföringen.
- *Frekvens* – Är kopplat till effektbalansen, för att elen skall upprätthålla en viss kvalitet krävs det att frekvensen ligger mellan 49,9 och 50,1 Hertz (Hz). När den totala elanvändningen stiger faller frekvensen och måste kompenseras med ökad produktion (Uniper 2020). Om frekvensen hamnar utanför de satta gränserna riskeras både omfattande elavbrott och skadad utrustning.
- *Svängmassa (Rotationsenergi)* – Kan beskrivas som en fördelaktig tröghet vilken finns hos roterande massor i systemet. Hjälper till att upprätthålla nätets frekvens och ökar tåligheten mot störningar (Energimyndigheten 2018).
- *Flexibilitet* – Elnätets resiliens att vara i konstant balans mellan användning och produktion vid förändringar i endera eller båda (Energimarknadsinspektionen 2016).

1 Inledning

I många av de publicerade rapporter och färdplaner inom energiomställningen tas helhetsgrepp på riktningar och utmaningar vilka väntar större sektorer sett till den rådande globala avväjningen av fossila bränslen. Studier som genom sina övergripande angreppssätt öppnar upp för hur morgondagens energiförsörjning och infrastruktur kan komma att se ut. Denna rapport kan istället liknas vid en djupdykning med målet att undersöka hur dessa mer generella framtidsversioner konkret kan komma att påverka varandra. Vid övergång från makro- till mikroperspektiv finns det anledning att fokusera på knutpunkter av olika system, där beroende och inflytande av och på varandra är enklare att detektera. På så vis kan faktiska konsekvenser av den pågående energiomställningen och potentiella framtidsscenarioer inom respektive sektor analyseras något mer konkret. I detta examensarbete avses knutpunkten vara flygplatser där såväl elsystemet som transportsektorn är väsentliga och integrerade infrastrukturer. Infrastrukturer som båda står inför tekniska och strukturella revolutioner de kommande åren. Ambitionen är således att handplocka lösningsalternativ från mer övergripande systemstudier; ökad andel förnyelsebar energi och elektrifiering av luftfartssektorn för att på så vis ge en mer reell uppfattning av dess konsekvenser och ömsesidiga inverkan. Förhoppningen är att kunna bidra med ytterligare en nyans i den kolossala färgpalett av åtgärder vilka förväntas krävas för att nå minskad klimatpåverkan från fossila bränslen.

I takt med ökat elberoende i dagens svenska samhälle, ett samhälle vilket samtidigt strävar efter att uppfylla målet om 100 procent förnybar elproduktion, krävs fortsatt garanterad leveranssäkerhet (Energimyndigheten 2018). Med andra ord står elsystemet inför omfattande interna förändringar samtidigt som det expanderar. Upprätthållandet av ett väl fungerande system är vitalt för en samhällsbärande infrastruktur men förändring och expansion måste samtidigt ske resurseffektivt. Implementering av intermittent produktion resulterar i nya stabilitetsproblem då variabla kraftslag inte innehar samma tålighet och tröghet som de konventionella. Därav förväntas utveckling av nya systemtjänster och affärsmodeller vara avgörande för att säkerställa och upprätthålla robustheten i elnäten. Samtidigt pågår en elektrifieringstrend inom flera sektorer, varav en av dem är transportsektorn. Allt fler elfordon har intagit de svenska vägarna senaste åren och nu siktar även luftfartssektorn att hoppa på elektrifieringståget på en kommersiell nivå (Trafikanalys 2020). Med den primära anledningen att minska sitt klimatavtryck men samtidigt bibehålla positionen som tillväxtbransch (Transportstyrelsen 2020a). Om elektrifieringens främsta syfte då är att reducera flygets klimatpåverkan är säkerställandet av fossilfri elproduktion ett måste (Trafikanalys 2020). Vilket gör Sverige till ett utmärkt föregångsland med sin höga andel förnyelsebara el. I anslutning till flygplatser finns det dessutom flera möjligheter och fördelar sett till implementering av lokal elproduktion då det råder god tillgång på mark, ligger i anslutning till infrastruktur och det alternativa värdet på mark anses lågt (Blomqvist & Unger 2018).

I denna studie undersöks därför huruvida elproduktion från solceller kan komma att tillgodose både rådande elanvändning och det elbehov de första kommersiella elektriska flygen kan tänkas utgöra. Vidare vilka synergier och utmaningar som identifieras med

systemlösningen och i relation till anslutande elnät. En fallstudie genomförs på Härjedalens flygplats i Sveg och Härjeåns Energi.

I skrivande stund är det ännu osäkert vilka långsiktiga effekter den pågående pandemin kommer ha på flygets utveckling. Examensarbetet utgår därför från hur flygtrafiken såg ut innan covid-19 blev en del av vår vardag.

1.1 Bakgrund

Nedan ges bakgrund samt kommande utmaningar till och av de två infrastrukturella system som granskas i examensarbetet: Elnätet och luftfartssektorn. Redogörelsen ges på systemnivå för att tillgodose den kunskap som anses behövas för rapporten.

1.1.1 Elsystemet

När stora samhällsbärande system, liksom elsystemet, står inför omfattande förändringar under relativt kort tid medföljer risker och utmaningar. Viktigt är att poängtera att beskrivna utmaningar nedan kan uppkomma vid olika tidpunkter och i olika hög grad.

Elsystemets utveckling sett till energiomställningen är sammanflätad och beroende av flera faktorer varav ett flertal som inte direkt går att påverka (Energimyndigheten 2018). Några exempel är ekonomisk tillväxt, globalisering, befolkningsökning och teknikutveckling. Den pågående elektrifieringen inom både transport- och industrisektorn ger exempelvis inga tecken på att stagnera och internationaliseringen av elmarknaden förväntas fortsätta. Sveriges elnät är sammankopplat till flera närliggande länder där import och export skall harmoniseras och krav från EU uppfyllas (Nordling 2016). Däremot finns det faktorer som har en direkt inverkan på elanvändning och som dessutom kan kontrolleras, liksom politiska mål och styrmedel samt utveckling av nya affärsmodeller (Energimyndigheten 2018).

Om regeringens mål om ett hundra procentigt förnyelsebart elsystem skall komma att bli verklighet är sannolikheten hög att en betydande andel av elproduktionen kommer utgöras av intermittenta energikällor (Energimyndigheten 2018), liksom sol- och vindkraft. Vilka innebär nya krav på systemet och att det inte längre kommer gå att förlita sig på den stabilitet vilken erbjuds tidigare. Fossila bränslen är inte längre ett hållbart alternativ och kärnkraft är i dagsläget inte ekonomiskt försvarbart. Vattenkraften kan därför behöva utgöra baslast i allt högre utsträckning. Vilket innebär att de unika fördelar som vattenkraften innehar i form av flexibilitet och frekvensreglering kan minska till följd av behovet av tillgodosett effektbehov. Variationerna som intermittenta produktionskällor ger upphov till skapar olika tidsupplösningar sett till produktionsmönster, från säsong ner till sekundnivå. En expanderande av intermittent elproduktion förväntas även innebära en decentralisering av elsystemet då sol- och vindenergi ställer andra geografiska krav än konventionell produktion gjort. Sett till geografiska förutsättningar och teknisk potential har Sverige goda möjligheter då stora områden finns tillgängliga för utökad kraftproduktion. Ökad decentralisering förväntas även ske i takt med allt fler mikroproducenter och prosumenter (aktörer som både använder och producerar el) intar marknaden. Dessa aktörer kräver nya typer av

affärsmodeller då de medför en tätare sammankoppling, inte endast sett till energiöverföring, utan även mellan producenter och användare.

Även elbehovet varierar i sin tur i flera dimensioner, både med avseende på användningsområde och geografiska aspekter, från landsbygd till städer (Energiföretagen 2020a). Då många bostäder och lokaler värms upp med hjälp av el i Sverige är elanvändningen även knuten till, förutom dagsljus, utomhustemperatur. Elanvändningens variation sträcker sig precis som produktionen över året, mellan månader, veckor och dagar, ner på minut- och sekundnivå. Ett väl dimensionerat system är fundamentalt för ett elintensivt land som Sverige. Vilket innehar kapacitet att tillgodose de effektbehov varje användare efterfrågar, året om, i varje stund och oberoende av varandra. Det finns inte något kösystem eller någon prioriteringsordning i elnäten (Berglund & Åkerlund 2007).

Som konsekvens av den rådande omställningen, både sett till produktion- och användarsidan, innebär det att elnätens uppbyggnad och struktur kommer påverkas och bli än mer komplexa än vad de redan är idag (Nordling 2016). Befintliga nätstrukturer är huvudsakligen utformande för stabila centraliserade produktionskällor i form av vatten- och kärnkraft (Energimyndigheten 2018). Effektflödet är anpassat att ske i en och samma riktning, från ett begränsat antal produktionsanläggningar med hög spänning som sedan succesivt transformeras ner till lägre (Nordling 2016). Med ökad distribuerad och varierande elproduktion förväntas inte effektflödet vara planerbart och enkelriktat i den utsträckning det varit tidigare. Med andra ord är det inte efterfrågan som kommer styra produktionen i lika hög omfattning. Vilket ställer nya krav på säkerhetsåtgärder, styrning och övervakning, i form av så kallade ”smarta nät”, där nätens flexibilitet blir avgörande.

Då variationen förväntas öka på både användar- och produktionssidan är ett flexibelt system avgörande för dess resiliens mot störningar och avbrott (Power Circle 2018). En lösning vilken öppnar upp möjligheter att reducera påfrestningar på nätets flexibilitetsanpassning är elektrokemisk energilagring, i form av batterilager. En lagringsmetod vilken examensarbetet återkommer till. Både sett till elektrifiering av flygplan där batterier är en vital del och som potentiell systemnytta i anslutning till solkraft. Intermittensen vilken solkraft ger upphov till kan harmoniseras med hjälp av batterilager (VTI 2020). Både sett till den egna användningen och till nätet, med rätt optimering kan batterilager bidra med utjämning av effekttoppar. En optimering vilken vidare innehar potential att generera arbitrage: El köps när det råder låga priser och sparas till tillfällen då behov uppstår och priset är högre (Åhman 2016). För att denna affärsmodell skall fungera krävs pricksäkra prisprognoser. Batterilager kan således liknas med en mellanhand vilken tjänar utjämnare i morgondagens elnät och bidrar med systemnytta på flera nivåer. Den största utmaningen är kostnaden, batterilager är fortfarande en dyr investering.

Efter avregleringen av elmarknaden under mitten av nittiotalet har lönsamhet varit drivkraften för skapandet av incitament till investeringar (Energimyndigheten 2018). Vilket resulterat i att ekonomiska aspekter är det som sätter begränsningar snarare än tekniska. Detta påverkar utformningen av elmarknaden och dess resurseffektivitet. Konsekvenser som låga, eller till och med negativa elpriser och nedläggning av befintliga förnyelsebara anläggningar riskerar att bli allt vanligare. Lönsamhetsproblematik råder även kring äldre anläggningar.

Den ekonomiska livslängden kan i vissa fall vara det som ligger till grund för avveckling trots att teknisk potential fortfarande finns. Därav är reinvesteringsbehovet i elsystemet stort och blir dessutom allt mer brådskande. I stora drag rör det sig om anläggningar vilka årligen bidrar med cirka 100 TWh, två tredjedelar av Sveriges elproduktion och förväntas nå sin förväntade livslängd fram till 2045. Om en anläggning inte längre är lönsam finns i dagsläget inga incitament till fortsatt drift. Nedläggning av kärnkraftverk och kraftvärmeverk orsakar inte endast reducerad tillgänglig produktion utan även mängden tillgänglig svängmassa i systemet. Vilket i sin tur genererar stora tomrum då intermittent produktion förväntas öka och inte bidrar med någon naturlig rotationsenergi (Energimyndigheten 2019).

För konventionella kraftverk råder långa ledtider gällande tillståndsprocesser och nybyggnationer, vilket riskerar att leda till instabila prissignaler för den typ av satsningar (Energimyndigheten 2018). Osäkerheten skapar följaktligen flaskhalsar vilka kan resultera i både förseningar och uteblivna investeringar. I detta avseende förväntas variabla produktionslag gynna nätet sett till både överföringskapacitet och kortare ledtider. Överföringskapaciteten är redan i dagsläget ansträngd i dels storstadsregioner som Malmö, Göteborg och Stockholm men dels i anslutning till elintensiva industriprocesser. Produktion från solceller skulle till viss del dämpa bristen på överföring men problematiken återstår kring både säsongsvariation, då behovet är som högst under vintern när produktionen är som lägst. Men även sett till minskad svängmassa i systemet. Minskad produktion vid tillfällena med hög efterfrågan leder i sin tur till högre elpriser (Konsumenternas Energimarknadsbyrå 2021). I framtiden förväntas således prisfluktuationerna på elmarknaden variera i högre grad än vad de gjort tidigare. Dessa utmaningar leder till ökad efterfrågan av nya affärsmodeller, regelverk, systemlösningar och marknader för att säkerställa både försörjningstrygghet och en kostnadseffektiv elhandel (Energimyndigheten 2018).

1.1.2 Luftfartssektorn

Det är som sagt inte endast interna förändringar och utmaningar som väntar elsystemet utan efterfrågan på el växer i flera sektorer. Den pågående elektrifieringen inom transportsektorn innebär en kraftig ökning av laddningsinfrastruktur och eltillförsel vilket naturligtvis påverkar elnätet, främst sett till ökat effektbehov (Nordling 2016). I dagsläget står den svenska fordonsflottan för cirka en tredjedel av utsläppta växthusgaser (Regeringskansliet 2020a). En omställning till eldrift anses vara avgörande för att reducera denna andel till nära noll år 2045, enligt nationella klimatmål. Teknikskiftet kan komma att bidra i både positiv och negativ bemärkelse sett till elsystemet och beror på hur incitament, affärsmodeller och styrning i förhållande till laddningsbehov utformas.

En sektor inom fordonsflottan med stora utmaningar sett till hantering av reducerade utsläpp är luftfarten. I dag uppskattas flyget utgöra 4–5 procent av den antropogena inverkan på klimatet samt stå för 2–3 procent av de globala koldioxidutsläppen (Transportstyrelsen 2020a). Precis som elsystemet innehar luftfarten karakteristiska systemdrag vilka bidrar med komplexitet och kräver förståelse vid utformning av harmoniserade och hållbara lösningar.

Luftfartssektorn är i än högre grad ett mer internationaliserat system än elsystemet, där nationell lagstiftning sett till utlandsresor inte ensamt kan bidra med någon lösning

(Transportstyrelsen 2020b). Dessutom förväntas antalet globala flygpassagerare mer än fördubblas från 2016 till 2037 (IATA 2018). För att nå målen om reducerade utsläpp finns därför flera samarbeten vilka sträcker sig över landsgränser, organisationer, företag och flygbolag med ambitionen att utforma tillräckligt kraftfulla lösningar (Transportstyrelsen 2020b). Luftfartssektorn är, liksom elsystemet, en trög bransch sett till investeringstid. Större flygplan har en livslängd på 20–30 år vilket resulterar i att ny teknik tar lång tid att få genomslag och bidrar därför med stor osäkerheten inom branschen. Konventionella lösningar behandlar effektivisering av dagens modeller, motorer som drar mindre bränsle och bränslen i sig som bidrar till minskad klimatpåverkan. Men det finns även mer banbrytande lösningar vilka innebär betydligt mer omfattande tekniksiften. En av dem är elektrifiering i form av batteridrivna flygplan (Trafikanalys 2020). Denna lösning utgör ett potentiellt alternativ till minskad klimatpåverkan från transportsektorn och därmed en möjlighet till främjande för hållbart resande (Regeringskansliet 2020b).

Uppmärksamheten kring elektriskt drivna flyg väcktes redan 2010 men det dröjde fem år innan den uppmärksamade testflygningen över engelska kanalen ägde rum i det Airbustillverkade 2-mannaplanet (VTI 2020). Efter det stagnerade intresset då batteriutvecklingen bedömdes gå för långsamt för ett kommersiellt genombrott. Däremot finns det flera tvåsitsiga modeller på marknaden. Men tack vare den pågående batterirevolutionen är det inte endast Airbus som återupptagit tekniken för batteridrivna flygplan. Runtom i världen pågår flera utvecklingsprojekt som sträcker sig över regioner och företag. Bara genom att kika över landsgränsen till Norge är målet att ha världens första elektrifierade flygrutt 2023 mellan Bergen och Stavanger. I Sverige annonserades Örnsköldsvik som Sveriges bas för testflyg av eldrivna plan utav Luftfartsverket och ingår i ett omfattande projekt i Kvarkenregionen. ”Elektrisk Lufttransport i Sverige (ELISE)” är i sin tur ett omfattande projekt som förenar alla berörda parter inom den svenska luftfarten för att möjliggöra och etablera elflyg till 2025 (Grahn *et al.* 2020). Sett till den tekniska utvecklingen har det Göteborgsbaserade företaget Heart Aerospace gått ut med målsättningen att ha det första certifierade 19-passagerareflygplanet på marknaden 2026 (Heart Aerospace 2020). Eviation är i sin tur ett israeliskt företag baserat i USA med samarbetspartners som bland annat NASA och Europeiska unionens byrå för luftsäkerhet (EASA) och planerar att ha sitt 11-mannaflaggskepp Alice i luften redan 2021 (Hemmerding 2020).

Luftfartens klimatpåverkan är inte den enda bakomliggande faktorn till pådrivningen av elektrifiering, tekniksiften förutspås även bidra till bibehållandet av att vara en tillväxtbransch (VTI 2020). De ekonomiska operativa fördelarna förväntas uppgå till 75–80 procent till följd av lägre bränslekostnader jämfört med konventionella flygplan. Underhållskostnaderna i sin tur förväntas reduceras med cirka 50 procent. Sänkta bränslekostnader förutsätter dock att elpriset ligger inom tillräckligt låga nivåer (Grahn *et al.* 2020). En ordentlig prishöjning på elmarknaden resulterar givetvis i att den marginella vinsten minskar då bränsle utgör en betydande del av driftkostnaden. Dessutom förändras flygplatsers elförsörjning sett till ökad elanvändningen och effektbehov. På så vis är utvecklingen av den elektrifierad luftfart sammanlänkad med elsystemets utveckling under de kommande åren. Samtidigt förväntas priset på fossilbaserade bränslen stiga, vilket skapar ytterligare incitament för nya tekniker för luftfarten (Schefer *et al.* 2020).

Elektrifiering av luftfarten förväntas medföra fördelar sett till ökad tillgänglighet (Trafikanalys 2020). Tack vare sänkta operativa kostnader uppstår möjligheter att både öka lönsamheten för trafiksträckor som i dagsläget har lägre beläggningsgrad och öppna upp för nya rutter. Historiskt sett har flygindustrin utvidgat tillgängligheten som i sin tur gynnat näringsliv och lokal tillgänglighet. Här kan en elektrifiering komma att bidra med fortsatt positiv inverkan. Sett till klimatpåverkan anses de operativa utsläppen minska till noll vid elektrifiering och bullernivån reduceras med 50 procent (Kvarkenområdet 2020). Om ljudnivån på plan som lyfter och landar sjunker skulle det i framtiden kunna innebära att flygplatser i anslutning till bebyggelse inte behöver stänga nattetid (Read 2020). Dessutom skulle möjligheterna för nya flygplatser uppstå.

Fremsta utmaningen för elflygets utveckling utgörs av batteriets kapacitet och dess energidensitet (VTI 2020). Vilket resulterar i att batteriets vikt och dess andel av flygplanets totala vikt är avgörande för vilka räckvidder som är möjliga. Vidare kommer batteridrivna flygplan ha en konstant vikt under hela resan, oberoende av flygsträcka, medan konventionella flygplans bränsle dimensioneras utifrån sträcka och dessutom förbränns efter hand. Vilket innebär att vikten hos konventionella flygplan sjunker längs flygsträckan och möjliggör därför längre resor. Därav anses det ta många år innan större konkurrenskraftiga batteridrivna elflygplan som flyger längre sträckor intar marknaden, både sett till teknik och prismässighet. Utmaningen sett till batterier ligger även i att bibehålla en tillräcklig hastighet utan att göra avkall på räckvidden (Trafikanalys 2020). Detta med anledning att en av flygets styrkor är just den relativt sett korta restiden, vilken förväntas förlängas med cirka 30 procent med batteridrivna flyg. Initialt blir denna utmaning som störst då det är kortare sträckor vilka elektriska flyg kommer kunna konkurrera med.

Med nya typer av bränslen medföljer även nya typer av risker, batteridrivna flyg är inget undantag (Trafikanalys 2020). Nya krav kommer ställas för att undvika och hantera allt som kan tänkas gå snett med batterier, så som termisk rusning, redundans eller utsläpp av gaser. Även mjukare faktorer blir avgörande för en marknadspenetrering: Tillit och förtroende hos konsumenterna är direkt avgörande för omfattande teknikskiften.

Att utmana större jetplan och transatlantiska flygsträckor ligger långt in i framtiden, fokus i dagsläget ligger på att skapa konkurrenskraftiga elflygplan sett till regionala flygplatser och sträckor. Då elflyg fortfarande är en omogen teknik finns det i dagsläget ingen entydig bild av hur stort laddningsbehovet kommer vara (Avinor 2020). Denna studie hoppas kunna förmedla en något tydligare bild av hur mindre regionala flygplatser ska kunna vara med och bidra i energiomställningen av både elsystemet och luftfarten.

1.2 Syfte & Frågeställning

Examensarbetets syfte är att på systemnivå utreda vilken roll regionala flygplatser kan spela i energiomställningen. Målet är att undersöka möjligheten till egenproducerad el tillsammans

med vad en elektrifiering av luftfarten innebär, främst för flygplatser men även för anslutande elnät.

För att uppnå rapportens mål ligger följande tre frågeställningar eller framtidsscenario till grund, där det första avser solceller, det andra en elektrifiering av flyget och det tredje en systemlösning av de två tidigare:

- Scenario *Solet*: Hur skulle en nätansluten solcellsanläggning i anslutning till flygplatser kunna utformas och optimeras sett till årlig täckningsgrad av befintlig elanvändning? Vilka utmaningar finns sett till flygplatser och anslutande elnätet?
- Scenario *Flyg-el*: Vilken inverkan förväntas en implementation av elektrifierade kommersiella flyg ha på regionala flygplatser samt deras lastprofil?
- Scenario *Systemlösning*: Hur väl möter produktion av en solcellsanläggning en flygplats lastprofil när elektrifierade flyg inkluderas baserat på årlig täckningsgrad? Vilka systemnyttor och utmaningar uppstår?

Samtliga frågeställningar avses besvaras i en både kvantitativ och kvalitativ karaktär med avseende på deras uppbyggnad. Kvantitativa svar ges med hjälp av en simuleringsmodell för respektive frågeställning (eller scenario). Vilken utgår ifrån ett basscenario utgjort av examensarbetets fallstudie. Resultaten från modellen analyseras sedan vidare i två delar och ställs mot rapportens teoridel för att besvara de kvalitativa delarna i rapportens frågeställningar. För att avslutningsvis mynna ut i en gemensam diskussion på systemnivå där potentiella synergier, utmaningar och nya aktörer inkluderas.

1.3 Avgränsningar

Långtidseffekterna på luftfartssektorn från Coronapandemin är omöjligt att förutspå i skrivande stund. Utsatta klimatmål förväntas däremot inte påverkas i det långa loppet. Inte heller den teknikutveckling som förväntas medfölja. Därav utgår rapporten från att utvecklingen mot klimatneutralitet sker oberoende av situationen i världen just nu.

Inom flygbranschen undersöks även flyg driva av vätgas, vilka utelämnas i examensarbetet med anledning att begränsa rapportens omfattning.

Ambitionen med rapporten är att ge ett systemperspektiv på vad en elektrifiering av luftfartssektorn kan komma att innebära sett till flygplatsers elanvändning. Både sett till anslutande elnät och egenproducerad el i form av solceller. Sett till lokal produktion hade även vindkraft varit ett intressant perspektiv att inkludera i rapporten. Valet att endast utreda solceller grundas dels på att begränsa rapportens omfattning, dels då utveckling sett till mikroproduktion av solceller anses kommit längre.

Batterilager i samband med solceller är något som nämns under rapportens gång men avgränsas till att endast finns med som teoretiskt underlag, analys- och diskussionselement. Anledningen är åter igen att begränsa rapportens omfattning. Däremot finns det möjlighet att inkludera båda vindkraft och batterilager i framtida studier.

Slutligen, med all osäkerhet beskriven i rapportens bakgrund (avsnitt 1.1) görs en avgränsning sett till ekonomiska aspekter. Fokus läggs främst på den tekniska utvecklingen av både elsystemet och luftfarten, även om prissignaler till viss del analyseras på en generell nivå.

1.4 Disposition

Examensarbetet består av en inledning följt av en teoridel, en metodredogörelse för simuleringsmodellen och den applicerade fallstudien följt resultat, analys, diskussion och slutsats.

Kapitel 1: Examensarbetet introduceras med en övergripande inledning och bakgrund med avsikt att ge läsaren den kunskap vilken anses behövas för rapporten. Vartefter arbetets syfte och frågeställningar presenteras följt av rapportens avgränsningar.

Kapitel 2: Tillgodoser den teori vilken anses behövas för att bygga upp en metod vilken besvarar rapportens frågeställningar. En översikt ges för elsystemets utformning och uppbyggnad följt av flygplatsers relation till elförsörjning. Här inkluderas både solceller, batterier och elflyg.

Kapitel 3: Metodavsnittet avser att ge förståelse för simuleringsmodellens uppbyggnad och stegvisa utveckling tillsammans med redogörelse för rapportens fallstudie.

Kapitel 4: Resultat och analys sker i två steg. Fallstudien presenteras i ett *Basscenario* följt av resultat och analys av rapportens två första frågeställningar, scenario *Solel* och scenario *Flyg-el*. I analysdelen återkopplas resultaten med teorin från *Kapitel 2*.

Resultat från simuleringsmodellen presenteras i den mån då det anses tillföra läsaren ny information.

Kapitel 5: Resultat och analys del II utgörs av scenario *Systemlösning* och presenteras utifrån resultat och analys från *kapitel 4*. Uppdelningen görs då scenario *Systemlösningen* är uppbyggt av scenario *Solel* och *Flyg-el*.

Kapitel 6: Diskussion av frågeställningarna förs utifrån *kapitel 4* och *5*, här inkluderas även ett bredare systemperspektiv. Vidare förs diskussion även kring rapportens metodik.

Kapitel 7 & 8: Avslutningsvis mynnar rapporten ut i slutsatser och framtidsutsikter.

2 Teori

I kapitlet ges först en något mer teknisk beskrivning över det svenska elnätets uppbyggnad och utformning följt av en säkerhetsredogörelse sett till elkvalitet. Därefter sätts flygplatser och elförsörjning i sammanhang för att avslutningsvis göra djupdykningar inom solcellsanläggningar, batterilager och elektiska flyg.

2.1 Elnätets uppbyggnad och utformning

Det svenska elnätet sett till dess infrastruktur kan dels upp i tre kategorier, stam-, region- och lokalnät (Nordling 2016). Stamnätet står för transmission både nationellt och internationellt, de två resterande för distribution på regional och lokal nivå. En pedagogisk översikt för de olika nätens funktion är att likna dem vid olika typer av transportvägar där stamnätet representerar motorvägar, el transporteras långa sträckor i stora mängder på ett så effektivt sätt som möjligt. Stamnätet ägs av den svenska staten och förvaltas av Svenska Kraftnät. Regionnätet i sin tur kan liknas vid riksvägar och transporterar elenergin från motorvägarna in till städer och större orter, hit kan även större elanvändare ansluta. De som driver och bär ansvar för dessa ledningar är elnätsbolag runt om i Sverige, de bär även ansvaret för lokalnäten som slutligen transporterar elen till mindre elanvändare och kan liknas vid landsvägar.

På en någon mer teknisk not är det inte endast transport, ägande och ansvar som skiljer de olika näten åt, de har även olika spänningsnivåer (Nordling 2016). Stamnätets spänningsnivå ligger mellan 220 kV och 400 kV med anledning att minimera förluster då elen transporteras längre sträckor från var den produceras till där den används. Regionnätet, eller riksvägarna, håller lägre spänning, mellan 20 kV och 130 kV och är varifrån större elintensiva industrier får sin eltillförsel, även vatten- och vindkraftverk kan vara anslutna direkt till ett regionnät. Lokalnäten i sin tur innehar spänningsnivåer mellan 0,4 kV och 20 kV, det som tidigare beskrevs som landsvägar där hushåll och lokaler utgör slutstationen. Det som avgör till vilket nät produktionsanläggningar ansluts är till vilken effektstorlek som produceras. För tillåtelse att ansluta direkt till stamnätet krävs en inmatningseffekt på minst 100 MW. Anslutningar till region- och lokalnäten beror även dem på vilken effektstorlek anläggningen genererar, där mindre anläggningar ansluts till lokalnäten. I korsningar av olika transportvägar (eller elnätsstorlekar) finns transformatorer vilka omvandlar en spänningsnivå till en annan (ABB 2020). De utgör en väsentlig del av nätet för att transporten skall kunna ske så pass effektivt som möjligt och användare ska få el med rätt spänning.

Nätanslutna elanvändare betalar en så kallad nätavgift eller nättariff till ägande nätbolag (Konsumenternas Energimarknadsbyrå 2020). Avgiften täcker de kostnader kunden utgör för transporten av elen men även sett till underhåll och drift av elledningar. Nättariffer delas upp i tre olika delar: En fast del, en rörlig del samt en abonnemangskostnad. Den fasta delen täcker främst administrativa kostnader men även kostnader för mätningar. Den rörliga delen avser energiöverföringen från nätet till kunden, vilket beskrivits i bakgrunden som effekt över tid. Abonnemangskostnaden i sin tur baseras på vilken huvudsäkring kunden har och

är avgörande för hur stort effektuttag som kan göras. Då det finns många olika nätbolag runt om i Sverige är det upp till Energimarknadsinspektionen att ansvara att prissättning sker enligt ellagen.

2.2 Elkvalitet

Som nämnt tidigare är elsystemet unikt på många sätt, där det kanske mest avgörande är att systemet måste vara i konstant balans mellan produktion och användning (Axelsson *et al.* 2017). Efterfrågan avgör hur mycket el som skall produceras och marginalerna är väldigt små sett ur ett tekniskt perspektiv (Berglund & Åkerlund 2007). Utöver balansproblematik och flexibilitet kan det även uppstå störningar i systemet vilka påverkar kvalitén på den el som levereras. Begreppet elkvalitet kan kokas ned till två huvudkoncept enligt följande:

- *Leveranssäkerhet*: En god elkvalitet är detsamma som avsaknad av avbrott hos användare eller till vilken grad användare kan förlita sig på att el finns tillgängligt.
- *Spänningsgodhet*: Innebär upprätthållandet av en viss spänning inom ett specificerat område. För att återkoppla till liknelsen av transportvägar, innebär upprätthållande av god elkvalitet att samtliga fordon når sin slutdestination i gott skick. Vidare att det råder jämnt och harmoniserat trafikflöde längs vägen.

För att avgöra om det råder en god elkvalitet i näten mäts avvikelser i spänningens frekvens, vågform och nivå. Vilka sedan jämförs med Energimarknadsinspektionens författarsamling EIFS 2013:1 för att undersöka om de ligger innanför godkända intervall (Energimarknadsinspektionen 2013). Avsevärda konsekvenser riskerar att uppstå om dessa intervall över- eller underskrids, där slitage, störningar och haveri på ansluten utrustning riskerar att uppstå (Axelsson *et al.* 2017). Ansvarbärandet till upprätthållande av god elkvalitet ligger i huvudsak på elnätsägarna men slutar i anslutningspunkten där användaren tar över (Berglund & Åkerlund 2007). Parametrar och nyckelord vilka har identifieras med utmaningar sett till bibehållande av god elkvalitet vid anslutning av solcellsproduktion i näten presenteras i följande punktlista.

- *Spänningsavbrott*
Uppstår de den spänning vilken matas in på nätet är under en procent av systemets nominella spänning (Karlsson & Davidsson 2012). Denna typ av avbrott kan uppstå både kort- och långvarigt, där korta avbrott ligger inom ett tidsintervall på tio millisekunder och tre minuter. Långvariga spänningsavbrott är således över tre minuter. Problemet uppstår som resultat av bland annat kortslutning mellan antingen fasspänning och huvudspänning ute på nätet, hos någon kund eller vid överbelastning. De mest förekommande anledningar till kortslutningar är väderrelaterade, som nedfallna träd, åska, is och snö.
- *Kortvariga spänningsvariationer*
Korta spänningsvariationer delas in i ett par undergrupper varav den första benämns som *Enstaka spänningsvariationer*, vilket innebär kortare sänkning eller höjning av den nominella spänningen (Axelsson *et al.* 2017). Då effektivvärdet uppgår till under 90

procent av den nominella spänningen riskeras varvtalsstyrda drivsystem eller annan teknisk utrustning slås ut. En kortvarig spänningshöjning uppstår då effektivvärdet är högre än 110 procent av den nominella spänningen. Den andra typen kallas *Flimmer* eller *Flicker*, vilket är en störning som uppkommer periodvis och innebär lägre frekvens än nätets. Konsekvensen av flimmer kan exempelvis vara att ljuset i glödlampor flimrar. Den tredje kortvariga spänningsvariationen kallas *Transiter*, eller spänningspikar och karaktäriseras som korta och övergående variationer med relativt hög amplitud. Risken vid denna typ av störning är att apparaturer slås ut eller störs.

- *Snabba korta spänningsändringar*

Är ytterligare en variant av korta spänningsvariationer men beskrivs separat då problemet tar hänsyn till ytterligare en parameter (Axelsson *et al.* 2017). Snabba korta spänningsändringar kan uppstå, då effektivvärdet skiftar snabbare än 0,5 procent per sekund inom intervallet för kortvariga spänningsvariationer (90–110 procent) (Energimarknadsinspektionen 2013). Snabba korta spänningsändringar bestäms genom två delvärden av ändringar, maximal (ΔU_{\max}) och stationär ($\Delta U_{\text{stationär}}$). ΔU_{\max} är den maximala spänningsändringen under tidsförloppet medan $\Delta U_{\text{stationär}}$ är differensen mellan effektivvärdet före och efter ändringen.

- *Långvarig spänningsvariation*

En långvarig variation motsvarar ett tidsintervall på mer än en minut (Karlsson & Davidsson 2012). Dock finns det tillåtna fluktuationer i lägre grad utan att de klassas som störningar, gränsen uppgår till ± 10 procent av den nominella spänningens effektivvärde under tio minuter under en veckas tid (Axelsson *et al.* 2017). ± 10 procent innebär att det kan både ske en höjning och sänkning och de innebär olika risker. En överspänning orsakar störst problem då den kan skada eller haverera apparatur medan en underspänning istället försämrar dess standard vid för låga effekter.

- *Osymmetri*

Kopplas till trefasssystemet vilket finns definierat i rapportens ordlista (Axelsson *et al.* 2017). Osymmetri uppstår främst då enfasiga laster fördelas ojämnt på systemets tre faser. Obalanser av dessa slag kan ge upphov till problem för elmotorer och frekvensomriktare. Uppmätta tiominutersvärden av spänningsosymmetri under en veckas tid får ej överstiga två procent (Energimarknadsinspektionen 2013).

- *Övertoner*

Innebär att trefasssystemets symmetri störs (Axelsson *et al.* 2017). Övertoner kan delas upp i multipler av grundtonen som är 50 Hz och konsekvensen av dem kan leda till skador på transformatorer.

- *För hög strömstyrka*

Även kallat överström och innebär att systemet utsätts för en högre ström än vad ledningarna är dimensionerade för (Axelsson *et al.* 2017). Det per se, är inte ett elkvalitetsproblem man kan ge upphov till problematik kring upphettade och förstörda kablar och komponenter.

2.3 Flygplatsers roll i energiomställningen

Då rapporten har flygplatser som knutpunkt för elförsörjning och luftfartssektorn följer nedan en redogörelse för hur dess koppling ser till bådadera. Dels ges en redogörelse för ett generellt perspektiv, dels sett till solceller, batterier och elflyg.

2.3.1 Flygplatser och elförsörjning

Sett till hur flygplatser och elnät förhåller sig till varandra är det nätets uppgift att se till att flygplatsers effektbehov bli tillgodosett (Grahn & Littorin 2020). Det kan i nuläget ses som ett unilateralt beroende, anslutande region- eller lokalnätet förser flygplatser med el. Vilket ligger i linje med det konventionella enkelriktade effektflöde som beskrivits tidigare i rapporten. Vid en implementering av elektrifierade flyg kommer detta elbehov öka, till vilken grad beror på antal avgångar och elflygens laddningsbehov. Flygplatser förväntas således att få en ny typ av lastprofil, vilken kan förändras ytterligare om de även producerar egen el. Vid en eventuell installation av lokal elproduktion ansluten till nätet uppstår en ny bilateral elförsörjning där flygplatser också bistår nätet med förnyelsebar el vid överproduktion. Flygplatser går då från att vara konsument till prosumenter, som både producerar och använder el. För att uppnå en harmoniserad övergång till detta utbyte förutsätts förnyande regelverk och affärsmodeller samt fortsatt utveckling av smarta nät. Även energilager anses kunna bli en nyckelspelare i utformningen av lösningar.

Vid en elflygsimplementering kommer som tidigare nämnt vinstmarginalen sett till bränslekostnader bero på det rådande elpriset, vilket i sin tur beror på elmarknadens prisutveckling (Grahn & Littorin 2020). Lokal produktion kan i detta avseende minska beroendet av marknadspriset på el. Med lägre effektuttag minskar även abonnemangskostnaden men det förutsätter att det är ekonomiskt försvarbart att investera i lokal elproduktion. Utvecklingen av att utforma nya affärsmodeller med avseende på elnät och prosumenter förväntas bli avgörande för att skapa en fungerande bilateral elmarknad. Ett systemperspektiv blir fundamentalt vid utbyggnad av lokal produktion sett till vilka synergier som kan detekteras utöver det behov elektriska flyg kan tänkas utgöra. Laddningsbehovet förväntas resultera i tydliga effekttoppar, speciellt om många plan laddas samtidigt. Därför bör även annan elanvändning ses över, flygplatsers användning sett till lokaler och fordon men även andra närliggande aktörer. Övriga fordon i anslutning till flygplatser kommer i allt högre grad vara eldrivna, både sett till operativa fordon och de fordon vilka resenärer tar sig till och från flygplatser med (Trafikanalys 2020). I Sverige finns det exempelvis pågående planer att elektrifiera inlandsbanan med vätgas, en tågstacka som i dagsläget drivs av fossila bränslen och går genom större delen av norra Sverige (Karlsson 2020).

I anslutning till flygplatser finns flera möjligheter och fördelar sett till byggnation av solceller då det i många fall råder god tillgång på mark, ligger i anslutning till infrastruktur och det alternativa värdet på marken anses lågt (Blomqvist & Unger 2018). Till vilken grad detta stämmer in är individuellt för varje flygplats, beroende på lokalisering, storlek och

framtidsutsikter. En implementering av lokal produktion innebär även utmaningar vilka behöver tillkännages och utredas. Ibland dem är säkerheten den mest avgörande aspekten. Luftfartsverket gick i maj 2020 ut och slog larm om störningar som riskeras att uppkomma från solcellsanläggningar i anslutning till flygplatser (Elinstallatören 2020). De vill införa ett regelverk så inga solceller skall få byggas inom ett tre kilometers skyddsavstånd från luftfartens flygledningssystem. Ett alternativt förslag presenterades också vilket innebär att inga solceller får installeras såvida det inte genomförs en ordentlig utredning, en så kallad säkerhetsbevisning eller flygsäkerhetsplan. Där det skall påvisas att inga störningen kommer uppstå från solcellsanläggningen. Parametrar som kan komma att utgöra risker vid byggnation av solceller i anslutning till flygplatser och därav behöver utredas är (Young 2019):

- *Fysiska begränsningar:* Tillgängligheten får inte påverkas.
- *Solreflektion som påverkar piloter:* Bländningsrisk från moduler måste undvikas.
- *Styrenheter och markbaserade fordon:* Störningar på annan elektrisk utrustning måste undvikas.
- *Miljöutredning sett till markanvändning:* Utredning måste genomföras i form av miljökonsekvensbeskrivning.
- *Utrymningsvägar och tillkomlighet för räddningstjänst:* Åter igen, fysiska begränsningar får inte uppkomma.
- *Störning på kommunikation- och navigeringssystem:* Det får inte uppstå problem för kommunikationen med flygfordon eller dess navigationsutrustning.
- *Elektromagnetiska störningar:* Krävs ett system vilket inte påverkar sin omgivning.

Även om det i dagsläget inte uppkommit några anmälningar om denna typ av störning i Sverige utesluts inte risken om att de uppstår i framtiden (Elinstallatören 2020). Samtidigt finns flera exempel på flygplatser i andra länder som lyckas med en fullskalig implementering och dessutom flertalet svenska flygplatser med egenproducerad solkraft (Grahn & Littorin 2020). Det ligger i många aktörers intresse att se till att det inte är juridiska tillståndsprocesser som utgör flaskhalsar sett till utbyggnad av egen elproduktion. Sett till finansiering av solcellsanläggning eller annan lokal produktion bedöms inte de flesta flygplatser på egen hand ensamma kunna stå för kostnaden, framför allt sedan många mindre flygplatser är kommunalt ägda. Istället kan leasinglösningar bli aktuellt vilket är något som bör utredas för respektive fall. Bara sett till flygbranschen bör det finnas incitament till gröna och hållbara investeringar då debatterade fenomen som flygskam sätter sin prägel (Wande 2019).

2.3.2 Solel

Även om det skett en stor ökning av el producerad av solceller, både i Sverige och Europa, är den totala andelen fortfarande marginell (Axelsson *et al.* 2017). 2018 utgjordes den av 0,2 procent av Sveriges elproduktionen. Den totala produktionen uppgick till cirka 176 TWh, vilket innebär en solcellsproduktion på 0,4 TWh (SCB 2020). Sannolikheten för en fortsatt ökning är dock hög sett till de mål som både den svenska regeringen och EU satt (Regeringskansliet 2020c). Då andelen solel i det svenska elsystemet hittills varit så pass låg är det relevant att utreda vilken påverkan en ökning kommer innebära, vilka förutsättningar som krävs och vilka möjligheter som finns (Axelsson *et al.* 2017). En fundamental och oundviklig utmaning när det kommer till att utvinna elenergi från solen är de naturliga fluktuationer som råder under året och under dygnet, där vissa variationer är enklare att förutse än andra (Axelsson *et al.* 2017). Att det är mindre sol under vinterhalvåret eller under nätter i jämförelse med sommarmånaderna och under dagtid tillhör dem. Däremot kan förbipasserande moln vara mindre enkla att förutspå men effekten av dem går att mildra med hjälp av rätt teknik. En av de största nackdelarna med denna naturliga säsongsvariation är att den inte korrelerar särskilt väl med elanvändningen då elbehovet är som störst under de kalla månaderna. Detta knyter an till de utmaningar vilka väntas den framtida elmarknaden då många anläggningar som idag står för reglering i nätet planeras att avvecklas de kommande åren (Energimyndigheten 2016).

Genom att kika på andra länder vilka har en högre andel solel än Sverige, kan riktlinjer ges angående vilken acceptansgräns som skulle kunna bli möjlig. Acceptansgräns syftar på lokalnätets möjlighet till anslutning av solceller med samtidigt bevarat god elkvalitet. Den generella bilden, baserat på ett flertal studier, visar på att runt 30 procent av den årliga elanvändningen skulle kunna tillgodoseas med solel. Detta utan att större investeringar sett till nätförstärkning genomförs, följaktligen har denna acceptansgräns inte ett statistiskt värde utan beror till stor del på hur ekonomiska incitament utvecklas och hur resterande tillförsel utformas (Energimyndigheten 2018). Med andra ord måste det finnas tillräcklig kapacitet och flexibilitet att tillgodose effektbehovet trots dessa variationer under hela året på ett resurseffektivt sätt.

2.3.2.1 Beräkningar solelsproduktion

Den elproduktion vilken kan utvinnas från en solcellsanläggning på en viss plats tas fram genom en rad beräkningar baserade på uppmätta värden av solinstrålning. Följande ekvationer är tagna från "Solar Engineering of Thermal Processes" skriven av Beckman och Duffie (2013) och är baserade på uppmätta värden sett till total horisontell solinstrålning samt diffus horisontal solinstrålning. Datahantering redogörs för i rapportens metod.

Först presenteras en lista av nomenklatur.

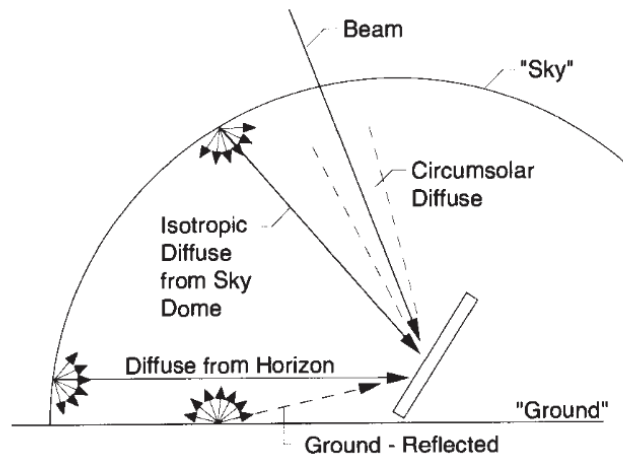
<i>Beteckning</i>	<i>Förklaring</i>	<i>Enhet</i>
G_t	Total solinstrålning, tiltad yta	W/m^2
G_{dt}	Diffus solinstrålning, tiltad yta	W/m^2
G_{dh}	Diffus solinstrålning, horisontell yta	W/m^2
G_{bt}	Direkt solinstrålning, tiltad yta	W/m^2
G_{bh}	Direkt solinstrålning, horisontell yta	W/m^2
G_{gt}	Markreflekterad solinstrålning, tiltad yta	W/m^2
G_h	Global instrålning, horisontell yta	W/m^2
G_{sc}	Solkonstant	W/m^2
G_{on}	Solinstrålning utanför atmosfären mot en yta vinkelrät mot solen	W/m^2
T_s	Soltid	h
T_{st}	Standardtid	h
L_{st}	Standardmedian	°
L_{lok}	Longitud för fallstudie	°
$E(n)$	Tidsförändring för dag n	h
B	Tidskonstant	
ω	Solens tidsvinkel	°
δ	Deklinationsvinkel	°
β	Modulens tilt	°
φ	Latitud för fallstudie	°
γ	Azimutvinkel	°
θ_z	Instrålningsvinkel utan tilt	°
θ	Instrålningsvinkel med tilt	°
R_b	Geometrifaktor	
A_i	Anisotropiskt index	
ρ	Albedo, reflektionsfaktor	
E	Solenergi	Wh
$A_{solcell}$	Yta för solcellsanläggning	m^2

η	Effektivitet solcell	
l	Systemförlust solcellsanläggning	
P_p	Peak-effekt solcellsanläggning	W

Vid beräkning av solinstrålning mot ett vinklat plan, G_t , där t står för "tilt", som i detta fall representeras av solcellsmodulens vinkel sett till marken ingår det tre parametrar, eller tre olika typer av instrålning (W/m^2) enligt

$$G_t = G_{bt} + G_{dt} + G_{gt} \quad (1)$$

Den direkta instrålningen, G_{bt} , där b:et står för engelskans "beam" avser den energi som utan att reflekteras träffar planet. Den diffusa instrålningen G_{dt} (d för diffus) representerar all övrig instrålning från himmeln. Tredje och sista parametern är den andel av diffus instrålningen som först träffar marken, reflekteras och slutligen når planet, G_{gt} , där g:et representeras av engelskans "ground". Dessa tre parametrar kan beräknas på flera olika vis beroende på vilken mätdata och beräkningsmodell som används. I rapporten appliceras en modell framtagen av Hay & Davies, som kan ses i *Figur 1*.



Figur 1 En överskådlig bild över hur instrålningen är uppdelad i olika komponenter, vid användning av Hay & Davies beräkningsmetod exkluderas dock den horisontella diffusa instrålningen (Hay & Davies, 2013).

Den diffusa instrålningen består utav två av tre komponenter, en som representerar den isotropiska instrålningen från atmosfären (Isotropic Diffuse) och en den diffusa instrålning som uppstår runt den direkta instrålningen (Circumsolar Diffuse). I *Figur 1* syns även en tredje diffus instrålning från horisonten (Diffuse Horizon) men den inkluderas ej i kommande beräkningar och utgör en väldigt liten andel.

Mätvärden av solinstrålning vilka utgör underlag för beräkningar är den totala horisontella instrålningen (G_h) i kombination med den diffusa (G_{dh}), även den mot ett horisontellt plan (h står för horisontell). Inledningsvis beräknas solens rörelse med tiden och konverteras

sedan till soltid istället för den tid som visas på våra klockor, standardtid. Anledningen till detta beror både på jordens rotationshastighet i relation till solen och på var beräkningen utförs sett till longitud i relation till nollmedianen. Skillnaden mellan soltid (T_s) och standardtid (T_{st}) i minuter beräknas ut genom följande ekvation

$$T_s - T_{st} = 4(L_{st} - L_{lok}) + E(n) \quad (2)$$

Där L_{st} är standardmedian (i Sverige -15°) och L_{lok} är den exakta longituden för beräkningen. Parametern $E(n)$ representerar tidsändringen och beror på vilken dag (n) det är på året och beräknas

$$E(n) = 229,2(0,000075 + 0,001868 * \cos(B) - 0,032077 * \sin(B) - 0,014615 * \cos(2B) - 0,04089 * \sin(2B)) \quad (3)$$

Där B ges genom

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (4)$$

Soltiden räknas sedan om till en timvinkel (ω) för att representera solens position i relation till planet genom ekvationen

$$\omega = 15\left(\frac{T_s}{60} - 12\right) \quad (5)$$

Innan solinstrålningen mot det vinklade planet beräknas behövs ytterligare ett par parametrar deklaras. Dels krävs vetskap om vilken vinkel, eller lutning, planet är i, i relation till marken (β), dels i vilken vinkel den är riktad i sett till väderstreck, detta kallas azimuthvinkel (γ). Azimuthvinkeln är 0° vid söderriktning och 180° i riktning mot norr. Deklination (δ) är den vinkel som beroende på dag på året representerar den vinkelposition jorden har i relation till solen på grund av dess elliptiska bana och tas fram enligt följande

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (6)$$

Där n , precis som tidigare står för vilken dag på året det är.

Första komponenten i *Ekvation (1)* att räknas ut är den direkta solinstrålningen G_{bt} . Till en början behöver en tiltad yta särskiljas från en horisontell, enligt *Figur 2* på nästa sida. En del beräkningar görs i flera steg och omvandling sker mellan en plan yta och en med vinkeln β . Den direkta solinstrålningen mot tiltad yta fås genom att först beräkna infallsvinkeln (θ) mellan solstrålarna och det tiltade planet enligt

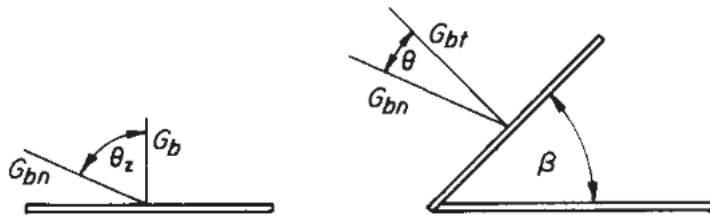
$$\cos(\theta) = (\sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\varphi) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)) \quad (7)$$

Där φ planets placering sett till latitud. Om infallsvinkeln istället räknas för en horisontell yta sätts beta till noll vilket resulterar i följande ekvation

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (8)$$

En geometrifaktor R_b ger ett samband mellan direkt instrålning för ett tiltat plan och ett horisontellt med avseende på θ och θ_z , förhållandet ses överskådligt i *Figur 2* och beräknas enligt

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (9)$$



Figur 2 Visar förhållandet mellan infallsvinkeln sett till ett horisontellt och vinklat plan i relation till G_{bn} där n representerar normalen (Duffie & Beckman, 2013).

R_b kan anta stora orealistiska värden i samband med soluppgång och solnedgång eftersom θ_z går mot noll när solen går mot horisonten. I denna modell anpassas dessa värden genom att medelvärdet tags för värdet före och efter orealistiska värden.

Mätdata med global instrålning mot ett horisontellt plan (G_h) är en sammansättning av den diffusa och den direkta instrålningen enligt

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} \quad (10)$$

Anledningen till att det inte finns någon parameter för markreflektad instrålning i *Ekvation (10)* är att då mätningar görs mot ett horisontellt plan är markreflektionen noll. För att slutligen ta fram den direkta instrålningen mot ett vinklat plan med Hay & Davis modell används följande ekvation

$$G_{bt} = (G_h - G_{dh})R_b \quad (11)$$

Nästa steg är att ta fram den diffusa instrålningen mot ett vinklat plan, G_{dt} . Med hjälp av Hay & Davis beräknas ett anisotropiskt index fram enligt *Ekvation (12)* som en funktion av infallande och genomsläppt strålningsintensitet

$$A_i = \frac{G_{bn}}{G_{on}} \quad (12)$$

Där G_{bn} som enligt *Figur 2* utgörs av direkta instrålningen vinkelrät mot ett plan och ges genom

$$G_{bn} = \frac{G_{bh}}{\cos(\theta_z)} \quad (13)$$

G_{on} räknas i sin tur ut med hjälp av solkonstanten $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ och dag (n) på året enligt

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \quad (14)$$

Med hjälp av mätdata på diffus solinstrålningen mot ett horisontellt plan (G_{dh}) beräknas den diffusa instrålningen mot ett tiltat plan ut enligt

$$G_{dt} = G_{dh} \left((1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + A_i R_b \right) \quad (15)$$

När denna metod används för diffus instrålning behöver hänsyn tas till när soluppgång och solnedgång sker och är endast applicerbar under de timmar solen är ovan horisonten. Matematiskt innebär det att så länge θ_z ligger inom intervallet $[-90 < \theta_z < 90]$.

Sista parametern som beräknas med avseende på *Ekvation (1)* är den markreflekterade solinstrålningen G_{gt} . En reflektionsfaktor, albedo (ρ), är en parameter vilken varierar beroende på vilket markunderlag solinstrålningen reflekteras mot. Valda ekvationen för markreflekterad solinstrålning mot ett tiltat plan lyder enligt följande

$$G_{gt} = G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (16)$$

För att räkna ut vilken energiproduktion $E_{solceller}$ (Wh/h) som solinstrålningen bidrar till behövs den yta vilken solcellerna upptar $A_{solceller}$ (m^2), verkningsgrad η för solcellerna samt andel systemförluster l , vilka tillsammans utgör ekvationen

$$E_{solceller} = G_t * A_{solceller} * \eta * (1 - l) \quad (17)$$

Vid utformning av solcellsanläggningar diskuteras ofta dess storlek i form av maximal effekt istället för vilken yta som upptas och beräknas med hjälp av STC (Standard Test Condition), där värdet för solinstrålningen är $1000 \text{ (W/m}^2)$. Beräkningen ser ut enligt följande

$$P_p = A_{solceller} * 1000 * \eta \quad (18)$$

Där P_p betecknar den maximala effekten (W_p), eller peak-effekten, för anläggningens yta $A_{solceller}$ (m^2) och modulernas verkningsgrad η .

2.3.2.2 Solel och elkvalitet

Eftersom nätanslutna solcellsanläggningar är en relativt ny kommersiell elförsörjningsteknik finns det givetvis flertalet utmaningar att överkomma (Energimyndigheten 2016). Tidigare rådde problematik kring övertoner i samband med nätkopplade solcellsanläggningar men tack vare utvecklingen av växelriktare går dessa nu att filtrera bort. Även osymmetrisk anslutning har varit ett problem vilket trefasväxelriktare rättade till. I dag rekommenderas samtliga installationer, men framför allt större anläggningar över 2 kW, att förses med denna typ. Med det sagt, pekar det mesta på att elnätet i sig kommer utgöra den främsta begränsande faktorn sett till tekniska aspekter för solkraftens penetrationsgrad i framtiden.

Tidigare har parametrar presenterats vilka är avgörande för upprätthållande av en god elkvalitet i samband med solkraft, eller vad som krävs för ett harmoniserat transportflöde, och dess marginaler (avsnitt 2.2). Nu återstår identifiera i vilken utsträckning störningar riskerar att uppstå (Axelsson *et al.* 2017). Sett till ökad implementation av solceller riskerar överspänning, osymmetri, övertoner och för hög strömstyrka leda till framtida utmaningar. Sveriges elnät är i dagsläget relativt väl utbyggt och robust sett till mottagningsförmåga av solel, vilket lindrar de problem som kan utgöra reell påverkan på lågspänningsnäten. Främst är det störningar vilka ger upphov till överbelastning, överspänning och för höga strömstyrkor när solel matas ut på nätet. I dag balanseras det upp av motsvarande användning eftersom andelen solkraft är så pass låg.

I framtiden däremot, då den decentraliserade variabla produktionen förväntas utgöra en större kvot kan det uppstå påfrestningar på de lokala näten som de inte är dimensionerade för (Axelsson *et al.* 2017). Speciellt stor är risken under varma sommardagar då användningen av el generellt sett är låg men solcellsproduktionen är hög. I detta avseende är det av vikt att undersöka i vilken miljö nätet ligger, då stadsnät generellt sett har högre användning och därav är överspänning inte en lika trolig störning som på landsbygden. På landsbygden är ofta lasttätheten lägre, det vill säga antalet uttagsskunder färre. I stadsnät är det istället förhöjd strömstyrkan som anses vara den begränsande faktorn. På landsbygden är situationen omvänd, näten har generellt sett högre kapacitet men lägre efterfrågan. Vilket innebär att förhöjda strömstyrkor bör ligga innanför kapacitetsgränserna och att det som först begränsar blir situationer med överspänning.

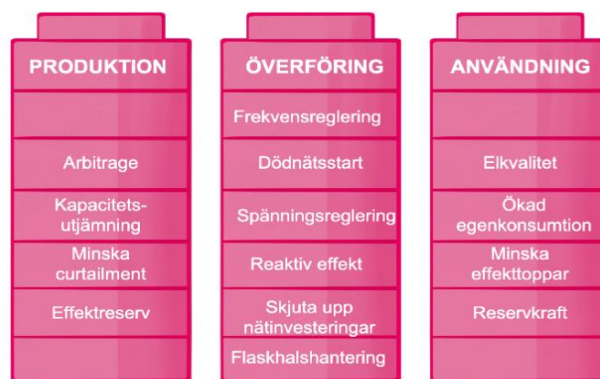
För att ge ytterligare insikt i vilken inverkan solceller ådrar elsystemet används studien *Analys av elkvaliteten i Sveriges första MW-solcellspark* (Bagge 2015). Vilken undersöker inverkan större solcellanläggningar ådrar nätet sett till elkvalitet genom faktiska mätningar. Anläggningen är belägen mellan Västerås och Enköping och togs i bruk 2014. Lokalnätet vilken elen matas ut på har en spänning på 10 kV och anses vara relativt svagt då mätpunkten var placerad långt ifrån matande transformator. En elmätare placerades i anslutningspunkten från solcellsanläggningen till nätet. Mätningar och beräkningar gjordes för både 10 minuters intervall samt sekund- och minutintervall, för att granska snabba förändringar. Förutom att använda EIFS 2013:1 som underlag för utvärdering används även Energiföretagens *Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet* (AMP). Sammanfattningsvis

konstaterade studien att solcellsanläggningen hade viss påverkan på nätet men utan att överskrida restriktionerna i EIFS 2013:1. Den främsta påverkan som uppmättes var relaterade till långsamma spänningsvariationer, vilket antas ha med nätets svaghet att göra. Vilket, enligt redogörelse i studien, kan åtgärdas genom kabelförstärkning. Således beror störningar på anläggningens storlek i förhållande till nätets spänning och om nätet i sig är starkt eller svagt. Mätningarna resulterande även i en del övertoner men inget som överskred utsatta riktlinjer.

2.3.2.3 Solel och batterilager

Rapportens bakgrund kartlägger utmaningar som väntar det svenska elsystemet de kommande åren och batterilager nämns som ett lösningsalternativ. Elnätets flexibilitetsförmåga har också beskrivits och hur det förväntas växa i samband med nedläggningar av konventionell kraftproduktion och utbyggnad av intermittent produktion (Energimarknadsinspektionen 2016). Där batterilager i viss mån anses kunna harmonisera flexibilitetsbehovet. Förmågan att lagra el inom systemet i batterier har flera fördelar, bland andra kan elkvalitetsproblem från solceller reduceras, så kan även flaskhalsar sett till effektbehov från snabbbladdning av olika elfordon (Power Circle 2020). Batterilager kan med andra ord ses som en flexibilitetsresurs som tekniskt sett kan komma att bli ett avgörande komplement för den intermittens variabel elproduktion utgör.

Utmaningen med att lagra elenergi i batterier är dess begränsade kapacitet (Power Circle 2020). Därav sträcker sig fördelarna med tekniken upp till timnivå. Säsongsvariationen i intermittenta kraftslagen medför är således inte kompatibel med batterier i dagsläget. Nedan i *Figur 3* följer en sammanställning av de systemnyttor batterilager kan komma att bidra med i framtidens elsystem. Vilka nyttor som skapas beror på i vilken del av elnätet installation sker och hur optimering utformas. Curtailment avser att effekten från solcellsanläggningen till anslutande nät kan begränsas vid behov. Ytterligare utmaning är den kostnad batterilager utgör i dagsläget. För att skapa lönsamhet anses det fundamentalt att flera aktörer går samman och utformar lösningar vilka genererar tjänster och nyttor på bästa sätt då ett och samma batterilager inte ensamt kan bistå med samtliga nyttor som beskrivs i *Figur 3*.



Figur 3 Ger en överblick över vilka nyttor batterilager kan bidra med på olika nivåer i elsystemet (Power Circle 2020).

2.3.3 Flygplatser och elektrifierade flyg

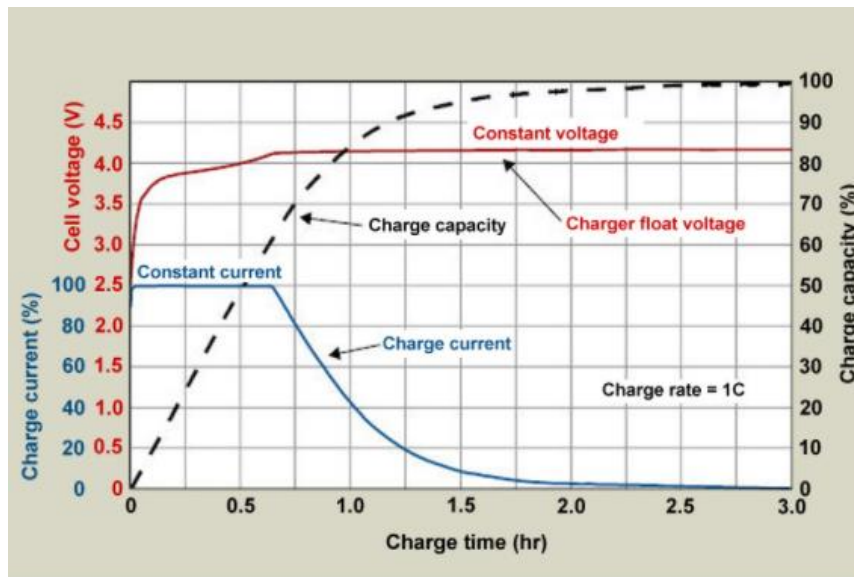
Vid teknikskiften råder alltid en spänd väntan på vilken aktör som vågar ta första steget, elektrifierade flyg är inget undantag (Read 2020). Flygbolag förväntas tveka inför investeringar om det inte finns tillgänglig infrastruktur hos flygplatser. Samtidigt som flygplatser likaväl drar sig för projekt som inte garanterar vinst. I dagsläget finns det inga specifika regelverk för flygplatsers roll i elektrifiering av luftfartssektorn utan det lämnas till respektive flygplats att ta beslut inom befintliga regelverk (Trafikanalys 2020). Däremot förväntas en uppdateringar i takt med den tekniska utvecklingen. Med nya tekniker uppstår även nya risker, vilka för elflyg behöver behandlas och utredas. Ett exempel på detta är brandrisk för plan på laddning. Säkerhetsaspekter är något som EASA (European Union Aviation Safety Agency) bör hantera så ett harmoniserat och väl fungerande regelverk utvecklas för hela Europa.

Laddningsinfrastruktur specifikt utformad för elektriska flyg kommer behövas med anpassad mjukvara och laddningskontakt (Grahn & Littorin 2020). Vilka effektbehov som förväntas uppstå beror på planens batteristorlek, mindre plan förväntas klara sig på samma behov och elektrisk utrustning som dagens elbilar. För större plan däremot, med effektbehov uppåt 500 kW krävs nya standarder.

Då den pågående batterirevolutionen inom transportsektorn sträcker sig över flera sektorer gynnas olika branscher av varandras framsteg, elflygsbranschen kommer exempelvis kunna dra nytta av den högeffekt-laddningsstruktur som tas fram inom lastbilssektorn (Grahn & Littorin 2020). Även om det inte finns någon standard i dagsläget förväntas mycket händer de kommande åren. Flygbranschen är bland annat inkluderad i arbetet med CharIn HPCCV (High Power Charging for Commercial Vehicle Charging) som skulle kunna bli den globala standarden för flyg med effektbehov runt 4 MW. Det viktigaste sett ur flygplatsers perspektiv anses vara införandet av standarder vilka innebär laddningsutrustning som inte är kopplad till en specifik typ av elflyg. Med anledning att kunna ta emot olika sorters plan oberoende av modell och flygbolag. Sett till variation av olika flygplansmodeller kommer det krävas av flygplatspersonal att göra sig bekant med olika tillvägagångssätt och laddningsprocedurer (Read 2020). Vissa elplan under utveckling har utbytbara batterier för att ”turnaround”-tiden (tiden från landning till redo för start) skall vara så kort som möjligt. Sett till modeller med fasta batteri kan laddning ske på olika sätt och personal behöver ha god kännedom om dessa.

Sett till batteriladdningsprestanda finns en rad parametrar vilka spelar roll. En av de mest avgörande sett till elflygsladdning är den omgivande temperaturen (Battery University 2017). Vilken i sin tur påverkar batteriets temperatur och därav laddningsförmåga. Litium-jonbatterier har en bästa laddningsprestanda sett till snabb-laddning mellan 5°C och 45°C. Vid temperaturer lägre än 0°C kan laddningen ta upp till tre gånger längre tid (Engineering and Technology 2018). Med andra ord innebär lägre temperatur längre laddningstid. Vilket inte har med laddningsinfrastruktur att göra, dess effekt spelar ingen roll utan det är batteriets förmåga att ta emot energi som avgör.

När det kommer till hur energitillförseln varierar sett till laddningstiden illustreras detta för litium-jonbatterier i *Figur 4*, vid optimala förhållanden (Battery University 2018). Det framgår att de första 80 procenten sett till laddningskapacitet (den svarta streckade linjen) går betydligt snabbare att ladda än de kvarstående 20 procenten.



Figur 4 Påvisar hur litium-jonbatterier beter sig under laddning över tid vid optimala förhållanden (Battery university 2018).

2.3.3.1 Elflyget Alice

Start-up företaget Eviations kapplöpningshäst Alice anses vara en av föregångarna för elektriska flyg med en kapacitet på nio passagerare och två besättningsmän (Hanley 2020). Målet är en marknadslansering under 2022. En av de främsta utmaningarna med batteridrivna plan är, som bekant, vikten batteriet utgör. För kommersiella jetbränsleplan utgör bränslet cirka 30 procent av planets vikt vid start medan batterivikten ombord på Alice utgörs av hela 60 procent. Dessutom kan konventionella plan tankas med den mängd bränsle som krävs för en viss sträcka. Som kompensation har Alice fått en ny banbrytande design för att öka lyftkraften, bland annat fördelas batteriets vikt över stora delar av planet. Denna fördelning medför även att redundansen kan separeras på 16 olika vis för största möjliga säkerhet (Thurber 2019). Den totala räckvidden uppgår till 1 000 kilometer, inklusive reservkraft på 45 minuter i cruise-hastighet (Eviation 2020). Alice har en total batterikapacitet på 920 kWh och utgörs av litium-jonbatterier. De tre motorernas maximala effekt uppgår till 900 kW och normaleffekt (eller "cruise-effekt") till 260 kW. Sett till hastighet når hon en cruise-nivå på 400 kilometer per timme på en 3 000 meters höjd (Bailey 2019).

Laddningsbehovet kräver en timmes laddning för två timmars flygning med en infrastruktur avsedd för 500 kW (Bailey 2019). Den grundläggande laddningstiden sett till flygtid är med andra ord 2:1 med denna laddningseffekt.

3 Metod

För att besvara rapportens tre frågeställningar, vilka samtliga bygger på framtida potentiella scenarion, utvecklades stegvis en dynamisk simuleringsmodell. En modell som utgår från en fallstudie vilken möjliggjorde kvantifiering av dessa framtidsscenarion och ger i modellen förmånen att ställa dem i relation till varandra. Nedan kartläggs metodiken för modellens uppbyggnad och framtagna scenarion följt av en redogörelse för fallstudien, vilken utgjordes av en regional flygplats och dess anslutande elnät. Fallstudien låg till grund för modellens basscenario vilket syftar på hur flygplatsen opererar utan solceller och elflyg sett till elanvändning.

3.1 Simuleringsmodell

Modellen utvecklades med Excel som plattform, där rapportens två första frågeställningar (eller scenarion) hanterades separat för att analyseras var och ett för sig för att sedan kombineras i det tredje scenariot. Nedan följer en kort motivering till respektive scenario samt hur de i modellen förhåller sig till basscenario.

Scenario Solel: Togs fram för att besvara rapportens första frågeställning och innefattar en solcellsmodell för fallstudiens lokalisering med avseende att variera solcellsproduktion. För scenariot utformades därför en solcellsanläggning vars produktion i modellen sätts i relation till flygplatsens basscenario.

Scenario Flyg-el: Utvecklades med avseende att besvara andra frågeställningen sett till elflygets inverkan på flygplatsers nuvarande lastprofil. Scenariot utgörs av en påbyggnad på basscenario, för att sedan sättas i relation till basscenario.

Ovanstående scenarion utvecklades oberoende av varandra, vilket anses värdefullt att läsaren har med sig vid kommande mer ingående beskrivningar.

Scenario Systemlösning: Utgick från rapportens tredje frågeställningen och utgör en kombination av scenario *Solel* och scenario *Flyg-el*. Med avseende att besvara hur väl solcellsproduktion tillgodoser flygplatsens lastprofil med elflyg inkluderat. Därav exkluderas basscenario i modellens *Systemlösningen*.

Modellen sträcker sig över ett års tid för att påvisa känd variation som elsystemet måste anpassas till, vilken sker från säsongsnivå ner på sekundnivå, för elproduktion och elanvändning. I kommande redogörelse för respektive scenario presenteras och förklaras använda beräkningar, antaganden, datahantering, indata samt nyckelparametrar. Med dynamisk simuleringsmodell menas att användaren matar in olika indata för olika scenarion, således varierar resultatet beroende på vilken indata som väljs. Valet att utveckla en modell vilken går att variera utefter behov ansågs vara till fördel när framtida systemlösningar analyseras. Vidare med anledning att både individuella parametrar kan modifieras, jämföras och ställas i relation till varandra men även systemlösningens utformning. Det ansågs

värdefullt att användaren kan laborera med olika parametrar och dess konsekvenser för att dra slutsatser med avseende på ekonomiska, tekniska och infrastrukturella aspekter.

3.1.1 Basscenario

Som utgångsläge i modellen användes fallstudiens flygplats, sett till dess nuvarande lastprofil. Vilken utgjordes av energidata i form av effektbehov på timmedelvärdesnivå. I modellen ger Basscenarioet således en överblick och förståelse för den rådande elförsörjning av flygplatsen sett till mönster och magnitud. Basscenarioet bidrar även med verklighetsförankring till de framtagna scenarierna. I modellen kan därför resultatet utvärderas och analyseras, både sett ur flygplatsens och anslutande elnäts perspektiv. Uppmätt data för flygplatsens elanvändning hanterades genom att varje uppmätt timmedelvärde gick att behandla separat och skapade därmed lastprofilen i form av en tidsserie. En tidsserie vilka kommande scenarion i modellen jämförs med och även byggdes vidare på. Tillgänglig data fanns endast att tillgå över ett års tid, vilken presenteras i samband med rapportens fallstudie. I beräkningar och figurer benämns basscenarioet som ”rådande elanvändning” för att tydliggöra att det är hur omständigheterna ser ut i dagsläget. Även utomhustemperaturer för motsvarande tidsintervall och plats inkluderades i basscenarioet, tagna från SMHI (SMHI 2020a). Inkluderandet av utomhustemperaturer ger i modellen förutom ett sammanhang till elanvändningens variation över året även värde sett till omständigheter för batteriladdning.

En redogörelse av basscenarioet inleder rapportens resultat, med anledning att ge förankring i rådande omständigheter sett till flygplatsens elförsörjning. Tidsserien för lastprofilen och utomhustemperaturen presenteras på timmedelvärden över den tillgängliga tidsperioden för tillhandahållen data.

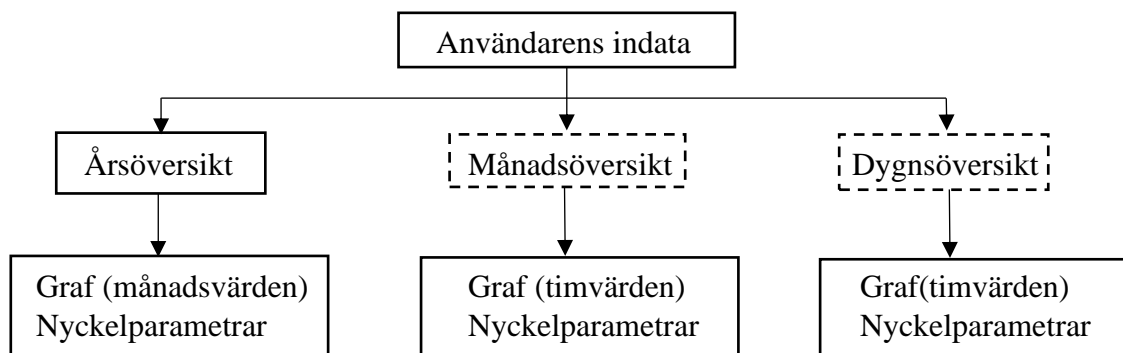
3.1.2 Modelluppbyggnad

Antalet frågetecken sett till hur en kommersiell elflygsimplementering kan komma att utvecklas är i detta skede fortfarande många. Som resultat finns inte heller någon uttalad metod att optimera en solcellsanläggning i relation till lastprofilen vilken den ger upphov till. Varför en dynamisk modell togs fram, för att användaren ska kunna jämföra olika utfall. Detta motiverades ytterligare då storleken på solcellsanläggningen också bör kunna varieras beroende på laddningsbehov, elnätets mottagningsförmåga och grad av önskad eltillförsel. Begreppet *indata* i modellen är parametrar vilka främst ansågs påverka hur flygplatsers elförsörjning förväntas variera med avseende på olika scenarion. Dessa anges av användaren av modellen. Redogörelse för vald *indata* och dess värden använda i rapporten görs i samband med kommande scenariobeskrivningar.

Beroende på indata genereras i modellen olika resultat för respektive scenario. Resultat vilka utvecklades att presenteras i tre olika tidsupplösningar. En årsöversikt, en månadsöversikt och en dygnsöversikt. Varje tidsupplösning länkades till en graf samt till en rad *nyckelparametrar*, vilka tolkar och sammanställer resultatet för respektive tidsöversikt i graferna. Valet av utvecklade *nyckelparametrar* baserades på dess nytta sett till att analysera

respektive scenario och tidsupplösning, vidare för att skapa resultatunderlag sett ur både elnäts och flygplatsers perspektiv.

Modellen utvecklades för att utgöra ett användarvänligt verktyg. Därför sker många av beräkningarna i modellens "bakgrund", med andra ord, användaren ser inte dem. En översikt för modellens generella uppbyggnad sett till vad användaren ser följer i flödesdiagrammet i *Figur 5*. Dess slutgiltiga visuella utseende för användaren finns att tillgå i rapportens Appendix (Bilaga 2).



Figur 5 Ger en generell bild över den utvecklade modellens funktion, från indata till vilka resultat som genereras för respektive tidsupplösning. Streckade boxar innebär flexibla val sett till tidsperiod.

Sett till månads- och dygnsöversikten i modellen är det upp till användaren att välja månad och ett eller flera dygn beroende på önskemål. Detta möjliggjordes genom användandet av dynamiska tidsserier vilka varierar med användarens val av tidsintervall. Användarens val kopplades även till graferna och nyckelparametrarna trots *indata* hålls konstant. Därav har användaren möjlighet att för samma förutsättningar (*indata*) granska grafer och nyckelparametrar för olika tidsperioder i högre tidsupplösning. Den dynamiska karaktären utläses i *Figur 5* som streckade boxar.

Baserat på kommande beskrivningar av *indata* tillämpade i rapporten utgörs resultat därav utav tre scenarion. Vilka i sin tur genererar tre tidsöversikter var och en med tillhörande graf och nyckelparametrar, enligt *Figur 5*. I examensarbetets resultat inkluderas de i den mån av tillförande av ny information för läsaren vilka tar rapporten framåt.

3.1.3 Tidsupplösning

Modellens tre tidsöversikter, vilka ses i *Figur 5*, valdes för att påvisa den kända variationen av elproduktion och elanvändning enligt rapportens bakgrund (avsnitt 1.1). Valet att endast studera säsongsvariation ner till dygnsvariation berodde på begränsad energidata från flygplatsen. Vilken inverkan detta antas ha på resultatet redogörs för i rapportens metoddiskussion.

Årsöversikten utvecklades att utgå från ackumulerade timmedelvärden för varje månad, således månadsmedelvärden och presenteras i modellen i form av ett stolpdiagram. Detta innebär att ingen hänsyn tas till dygnsvariationer utan påvisar skillnaden månadsvis för årets säsonger. Månads- och dygnsöversikten däremot byggdes på timmedelvärden. Fluktuationer på timnivå kan därför identifieras. Graferna kopplade till dessa översikter valdes att presenteras i punktdiagram.

I tredje scenariot, Scenario *Systemlösning*, togs ytterligare en tidsöversikt fram men i form av ett stickprov och approximerad data. Med anledning att kunna ge en bättre översikt för variationen vid högre tidsupplösning, här på minutnivå. Huruvida detta utfördes redogörs för i scenariots beskrivning.

3.1.4 Scenario *Solel*

För att besvara rapportens första frågeställningen, hur en nätansluten solcellsanläggning kan utformas i anslutning till flygplatsen för att optimeras utifrån täckningsgrad, utvecklades en ny tidsserie. Att utgå från täckningsgrad är ett vanligt sätt inom branschen för att utforma anläggningar. Den nya tidsserien avsågs att generera förväntad elproduktion från en solcellsanläggning för fallstudiens lokalisering. Detta gjordes med samma tidsupplösning som basscenariot är uppbyggt på, timmedelvärden. Denna avvägning gjordes med insikt i att variation på minutnivå exkluderas. Konsekvensen av beslutet resoneras kring i rapportens diskussion av metodval. För att uppnå en rättvis jämförelse ansågs samma tidsupplöst data vara lämpligast. Nedan följer en redogörelse av använda beräkningar sett till tillgänglig solenergi per kvadratmeter per timme för fallstudiens lokalisering enligt beräkningar från teoridelen (avsnitt 2.3.2.1). Dessa görs i "bakgrunden" av modellen och är därför inget användaren av verktyget ser.

Bräkningar solinstrålning

Den mätdata som solelsproduktionen byggdes på enligt teorin (avsnitt 2.3.2.1) hämtades från SMHI:s modellverktyg STRÅNG (SMHI 2020b). STRÅNG utgörs av en databas för olika metrologiska mätvärden från platser runt om i världen. Bland den data som finns att tillgå hämtades uppmätta timmedelvärden för solinstrålning för fallstudiens koordinater. Värdet på parametrar kopplade till fallstudien presenteras i samband med dess lokalisering.

Indata

Som beskrivits tidigare kopplades varje scenario samman med en rad indata (anges av användaren) vilken i sin tur genererar nyckelparametrar och grafer i tre tidsupplösningar. Indata vald för scenario *Solel* baserades på *Ekvation (17)* från teoridelen (avsnitt 2.3.2.1), elproduktion från solceller på timmedelvärden ($E_{\text{solceller}}$). I modellen kan således solcellsanläggnings yta (A), verkningsgrad (n) och systemförluster (l) varieras efter önskemål. Solinstrålning hålls däremot konstant för varje timme eftersom den redan är beräknad över året enligt *Ekvation (1)-(16)* enligt rapportens teoridel (avsnitt 2.3.2.1).

Indata som användaren anger för scenario *Solel* finns att tillgå i *Tabell 1*.

Tabell 1 Anger de parametrar som den utvecklade modellen kräver för att räkna ut elproduktion för en solcellsanläggning.

Indata scenario Solel	
Total tillgänglig yta	(m ²)
Längd	(m)
Bredd	(m)
Verkningsgrad (n)	(%)
Systemförluster (l)	(%)

Sett till verkningsgrad och systemförluster appliceras i modellen angiven indata direkt på *Ekvation (17)* och total solinstrålningen hålls som bekant konstant. Däremot krävde den yta vilken *Ekvation (17)* skall ta hänsyn till en del bearbetning utifrån angiven indata. Bearbetningen sker i modellens "bakgrund" enligt följande beskrivning.

Modellens utformades med antagandet att användaren har viss information om de ytor som undersöks. För rapportens fallstudie finns ett flygfoto med givna mått i Appendix (Bilaga 1). Ett problem som riskerar att uppstå då rader av solcellsmoduler placeras för nära varandra är skuggning. Vilket undviks genom standardvärden inom branschen sett till radavstånd. Genom att användaren anger längd och bredd utvecklades beräkningar vilka sker i "bakgrunden" och genererar den yta som endast solceller upptar men med hänsyn till radavstånd.

Radavståndet (m) baserades på solpanelens sidolängd (m) vilken multipliceras med faktor 2,5 enligt

$$Radavstånd_{solceller} = Sidolängd_{modul} * 2,5 \quad (19)$$

I modellen användes en sidolängd på 1,7 m vilket anses vara standardlängd inom branschen och resulterade i ett radavstånd på 4,25 m. En avgränsning gjordes i modellen där ytan upptagen av solceller baserades på radavstånd i relation till angiven bredd (m). Det uppstår skillnad i total yta för anläggningen om istället inmatad längd (m) sätts i relation till radavstånd. I vilken grad variationen sker beror på vilken längd och bredd som användaren anger. Denna approximation ansågs godtycklig för rapporten, dels med tanke på storleken av tillgängliga arealer för fallstudien, ses i Appendix (Bilaga 1), dels då målet med scenariot var att jämföra elproduktion, inte ytor. Ytan $A_{solceller}$, (m²) vilken upptas av solceller och används i *Ekvation (17)* beräknas slutligen enligt

$$A_{solceller} = Längd * Sidolängd_{modul} * \frac{Bredd}{Radavstånd_{solceller}} \quad (20)$$

Nyckelparametrar

Respektive nyckelparameter utformade i samband med scenario *Solel* presenteras och förklaras i nedanstående lista, följt av eventuella ekvationer. Vilket tidsintervall de är beräknade på varierar med tidsöversikterna, då vissa är inkluderade i mer än en. Vilka

nyckelparametrar som i modellen presenteras med respektive tidsöversikt finns överskådligt att tillgå i flödesdiagrammet i kommande avsnitt för scenario Systemlösning, *Figur 6*.

Följande nyckelparametrar togs fram för att utgöra underlag sett till frågeställningens andra del: Vilka utmaningar en solcellsanläggning har för både anslutande elnät och flygplats.

- *Medelproduktion (Wh/tidsintervall)*: För det tidsintervall som analyseras beräknas medelvärdet av solcellsproduktion.
- *Totalproduktion (Wh/tidsintervall)*: Summerar elproduktion för valt tidsintervall.
- *Överproduktion (Wh/tidsintervall, andel/tidsintervall)*: Den mängd producerad el för tidsintervallet vilken överskrider rådande elanvändning, den produktion som mats ut på elnätet. Beräknas för mängd samt andel av totalproduktionen för valt tidsintervall.

$$\text{Överproduktion} = \text{Totalproduktion} - \text{Rådande elanvändning} \quad (21)$$

$$\text{Andel överproduktion} = \frac{\text{Överproduktion}}{\text{Totalproduktion}} \quad (22)$$

- *Täckningsgrad (andel/år)*: Vilken andel av totalproduktionen för ett år motsvarar sett till den totala årliga elanvändningen enligt

$$\text{Täckningsgrad} = \frac{\text{Total elproduktion}_{\text{år}}}{\text{Rådande elanvändning}_{\text{år}}} \quad (23)$$

- *Utnyttjad produktion (Wh/tidsintervall, andel/tidsintervall)*: Utgörs av den produktion som tillgodoser elanvändning. Dessutom visas vilken andel den utnyttjade produktionen utgör sett till både totalproduktion och totalanvändning.

$$\text{Utnyttjad produktion} = \text{Totalproduktion} - \text{Överproduktion} \quad (24)$$

$$\text{Andel utnyttjad produktion} = 1 - \text{Andel överproduktion} \quad (25)$$

$$\text{Andel utnyttjad elanvändning} = \frac{\text{Utnyttjad produktion}}{\text{Rådande elanvändning}} \quad (26)$$

Sammanställning scenario Solel

Med avseende på första frågeställningen, huruvida elproduktion från solceller kan utformas utifrån täckningsgrad, ges i rapportens resultat två exempelfall. Ett fall motsvarade en täckningsgrad på 50 procent och ett en täckningsgrad på 75 procent, båda sett till

basscenariot. Tack vare modellens dynamiska utformning nåddes önskat resultat genom optimering av tillgängliga ytor för respektive fall och resulterade i *Tabell 2*. Både verkningsgrad och systemförluster hölls konstanta för beräkningar i rapporten, baserade på branschstandarder.

I rapportens resultat med avseende på scenario *Solel* beräknades även solcellsanläggningens storlek för respektive täckningsgrad, sett till *Ekvation (18)* (avsnitt 2.3.2.1). Med anledning att återkoppla till rapportens teori vid analys av resultatet.

Tabell 2 Ger den indata sett till en utformad solcellsanläggning för en täckningsgrad på 50 respektive 75 procent.

<i>Täckningsgrad</i>	<i>Total tillgänglig yta</i> <i>m²</i>	<i>Längd</i> <i>m</i>	<i>Bredd</i> <i>m</i>	<i>Verkningsgrad</i>	<i>Systemförluster</i>
50%	87 000	130	21	20%	14%
75%	87 000	194	20	20%	14%

3.1.5 Scenario *Flyg-el*

För scenariot presenteras den genomförda metodiken för att besvara rapportens andra frågeställningen, med avseende på kvantitet: Vilken inverkan kommersiella elflyg förväntas ha för regionala flygplatser lastprofil. Precis som i scenario *Solel* utvecklades ännu en tidsserie på timmedelvärde till modellen (de två scenariona är fristående från varandra). Skillnaden är att denna tidserie använde basscenariot som grundstomme för att sedan addera lastprofilen för elflyg. En addition som i modellen utgörs av effekttoppar vid laddning av flyg. Den nya lastprofilen utvecklades att följa samma metodik som tidigare visats i *Figur 5*. För att jämföra förändringen sätts i modellen den nya tidsserien, inklusive elflyg, i relation till basscenariot

Tillgängligt energidata fanns som bekant endast på timmedelnivå. Därför adderades hela laddningsbehovet som en klumpsumma till ett matchande timvärde för basscenariot. Laddning antogs därför ta en timme. Detta gjordes trots att den faktiska laddningstiden kan komma att bli både kortare och längre. Att göra den kortare begränsades av tidsupplösningen på data och att göra den längre ansågs inte rimligt då få plan sällan har en turn-around-tid (tid från landning till att planet är i luften igen) på mer än en timme.

Omgivande temperaturpåverkan beskriven i teoridelen (avsnitt 2.3.3) sett till batteriladdning inkluderades inte heller i scenariot. Med avseende på att temperaturpåverkans magnitud för framtida elflygplan var okänd. Vidare ges i modellen inte heller en rättvis bild sett det laddningsmönster som presenterats i teoridelen om batterier *Figur 4* (avsnitt 2.3.3). Detta ansågs vara en mer reell och kvantifierbar påverkan och valdes att inkluderas i rapporten men inte förrän i scenario *Systemlösning*. Målet med scenariot var att skapa en uppfattning om hur flygplatser lastprofil kan komma att förändras med laddning av elflyg inkluderat. Tidsserien för *Flyg-el* togs fram genom följande beräkning

$$E_{\text{flyg-el}} = \text{Rådande elanvändning} + E_{\text{laddningsbehov}} \quad (27)$$

Där $E_{\text{flyg-el}}$ (kWh/h) utgörs av en addition av uppmätta värden från basscenariot (kWh/h) och en timmes batteriladdning av elflyg, $E_{\text{laddningsbehov}}$ (kWh/h).

För att identifiera laddningstimmar utgår modellen från flygplatsens nuvarande kommersiella flygtrafik, vilken presenteras i fallstudien. Flygplan som ankommer och flygplan som avgår behandlades till viss del annorlunda men i båda fallen antogs att full laddning krävs. Denna metod hade inte applicerats om det var samma flygplan som enligt flygschemat ankommit för att sedan avgå.

Beroende på när planet ankommer valdes den timme, antingen den under vilken ankomsten sker eller den efter. Avvägningen gjordes baserat på vilken av timmarna som antogs bära största delen av laddningsbehovet. Om planet landar före halva timmen gått tilldelades laddningen på den timmen. Vidare, om planet landar efter halva timmen satts laddningsbehovet på timmen efter. Om planet landar precis under halva timmen användes timmen under vilken landningen sker. Sett till avgångar användes samma metod men istället satts laddningsbehovet till timmen innan om mindre än halva timmen gått vid avgång. Annars till timmen för avgång. Detta tillämpades för tidsperioden även om det förmodades finnas vissa undantag för tidtabellen sett till både storhelger och förseningar. Med motivering i att ambitionen var att ge en övergripande bild. Däremot, vid förekommande av längre tillkännagivna perioder utan flygtrafik inkluderades dessa då de ansågs ha avgörande inverkan på resultatet. För en sådan period antogs därför ingen laddning av elflyg ske. Information om längre tid utan kommersiellt flyg redogörs för i fallstudien. Nedan presenteras indata för scenariot *Flyg-el*.

Indata

Som indata för detta scenario valdes elflygets totala batteristorlek (kWh) och dess batterireserv (kWh). Anledning till inmatning av reserven var att den inte antogs vara förbrukad under normala laddningsförhållanden. Beroende på vilken teknisk data som finns att tillgå om elflyg kan batterikapacitet räknas ut på olika vis. För modellen användes följande

$$E_{\text{laddningsbehov}} = E_{\text{batteri}} - E_{\text{IFR}} \quad (28)$$

$E_{\text{laddningsbehov}}$ (kWh/h), står för batteriets tillgängliga energi när reservenergin räknats bort. E_{batteri} (kWh/h) för den totala batterikapaciteten och E_{IFR} (kWh) för den kapacitet reserven utgör. Reservkapaciteten beräknas ut enligt

$$E_{\text{IFR}} = P_{\text{cruise}} * t_{\text{IFR}} \quad (29)$$

Där P_{cruise} (kW/h) är den effekt som reservtiden t_{IFR} (h) är räknad på. Indata för scenario *Flyg-el* sammanställs i *Tabell 3*.

Tabell 3 Återger den indata modellens användare väljer för scenario flyg-el.

<u>Indata scenario Flyg-el</u>	
Total batterikapacitet (E_{batteri})	(kWh)
Batterireserv (E_{IFR})	(kWh)

Termen Flyg-el innebär i fortsättningen tidsserien för vilken addition av flygplatsens nuvarande lastprofil gjorts med laddningsbehov sett till elflyg. För timmar utan laddning uppgår batteriparametern ($E_{\text{laddningsbehov}}$) i *Ekvation (27)* till noll och utgörs endast av basscenariots uppmätta värde. I rapporten antogs full laddning under samtliga laddningstimmar.

Nyckelparametrar

Utvecklade och valda nyckelparametrar för scenario *Flyg-el* beskrivs nedan (parenteser omger begreppet *Flyg-el* i ekvationerna för att bindestrecket inte ska förväxlas med subtraktion). I likhet med presentationen av nyckelparametrar för scenario *Solel* ges först en beskrivning oberoende av tidsupplösning då vissa parametrar återkommer i flera tidsöversikter i modellen. Varje använd nyckelparameter för respektive tidsupplösning kan ses längre ner i flödesdiagrammet för modellen, *Figur 6*.

- *Medelanvändning (Wh/tidsintervall)*: Medelvärde på summerad elanvändning sett till tidsintervall.
- *Totalanvändning (Wh/tidsintervall)*: Summan av *Flyg-el* för valt tidsintervall.
- *Totalökning (Wh/tidsintervall, andel/tidsintervall)*: Effektskillnaden *Flyg-elen* utgör jämfört med basscenariot sett till effektvärde för valt tidsintervall och procentuell andel.

$$\text{Totalökning} = (\text{Flyg} - \text{el}) - \text{Rådande elanvändning} \quad (30)$$

$$\text{Totalökning}_{\text{andel}} = \frac{\text{Totalökning}}{\text{Rådande elanvändning}} \quad (31)$$

- *Andel Flyg-el (andel/tidsintervall)*: Den procentuella förändringen mellan *Flyg-el* och rådande elanvändning.

$$\text{Andel} (\text{Flyg} - \text{el}) = 1 - \left(\frac{\text{Flyg-el}}{\text{Rådande elanvändning}} \right) \quad (32)$$

Slutligen presenteras den indata vilken användes i rapporten. Teknisk data från teoridelen (avsnitt 2.3.3.1), ses i *Tabell 4*, med avseende på Eviations elflygsmodell Alice. Även laddningstid inkluderades för kännedom. Alice valdes för rapporten dels med avseende på tillgänglig data dels sett till hennes storlek vilken är i likhet med den mindre kommersiella regionala flygplan har i dag.

Tabell 4 Teknisk data för elflygsmodellen Alice.

<i>Teknisk data Alice</i>	
Total batterikapacitet (E_{batteri})	920 (kWh)
Cruise-effekt (P_{cruise})	260 (kW)
Reservtid (t_{IFR})	0,45 (h)
Laddningstid (full)	1 (h)

Enligt *Tabell 4* ges en rättvis bild i rapporten sett till full laddningstid av Alice vilken uppgår till en timme.

Sammanfattning scenario Flyg-el

Alice batterireserv beräknades genom *Ekvation (29)*, därav utgjorde scenariots indata i rapporten av värdena vilka finns i *Tabell 5*.

Tabell 5 Redogör för rapportens indata sett till scenariot för Flyg-el baserat på elflygsmodellen Alice.

<i>Indata scenario Flyg-el</i>	
Total batterikapacitet (E_{batteri})	920 (kWh)
Batterireserv (E_{IFR})	195 (kWh)

Med indata i *Tabell 5* och Scenario *Flyg-el* avsågs att besvara vilken inverkan en elektrifiering av kommersiell luftfart kan få på flygplatsers lastprofil.

3.1.6 Scenario Systemlösning

Sett till rapportens tredje frågeställning: Hur väl elproduktion från en solcellsanläggning möter flygplatsens elanvändning vid implementering av elflyg baserat på årlig täckningsgrad, genomfördes en sammanslagning. I modellen ställs scenario *Solel* i relation till scenario *Flyg-el*. Vilket i sin tur innebar att inga nya tidsserier behövdes. Däremot genomfördes två stickprov sett till approximerad högre tidsupplöst data för dygnsöversikten, på minutmedelnivå. Tillämpat tillvägagångssätt finns längre ner i scenariobeskrivningen.

Indata

Ingen ny indata adderades till detta scenario utan en kombination från föregående användes i form av *Tabell 2* (avsnitt 3.1.4) och *Tabell 5* (avsnitt 3.1.5).

Nyckelparametrar

Nyckelparametrar vilka valdes till scenariot innehåller inte några nya beräkningar rent matematisk. Däremot används nyckelparametrar från de två tidigare scenariona i kombination enligt följande

Överproduktion (Wh/tidsintervall, andel/tidsintervall): Producerad *Solel* för tidsintervallet vilken överstiger *Flyg-elen*.

$$\text{Överproduktion} = \text{Totalproduktion} - (\text{Flyg} - \text{el}) \quad (33)$$

$$\text{Andel överproduktion} = \frac{\text{Överproduktion}}{\text{Totalproduktion}} \quad (34)$$

Täckningsgrad (andel/år): Vilken andel av totalproduktionen för ett år motsvarar sett till totalanvändning (*Flyg-el*).

$$\text{Täckningsgrad} = \frac{\text{Total elproduktion}_{\text{år}}}{\text{Flyg-el}_{\text{år}}} \quad (35)$$

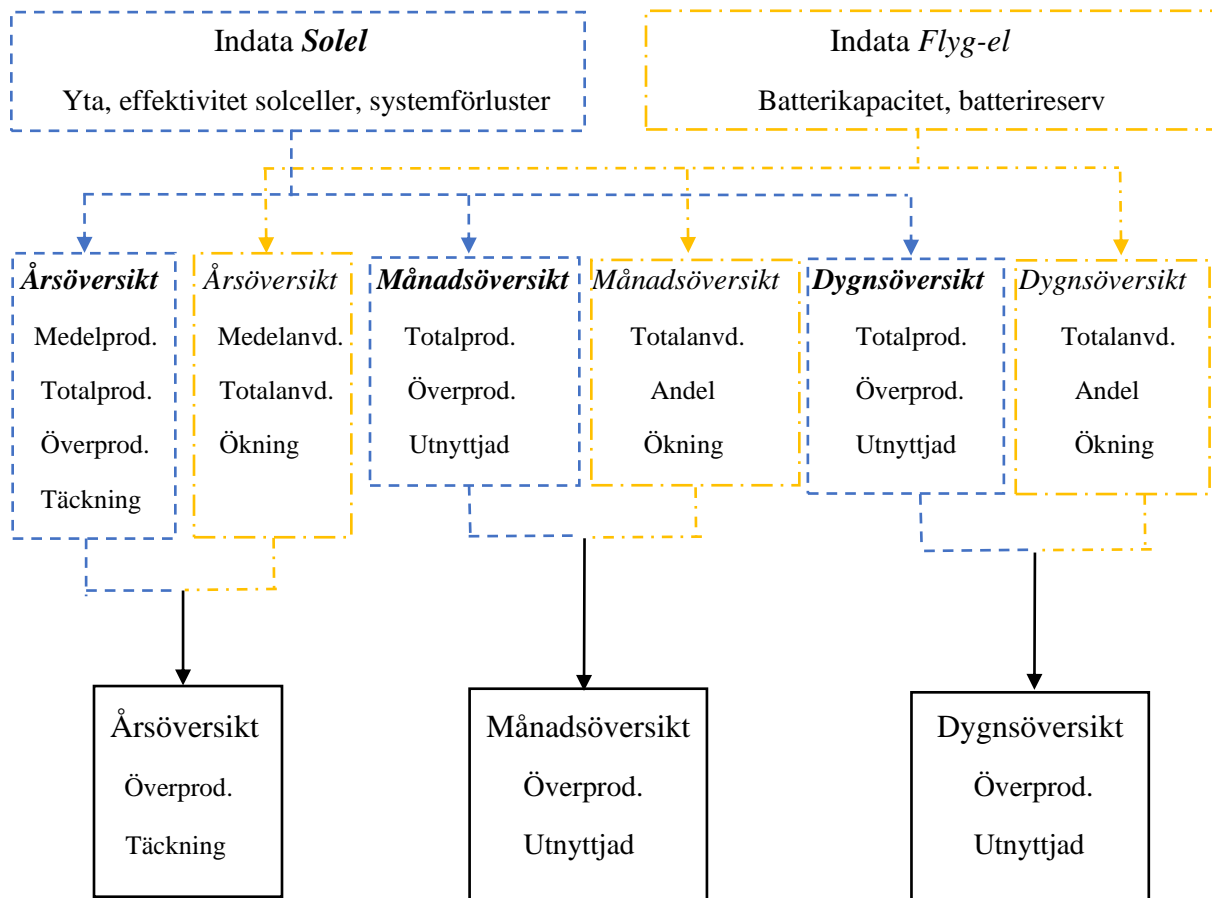
Utnyttjad produktion (Wh/tidsintervall, andel/tidsintervall): Utgörs av den produktion som tillgodoser *Flyg-elen*. Dessutom visas vilken andel den utnyttjade produktionen utgör sett till både totalproduktion och totalanvändning.

$$\text{Utnyttjad produktion} = \text{Totalproduktion} - \text{Överproduktion} \quad (36)$$

$$\text{Andel utnyttjad produktion} = 1 - \text{Andel överproduktion} \quad (37)$$

$$\text{Andel utnyttjad elanvändning} = \frac{\text{Utnyttjad produktion}}{\text{Flyg-el}} \quad (38)$$

Vilka tidsöversikter nyckelparametrarna applicerades på i scenario *Systemlösning* finns att utläsa nedan i *Figur 6*. Denna ger även en översikt för modellens slutgiltiga uppbyggnad med avseende på indata och använda nyckelparametrar för modellens tre scenarion med tre respektive tidsöversikter. Vidare visualiseras även hur sammanslagningen av scenario *Solel* och scenario *Flyg-el* genomfördes.



Figur 6 Ger en fullskalig översikt för hur den framtagna modellen i ett flödesdiagram med avseende på variabla parametrar för indata och nyckelparametrar för respektive tidsupplösning och scenario. Blå streckad linje utgörs av scenario Solel, gul streckad linje av scenario Flyg-el och svart heldragen linje av scenario Systemlösning.

Dygnsöversikt på minutmedelvärden

När sammanslagning av scenariona *Solel* och *Flyg-el* gjorts ansågs det finnas belägg att zooma in ytterligare. Med andra ord adderades en tidsupplösning för att analysera elproduktion och elanvändning på minutmedelvärde istället för på timmedelvärde. Detta gjordes två gånger, under två dygn vid olika tillfällen på året, vilka redogörs för längre fram i rapporten.

I scenario *Flyg-el* togs ingen hänsyn till litium-jonbatteriets laddningskurva (avsnitt 2.3.3). Detta med anledning att laddningstiden approximerades till en timme, vilket också var högsta tillgängliga upplösning på data. Anledningen till att minutnivån utvecklades var dels att inkludera Alice faktiska laddningskurva, dels sett till elsystemets upprätthållande av balans i varje stund.

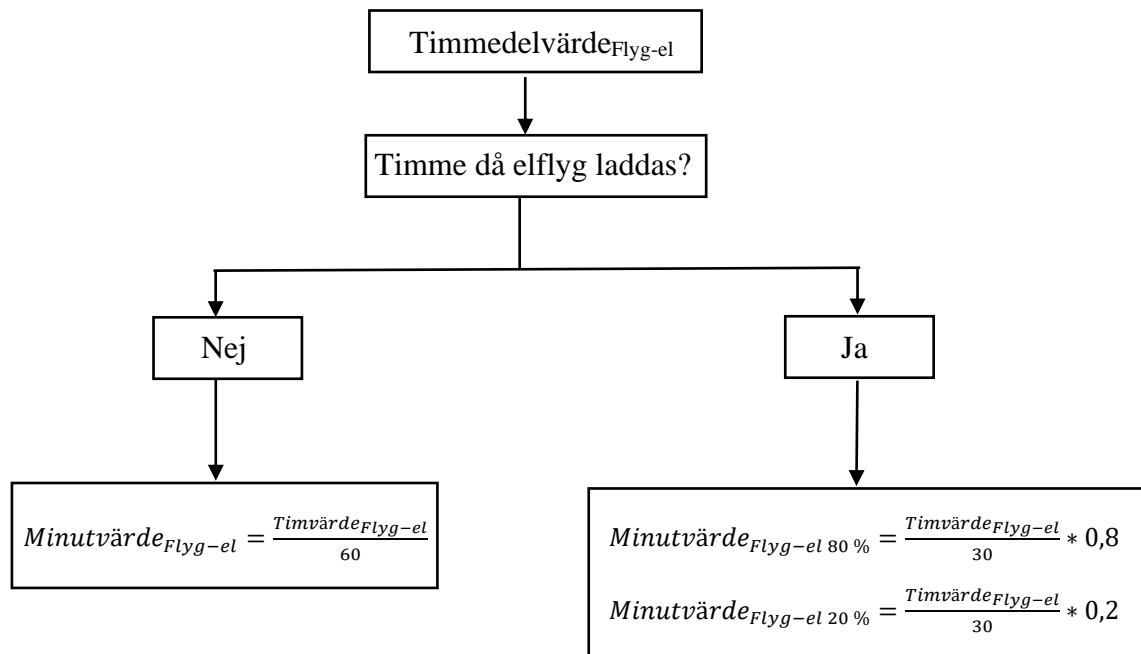
Då ingen ny data adderades gjordes istället tre approximationer på tillgänglig data enligt följande:

- Den verkliga minutmedelvariationen sett till scenario *Flyg-el* vid de timmar då laddning inte sker ansågs vara försumbara mot de minutmedelvärden som uppstår vid laddning.
- Den verkliga minutmedelvariationen sett till scenario *Solel* ansågs vara försumbara mot de minutmedelvärden som uppstår vid laddning.
- Vid laddning följer Alices batteri det mönster vilket ses i *Figur 4* (avsnitt 2.3.3), som innebär att 80 procent av laddningen skulle ske under första halvan av den totala laddningstiden. Medan resterande 20 procent skulle ske under andra halvan.

Dessa approximationer ansågs godtyckliga med motivation i det höga effektbehov elflyg förväntas utgöra under laddningstimmar. Då scenario *Solel* inte har timmar för laddning att ta hänsyn till fördelades varje timmedelvärde jämt på 60 minuter enligt

$$\text{Minutvärde}_{solel} = \frac{\text{Timvärde}_{solel}}{60} \quad (39)$$

Scenario *Flyg-el* hanterades annorlunda med avseende på behov av olika hantering av timmedelvärde för laddning eller ej. För timmar då ingen laddning sker tillämpades samma beräkning som för *Solel* i *Ekvation (39)* vilken ses i flödesdiagrammet för metodiken i *Figur 7*. För laddningstimmar behandlades istället timmedelvärdena enligt den tredje approximationen gjord ovan med metodik enligt *Figur 7*.



Figur 7 Beskriver hur timmedelvärden för flyg-el hanterades vid approximation till minutmedelvärde beroende på om det är en timme som elflyg laddas eller ej.

De nyckelparametrar som beräknades på minutmedelvärdesnivå utgick från samma metodik som för dygnsöversikten, se *Figur 6*, då det är samma tidsöversikt men i ny tidsupplösning.

Sammanställning scenario Systemlösning

Eftersom scenario *Systemlösning* i modellen utgörs av en kombination av scenario *Solel* och scenario *Flyg-el* valdes scenariot att presenteras i ett separat resultat- och analyskapitel i rapporten. Precis som resultatet för scenario *Solel* presenteras två fall baserade på täckningsgrad utgjord av 50 respektive 75 procent men istället satt i relation till den årliga elanvändningen för scenario *Flyg-el*. Med ambitionen att besvara rapportens tredje frågeställning, hur väl solcellsproduktion möter flygplatsens lastprofil inkluderat elflyg. I resultatet återfinns även de två stickproven beräknade på minutmedelvärde. Nedan i *Tabell 6* visas indata för scenario *Solel* för att nå önskade täckningsgrader. Indata med avseende på *Flyg-el* ses i *Tabell 5* (avsnitt 3.1.5).

Tabell 6 Visar indata för simuleringsmodellen för scenariot *Systemlösning*.

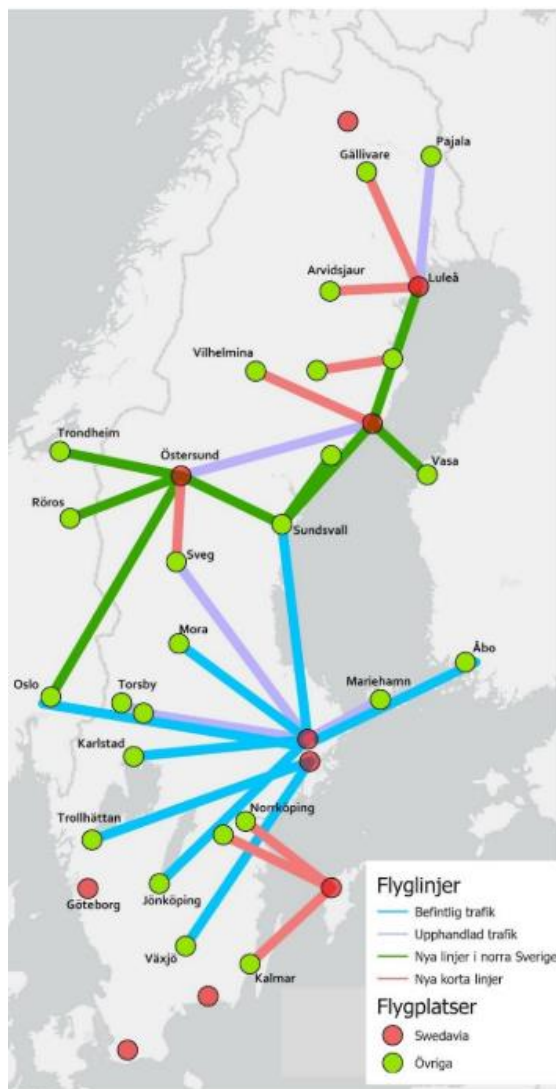
<i>Täckningsgrad</i>	<i>Total tillgänglig yta</i> <i>m²</i>	<i>Längd</i> <i>m</i>	<i>Bredd</i> <i>m</i>	<i>Verkningsgrad</i>	<i>Systemförluster</i>
50%	87 000	366	25	20 %	14 %
75%	87 000	555	25	20 %	14 %

3.2 Fallstudie

Sveg, beläget i södra Norrland (Long: -14,41°, Lat: 62,05°) är på den plats rapporten förankrades i, både sett till flygplats och elnät. Sveg ligger på en intressant position, inte endast med avseende på flygrutter utan även sett till annan infrastruktur, inlandsbanan. Vilken det redogjordes för i rapportens teoridel (avsnitt 2.3.1).

3.2.1 Härjedalens flygplats

Mellan de flygplatser som finns i Sverige och är presenterade i *Figur 8* nedan syns ett par sträckor som lämpar sig för elflyg sett till räckvidd men även sett till restid (Trafikanalys 2020). Dessutom öppnar en elektrifiering upp för nya rutter vilka kan bidra med regionsförstärkande effekt. Härjeåns flygplatsen i Sveg har i dag en kommersiell flygsträcka till Arlanda, som dessutom är statligt upphandlad. Flygsträckan uppgår till strax under 400 kilometer. Dessutom föreslås i *Figur 8* en ny rutt mellan Sveg och Östersund.



Figur 8 Kartläggning över lämpliga flyglinjer till övergången av elflyg (Trafikanalys 2020).

Den rådande tidtabellen för ankomster och avgångar mellan Sveg och Arlanda återges i Tabell 7 nedan.

Tabell 7 Visar rådande avgångar (kursivt) och ankomster till Härjedalens flygplats.

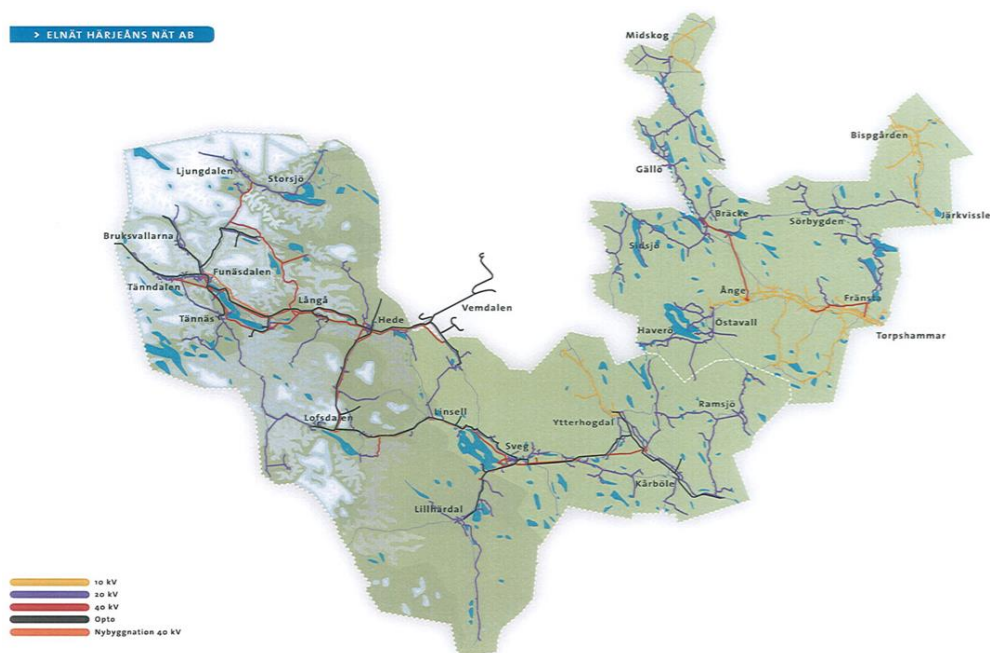
	Mån	Tis	Ons	Tors	Fre	Lör	Sön
Avg	<i>06:45</i>	<i>06:45</i>	<i>06:45</i>	<i>06:45</i>	<i>06:45</i>		
Ank	08:55	08:55	08:55	08:55	08:55		
Avg				<i>12:50</i>			
Ank				14:25			
Avg							<i>14:55</i>
Ank							16:30
Avg	<i>17:05</i>	<i>17:05</i>	<i>17:05</i>	<i>17:05</i>	<i>17:05</i>		
Ank	18:45	18:45	18:45	18:45	18:45		

Härjedalens flygplats är rent tekniskt en av de modernaste i Sverige och gick 2019 med i Green Flyway som är ett initiativ för främjandet av elflyg i Sverige och Norge. I anslutning till flygplatsen finns flera öppna områden tillgängliga för solceller, en flygbild finns att tillgå i Appendix (Bilaga 1). Totalt sett finns det ytor upp mot 87 000 m². Flygplatsen är avstängd under juli månad med anledning till minskad efterfrågan på resande.

I dagsläget har flygplatsen två olika nätabonnemang, en huvudsäkring på 200A för själva huvudbyggnaden samt en på 63A vilken tillhör hangarerna som ligger i anslutning till huvudbyggnaden. I simuleringsmodellen utgörs basscenariot av summan för elanvändningen från båda nätabonnemangen. Dessa fanns endast tillgängliga för 2019.

3.2.2 Härjeåns Energi

Härjeåns elnät tillgodoser i dagsläget 27 000 kunders behov av värme, ljus och kraft (Härjeåns Energi 2020). Nedan i *Figur 9* ges en bild av hela distributionssystemet. Sveg kan utläsas till att ligga en bra bit ifrån stora städer, således är nätet främst avsett för landsbygd i mellersta Norrland. Vid utläsning av *Figur 9* är det ett 20 kV elnät som förser Sveg med el.



Figur 9 Ger en översikt för Härjeåns distributionsområde för olika typer av ledningar och dess nätspänningar, inklusive fallstudiens lokalisering, Sveg.

Sett till närliggande produktion, ligger Svegs kraftverk beläget vid inloppet från Svegsjön. Vattenkraftverket har en kapacitet på 37 MW och en normalårsproduktion på cirka 150 GWh.

3.3.3 Omgivning

För att resonera kring vilka synergier en solcellsanläggning kan bidra med är det av vikt att även detektera andra aktörer vilka kan tänkas dra nytta av lokalproducerad el. Inlandsbanan som går precis intill flygplatsen skulle kunna vara en sådan aktör med avseende på behovet av tankstationer vid en elektrifiering som nämns i studiens teoridel (avsnitt 2.3.1). Sett till annan infrastruktur passerar Europaväg 45 genom Sveg, vilket innebär en förväntad ökning av vägfordon i behov av laddning.

3.3.4 Parametrar för solcellsanläggning

I avsnittet för beräkningar av elproduktion från solceller i rapportens teoridel (avsnitt 2.3.2.1) presenterades en rad parametrar vilka beror på vilken plats beräkningarna avser. Nedan följer en redogörelse för dessa baserat på fallstudien.

<i>Beteckning</i>	<i>Förklaring</i>	<i>Värde</i>
L_{lok}	Longitud för fallstudie	-14,41°
B	Modulens tilt	30°
φ	Latitud för fallstudie	62,06°
$\rho_{snö}$	Albedo, reflektionsfaktor snö (dec-mars)	0,7
ρ_{bm}	Albedo, reflektionsfaktor, bar mark	0,25
γ	I vilken riktning solceller riktas	0° (söder)

Att modulens tilt valdes till 30° baserades på rekommendationer vid anläggningar belägna längre norrut i Sverige. Valda värden för reflektionsfaktorn baserades på månader med respektive utan snö (Beckman & Duffie 2013).

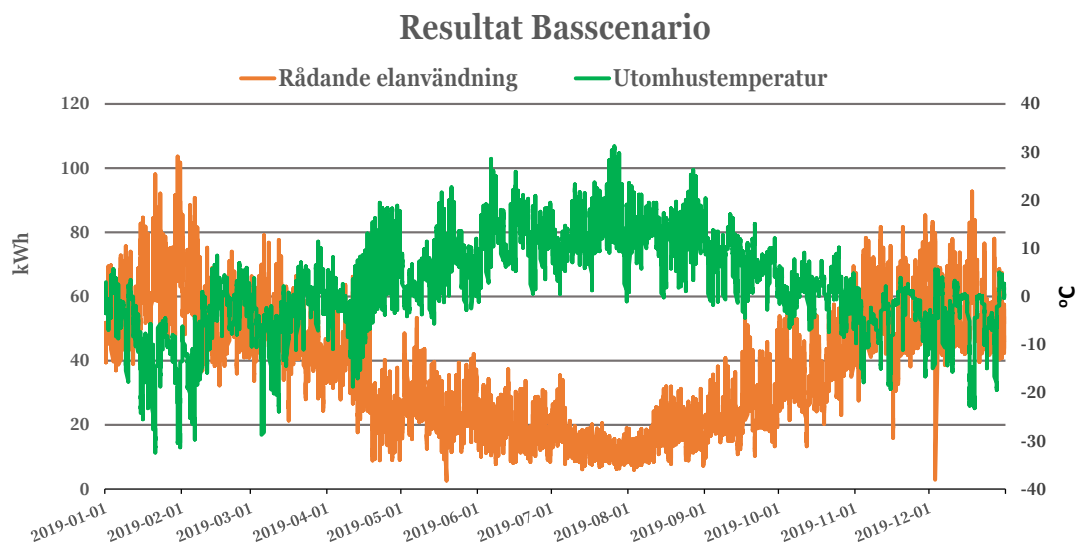
4 Resultat & Analys Del I

Rapportens resultat och analys är uppdelat i två delar. Första delen tar avstamp i modellens basscenario för att sedan redogöra för resultat och analys av rapportens två första frågeställningar: Scenario *Solel* och scenario *Flyg-el*.

Resultat för respektive scenario bygger på grafer och nyckelparametrar från den framtagna simuleringsmodellen med avseende på givna indata från rapportens metod. Analysen avser att sätta resultaten i sammanhang, både sett till varandra samt till rapportens teoridel.

4.1 Resultat *Basscenario*

Basscenarioet representerar ett slags utgångsläge för elförsörjningen av Härjedalens flygplats. Med en lastprofil baserad på timmedelvärden från år 2019. I *Figur 10* presenteras lastprofilen tillsammans med utomhustemperaturen (också den på timmedelnivå) i Sveg för att påvisa variationen vilken rådde över året.



Figur 10 Visar hur flygplatsens lastprofil varierade över året 2019 för uppmätta timmedelvärden med korrelerande utomhustemperaturer.

Elanvändningen för basscenarioet var enligt *Figur 10* som högst under vintermånaderna när temperaturen var som lägst. Lägsta timmedelvärde uppgick till 1,6 kWh/h och förmodas ha uppkommit under någon form av elavbrott med anledning att i *Figur 10* utläses värden nära noll under kortare perioder över året. Den totala elanvändningen uppgick till 324,82 MWh/år. Någon vidare analys på basscenarioet görs inte då det i fortsättningen kommer sättas i relation till elproduktion av solceller och utgöra grund till laddningsbehov av elflyg.

4.2 Resultat scenario *Solel*

Resultatet för scenariot är enligt metoden framtaget för att besvara rapportens första frågeställningen, hur en solcellsanläggning kan utformas och optimeras i anslutning till flygplatsen, sett till täckningsgrad. Den indata som angavs finns dokumenterad i *Tabell 2* i kapitlet för rapportens metod (avsnitt 3.1.4). De två fall som valdes att inkluderas i rapporten utgörs av täckningsgrad på 50 respektive 75 procent, med avseende på rådande elanvändning från basscenariot. Nedan följer modellresultat för årsöversikt och månadsöversikt tillsammans med valda relevanta nyckelparametrar.

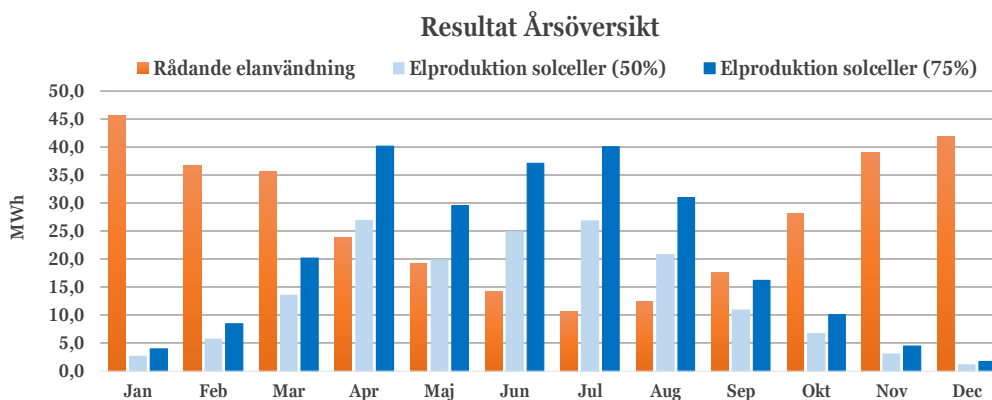
Årsöversikt

Årsöversikten är som bekant byggd på månadsmedelvärden för att åskådliggöra säsongsvariation av solcellsproduktion. *Tabell 8* innefattar de ytor en solcellsanläggning skulle utgöra baserat på indata tillsammans med vilka storlekar anläggningen skulle uppgå till för både 50 och 75 procent täckningsgrad.

Tabell 8 Visar vilken yta och storlek av solceller som krävs för att uppnå 50 respektive 75 procents täckningsgrad baserat på den rådande elanvändningen under 2019.

<i>Täckningsgrad</i>	<i>Yta solceller</i> <i>m²</i>	<i>Storlek</i> <i>MW_p</i>
50%	885	0,18
75%	1327	0,27

Ytan solceller som den 50 procentiga täckningsgraden skulle ge upphov till utläses till 885 m². Anläggningens storlek skulle då uppgå till 0,18 MW_p. En årlig täckningsgrad på 75 procent skulle utgöra en solcellsanläggning på 1 327 m². Anläggningens storlek skulle då uppgå till 0,26 MW_p. Hur solcellsproduktionen skulle stå sig i relation till basscenariot för flygplatsen för de båda fallen återges nedan i *Figur 11*, där resultatet av de båda täckningsgraderna ses i samma graf för överskådlighet.



Figur 11 Beskriver den årliga elproduktionen som en solcellsanläggning skulle producera per månad för täckningsgraderna 50 och 75 procent i relation till den månadsvisa elanvändningen 2019.

I Figur 11 framgår tydligt hur produktionen skulle vara lägre under första delen av året för att sedan stiga under vår och sommar för att åter igen avta under hösten. Från april till augusti skulle produktionen överstiga elanvändningen i varierad grad för båda täckningsgraderna. Elanvändningen i sin tur skulle variera i motsats till elproduktionen, vilket beskrivits i resultatdelen för basscenariot (avsnitt 4.1.1). Relevanta nyckelparametrar i form av totalproduktion och överproduktion för de båda täckningsgraderna ges i Tabell 9.

Tabell 9 Sammanställer den årliga totalproduktionen och överproduktionen för de två olika täckningsgraderna.

Täckning	Totalproduktion	Överproduktion
	MWh/år	MWh/år
50%	162,81	38,84
75%	244,22	98,42

Den beräknade totalproduktionen för den 75 procentiga täckningsgraden utläses till att vara högre än den 50 procentiga. Skillnaden hur täckningsgraderna skulle förhålla sig till varandra är densamma för totalproduktionen, 162,8 MWh skulle vara precis som 50 procent, två tredjedelar av 244,2 MWh respektive 75 procent. Mönstret skulle däremot inte följas av överproduktionen då 38,8 MWh istället skulle utgöra av en tredjedel av 98,4 MWh.

Månadsöversikt

Nyckelparametrar för scenariots månadsöversikt sammanställdes för samtliga månader i två tabeller, Tabell 10 och Tabell 11. Dessutom presenteras utifrån tabellerna två månadersgrafer för att ge en visuell överblick av resultatet. Tabell 10 redogör för den producerade solelen för båda täckningsgraderna och Tabell 11 istället med avseende på den utnyttjade solelen. Nyckelparametrarna finns förklarade i rapportens metodkapitel (avsnitt 3.1.4).

Tabell 10 Visar hur elproduktionen skulle variera månadsvis över året för de två täckningsgraderna sett till totalproduktion och överproduktion beräknade på timmedelvärden.

<i>Månad</i>	<i>Totalproduktion Solel</i>		<i>Överproduktion Solel</i>			
	<i>50%</i> <i>MWh/månad</i>	<i>75%</i> <i>MWh/månad</i>	<i>50%</i> <i>MWh/månad</i>	<i>Andel</i>	<i>75%</i> <i>MWh/månad</i>	<i>Andel</i>
Januari	2,59	3,89	0,07	3%	0,62	16%
Februari	5,70	8,55	0,87	15%	2,48	29%
Mars	12,72	19,08	3,88	31%	8,29	43%
April	26,87	40,30	16,33	61%	28,76	71%
Maj	19,06	28,59	8,53	45%	18,05	61%
Juni	24,82	37,23	15,29	62%	27,09	73%
Juli	25,60	38,40	18,91	74%	31,41	82%
Augusti	20,44	30,67	13,64	67%	23,42	76%
September	10,87	16,30	3,99	37%	8,45	52%
Oktober	6,39	9,58	1,32	21%	2,99	31%
November	3,02	4,53	0,33	11%	1,09	24%
December	1,16	1,75	0,01	1%	0,08	5%

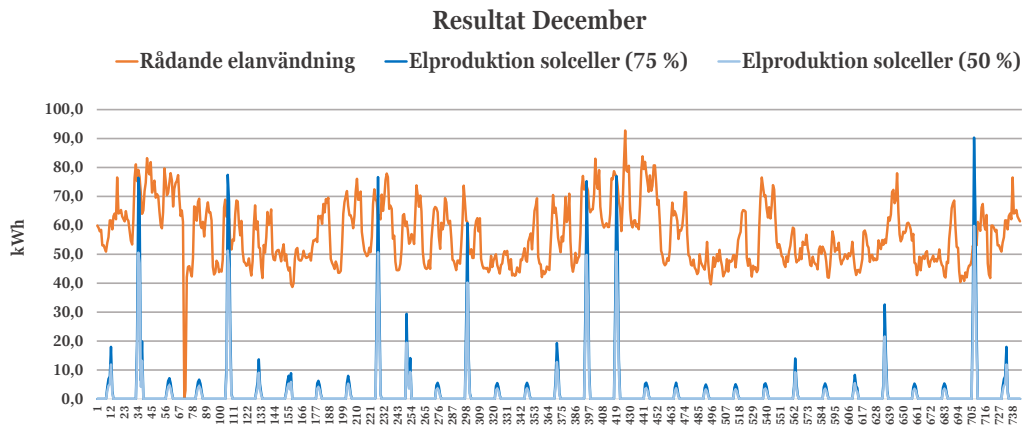
I Tabell 10 utläses månadsvis samma parametrar som i Tabell 9, solcellsanläggnings totala produktion samt hur stor överproduktionen skulle vara för respektive täckningsgrad. Dessutom inkluderas vilken andel överproduktionen skulle utgöra sett till totalproduktionen. Värdena skulle variera över året, från låga värden i januari och februari till att stiga under vår- och sommarmånader för att minska igen till hösten och vintern. April skulle vara den månad som visar högsta värden, både sett till den 50 procentiga och 75 procentiga täckningsgraden för totalproduktionen. Medan den högsta överproduktionen skulle uppkomma i juli månad, vilket också är gemensamt för båda täckningsgraderna. Den månad med minst produktion skulle vara december, för båda fallen sett till totalproduktionen och överproduktion.

Tabell 11 Visar hur mycket solexel som månadsvis skulle kunna utnyttjas av flygplatsen beräknat på timmedelvärden. Även vilka andelar den nyttjade produktionen skulle utgöra sett till den totala produktionen men även flygplatsens elanvändning.

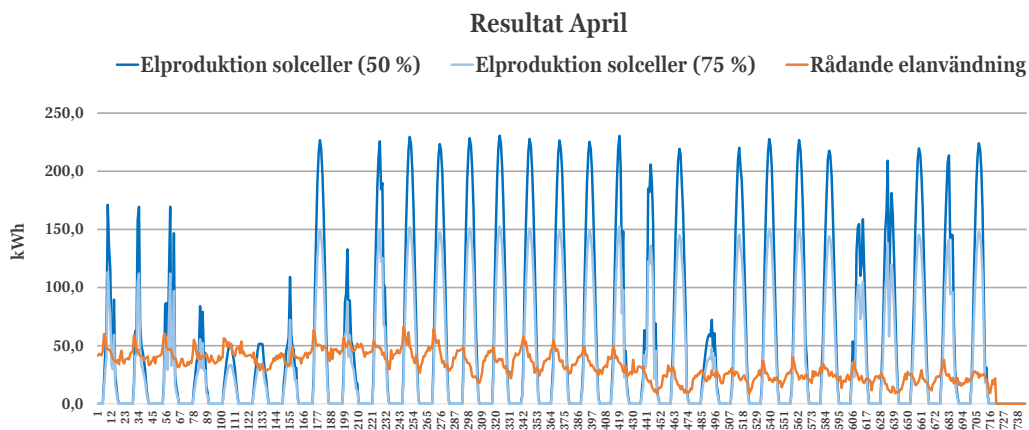
Månad	Utnyttjad produktion		Andel utnyttjad produktion			
	50%	75%	50%		75%	
	MWh/månad	MWh/månad	Produktion	Användning	Produktion	Användning
Januari	2,52	3,27	97%	6%	84%	7%
Februari	4,83	6,07	85%	13%	71%	17%
Mars	8,84	10,79	69%	25%	57%	31%
April	10,53	11,54	39%	44%	29%	48%
Maj	10,53	11,51	55%	57%	39%	62%
Juni	9,54	10,15	38%	67%	27%	71%
Juli	6,69	6,99	26%	65%	18%	68%
Augusti	6,81	7,24	33%	56%	24%	60%
September	6,87	7,85	63%	39%	48%	44%
Oktober	5,07	6,59	79%	19%	69%	24%
November	2,69	3,44	89%	7%	76%	9%
December	1,15	1,66	99%	3%	95%	4%

Tabell 11 förmedlar en tydligare bild över hur den producerade och utnyttjade elen från solcellsanläggningen skulle variera över året. Mängden utnyttjad solexel skulle följa den årsvariation som beskrivits i Tabell 10. Den totalt utnyttjade mängden solexel skulle vara som störst under april och maj månad för båda täckningsgraderna och som lägst i december. Sett till den andel produktion som skulle utnyttjas är den som högst under januari och februari för att sjunka som lägst till juli. Där efter skulle den öka för att nå höga värden igen under november och december. Sett till den andel produktion som skulle utnyttjas är värdena för den 50 procentiga täckningsgraden högre än för den 75 procentiga under samtliga månader. Den andel som skulle utnyttjats sett till användning har motsatt variation. De lägsta värdena skulle uppstå under januari för att öka och nå sitt maximala värde under juni för att sedan sjunka igen. Det lägsta värdet skulle ges under december månad.

Variationen av produktion sammanställd i Tabell 10 och Tabell 11 visualiseras i Figur 12 och Figur 13 för de två månader med högst respektive lägst totalproduktion från Tabell 10. Figur 12 visar den månad med lägst produktion, december för de båda täckningsgraderna. Följt av Figur 13 vilken illustrerar april, den månad med högst elproduktion. Båda satta i relation till basscenariot, flygplatsens rådande elanvändning.



Figur 12 Visar hur solcellsproduktion skulle variera för december med en årlig täckning på 50 respektive 75 procent tillsammans med flygplatsens rådande elanvändning för timmedelvärden.



Figur 13 Visar hur stor elproduktion som solcellsanläggning skulle utgöra om täckningsgraden skulle uppgå till 50 respektive 75 procent och elanvändningen för flygplatsen baserat på timmedelvärden.

Resultaten i *Figur 12* och *Figur 13* skiljer sig åt. Under december månad skulle elproduktionen endast vid ett fåtal timmar nå upp till elanvändningen. Den 75 procentiga täckningsgraden skulle överstiga elanvändningen vid endast två tillfällen. Medan i april månad skulle det under flera timmar råda tydlig överproduktion för båda täckningsgraderna. Topparna skulle dessutom vara betydligt bredare under april månad med avseende på fler timmar av dagsljus.

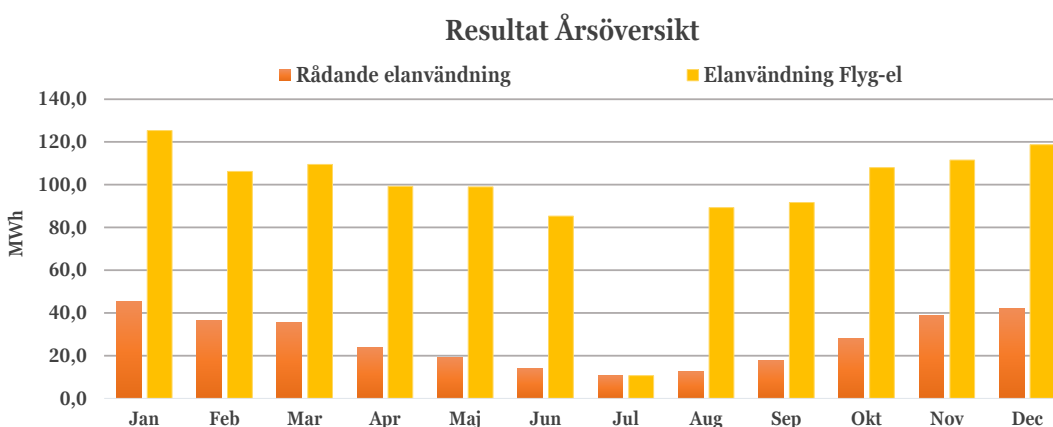
Sammanfattningsvis påvisar scenario *Solel* en solcellsanläggnings kompatibilitet med flygplatsens rådande lastprofil, baserad på täckningsgrad i enighet med rapportens första frågeställning.

4.3 Resultat scenario *Flyg-el*

Med scenariot var ambitionen att besvara rapportens andra frågeställning: Vad en implementering av kommersiella elflyg förväntas innebära för flygplatsers nuvarande lastprofil. Använd indata ges i *Tabell 5* i rapportens metod för scenariot (avsnitt 3.1.5). Vilken baseras på teknisk data för elflygsmodellen Alice från teorikapitlet (avsnitt 2.3.3.1) tillsammans med Härjedalens tidtabell för avgångar och ankomster från rapportens fallstudie (avsnitt 3.2.2). Modellresultatet för scenariot ges i form av en årsöversikt samt en dygnsöversikt, både med relevanta tillhörande nyckelparametrar.

Årsöversikt

Modellresultatet för årsöversikten av scenariot presenteras månadsvis i *Figur 14* där basscenariot ställdes mot lastprofilen för *Flyg-el*.



Figur 14 Visar hur en förändring sett elanvändning per månad av Härjeåns flygplats skulle se ut vid en implementering av elflyget Alice över ett år med flygplatsen avstängd i juli.

Figur 14 påvisar en markant ökning av flygplatsens elanvändning för scenario *Flyg-el* samtliga månader, förutom i juli då flygplatsens verksamhet ligger nere. Högsta elanvändning både sett till basscenariot och *Flyg-el* skulle äga rum i januari. I övrigt utläses från *Figur 14* att själva ökningen, månadsvis skulle vara relativt konstant över året och följa mönstret sett i både *Figur 10* (avsnitt 4.1.1) och *Figur 11* (avsnitt 4.1.2). En marginell skillnad i topplasteffekt utläses för vissa månaders relativt sett mellan lastprofilerna. I *Tabell 12* nedan följer en sammanställning av nyckelparametrar tillhörande årsöversikten för Scenario *Flyg-el*.

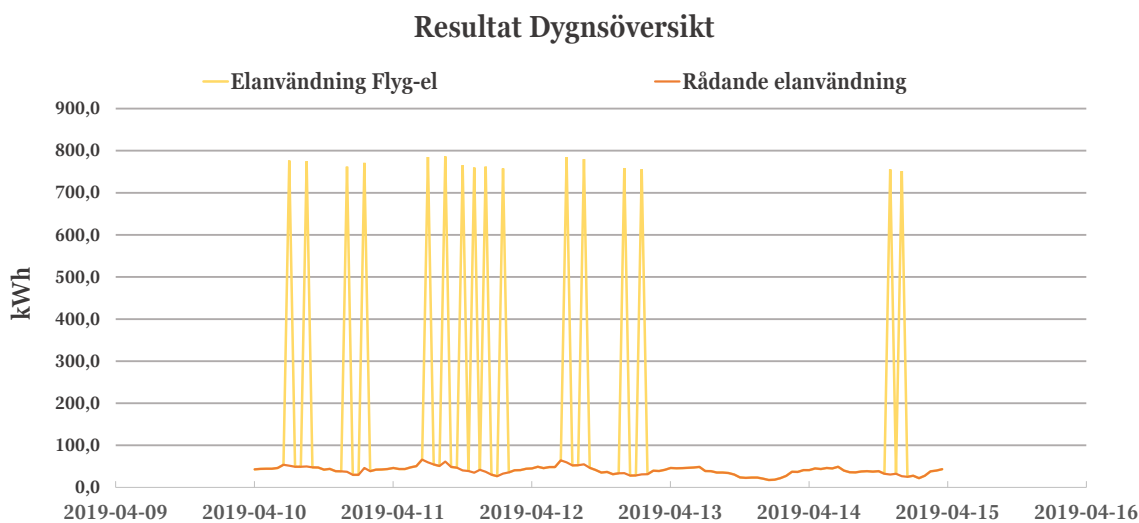
Tabell 12 Kopplas samman med Figur 14 för att ge en sammanfattning av de nyckelparametrar av den skillnad en elflygsimpletering skulle innebära sett till basscenariot.

Lastprofil	Medelanvändning	Totalanvändning	Totalökning	
	MWh/månad	MWh/år	MWh/år	Andel
Rådande elanvändning	27,14	324,82	829,40	255 %
Elanvändning <i>Flyg-el</i>	104,05	1 154,32		

För beräknade nyckelparametrar i Tabell 12 togs hänsyn till flygplatsens avsaknad av kommersiell luftfart under juli månad. Medelanvändningen per månad utläses till 27,14 MWh för basscenariot och 104,05 MWh för scenario *Flyg-el*. Totala användningen för året med elflyg skulle uppgå till 1 154,32 MWh och rådande elanvändning för året till 324,82 MWh. Den årliga elanvändningen med elflyg skulle innebära en ökning med 829,40 MWh enligt Tabell 7, vilket skulle motsvara 255 procent.

Dygnsoversikt

I Figur 15 visas modellresultatet på dygnsnivå för scenario *Flyg-el* inom tidsintervallet (2019-04-10 till 2019-04-15).



Figur 15 Visar rådande elanvändning för basscenario samt hur den beräknade elanvändningen skulle se ut per timme med elflyg för fem dygn under april månad.

Figur 15 påvisar höga medeltoppeffekter för enskilda timmedelvärden under de 16 timmar som flyg skulle antas vara på laddning vid Härjedalens flygplats för tidsintervallet. I fortsättningen i rapporten benämns dessa medeltoppeffekter per timme som "effektbehov" eller "effekttoppar" för att underlätta läsningen. Ett relativt jämnt effektbehov runt 20-70 kWh per timme sett till basscenariot, utläses timmar i Figur 15 då effektbehovet skulle uppgå till nästan 800 kWh vid laddning. Detta skulle innebära en ökning på nästan 1000 procent, med andra ord skulle en ungefärlig effektökning ske på 10 gånger vid varje timme för laddning. I Tabell 13 nedan följer som tidigare en sammanställning av tidsupplösningens relevanta beräknade nyckelparametrar.

Tabell 13 Visar en sammanställning från modellens resultat för fem dygn under april månad med avseende på nuvarande elanvändning och Flyg-el.

<i>Lastprofil</i>	<i>Totalanvändning</i>	<i>Andel flyg-el</i>	<i>Totalökning</i>	
	<i>MWh/intervall</i>		<i>MWh/intervall</i>	<i>Andel</i>
Rådande elanvändning	4,84	71 %	11,60	241 %
Elanvändning Flyg-el	16,42			

Från *Tabell 13* utläses att lastprofilen med elflyg under dygnet skulle vara ungefär tre gånger så stor i jämförelse med rådande elanvändning under tidsintervallet. Andelen *flyg-el* skulle utgöra 71 procent och den totala ökningen 11,60 MWh. Vilket skulle resultera i en ökad elanvändning på 2,41 gånger.

Skillnaden en elflygsimplementering av modellen Alice skulle utgöra sett till basscenariot har redogjorts för i detta avsnitt, en årlig ökning på 830 MWh eller 2,55 gånger rådande elanvändning. Vidare har tydliga effekttoppar påvisats för timmar då elflygsladdning skulle ske.

4.4 Analys scenario *Solel* & scenario *Flyg-el*

Nedan analyseras resultaten från scenario *Solel* och scenario *Flyg-el* separat. Resultaten ställs i relation till varandra men även till rapportens teoridel (avsnitt 2).

Scenario *Solel*

En nätansluten solcellsanläggning i anslutning till Svegs flygplats skulle innebära en förändrad elförsörjningen, i enhet med rapportens teoridel (avsnitt 2.3.1). Istället för ett enkelriktat flöde från nätet till flygplatsen skulle istället energiöverföring ske i båda riktningar. Magnituden av påvisad överproduktion beror på, enligt resultatet hur stor solcellsanläggningen skulle vara och även under vilken tid som avses, både sett till säsong, dygn och timme. Variation i högre tidsupplösningar granskas i Del II.

Produktionsmönstret skulle som förväntat innebära låg produktion under vinterhalvåret för att sedan öka under vår och sommar. Mönstret skulle inte korrelera med elanvändningen som istället var som högst under vintern. Däremot är inte fluktuationen för flygplatsens rådande elanvändning speciellt stor, därför har solcellsproduktionens variationsmönster i högre grad kunnat kartläggas. En ökad täckningsgrad skulle innebära att en högre andel av elanvändningen skulle bli tillgodosedd av lokal produktion. Det skulle även innebära ökad överproduktion till nätet, både totalt sätt men även relativt totalproduktionen.

Sett till de ytor som solcellsanläggningen skulle uppta för de båda fallen utgör de en väldigt liten andel av tillgängliga arealer på 87 000 m². Med avseende på säkerhetsaspekten som presenterats i teoridelen (avsnitt 2.3.1) sett till säkerhetsbevisning för solceller på flygplatser kan den tillgängliga ytan komma att minska. Till vilken grad går först att uttala sig om när en riskbedömning genomförts. Med avseende på resultatets låga utnyttjandeandel av flygplatsen sett till tillgänglig mark är det viktigt att återkoppla till vikten av

resurseffektivitet sett till en eventuell utbyggnad och även inkluderandet av anslutande elnät i analysen.

Sett till elkvalitet, vilken enligt teoridelen riskerar att försämrats vid inmatning av el från solcellsanläggningar (avsnitt 2.3.2.2) fanns inte tillgänglig data från Härjeåns Energi att inkludera. Istället återkopplas resultatet till teoridelen sett till den studie som presenterats med avseende på solceller och elkvalitet (avsnitt 2.3.2.2). Anläggningen i den beskrivna studien uppgick till en storlek av 1 MW_p och ingen mätning påvisade några störningar som låg utanför godkända intervall. Med tanke på scenariots resultat sett till anläggningsstorlekar, den största på 0,27 MW_p, skulle risken för försämrade elkvalitet anses låg. Den parameter vilken skulle kunna utgöra en utmaning är spänningsvariationer vilket var det som uppmärksammas i den tidigare gjorda studien. Spänningsvariationer i form av spänningshöjningar kopplas dessutom till nät placerade ute på landsbygden vilket Härjeåns elnät anses vara i enighet med fallstudiens beskrivning (avsnitt 3.2.2).

Med avseende på de hinder vilka redogjorts för i rapportens teoridel (avsnitt 3.2.1) sett till säkerhet saknas det i dagsläget regelverk och säkerhetsbevisning utformad för solceller på flygplatsområden. I anslutning till Härjedalens flygplats anses de omfattande ytor tillgängliga som en fördel då olika säkerhetsåtgärder förväntas begränsa vilka ytor som lämpas för solceller. Genom att ta ett steg tillbaka och se ur ett systemperspektiv kan flygplatsen med avseende på de stora tillgängliga ytorna som kvarstår producera och sälja el till nätet. Då inte endast med avsikt att täcka den egna elanvändningen utan också förse hela systemet med förnyelsebar elproduktion.

Scenario *Flyg-el*

Sveg har visat sig utgöra en lämplig kandidat sett till regional implementering av kommersiella elektrifierade flygsträckor vilket redogjorts för i rapportens metodkapitel (avsnitt 3.2.1). Både med avseende på befintliga rutter och på utökade. Nuvarande linje mellan Sveg och Arlanda utgörs av en sträcka på cirka 40 mil vilket ger goda marginaler om Alice skulle användas. En ny linje som kan tänkas upprättas är mellan Sveg och Östersund.

I teoridelen har inverkan av omgivande temperatur på batteriladdning beskrivits (avsnitt 2.3.3) och är en faktor som kommer behövas tas hänsyn till i Sveg. Utomhustemperaturens årliga variation utläses från *Figur 10* i resultatet för basscenariot (avsnitt 4.1.1) och ligger delar av året långt under de gränser vilka anges i teoridelen. Till vilken grad detta förväntas påverka laddningstiden är något som behöver utredas ytterligare men förväntas innebära olika laddningstider sett över året om laddning sker utomhus.

Lastprofilen för flygplatsen påvisas förändras i hög grad om samtliga flygningar skulle ske med elflyget Alice. För timmar med laddning utläses höga effekttoppar från *Figur 15*, vilka anslutande elnät måste ha flexibilitetsförmåga att tillgodose. Sett till de tariffabonnemang (eller nätavgifter) flygplatsen har i dag med huvudsäkkringar på 200 A respektive 63 A förväntas de behöva uppdateras vid en implementering av elflyg. För Alice rekommenderas en laddningsinfrastruktur på 500 kW vid en timmes laddning vilket är samma tidsintervall som använts enligt rapportens metod (avsnitt 3.1.5). Ett abonnemang utformat med avseende

på elflyg antas beror på flera olika faktorer och analyseras inte vidare i denna rapport. Men en ökning i effektuttag är att vänta vilket kommer innebära en adderad belastning på nätet och en större tariff.

Den relativa topplastvariationen vilken utläses från *Figur 14* anses bero på dels hur många dagar månaden utgörs av dels de olika veckodagarnas frekvens inom respektive månad, sett till laddning av flyg. En månad med 31 dagar som kalendermässigt sammanfaller med många avgångar och ankomster förmodas utgöra skillnaden i säsongsmönstret. Avsaknaden av jämförelse för flera år behandlas i rapportens metoddiskussion.

Den observerade relativt jämna ökningen av lastprofilen med elflyg över året i *Figur 14* är inte något som korrelerar med dygnsvariationen i *Figur 15*. Effektbehovet elflyg skulle utgöra är enligt scenariots metod (avsnitt 3.1.5) sammankopplat med de timvärden då laddning skulle ske och resulterar stundtals höga effekttoppar. Variationen som skulle uppstå mellan timmar tas inte hänsyn till i årsöversikten vilken som bekant är uppbyggd av varje månads ackumulerade timmedelvärden. En fördel med lastprofilen *Flyg-el* är att variationen skulle vara enkel att förutse och bero på antal avgångar och ankomster.

En något lägre ökningsandel på cirka 2,4, presenterades för dygnsöversikten i *Tabell 13* sett till den som presenterades i årsöversikten i *Tabell 14* på cirka 2,6. Skillnaden anses bero på det faktum att den rådande elanvändningens säsongsvariation enligt *Figur 10* ger viss skillnad beroende på vilken tid på året som granskas. Vidare anses valet av dygn spela in, då det förekommer olika antal avgångar och ankomster beroende på valda veckodagar.

5 Resultat & Analys Del II

Andra delen av rapportens resultat och analys utgörs av samma uppbyggnad som första delen. Resultatet avser att ge en kvantitativ redogörelse för rapportens tredje frågeställning, en kombination utgjord av scenario *Solel* och scenariot *Flyg-el*. Vilket sedan analyseras mot rapportens teoridel (avsnitt 2) ur flygplatsens och elnätets perspektiv.

5.1 Resultat scenario *Systemlösning*

Scenariot utgörs av en sammanslagning av de två tidigare presenterade scenarierna. Med andra ord ställdes elproduktion från solceller i relation till flygplatsens lastprofil inklusive elflyg. Enligt scenariots metod (avsnitt 3.1.6) presenteras använd indata för två fall utifrån täckningsgraden av scenario *Flyg-el*, 50 procent och 75 procent. I rapporten presenteras modellresultat för scenario *Systemlösning* med samtliga tidsupplösningar. En årsöversikt med graf och nyckelparametrar följt av månadsöversiktens nyckelparametrar sammanställda och slutligen dygnsöversikten på både timmedelvärde och för de månader med lägst respektive högst produktion.

Årsöversikt

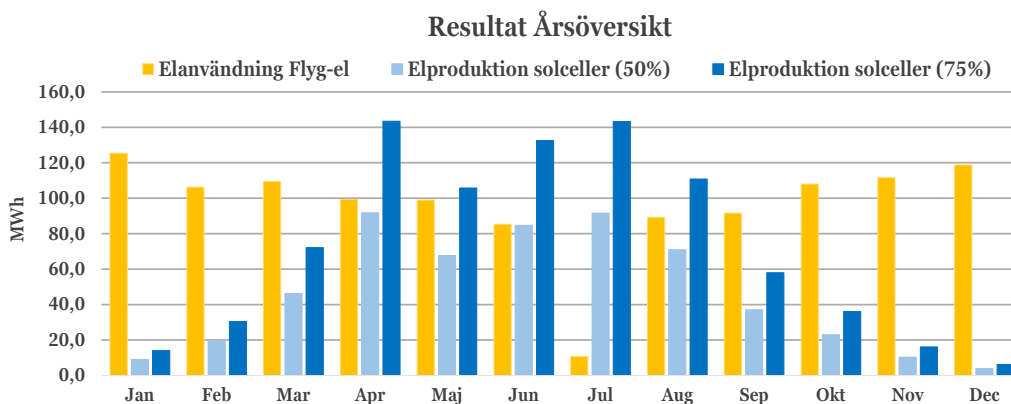
I linje med tidigare scenarion ges först en årsöversikt baserad på ackumulerade timmedelvärden för varje månad. I *Tabell 14* presenteras de ytor av solceller som respektive täckningsgrad skulle resultera i samt vilken storlek de skulle utgöra.

Tabell 14 Visar vilken yta en solcellsanläggning skulle uppta vid en täckningsgrad för flygplatsen inklusive elflyg för 50 respektive 75 procent. Även vilken storlek sett anläggningen skulle utgöra.

Täckningsgrad	Yta solceller	Storlek
	m²	MW_p
50%	3 111	0,62
75%	4 718	0,94

Enligt *Tabell 14* skulle anläggningarnas yta uppgå till 3 111 m² för den 50 procentiga täckningsgraden och 4 718 m² för den på 75 procent. Storlekarna anläggningarna skulle resultera i sett till vald indata skulle utgöra 0,62 MW_p och 0,94 MW_p, för 50 respektive 75 procent täckningsgrad.

I *Figur 16* visas respektive årsöversikt för de två olika täckningsgraderna baserade på månadsmedelvärden för *Flyg-el* och *Solel*.



Figur 16 Visar hur elanvändning med elflyg skulle stå i relation till elproduktion från solceller med en täckningsgrad på 50 respektive 75 procent månadsvis under ett år.

I Figur 16 utläses säsongsvariationen för hur elanvändningen med elflyg skulle se ut samt hur den skulle korrelera med elproduktion från solceller med 50 respektive 75 procents täckningsgrad. Endast i juni månad skulle överproduktion ske sett till 50 procent täckningsgrad, då flygplatsen håller stängt. Sett till den högre täckningsgraden utläses överproduktion från april till och med augusti. Den största skillnaden skulle inträffa precis som för den lägre täckningen under juli månad. Under vinterhalvåret utläses produktionen till att bli desto lägre för båda fallen. I januari, november och december skulle el från solceller utgöra en liten andel av den månadsvisa användningen. Skillnaden för solcellsproduktions två täckningsgrader utläses till att vara betydligt lägre vid månader med låg produktion än vad dem skulle vara för månader med hög.

I Tabell 15 nedan sammanställs beräknade relevanta nyckelparametrar för scenariots årsöversikt.

Tabell 15 Sammanfattar resultatet från Figur 16 med avseende på elanvändning med elflyg och solcellsproduktion baserat på summerade månadsvärden (exklusive juli månad).

Användning/produktion	Total användning/produktion	Överproduktion
	MWh/år	MWh/år
Elanvändning Flyg-el	1 154,30	
Solcellsproduktion 50 %	572,90	85,97
Solcellsproduktion 75 %	868,70	252,35

Från Tabell 15 utläses att den totala elanvändningen över året skulle uppgå till 1 154,30 MWh. Den totala produktionen för täckningsgraden på 50 procent skulle uppgå till 572,90 MWh och överproduktionen till 85,97 MWh. För täckningsgraden på 75 procent skulle den totala produktionen istället uppgå till 868,70 och överproduktionen till 252,35 MWh.

Månadsöversikt

Nedan följer beräknade nyckelparametrar för scenariots månadsöversikt. *Tabell 16* anger resultaten sett till totalproduktion och överproduktion för respektive täckningsgrad medan *Tabell 17* istället anger resultaten för den utnyttjade produktionen.

Tabell 16 Ger en månadsöversikt för hur stor totalproduktion samt överproduktion en solcellsanläggning skulle ge med avseende på 50 respektive 75 procent täckningsgrad för flygplatsens elanvändning inklusive elflyg med avseende på timmedelvärden.

<i>Månad</i>	<i>Totalproduktion</i>		<i>Överproduktion</i>			
	<i>50%</i>	<i>75%</i>	<i>50%</i>	<i>75%</i>		
	<i>MWh/månad</i>	<i>MWh/månad</i>	<i>MWh/månad</i>	<i>Andel</i>	<i>MWh/månad</i>	<i>Andel</i>
Januari	9,12	13,83	3,44	38%	6,47	47%
Februari	20,06	30,43	8,97	45%	16,45	54%
Mars	44,75	67,87	26,80	60%	46,10	68%
April	94,55	143,37	66,69	71%	106,09	74%
Maj	67,08	101,72	44,39	66%	72,19	71%
Juni	87,36	132,47	63,55	73%	100,65	76%
Juli	90,09	136,61	82,72	92%	129,14	95%
Augusti	71,95	109,10	52,21	73%	82,21	75%
September	38,24	57,98	23,84	6%	39,56	68%
Oktober	22,48	34,09	11,19	50%	20,51	60%
November	10,63	16,12	4,74	45%	8,47	53%
December	4,10	6,21	1,27	31%	2,65	43%

I *Tabell 16* ses den totala elproduktionen som skulle råda för respektive månad för båda täckningsgraderna. Säsongsvariationen skulle generera låg produktion under vinterhalvåret med lägsta värden i december och högre under våren och sommaren med högsta värden i april. Sett till överproduktionen för de båda täckningsgraderna skulle de följa samma mönster över året, lägre under vintermånaderna för att sedan successivt öka våren och sommaren. Den lägsta andelen sett till överproduktion för den 50 procentiga täckningsgraden skulle uppgå till 31 procent under december månad medan den högsta till 92 procent i juli. Samma månader skulle resultera i högsta och lägsta värden med avseende på överproduktion för den 75 procentiga täckningsgraden men uppgå till 43 respektive 95 procent.

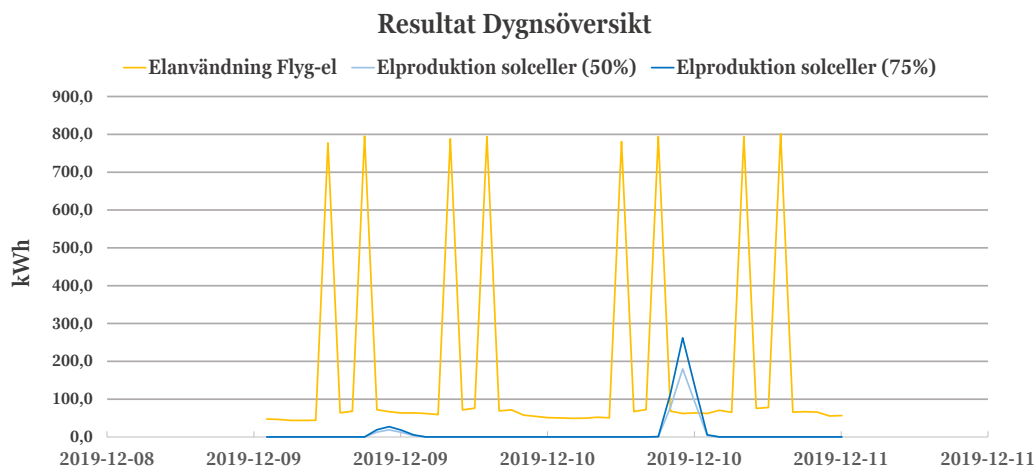
Tabell 17 Visar både summerad utnyttjad produktion och hur stor andel av elproduktion från solcellsanläggning som skulle utnyttjas, sett till användning och produktion för de båda täckningsgraderna på timmedelvärden.

Månad	Utnyttjad produktion		Andel utnyttjad produktion			
	50%	75%	50%		75%	
	MWh/månad	MWh/månad	Produktion	Användning	Produktion	Användning
Januari	5,68	7,36	62%	5%	53%	6%
Februari	11,09	13,97	55%	10%	46%	13%
Mars	17,95	21,77	40%	17%	32%	20%
April	27,86	37,28	29%	28%	26%	38%
Maj	22,69	29,53	34%	24%	29%	31%
Juni	23,80	31,82	27%	28%	24%	37%
Juli	7,37	7,47	8%	71%	5%	72%
Augusti	19,74	26,89	27%	22%	25%	30%
September	14,40	18,43	38%	16%	32%	20%
Oktober	11,29	13,58	50%	11%	40%	13%
November	5,89	7,66	55%	5%	47%	7%
December	2,83	3,56	69%	2%	57%	3%

I Tabell 17 utläses de summerade värdena av solcellsproduktion för de båda täckningsgraderna vilka skulle utnyttjas respektive månad och de skulle följa den årliga variationen vilken påvisats tidigare. Juli månad skulle sticka ut med anledning till avsaknad av avgångar och ankomster. Andel produktion vilken skulle utnyttjats under juli är således betydligt lägre än resten av året. Även den utnyttjade andelen sett till användning sticker ut men den är i motsats betydligt högre än för resten av månaderna.

Dygnsöversikt (Timmedelvärde)

Precis som för scenario *Flyg-el* presenteras exempel från modellens resultat för dygnsöversikten i scenario *Systemlösning*. Här valdes två dygn för den månad vilken skulle innebära lägst produktion och två dygn för den med högst utifrån Tabell 16. För lägsta produktion presenteras i Figur 17 två dygn i december samt för högsta produktion i Figur 18 ses två dygn i april.



Figur 17 Påvisar hur en solcellsanläggning med 50 respektive 75 procents täckningsgrad sett till flygplatsens elanvändning inklusive elflyg skulle komma att se ut under två dygn i december för timmedelvärden.

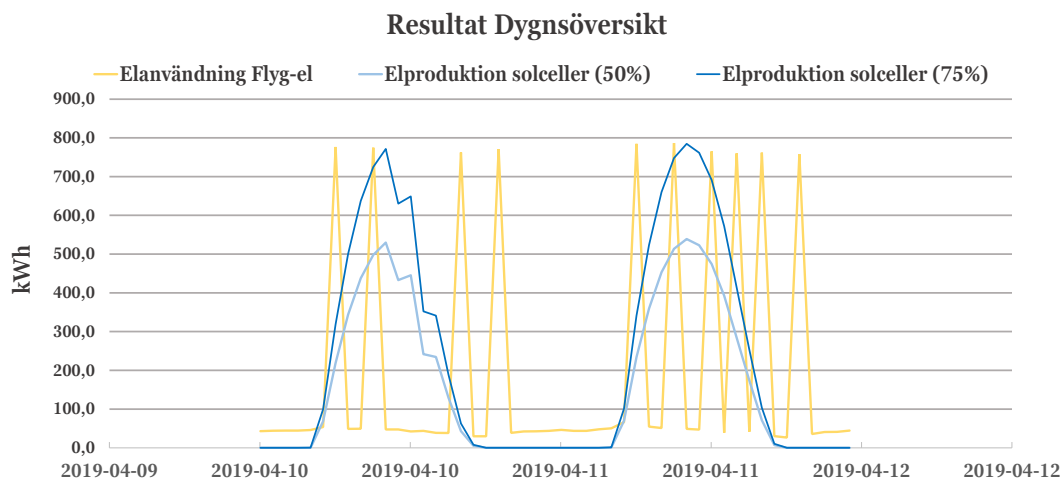
Enligt *Figur 17* skulle solcellsproduktionen överstiga elanvändningen under endast en timme för tidsintervallet, vilket skulle vara mitt under andra dagen. Under resten av tiden skulle elanvändningen istället överstiga solcellsproduktionen. Flygplatsens lastprofil visar att åtta laddningstillfällen skulle uppstå under de två dygnen. En sammanställning av nyckelparametrar för tidsintervallet finns att tillgå nedan i *Tabell 18*.

Tabell 18 Sammanfattar resultatet i *Figur 17* med avseende på elanvändning inklusive elflyg och en solcellsanläggning på 50 och 75 procent under två dygn i december.

Användning/Produktion	Total	Överproduktion		Utnyttjat	
	kWh/intervall	kWh/intervall	Andel	kWh/intervall	Andel
Elanvändning Flyg-el	8 767,59				3%/3%
Solcellsproduktion 50 %	389,55	144,65	37%	244,90	63%
Solcellsproduktion 75 %	584,87	314,37	54%	270,45	46%

Sett till den totala elproduktionen för båda täckningsgrader över tidsintervallet i *Tabell 18* skulle den vara betydligt lägre än den totala elanvändningen. Trots en överproduktion vilken skulle uppgå till 144,65 kWh eller 37 procent för 50 procents täckningsgrad och 314,37 eller 54 procent för 75. Den solel som skulle utnyttjats anges till 244,90 kWh under tidsintervallet för 50 procent och 270,45 kWh för 75 procent. Vilket skulle tillgodose en marginell andel av flygplatsens elanvändning på 3 procent för båda täckningsgraderna. Samma utnyttjade produktion skulle utgöras av 63 procent av den totala produktionen för en täckningsgrad på 50 procent och 46 procent för 75 procent.

Nästa dygnsöversikt ges för två dygn i april månad, vilken kan ses nedan i *Figur 18* tillsammans med tillhörande nyckelparametrar i *Tabell 19*.



Figur 18 Visar hur elproduktion från solcellsanläggning med täckningsgrad på 50 respektive 75 procent skulle motsvara flygplatsens elanvändning med elflyg för timmedelvärden under två dygn i april.

I Figur 18 skulle solcellsproduktionen uppgå till samma amplitud som elanvändningen vid ett par laddningstillfällen under tidsperioden, mitt på dagen under båda dygna för den 75 procentiga täckningsgraden. Den 50 procentiga täckningsgraden skulle nå upp till cirka två tredjedelar under samma timmar. En tydlig dygnsvariation utläses med hög produktion under dagen för att minska till noll eller nära noll över natten. För tidsperioden skulle tio laddningar av elflyg ske enligt effekttopparna att döma. Till vilken grad solcellsproduktionen skulle tillgodose elanvändningen under de två dygna ges i form av beräknade nyckelparametrar i Tabell 19.

Tabell 19 Ger en sammanställning för resultatet i Figur 18 sett till flygplatsens elanvändning inklusive elflyg samt en solcellsanläggning med täckningsgrader på 50 respektive 75 procent.

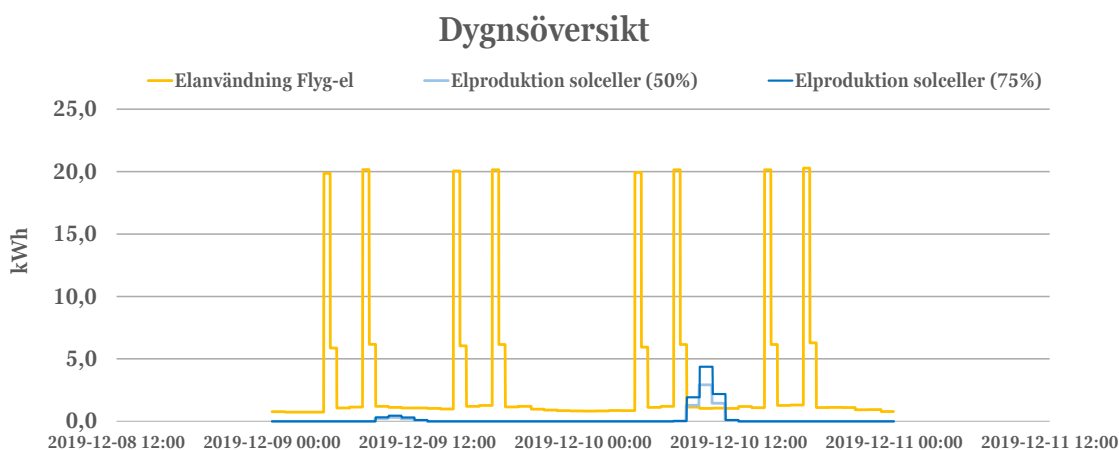
Användning/Produktion	Totalt	Överproduktion		Utnyttjat	
	kWh/intervall	kWh/intervall	Andel	kWh/intervall	Andel
Elanvändning Flyg-el	9 359,91				33%/46%
Solcellsproduktion 50 %	7 724,46	4 614,90	60%	3 109,56	40%
Solcellsproduktion 75 %	11 713,32	7 389,71	63%	4 323,61	37%

Dygnsöversikten för två dygn i april visar på en högre produktion än användning för täckningsgraden 75 procent enligt Tabell 19 medan den för den 50 procentiga skulle ligga strax under elanvändningen. Överproduktionen skulle uppgå till 7 389,71 kWh för tidsintervallet och 75 procent täckningsgrad vilket skulle motsvara 63 procent. Den 50 procentiga täckningsgraden skulle uppgå till 4 614,90 kWh överproduktion och utgöra en andel på 60 procent. Därav skulle 37 respektive 40 procent av den producerade elen utnyttjas och uppgå till 4 323,61 respektive 3 109,56 kWh för den 75 respektive 50 procentiga täckningsgraden. Andelen av den utnyttjade produktionen skulle i sin tur uppgå till 46 respektive 33 procent av användningen för tidsintervallet.

För att få ytterligare en högre tidsupplösning appliceras nu enligt metoden en dygnsöversikt på minutmedelvärden för samma timmar som i dygnsöversikterna ovan, två dygn i december respektive april.

Dygnsöversikt (Minutmedelvärde)

Nedan följer enligt metoden för scenariot (avsnitt 3.1.6) två stickprov för dygnsöversikten beräknad på minutmedelvärden, för samma tidsintervall som presenterats i *Figur 17* och *Figur 18*. Timmedeleffekt per minut presenteras nu istället för timmedeleffekt per timme. Nedan ges först en dygnsöversikt för scenario *Systemanalys* i december i *Figur 19* och beräknade nyckelparametrar sammanställs sedan i *Tabell 20*.



Figur 19 Ger en förväntas dygnsöversikt på minutmedelvärden under två dygn för december månad sett till flygplatsens elanvändning med elflyg och en solcellsanläggning med en täckningsgrad på 50 respektive 75 procent.

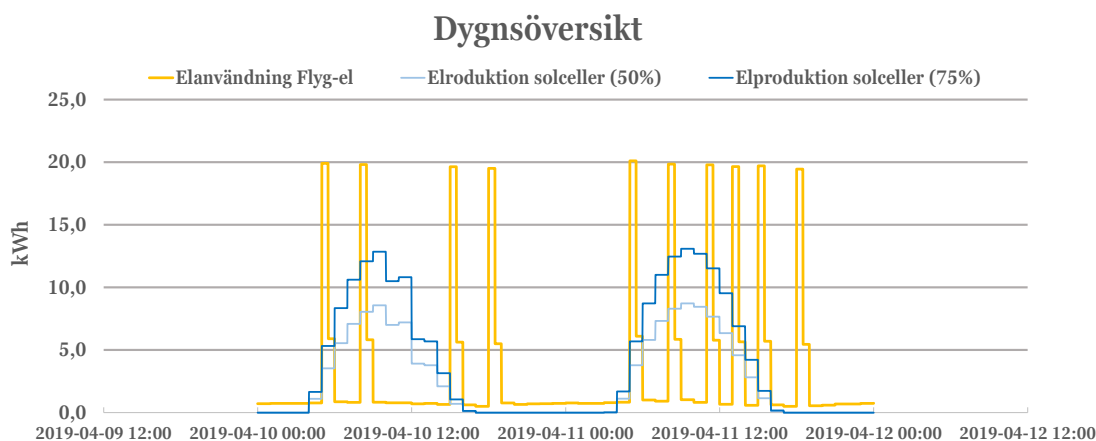
Elflygets laddningsprofil går att urskilja i *Figur 19* då tidsupplösningen skärps ytterligare. Högsta effektbehov skulle uppgå till 20 kWh per minut vid laddningstillfällena för att efter halva laddningstiden sjunka till ungefär 6 kWh per minut. Resterande tid utläses laddningstiden till ha uppgått till cirka 2 kWh per minut. Produktionen från solceller kan precis utläsas för första dygnet medan tre timmars produktion utläses för det andra, för båda täckningsgrader.

Tabell 20 Sammanställer nyckelparametrar till *Figur 19* för en dygnsöversikt uppbyggd på minutmedeldata. Beräknade parametrar är överproduktion och utnyttjad produktion för två dygn i december.

Användning/Produktion	Överproduktion		Utnyttjat	
	kWh/intervall	Andel	kWh/intervall	Andel
Elanvändning Flyg-el				3%/3%
Solcellsproduktion 50 %	145,30	37%	245,70	63%
Solcellsproduktion 75%	313,27	54%	271,73	46%

I *Tabell 20* utläses att överproduktion skulle uppgå till 37 procent för tidsintervallet, vilket motsvara 145,30 kWh för täckningsgraden 50 procent. Den totala utnyttjade produktionen

skulle uppgå till 245,70 kWh och utgöra en andel på 63 procent. För den 75 procentiga täckningsgraden skulle överproduktionen uppgå till 313,27 kWh och utgöra 54 procent. Den utnyttjade produktionen skulle uppgå till 271,73 kWh och utgöra en andel sett till totalproduktionen på 46 procent. Detta skulle utgöra 3 procent av flygplatsens elanvändning för båda täckningsgraderna. Nedan i *Figur 20* ges resultatet för dygnsöversikten på minutmedelvärdesnivå för två dygn i april.



Figur 20 Visar hur elanvändning med elflyg skulle korrelera med elproduktion från en solcellsanläggning med täckningsgrad på 50 respektive 75 procent på minutmedelvärden.

Figur 20 ger en visuell överblick för hur elanvändningen med elflyg och solcellsproduktion skulle se ut under dygnet i april, på minutmedelvärden. Vid laddningstillfällen av elflyg skulle elanvändningen uppgå till 20 kWh per minut, för att efter en stund minska till ungefär 6 kWh per minut. Resterande tid skulle elanvändningen uppgå till ungefär 1 kWh per minut. Produktion från solcellerna med 75 procent täckningsgrad utläses till att de skulle möta elbehovet till ungefär hälften av de effekttoppar som uppstår vid laddning, då produktionen är som högst. Den 50 procentiga skulle istället uppgå till cirka en tredjedel av elanvändningen då den är som högst vid laddningstillfällen. I *Tabell 21* sammanställs beräknade nyckelparametrar.

Tabell 21 Visar beräknade nyckelparametrar för en dygnsöversikt byggd på minutmedelvärden för två dygn i april. Nyckelparametrarna utgörs av överproduktion och utnyttjad produktion.

Användning/Produktion	Överproduktion		Utnyttjat	
	kWh/intervall	Andel	kWh/intervall	Andel
Elanvändning Flyg-el				33%/42%
Solcellsproduktion 50%	4 642,53	62%	2 849,75	38%
Solcellsproduktion 75 %	7 653,04	68%	3 595,34	32%

För dygnet i april skulle en överproduktion på 4 642,53 kWh ske med avseende på en 50 procentig täckningsgrad och 7 653,04 kWh med avseende på en 75 procentig. Dessa skulle

utgöra 62 respektive 68 procent av den totala produktionen. Den utnyttjade produktionen skulle uppgå till 2 849,75 respektive 3 595,34 kWh för 50 respektive 75 procents täckningsgrad. Den 50 procentiga skulle utgöra 33 procent av den utnyttjade elanvändningen och 38 procent av den utnyttjade totala solcellsproduktionen. För den 75 procentiga täckningsgraden skulle 42 procent av produktionen utnyttjas av elanvändningen medan 32 procent sett till produktionen.

5.2 Analys scenario Systemlösning

Scenario *Systemlösning* skulle resultera i en förändrad lastprofil för Härjedalens flygplats med avseende på laddningsbehovet av elflyget Alice. Utifrån den nya elanvändningen från scenario *Flyg-el* optimerades solcellsanläggningar med täckningsgrad 50 procent och 75 procent, sett till rapportens tredje frågeställning. Anläggningarnas yta skulle uppgå till 3 111 m² respektive 4 718 m² och fortfarande skulle utgöra en liten andel av de 87 000 m² som finns tillgängliga.

Sett till scenariots årsöversikt i *Figur 16* skulle säsongsvariationen vara lik den som påvisats i *Figur 11*, scenario *Solel* (avsnitt 4.2), både sett till produktionsvariation och hur användningen skulle variera. Produktionen skulle vara som högst under sommarhalvåret för att minska markant under vintern. Däremot skulle magnituderna vara högre i scenario *Systemlösning* vilket var väntat med tanke på den förändrade lastprofilen vilken togs fram i scenario *Flyg-el* (avsnitt 4.3).

Vid jämförelse av resultatet för solcellsproduktion från scenario *Solel* och scenario *Systemlösning* ligger intressanta skillnader sett till andel utnyttjad produktion. Eftersom täckningsgraderna sattes till 50 respektive 75 procent för båda fallen, kan den förändrade lastprofilens inverkan utläsas i *Tabell 11* för scenario *Solel* (avsnitt 4.2) och i *Tabell 17*. Den andel produktion som skulle ha utnyttjats sett till elanvändning är lägre i *Tabell 17* över hela året, för båda täckningsgrader i relation till dem i *Tabell 11*. Där skillnaderna är som högst under sommarhalvåret.

Till följd borde därmed andelen överproduktion öka, vilket utläses vid jämförelse av *Tabell 10* (avsnitt 4.2) och *Tabell 16*. Andelen överproduktion skulle vara högre för samtliga månader och täckningsgrader i *Tabell 16*. Slutsatsen dras att en lastprofil med tydliga effekttoppar i lägre grad skulle få sin elanvändning tillgodosedd av solceller per månad än en jämn lastprofil, vid en optimering baserad på årlig täckningsgrad. Vilket skulle leda till högre andel överproduktion och kräva mer flexibilitet från nätet.

Vid analys av dygnsöversikterna för april och december beräknades för samma tidsintervall timmedelvärden och minutmedelvärden enligt rapportens metod (avsnitt 3.1.6). För de två dyggen i december påvisade högre tidsupplöst data ingen större skillnad sett till nyckelparametrar i *Tabell 18* och *Tabell 20*. En marginell skillnad utläses till någon kWh sett till överproduktion vilket antas bero på avrundning gjorda för beräkningar. Detta anses rimligt då graferna *Figur 17* och *Figur 19* inte utgör någon större skillnad sinsemellan för någon av täckningsgraderna, förutom att tydliga plataer uppstod för olika timmar i *Figur 19*

med minutmedelvärden. Då solcellsproduktionen skulle vara så pass låg under dygnet kan inga direkta slutsatser dras med avseende på jämförelsen.

Däremot, vid jämförelse mellan dygnet i april i *Figur 18* med tillhörande nyckelparametrar för timmedelvärden i *Tabell 19* och minutmedelvärden i *Tabell 21* baserade på *Figur 20*, utläses viss skillnad. I *Figur 18* framgick det att solcellsanläggningen skulle möta laddningsbehovet mitt under dagarna för den 75 procentiga täckningsgraden. Vilket inte stämmer överens med *Figur 20* (minutmedeldata), då endast hälften av effektbehovet skulle vara tillgodosett vid samma tid på dygnet. Vid jämförelse av nyckelparametrar skulle andelen överproduktion för timmedeldata i *Tabell 19* uppgå till 63 procent vilket motsvarar 68 procent sett till minutmedelvärde för den 75 procentiga täckningsgraden. Den andel produktion vilken skulle utnyttjas sett till elanvändning utgjorde 46 procent på timmedeldata och 42 procent på minutmedeldata. Därav ges en indikation för skillnaden i resultat för olika tidsupplösningar sett till solcellsproduktion och höga effekttoppar i elanvändning. Vidare skulle samma skillnader vara mindre för den 50 procentiga täckningsgraden, därför antas det att vid högre täckningsgrader uppstår det större variation mellan tidsupplösningar.

Med detta i åtanke, att en förändrad lastprofil med tydliga effekttoppar inte linjärt följer en utökad solcellsanläggning är batterilager något som bör lyftas. I rapportens teoridel, *Figur 3* (avsnitt 2.3.2.3), ges en översikt över de nyttor batterilager har potential att bidra med. Där tillvaratagande av överproduktion och reducering av effekttoppar anses generera störst nytta för flygplatsen. Sett ur elnätets perspektiv skulle ett batterilager innebära att flexibiliteten vilken hade behövts med avseende på flygplatsens lastprofil kunnat minska, både sett till överproduktion och eltillförsel. I vilken grad antas dels bero på batterilagrets storlek dels på skillnaderna i säsongsvariation till följd av anläggningens storlek. I teorin klargörs det att batterilager främst är en lösning för att minska dygnsvariation sett till solelsproduktion och inte åtgärdar säsongsproblematiken. Däremot kvarstår fördelen med att el från nätet skulle kunna ladda upp batterilagret vid timmar med lägre elpriser även under månader med låg produktion. Batterilager utgör, enligt teorin, en hög investeringskostnad vilken anses vara en flaskhals för utökad implementation i systemet tillsammans med avsaknad av effektiva affärsmodeller och prisprognoser.

Sett till de storlekar (MW_p) solcellsanläggningarna skulle ge upphov till i detta scenario låg de närmre den som behandlades i studien ”*Analys av Sveriges första MW-solcellspark*” i rapportens teoridel (avsnitt 2.3.2.2), där storleken uppgick till $1 MW_p$ (Bagge 2013). Men som inte påvisade försämrade elkvalitet enligt mätningar. Sett till scenariots resultat skulle den anläggning med 75 procents täckningsgrad utgöra en storlek på $0,94 MW_p$. En kvalitativ slutsats dras att påverkan sett till försämrade elkvalitet på nätet inte skulle överskrida de säkerhetsintervall som anges i EIFS 2013:1 då storleken inte skulle överskrida $1 MW_p$. Sett till den verkliga inverkan kan inga slutsatser dras då andra parametrar spelar in likt val av teknik, utformning samt rådande elkvalitet i nätet.

För att minska risken för försämrade elkvalitet i samband med solceller i nätet skulle batterilager kunna utgöra ytterligare en nytta genom att agera som mellanhand för nätet och

produktion. Vidare även sett till att skapa redundans genom att eliminera risker vid elavbrott, vilket förväntas utgöra ett mer kritisk hot i framtiden om flygbränsle utgörs av el.

6 Diskussion

Nedan följer en diskussion av både rapportens resultat och analys för att sätta dem i ett bredare sammanhang. Även metodval och osäkerheter behandlas i andra delen.

6.1 Frågeställningar

Nedan diskuteras rapportens olika scenarion utifrån ett bredare perspektiv sett till de konsekvenser som kan komma att uppstå för elsystemet och luftfartssektorn i samband med solceller och elektrifierade flyg på flygplatser.

6.1.1 Scenario *Solel*

Scenariot utvecklades utan något avseende på en elektrifiering av luftfarten men skulle ändå påverka nätet sett till både mottagningsförmåga och distribution. Elproduktion i form av solkraft innebär att nätets flexibilitetsförmåga måste fungera i två dimensioner, till skillnad från basscenariot. Det vill säga både förse flygplatsens elbehov, vilket tack vare solcellanläggningen stundtals skulle minska, och ta emot el vid överproduktion. Ett bilateralt förhållandet kan komma att försvåra den balans som konstant måste råda sett till användning och produktion. Med andra ord krävs en ökad flexibilitetsförmåga av nätet om flygplatsen i framtiden blir en prosument. Sett till närliggande befintlig elproduktion anges i beskrivningen av fallstudien (avsnitt 3.2.2.2) att ett vattenkraftverk ligger strax utanför Sveg. Risken vid hög andel intermittent elproduktion från flygplatsen kan enligt rapportens bakgrund vara att vattenkraften i högre grad användas för att stabilisera den varierande solcellsproduktion. I vilken grad beror på hur stor solcellsanläggning som installerades och även om batterilager inkluderas.

Överproduktion från solceller kan innebära en försämrade elkvalitet i näten enligt rapportens teoridel (avsnitt 2.2 & avsnitt 2.3.2.3). I vilken utsträckning beror på flera parametrar, dels på anläggningens storlek och tekniska utformning dels på rådande förhållanden i näten. Med tanke på att solkraft fortfarande är en relativt ung teknik antas många av dagens risker elimineras allteftersom tekniken mognar, vilket redan har skett i vissa avseenden. Ett nämnt exempel är övertoner och ett annat är osymmetri. Därför anses det ligga i aktörers intresse att skapa en fossilfri och hållbar elförsörjning och undersöka tekniska lösningar och säkerhetsbevisning snarare än att utföra bannlysningar. Sett till den uppskattade acceptansgräns vilken presenterats (30 procent andel solkraft i näten utan negativ påverkan) (avsnitt 2.3.2.2) antas även den förändras. Gränsen beror delvis på hur övrig eltillförsel utvecklas dels på utveckling internt inom näten.

Batterilager är som bekant en lösning vilken analyserats i samband med decentraliserad produktion men sett till rådande omständigheter anses både finansieringen och lagring på säsongsnivå vara avgörande problem. I dagsläget är det sällan ekonomiskt försvarbart utan nya affärsmodeller och träffsäkra prisprognoser behövs. Alternativt externa aktörer med incitament för investering i förnyelsebar elproduktion. Med tanke på att fallstudien är

genomförd i norra Sverige, där det redan finns god tillgång på el och dessutom färre soltimmar, finns än färre incitamenten för implementering av solceller sett till exempelvis kommuner och energibolag.

Genom att ta ett steg tillbaka och se resultatet ur ett systemperspektiv kan flygplatsen med avseende på de stora tillgängliga ytorna som kvarstår producera el ut på nätet. Vilket skulle innebära att flygplatsen bidrar i energiomställningen med förnyelsebar elproduktion och även skulle skapa dels en inkomstkälla, dels sänka sina elkostnader. I vilken utsträckning beror till stor del på vilken eller vilka parametrar som begränsar först. Huruvida det är nätets flexibilitetsförmåga, påverkan på elkvalitén i nätet, kostnader eller säkerhet är något som behöver undersökas vidare.

6.1.2 Scenario *Flyg-el*

Sett till vad en elektrifiering av luftfarten förväntas innebära är det främst höga effekttoppar som i rapporten anses ge störst påverkan. En påverkan som elnät behöver anpassa sig till. Av vikt att poängtera är att magnituden av ökat effektbehov beror på vilken flygplansmodell som avses laddas och hur många elflygplan som laddas samtidigt. I rapporten ligger teknisk data för Alice till underlag. Huruvida andra modeller påverkar elanvändningen är svårt att säga men förhoppningen är att resultatet i examensarbetet skall bidra med en fingervisning till vad som kan förväntas i framtiden.

En fördel med denna förändring i lastprofil är, som nämnt tidigare, att effekttopparna går att fastställa på förhand och därav planera inför. I denna rapport genomförs en fallstudie på en flygplats som har relativt få avgångar och ankomster, där två dessutom aldrig infaller under samma timme. Om detta skulle förändras innebär det att flygplatsens lastprofil får än högre effekttoppar. Detta förväntas bli en utmaning för andra flygplatser, ett sådant exempel är Bromma flygplats. Enligt *Figur 8* i rapportens redogörelse för fallstudien (avsnitt 3.2.1), vilken beskriver lämpliga flygplatser för elflyg har Bromma flygplats potential förbinda nio olika flygsträckor. Konsekvensen på lastprofilen om samtliga flygsträckor elektrifieras i framtiden antas vara omfattande. Där problem dessutom sett till kapacitetsbrist för både södra Sverige och större städer redan antas bli ett allt mer förekommande problem enligt rapportens bakgrund (avsnitt 1.1).

Vad en elektrifiering innebär för luftfartssektorn sett till energiförsörjning, på en systemnivå är att en ny systemprocess för bränsletillförsel kommer behövas, då konventionellt bränsle byts ut mot el. En generell och konsekvent utformning av laddinfrastruktur anses behövas så det inte är laddning i sig som skapar flaskhalsar. Detsamma gäller för införande av regelverk sett till säkerhet vid nybyggnation av solceller i anslutning till flygplatser. Dessa typer av förändringar behöver, speciellt med avseende på luftfartens internationalisering anses behöva komma från EASA (European Union Aviation Safety Agency). Även om första generationens kommersiella elflyg avses för kortare sträckor finns det planer inom branschen på utvidgning i takt med batteriutvecklingen och krav på minskade växtgasutsläpp enligt rapportens bakgrund (avsnitt 1.2). Då en fullskalig elflygsimplementation inte förväntas ske

över en natt innebär det att flygplatser antas behöva förhålla sig till både elflyg och konventionella flyg samtidigt under en längre övergångsperiod.

Som beskrivit i rapportens bakgrund finns det inte bara incitament sett till reducerad klimatpåverkan vid en elektrifiering av luftfarten, utan även sett till sänka operativa kostnader för (avsnitt 1.2). Kostnader vilka uppskattas till 75–80 procent. Största andel av operativa kostnader utgörs av bränslekostnader, med andra ord elpriset. Vid en elektrifiering av luftfarten anses därför leveranssäker och resurseffektiv elförsörjning ligga i flygbolags intresse om de investerar i elflyg. Vad detta kan komma att innebära diskuteras vidare i scenario *Systemlösning*.

Huruvida den förväntade förlängda flygtiden med elflyg på 30 procent redogjord för i rapportens bakgrund (avsnitt 1.2) påverkar med avseende på social acceptans återstår att se. Den kan komma att bero på i vilken grad biljettpriset för elflyg minskar till följd av både sänkta bränslekostnader och minskad klimatpåverkan. Finns ekonomiska incitament förväntas i viss utsträckning en förlängd restid kompenseras och även bidra med ett sätt att undvika flygskam.

6.1.3 Scenario *Systemlösning*

Vid en kombination av solceller i anslutning till flygplatsen satt i relation till elflygets bidrag till förändrad lastprofil, finns nu ett par intressanta aspekter att diskutera vidare kring. Även med avseende på ett bredare perspektiv, utmaningar och systemnyttor på marknadsnivå.

Med både solceller och elflyg förväntas flygplatsers energiförsörjning förändras både sett till utökad lastprofil och till rollen som prosumert. I vilken grad beror dels på omfattningen av laddningsbehov dels på solcellanläggningens storlek och hur den optimeras med eventuellt batterilager. Enligt tidigare analyser i rapporten innebär större anläggning inte endast mer producerad el utan även högre andel överproduktion med en elanvändning vilken inkluderar elflyg. Om solcellsanläggningar anpassas efter irreguljära lastprofiler är det därför viktigt att utformning sker resurseffektivt, vilket i sin tur beror prosumertens tariff och rådande affärsmodell för elhandel. Varför dialog med anslutande elnät anses vara viktigt vid utformning av förändrad elförsörjning. Resurseffektivisering krävs även sett till elsystemet rent marknadsmässigt, vilket redogjorts för i rapportens bakgrund (avsnitt 1.1). Att bygga ut förnyelsebar produktion för sakens skull riskerar att ge skeva prissignaler och resultera i negativa konsekvenser för hela elmarknaden. Detta antas däremot inte bli en konsekvens av en solcellsanläggning i de omfattningar vilka presenterats i rapporten. Däremot anses det vara något att ha i åtanke om en större anläggningar i framtiden blir aktuella i anslutning till flygplatser med god tillgång på outnyttjade ytor.

Om solcellsanläggningar och batterilager i framtiden utformas i anslutning till flygplatser med avsikt att producera och sälja el ut till nätet och samtidigt tillgodose laddning för elflyg skulle en ny tariff behöva utformas. För att precisera dess utformning krävs vidare utredningar och nya regelverk sett till relationen mellan flygplats, flygbolag och laddinfrastruktur. Men tack vare ett batterilager skulle effektuttaget från nätet kunna minskas

under vissa tidsintervall och därmed även abonnemangsavgiften. I vilken utsträckning beror på storleken av både effektuttag, solcellsproduktion och batterilager, vidare hur lösningen optimeras. Närmare bestämt på lagringsförmågan hos batterilagret, intermittensen som solkraft ger upphov till och hur elpriset varierar.

Sett ur ett marknadsmässigt systemperspektiv kan batterilager nu diskuteras med avseende på finansiering. Vid en kommersialisering av elflyg uppstår nya intressenter på elmarknaden, flygbolag. Detta med anledning att konventionella flygbränslen byts ut mot el. I rapportens bakgrund beskrivs bränslekostnaderna för flyg utgöra en stor andel av de operativa kostnaderna (avsnitt 1.2). Vilka i sin tur förväntas minska med 75–80 procent vid en elektrifiering. Därför uppstår ett samband mellan elpriset och flygbolags vinstmarginal. Ett samband vilket förväntas skapa incitament för flygbolag att investera i en leveranseffektiv och prisseffektiv elförsörjning. Det finansiella hinder som funnits för investeringar i batterilager kan därför överkommas i form av att flera aktörer delar på investeringskostnaderna, exempelvis flygplatser och flygbolag. Alternativt övertar flygbolagen eller andra externa aktörer dem helt. Flygplatsers roll skulle således kunna bli mer utav en förvaltare av solceller och batterilagrar snarare än ensamma investerare.

Däremot återstår utmaningen sett till de säsongsvariationer som påvisats i resultatet där lösningen inte är lika kompatibel sett till solceller och vintermånader. Även om nyttan från arbitrage kvarstår, vilket beskrivits i rapportens bakgrund (avsnitt 1.1), krävs det träffsäkra prismodeller för att kunna avgöra när el ska köpas eller säljas för att generera vinst.

Genom att addera ytterligare en dimension till diskussionen kan även potentiella lokala aktörer inkluderas. Elektrifiering genom vätgas av inlandsbanan har tagits upp under rapportens gång, vilken passerar precis intill Härjedalens flygplats. Ponera en tankstation i närheten av flygplatsen och ännu en intressent uppstår med ekonomiska incitament till leveranssäker och förnyelsebar el. Detta är givetvis byggt på många antaganden men att inkludera flera aktörer vilka kan dela på risker förväntas bli avgörande för morgondagens elektrifierade samhälle och dess lösningar. Flygbolags och övriga aktörers intresse i lokal elproduktion i anslutning till flygplatser anses även ha potential att påskynda införandet av regelverk och säkerhetsbevisning sett till implementering av solceller. Eftersom det ligger i flera samhällsaktörers intresse att reducera luftfartens klimatpåverkan, inte minst för att uppnå regeringens nationella mål om en 100 procentig reduktion av nettoutsläpp till 2045.

6.2 Metod

Att genomföra en systemanalys på olika framtidsscenario har under rapportens gång inneburit många avvägningar och antaganden, därav finns det flertalet osäkerheter i rapportens resultat. Sett till besvarandet av frågeställningar hade en rent kvalitativ rapport kunnat göras byggd på information och intervjuer från olika aktörer inom branscherna. Därigenom tagit fram vilken inverkan en elektrifiering kan tänkas ge upphov till på ett mer ingående teoretiskt plan. Valet hade reducerat de många antaganden och approximationer som gjorts men därav också uteslutit ett kvantitativt resultat.

Motiveringen till att utveckla en dynamisk modell utgick från rapportens övergripande syfte. Vilket snarare bygger på att ta fram hur dessa framtidsscenario kan undersökas, då det råder stor osäkerhet kring exakt vilken riktning både elsystemet och luftfartssektorn tar de kommande åren. Osäkerheter vilka redogörs för i rapportens bakgrund. Det ligger svagheter i den generella uppbyggnaden som avser ge ett systemperspektiv, där vissa parametrar, exempelvis ekonomi utesluts. Eller en mer djupgående inverkan av en viss typ av solcell. Med det sagt är det något som vid kommande analyser kan appliceras som påbyggnad i modellen. Vidare uteslöts även utformning av effekten på effektabonnemang vilket beror på hur stort effektbehovet är som i sin tur beror på vilket plan det är som faktiskt kommer användas. Detsamma gäller med avseende på solcellsanläggningen, då dess utformning kan se ut många sätt.

Valet att endast bygga modellen för ett år anses resultera i osäkerheter då variation sett till längre och kortare tidsrymder exkluderas. Konsekvensen för rapporten är att den faktiska variationen på sekund och minutnivå inte tillkännages. Approximationen som gjordes tar endast hänsyn till den stora skillnad som råder mellan både rådande elanvändning och solcellsproduktionen sett till laddningen av elflyg.

Att bygga en modell för solceller applicerat på endast ett års mätvärden kan resultera i att ett extremt år valdes utan att sättas i någon form av relation till andra år. Därför genomfördes en jämförelse av den i modellen använda och beräknade solinstrålning för 2019 med ett internetbaserat verktyg för solinstrålning (PV-GIS). Anledningen till att data inte hämtades direkt från verktyget har med begränsad tillgänglig data att göra som sträcker sig fram till 2016. Dessutom hade modellen målats in i ett hörn och parametrar hade inte gått att förändra efter tycke. Jämförelsen av beräknad solinstrålning gjordes genom att hämta solinstrålning från PV-GIS:s från år 2013-2016 för Härjedalens flygplats koordinater. Dessa tre år jämfördes sedan med rapportens beräknade solinstrålning för 2019. Den beräknad solinstrålning utgjorde i tre av tolv fall största eller minsta värdet, där ingen av skillnaderna utgjorde mer än 10 procent sett till övriga år. Detta ansågs som tillräckligt konfirmation att både genomförda beräkningar stämde och 2019 inte var något extremt år.

Den indata som används i rapporten är till största del standardvärden inom branschen. Dessa valdes med anledning, åter igen, för att i rapporten förmedla generella framtidsscenario. En viss typ av solcell hade kunnat väljas men det anses inte ha gett någon större påverkan på resultatet.

Approximationen som gjorts för att ta hänsyn till radavstånd och därav skuggning av paneler i metoden genererar olika resultat beroende på om radavstånd sätts i relation till ytans längd eller ytans bredd. Men beror i sin tur på vilken längd och bredd användaren väljer. Konsekvensen av valet slår på någon procent sett till totalt upptagen yta då beräkningen utgår från längd eller bredd, vilket genomförd jämförelse påvisade. Valet påverkar i sin tur inte resultatet sett till elproduktion i rapporten då resultatet är baserat på täckningsgrad.

Rapportens största osäkerhet anses vara att basera laddningsbehovet på elflygsmodellen Alice. I dagsläget finns det ingen antydning på att det är just denna modell som kommer flyga

till och från Härjedalens flygplats. Men med tanke på den tekniska information som finns tillgänglig anses Alice vara det flyg som ger bäst uppskattning sett till elförsörjning. Det är betydligt mer sannolikt att nämnda Heart Aerospace blir det plan som kommer användas, men ingen teknisk data fanns att tillgå. Beräkning sett till förbrukad mängd energi per flygning övervägdes att användas. Men efter hand som skillnaderna mellan planen uppstod ansågs det för osäkert.

Temperaturens inverkan på laddning av elflyg är än så länge okänt, förutom att den i dagsläget påverkar befintliga mindre elektrifierade hobby-flyg. Konsekvensen av att den inte tas hänsyn till i rapporten är att de effektoppar laddningen av elflyg utgör i rapporten kunde ha sett annorlunda ut över året.

7 Slutsatser

En framtida elektrifiering av luftfartssektorn förväntas innebära förändringar sett till elförsörjning av flygplatser och dess roll i energiomställningen. Detta examensarbete bidrar med kvantitativ och kvalitativ kunskap inför denna förändring sett ur ett systemperspektiv.

Med avseende på rapportens första frågeställning, sett till implementering av solceller i anslutning till flygplatser påvisar rapporten att tillgängliga ytor i många avseenden är lämpliga för lokal elproduktion. Men i dagsläget saknas regelverk för säkerhetsställande sett till optimering och risker. Förutom att tillgodose sin egen elanvändning utgör även solcellsproduktion en potentiell inkomstkälla för flygplatser och identifieras dessutom som en möjlighet till att bidra i energiomställningen.

Sett till rapportens andra frågeställningen förväntas en kommersiell elflygsimplementering förändra flygplatsers elanvändning, främst med avseende på höga effekttoppar vid laddning. Omfattningen på utökat effekttuttag beror både på hur många plan som laddas vid samma tillfälle och på vilken modell och dess batterikapacitet. I rapporten påvisades effekttoppar tio gånger den elanvändning som finns i dag vid laddning av endast ett flyg. Konsekvenserna förväntas bli betydligt större om flera elflyg laddas samtidigt.

Angående rapportens tredje frågeställning anses en solcellsanläggning i begränsad mån kunna tillgodose den ökade elanvändningen från elflyg. Till vilken grad beror på omfattning av både elanvändning och solcellsanläggning men även på säsong. Rapportens resultat pekar på att en irreguljär lastprofil i mindre mån drar nytta av solcellsproduktion. Där batterilager anses ha potentiell att agera harmoniserande mellanhand och reducera effekttoppar. Vidare kunna generera arbitrage och reducera risken för negativ påverkan av elkvalitet i näten.

Slutligen har framtida aktörer, bland dem flygbolag, i rapporten identifierats som möjliga investerare i solcellsanläggningar i anslutning till flygplatser. Flygbolag som blivande intressenter på elmarknaden om en elektrifiering av luftfarten sker, sett till incitament för reducerad klimatpåverkan och sänkta operativa kostnader. Vilka båda i framtiden förväntas vara beroende av förnyelsebar, leveranssäker och billig el.

8 Framtidsutsikt

För framtida studier skulle det vara av intresse att undersöka andra flygplatser. Dels med avseende flygtrafik dels på lokalisering, sett till den begränsade solinstrålning vilken råder i norra Sverige.

Sett till rapportens resultat återstår stora arealer av outnyttjad mark på Härjedalens flygplats, även efter den totalt upptagna ytan av solceller räknas bort. I framtiden hade därför en kombinerad lösning med både solceller, vindkraft och batterilager varit en intressant åtgärd att granska. Vidare hade även en djupdykning sett till optimering av batterilager och effektabonnemang varit av intresse att undersöka för att se hur de ekonomiska utfallen skulle variera med olika täckningsgrader.

Konsekvenserna från samtliga scenarion skulle i framtiden vara intressant att analysera sett ur ett mer vinklat perspektiv från elnätets sida. Vilka konsekvenser de olika åtgärderna skulle förväntas få och vad som skulle krävas sett till flexibilitet. Vidare aspekter som anses intressant är de ekonomiska. Även om laddningsbehovets exakta omfattning ligger i framtiden hade olika affärsmodeller för lösningen varit av intresse att undersöka.

Flygbolags identifierade roll som potentiella framtida investerare i lokal förnyelsebar elproduktion i anslutning till flygplatser är något som anses av intresse att ta med sig. Speciellt med tanke på om en kommersialisering av elflyg även äger rum utomlands, där tillförseln av förnyelsebar el inte är lika självklar som i de nordiska länderna och även möjligheten till ökad produktion från solceller sett till sydligare breddgrader.

9 Referenser

- ABB. (2020). Transformator – i varje korsning i elströmmens vägnet. Tillgänglig <https://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/transformatorer> [Hämtad 2020-12-05]
- Thurber, M. (2019). Eviation's Alice to fly this year. Intervju med Eviations grundare. *AINonline*. 19 juni. Tillgänglig <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2019-06-19/eviations-alice-fly-year> [Hämtad 2020-12-09]
- Avinor. (2020). "Forslag til program for introduksjon av elektrifiserte flyg i kommersiell luftfart". Tillgänglig <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/forslag-til-program-for-introduksjon-av-elektrifiserte-fly-i-kommersiell-luftfart/id2692847/> [Hämtad 2020-12-08]
- Axelsson, E., Blomqvist, P., Dvali, K., Ludvig, K. & Unger, T. (2017). *Utbyggnad av soleil i Sverige*. Tillgänglig <https://energiforsk.se/program/soleil/rapporter/utbyggnad-av-soleil-i-sverige-2017-376/> [Hämtad 2020-09-16]
- Bagge, P. (2015). "Analys av elkvaliteten i Sveriges första MW-solcellspark". Tillgängligt <https://www.mdh.se/forskning/forskningsprojekt/framtidens-energi/utvardering-av-solelproduktion-fran-sveriges-forsta-mw-solcellspark> [Hämtad 2020-09-16]
- Bailey, J. (2019). "Who is Alice? – An introduction to the bizzare eviation electric aircraft." *Simple Flying*. 26 juni Tillgänglig <https://simpleflying.com/eviation-alice-electric-aircraft/> [Hämtad 2020-12-05]
- Battery University. (2017). BU-410: Charging at High and Low Temperatures. Tillgänglig https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures [Hämtad 2020-12-10]
- Battery University. (2018). BU-409: Charging Litium-ion. Tillgänglig https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries [Hämtad 2020-12-14]
- Beckman, W & Duffie, J. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. uppl. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison.
- Berglund, S-E & Åkerlund, J. (2007). *EMC, elkvalitet och elmiljö, guide för elanvändare och allmänt sakkunniga inom elområdet*. Elforsk 07-40. Version 4, 2007.
- Blomqvist, P & Unger, T. (2018). "Teknisk-ekonomisk kostnadsbedömning av solceller i Sverige". Tillgänglig <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/ovriga-rapporter/teknisk-ekonomisk-kostnadsbedomning-av-solceller-i-sverige.pdf> [Hämtad 2020-09-18]

Byman, K. (2016). "Sveriges framtida elproduktion". IVA-projektet Vägval el. Tillgänglig <https://www.iva.se/publicerat/framtidens-elproduktion--en-delrapport/> [Hämtad 2020-09-30]

Elinstallatören. (2020). *Luftfartsverket: Inga solceller inom 3 km, tack*". Tillgänglig <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2020/maj/luftfartsverket-inga-solceller-inom-3-km-tack/> [Hämtad 2020-09-29]

Energiföretagen. (2020a). "Elanvändning". Tillgänglig <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/energibranschen-viktig-for-svensk-ekonomi/elanvandning/> [Hämtad 2020-10-26]

Energiföretagen. (2020b). Handel på elbörsen. Tillgänglig <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/elhandel/handel-pa-elborsen/> [Hämtad 2020-11-23]

Energimarkandsinspektionen. (2013). "Energimarknadsinspektionens författningssamling EIFS 2013:1", s. 1–8.

Energimarkandsinspektionen. (2016). "PM - Markandsförutsättningar för elektriska lager – principiella utgångspunkter och möjligheter". Tillgänglig https://www.ei.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm/Rapporter%202016/PM_marknadsforutsattning_for_elektriska_batterilager.pdf [Hämtad 2021-01-15]

Energimyndigheten. (2016). "Effekter i elsystemet från ökad andel sol". ISSN 1403-1892.

Energimyndigheten. (2018). "Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem – Delrapport 1". Tillgänglig <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2019/sa-kan-100-procent-fornybar-elproduktion-se-ut/> [Hämtad 2020-09-06]

Energimyndigheten. (2019). "100 procent förnybar el – Delrapport 2". Tillgänglig <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2019/sa-kan-100-procent-fornybar-elproduktion-se-ut/> [Hämtad 2020-10-08]

Engineering and Technology. (2018). "Severe winters could hamper your electric vehicle". 2 augusti. Tillgänglig <https://eandt.theiet.org/content/articles/2018/08/severe-winters-could-hamper-your-electric-vehicle-study-finds/> [Hämtad 2020-12-10]

Eviation. (2020). Alice. Tillgänglig <https://www.eviation.co/aircraft/> [Hämtad 2020-11-18]

Grahn, M. & Littorin, T. (2020). "Elresan – Elsystemets utveckling i samband med en introduktion av elektrisk luftfart".

Hanley, S. (2020). "Eviation set to deliver first 9-passenger electric airplane in 2022". *Clean Technica*. 6 november Tillgänglig <https://cleantechnica.com/2020/11/06/eviation-set-to-deliver-first-9-passenger-electric-airplane-in-2022/> [Hämtad 2012-12-03]

Heart Aerospace. (2020). Tillgängligt <https://heartaerospace.com/> [Hämtad 2020]

Hemmerdiner, J. (2020). "Eviation tweaks Alice design, aims for 2021 first flight". *Flight Global*. 16 december. Tillgänglig <https://www.flightglobal.com/airframers/eviation-tweaks-alice-design-aims-for-2021-first-flight/141618.article> [Hämtad 2020-12-17]

Härjeåns Energi. (2020). Elnät hos Härjeåns nät. Tillgänglig <https://m.harjeans.se/elnat/> [Hämtad 2020-11-04]

Karlsson, J & Davidsson, M. (2012). "Mätning och analys av elkvalité". Examensarbete Halmstad Högskola. Tillgänglig <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:481393/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad 2020-10-05]

Karlsson, L. (2020). "Färdplan för grön vätgas i Jämtlands län". Peak Region.

Konsumenternas Energimarknadsbyrå. (2020). Nätavgifter. Tillgänglig <https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elkostnader/natavgifter/> Hämtad [2021-01-06]

Konsumenternas Energimarknadsbyrå. (2021). Elpriser – prognos och utveckling. Tillgänglig <https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elpriser-statistik/elpriser-prognos-och-utveckling/> [Hämtad 2021-01-09]

Kvarkenområdet. (2020). Tillgänglig <https://www.kvarken.org/nyheter1/nytt-flaggskeppsprojekt-tas-fram-i-kvarkenregionen-> [Hämtad 2020-11-16]

Nordling, A. (2016). "Sveriges framtida elnät En delrapport". IVA. Tillgänglig <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-energi/vagvalel-sveriges-framtida-elnat.pdf> [Hämtad 2020-09-19]

Power Circle. (2018). "Elnätets roll i framtidens energisystem." Kortversion. Tillgänglig https://powercircle.org/wp-content/uploads/2018/01/Kort_KAN2.0-Elna%CC%88tets-roll-i-framtidens-energisystem.pdf [Hämtad 2020-10-23]

Power Circle. (2020). "Batterier i elnätet". Kortversion. Tillgänglig <https://powercircle.org/batterilager.pdf> [Hämtad 2021-01-19]

Read, B. (2020). "Wiring up the electric aviation revolution". Royal Aeronautical Society. Tillgänglig <https://www.aerosociety.com/news/wiring-up-the-electric-aviation-revolution/> [Hämtad 2020-11-19]

Regeringskansliet. (2020a). "Regeringen ökar tempot i elektrifieringsarbetet." Tillgänglig <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2020/10/regeringen-okar-tempot-i-elektrifieringsarbetet/> [Hämtad 2020-12-05]

Regeringskansliet. (2020b). "Regeringsuppdrag om elflyg". Tillgänglig <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2020/01/regeringsuppdrag-om-elflyg/> [Hämtad 2020-12-05]

Regeringskansliet. (2020c). "Mål för energipolitiken". Tillgänglig <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/mal-och-visioner-for-energi/> [Hämtad 2020-11-13]

SCB. (2020). *Eltillförsel i Sverige Efter Produktionsslag. År 1986 - 2018-Statistikdatabasen.* Statistikdatabasen. Tillgänglig https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_EN_EN0105/EIProdAr/tabletableViewLayout1/ [Hämtad 2020-09-25].

Schefer, H., Fauth, L., Kopp, H., Mallwitz, J., Friebe, J. & Kurrat, M. (2020). "Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft". DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991804

SMHI. (2020a). Data temperatur. Tillgänglig <https://www.smhi.se/data/meteorologi/temperatur> [Hämtad 2020-10-5]

SMHI. (2020b). Data solinstrålning. Tillgänglig <https://www.smhi.se/data/meteorologi/stralning> [Hämtad 2020-10-08]

Trafikanalys. (2020). "Elflyg – en början på en spännande resa". Rapport 2020:12.

Transportstyrelsen. (2020a). "Flygets klimatpåverkan". Tillgänglig <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Miljo-och-halsa/Klimat/Flygets-klimatpaverkan/> [Hämtad 2020-11-26]

Transportstyrelsen. (2020b). "Hantering av flygets klimatpåverkan". Tillgänglig <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Miljo-och-halsa/Klimat/Hantering-av-flygets-klimatpaverkan/> [Hämtad 2020-11-26]

Uniper. (2020). Elsystemet. Tillgänglig <https://www.uniper.energy/sverige/effekt> [Hämtad 2020-10-02]

VTI (Statens väg- och transportforskningsinstitut). (2020). "Det kommersiella elflyget – verklighet eller dröm?". VTI rapport 1039.

Wande, H. (2019). "Flygskam ett huvudbry för flygbranschen". Intervju med Rickard Andersson (vd för SAS), i Affärsliv. Publicerad 2020-09-11.

Young, A. (2019). "Safety assessments for airport solar panel installations". ACI Insights. 29 april. Tillgänglig <https://blog.aci.aero/safety-assessments-for-airport-solar-panel-installations/> [Hämtad 2021-01-15]

Åhman, M. (2016). *"Elmarknadens omvandling: Reglering, vägval och drivkrafter för elsystemets utveckling till 2050"*. Lund University. ISBN: 978-91-86961-22-0

10 Appendix

Bilaga 1 – Översikt Svegs flygplats



Bilaga 2 – Översikt för ett exempel av modellens utseende

