UPPSALA UNIVERSITET

UPTEC STS 25031
Examensarbete 30 hp
2025–06

Risker på framtidens flygplatser

En riskanalys av infrastruktur för elflygplan

Freja Lövström Klucis

Civilingenjörsprogrammet i system i teknik och samhälle

UPPSALA UNIVERSITET

Risks at future airports: A risk analysis of infrastructure for electric aviation

Freja Lövström Klucis

Abstract

Sweden has a goal to have fossil free aviation in 2045 and aim to already in 2030 have fossil free domestic flights. A step on the way to become fossil free is to introduce electric aviation at Swedish airports. Electric aviation are aircrafts powered by electricity and is a way to reduce aviation impact on the environment. For airports to be able to receive electric aviation they need to develop their infrastructure so they can accommodate electric aircrafts. The introduction of new infrastructure at airports will be challenging and will introduce new risks to an already complex environment. In preparation for this implementation of electric aircrafts more research is needed on what kind of new risks are added at airports. The aim of this study was therefore to investigate what new risks are introduced at airports that have infrastructure for electric aviation and what measures that can be taken to reduce these risks. To achieve the aim a prognosis of how an airport with infrastructure for electric aviation will look in 2035 was made. On this prognosis a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) was performed. This risk analysis showed that the primary risk was thermal runaway in batteries caused by a technical errors or inexperience with personal. To reduce the risk, the aviation industry needs to invest in securing competence in their personal by recruiting or education. Emergency personnel need to have an education in battery fires and be included in the planning of new infrastructure. The research also showed that it is vital that European Union Aviation Safety Agency (EASA) include electric aviation in their regulations.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Jennifer Leijon Ämnesgranskare: Christer Törnkvist

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

Att världen står inför en klimatkris är inte längre ifrågasatt, haven mår sämre, växthuseffekten ökar och vår mångfald minskar. Frågan är nu istället vad kan vi göra åt det? Som svar på det har Sverige satt upp 16 miljömål som ska vara riktmärken för en hållbar utveckling, en väg framåt för att vi som samhälle ska kunna lämna över en god miljö till nästa generation. En del av dessa mål är att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser 2045 och att inrikesflyg ska vara fossilfritt 2030. Idag står inrikestransporter för en tredjedel av Sveriges utsläpp av växthusgaser och även om majoriteten av utsläppen är från vägtrafiken kommer en inte obetydlig del från inrikesflyg. För att minska vägtrafikens påverkan på klimatet har elfordon börjat introduceras och idag är det inte ovanligt att se olika elbilar på gatorna. Nu har forskare och innovationssmarta företag börjat undersöka om det inte är möjligt att elektrifiera flygen också.

Elektriska flygplan även kallade elflygplan drivs helt eller delvis av elmotorer. Elflyg som utvecklas eller redan finns i luften får främst sin el från batterier eller i framtiden bränsleceller. I den närmaste framtiden kommer det främst vara aktuellt att elflygplan flyger inrikesruter då räckvidden är kortare än för traditionella flygplan. Den begränsade räckvidden beror på kapaciteten batterier har och elflyg blir tyngre än vanliga flygplan då batterier väger mycket. Tanken är att elflyg i framtiden kan trafikera sträckor som Kiruna-Umeå eller Stockholm-Visby. Det finns redan idag små elflygplan som flyger på Skellefteå flygplats även om vi är några år bort från att flyga kommersiellt med större elflygplan.

För att vi ska ta oss dit behövs det dock inte bara fungerade elflygplan utan det krävs också att flygplatser kan hantera elflyg på ett säkert sätt. Precis som elbilar ställer elflygplan andra krav på energiförsörjning än deras traditionella fossila motsvarighet. Det innebär att flygplatser behöver ha en infrastruktur som möjliggör att de kan ladda elflygplans batterier och tanka elflygplans bränsleceller med vätgas. Säkerhetskraven på flygplatser är hög och det är viktigt att laddning och tankning av elflygplan sker säkert samt att introduktionen av infrastrukturen som krävs för elflygplan sker utan att öka riskerna på flygplatser. Det är därför intressant att undersöka vilka risker som tillkommer på flygplatser med elflygplan och vilka åtgärder som kan tas för att minska dem. Det här examensarbetet undersökte det genom en riskanalys utifrån en framtidsprognos om hur infrastrukturen för elflygplan kommer se ut. Prognosen visade på att elflygplan som drivs av vätgas är för långt från implementering för att undersökas inom ramen för den här undersökningen men att elflygplan drivna av batterier reallistiskt kan var på plats för inrikes flygningar om tio år.

Framtidsprognosen visade på att elflygplan i huvudsak kan laddas på tre olika sätt. Det första laddscenariot innebar att elflyg laddades direkt via elnätet med laddningsstolpar. Det andra laddscenariot innebar att elflyg laddades genom både elnätet och ett batterilager som i sin tur laddades upp under natten. Idén med ett batterilager var att om det inte finns tillräckligt kapacitet i elnätet för att ladda skulle det vara möjligt att använda sig av batterilagret istället.

Det kan även eventuellt vara billigare att ladda upp ett batterilager när elpriserna är låga än ladda alla elflyg direkt via elnätet men det behöver utredas separat. Det tredje laddscenariot innebar att elflyg laddades via laddbilar som skulle fungera som tankbilar på flygplatser idag. Laddbilar är lastbilar med batterilager på sig, man kan även beskriva dem som mobila batterilager.

Riskanalysen genomfördes på dessa tre olika laddscenarion och den visade på att tillkomna risker för flygplatser primärt kommer vara risker som ökar sannolikheten för termisk rusning i batterier. Termisk rusning innebär att batterier genomgår en okontrollerad frigörelse av energi och orsakar bränder som är extremt svårsläckta. Det kan orsakas av olika typer av fel i batterierna men också på grund av felhantering som orsakar skador. För att minska risken med termisk rusning visade riskanalysen på att placering av batterisystem var viktiga för att minimera eventuella skador. För att minimera risken att det sker visade arbetet på att det var viktigt att personal som kommer hantera batterier har kompetens som är lämplig för det.

Generellt visade även arbetet på att riskerna på flygplatsen ökar när infrastrukturen blir mer komplex och att investeringar behöver göras nu för att flygplatspersonal och räddningstjänst ska ha kompetensen som krävs när elflyg kommer. Den kompetensen kan skaffas genom utbildning och genom att rekrytera erfaren personal från närliggande sektorer. Just nu saknas det ett regelverk för laddningen av elflygplan men det planeras att komma ett från Europeiska unionens byrå för luftfartssäkerhet (EASA) nästa år. Enligt detta arbete är det viktigt att så blir fallet då det behövs ett regelverk som är anpassat för elflyg för att flygplatser ska kunna hantera riskerna med laddning. Framtida forskning bör fokusera på att utföra riskanalyser som är på mer specifika laddscenarion än vad som var möjliga i det här arbetet. Det är även av intresse att jämföra risker mellan infrastruktur för elflyg och traditionella flyg för säkerställa elektrifieringen inte innebär en ökad risk på flygplatser.

Förord

Det här examensarbetet markerar slutet på min utbildning på civilingenjörsprogrammet i system i teknik och samhälle vid Uppsala universitet. Arbetet genomfördes på Institutionen för elektroteknik Uppsala universitet och handledare för arbetet var Jennifer Leijon. Ett varmt tack riktas till Jennifer för hennes orubbliga stöd och peppning igenom hela arbetet. Ett stort tack även till min ämnesgranskare Christer Törnkvist som bidragit med kontakter, erfarenhet och goda råd. Jag vill också tacka alla som svarade på min enkätstudie i sammanband med arbetet och gjorde det här examensarbetet möjligt.

Jag vill även uttrycka min tacksamhet till min familj och vänner som stöttat mig igenom dessa fem år av utbildning, ert stöd har gjort den här examen möjlig. Min tid i Uppsala har varit fantastisk och jag vill uttrycka min uppskattning för alla som gjort den minnesvärd. Slutligen till mina systrar, ert råd, välmenande retande och hjälp är ovärderlig.

Ordlista

AC – Växelström (Alternating Current)

BESS – Batterilager (Battery Energy Storage System)

BMS – Batteri styrsystem (Battery Management System)

CCS – Combined Charging System

DC – Likström (Direct Current)

EMC – Elektriskmagnetisk kompatibilitet

EMI – Elektromagnetisk störning

EVSE – Electric Vehicle Supply Equipment

FMEA – Feleffektanalys (Failure Mode and Effect Analysis)

HVAC – Värme ventilation och luftkonditionering (Heating, Ventilation and Air Conditioning)

MCS – Megawatt Charging system

RPN – Risk prioriteringsvärde (Risk Priority Number)

Innehållsförteckning

1.Inledning ... 1
1.1 Forskningsprojektet TAKEOFF ... 1
1.2 Syfte och frågeställningar ... 2
1.3 Avgränsningar ... 2
2. Teori ... 3
3. Bakgrund ... 4
3.1 Elektriska flygplan ... 4
3.1.1 Elflygplansbatterier ... 5
3.1.2 Vätgasbränsleceller ... 6
3.2 Infrastruktur för elflygplan ... 6
3.2.1 Laddinfrastruktur ... 7
3.2.2 Elförsörjning ... 7
3.2.3 Vätgasinfrastruktur ... 9
3.2.4 Vätgas tankning ... 10
3.3 Risker med infrastruktur för elflygplan ... 11
3.3.1 Risker med eldistribuering och laddning ... 11
3.3.2 Risker med batterier ... 12
3.3.3 Risker med vätgas ... 13
3.3.4 Risker med flytande vätgas ... 14
3.3.5 Risker med vinterförhållanden ... 14
3.4 Erfarenhet, kunskap och kompetens ... 14
3.5 Säkerhetsåtgärder ... 15
3.5.1 Batterier ... 15
3.5.2 Säkerhetsåtgärder eldistribuering ... 16
3.5.3 Säkerhetsåtgärder vätgas ... 16
3.6 Regelverk för elflygplan ... 16
4. Flygplatsprognos ... 18
4.1 El- och effektkapacitet ... 19
4.1.1 Trafik på en medelstor svensk flygplats ... 20
4.1.2 Flygplansbatterier ... 20
4.1.3 Maxeffekt och vändningstid ... 21
4.1.4 Dagselförbrukning ... 22
4.2 Laddningsscenarion ... 22
4.2.1 Laddscenario 1: Laddningsstolpar med elförsörjning från elnätet ... 23
4.2.2 Laddscenario 2: Laddningsstolpar med elförsörjning från BESS och elnät ... 24
4.2.3 Laddscenario 3: Laddning med ett mobilt BESS ... 25

5. Riskmetodik ... 26
5.1 Felfunktionsanalys ... 26
5.1.1 Risk priority number - RPN ... 27
5.1.2 Utformande av FMEA-formulär ... 27
5.1.3 Utförandet av felfunktionsanalysen ... 28
5.1.4 Felträd ... 30
5.1.5 Enkätstudie ... 30
5.1.6 Interjuver ... 32
6. Resultat ... 33
6.1 Enkätstudie ... 33
6.2 Risker med elnätet på en flygplats ... 34
6.3 Risker med en transformatorstation på en flygplats ... 36
6.4 Risker med BESS ... 38
6.5 Risker med laddbilar ... 41
6.6 Risker med laddningsutrustning för elflyg utomhus ... 43
6.7 Risker med flygplansbatterier ... 44
6.8 Övergripande åtgärder ... 47
7. Diskussion ... 48
7.1 Risker med laddscenariona ... 48
7.1.1 Brand ... 49
7.1.2 Kompetens ... 49
7.1.3 Regelverk ... 50
7.2 Undersökningens felfunktionsanalys ... 50
7.3 Vätgasdrivna elflygplan ... 51
7.4 Risk för vem? ... 51
7.5 Framtida forskning ... 52
8. Slutsatser ... 54
Referenser ... 55
Bilaga A ... 61
Bilaga B ... 62
Bilaga C ... 63
Bilaga D ... 65
Bilaga E ... 66
Bilaga F ... 70
F.1 Bakgrundsfrågor ... 70
F.2 Frågor om transformatorstationen ... 70
F.3 Frågor om elnätet på en flygplats ... 71
F.4 Frågor om BESS ... 72

F.5 Frågor om mobilt BESS 74
F.6 Frågor om laddningsutrustning 75
F.7 Frågor om flygplansbatterier 76
F.8 Avslutande fråga 77
Bilaga H 78

1. Inledning

Idag uppskattas luftfarten globalt stå för 4–5 procent av den mänskliga påverkan på klimatet och 2–3 procent av koldioxidutsläppen. Samtidigt växer branschen och flygets miljöpåverkan förväntas öka i framtiden (Transportstyrelsen, 2024a). I och med det finns ett behov att utveckla flyg som är fossilfria och mer miljövänliga. Sverige har satt som mål att inrikesflyg ska vara fossilfria 2030 och alla flyg vid svenska flygplatser ska vara fossilfria 2045 (Fossilfritt Sverige, u.å.). Historiskt sett har det skett framsteg inom de flesta åtgärdsområdena Transportstyrelsen identifierat; tekniska utveckling av flygplan och motorer, förbättrade flygvägar och mer effektivt framförande av flygplanen, hållbarare flygbränslen och klimatstyrmedel (Transportstyrelsen, 2024b).

På senare år har möjligheten undersökts om omställningen som krävs kan ske genom eldrivna flyg. Elflygplan drivs av el eller vätgas genom batterier, bränsleceller eller modifierade konventionella flygplansmotorer. Det finns redan idag små flygplan som drivs av batterier men vidare forskning krävs för att planen ska vara användbara kommersiellt. Inom en tidshorisont på 10 år tror forskare att batteri elektriska flyg kommer vara en viktig del av inrikesflyg i Sverige (Sager m.fl., 2022, s. 23). Denna omställning innebär stora förändringar för flygsektorn och kommer med nya utmaningar som ställer krav på branschens innovationsförmåga, kompetens och kunskap. Förutom att konstruera säkra och resilienta flygplan behöver infrastrukturen på flygplatser förändras och utvecklas för att elektriska flyg ska kunna integreras.

Att införa nya drivmedel på flygplatser kommer vara utmanande och det innebär att man introducerar nya risker till en miljö som redan är komplex. Omställningen till klimatsnåla flyg innebär att det på flygplatser kommer blandas olika typer av bränslen som utgör en egen fara i sig (Rane m.fl., 2023, s. 1,3). Med denna förändring kommer nya säkerhetutmaningar och det har identifierats kunskapsluckor om vilka risker, störningar och faror som kommer med en förändrad infrastruktur på flygplatserna. Inför denna implementering av elflyg krävs därför mer forskning om vilka nya risker som tillkommer vid flygplatser och hur de kan minimeras.

1.1 Forskningsprojektet TAKEOFF

Det här examensarbetet genomfördes inom ramarna för forskningsprojektet Stärkt kompetensförsörjning, riskhantering och teknisk-ekonomiska förutsättningar för omställningen mot batterielektriska flyg och hållbar elektrifiering vid nationella flygplatser (TAKEOFF) som finansieras av Energimyndigheten. Projektet syftar till kunskapsbyggande, innovation och utveckling av elektriska flygplan drivna av batterier. Inom forskningsprojektet undersöks det också hur resilient laddinfrastruktur kan byggas på flygplatser och hur branschen kan möta de kommande kompetensbehoven. I forskningsprojektet samarbetar flera olika parter: Skellefteå City Airport, Uppsala universitet, Luleå tekniska universitet, Science City Skellefteå, Airforestry, Transportföretagen Flyg samt Resilient kompetenscentrum, för ett fossilfritt flyg.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är identifiera och utreda vilka risker som uppkommer på svenska flygplatser i sammanband med elflygplan. Arbetet ska bidra till nuvarande forskning om elflygplan genom att utreda risker som tillkommer på flygplatser när infrastruktur som krävs för laddning av elflygplan har integrerats. Studien ska även bidra med en ökad förståelse för vilka åtgärder som kan tas för att minimera dessa risker och tillsammans med annan forskning bana väg för en mer miljövänlig flygbransch.

Målet med examensarbetet är att utifrån en prognos på olika laddscenarion genomföra en felfunktionsanalys på infrastruktur i flygplatsmiljö. Felfunktionsanalysen ska tydliggöra vilka risker som finns med elektriska flygplan och magnituden av dessa samt vart riskreducerande åtgärder behöver tas. Studien utförs inte med en specifik flygplats i åtanke utan syftar till att beskriva riskerna för en regional flygplats i Sverige.

Frågeställningarna examensarbetet syftar till att besvara är:

- Vilka är de primära riskerna som tillkommer för flygplatser med infrastruktur för elektriska flygplan?
- Vilka riskreducerande åtgärder kan implementeras för att hantera dessa risker?

1.3 Avgränsningar

Studien undersökte risker inom flygplatsernas område vilket inte inkluderade infrastrukturen som kommer krävas utanför flygplatsernas område. Området som var aktuellt definieras tydligt under kaptiel 4. Primärt undersöktes tekniska risker för infrastrukturen. Risker kopplade till antagonistiska hot exkluderades då de ansågs vara så signifikanta att enskilda arbeten borde undersöka dessa.

2. Teori

För att ge en relation och definition på risk gås begreppet kort igenom i teorin.

Risk är ett mångfacetterat begrepp vars betydelse har varierat igenom historien beroende på kontext. Historiskt sett har risk syftat på naturfenomen såsom stormar, översvämningar och sjukdomar. Begreppet har därmed exkluderat mänskligt konstruerade faror (Lupton, 2013, s. 6). I modern tid har begreppets innebörd utökats och inkluderar nu även konsekvenserna från händelser som inte är orsakade av naturen eller slumpen. Utökningen av begreppet kom i sammanband med utvecklingen av sannolikhet och statistiska verktyg i industrisamhället. Risk var då fortfarande ett neutralt begrepp och det fanns bra risk och dålig risk (Lupton, 2013, s. 7–9).

Från och med tidigt 1900-tal har dock risk haft en negativ innebörd. Det var då faran att någonting icke önskvärt inträffade, denna definition gällde framför allt inom tekniska riskbedömningar (Lupton, 2013, s. 9). Vad människor uppfattar är en risk är subjektivt och beror på bland annat på den enskildes kultur och sociala kontext. Risker är därför inte permanenta utan förändras med samhället (Lupton, 2013, s. 22–23). Generellt har begreppet idag två huvuddelar, sannolikheten för en oönskad konsekvens och storleken av den (Nationalencyklopedin, u.å.). I den här uppsatsen har risk en negativ innebörd och risker anses allvarligare om de antingen har högre sannolikhet att inträffa eller om de har större konsekvenser.

3. Bakgrund

I bakgrunden förklaras vilka olika typer av elflygplan som är aktuella i dagens forskning samt vilken infrastruktur dessa kräver. Även forskning på risker och säkerhetsåtgärder kopplade till infrastrukturen introduceras. Slutligen förklaras även regelverket som finns för flygplatser. Bakgrunden grundar för flygplatsprognosen som felfunktionanalysen utgår ifrån.

3.1 Elektriska flygplan

Elektriska flygplan som även går under förkortningen elflygplan kan definieras som flygplan som drivs helt eller delvis av elmotorer. Forskning undersöker vilken elförsörjning som är lämpligast för flygplansmotorer och idag finns två framträdande alternativ, batterier eller bränsleceller (Trafikanalys, 2020, s. 41–42). Bränslet som är aktuellt för bränsleceller är vätgas och i med det definieras även ibland vätgasflyg med förbränningsmotorer som elflygplan i vissa studier (Trafikverket, 2024, s. 3). I Tabell 1 så redovisas det översiktligt vilka typer av elektriska plan som i framtiden kan komma bära passagerare. Tabellen baseras på en rapport om elflyg av Trafikanalys 2020 och en rapport av Trafikverket som undersökte vilka åtgärder som är nödvändiga för att kunna bidra till en tidig introduktion av elflyg 2024. Det finns idag ännu inga elflyplan i Sverige i kommersiell trafik så tabellen visar vilka typer av elektriska flygplan som är under utveckling (Trafikanalys, 2020, s. 41–42). Trafikanalys bedömer dock i en av sina rapporter, som gjorts på uppdrag av regeringen om att ta fram underlag för eldrivna flygplan, att batterielektriska flygplan ligger närmast marknaden i fråga om elflygplanstyp (Trafikanalys, 2020, s. 101).

Tabell 1. Olika typer av elflyplan (Trafikanalys, 2020, s. 42; Trafikverket, 2024, s. 3).

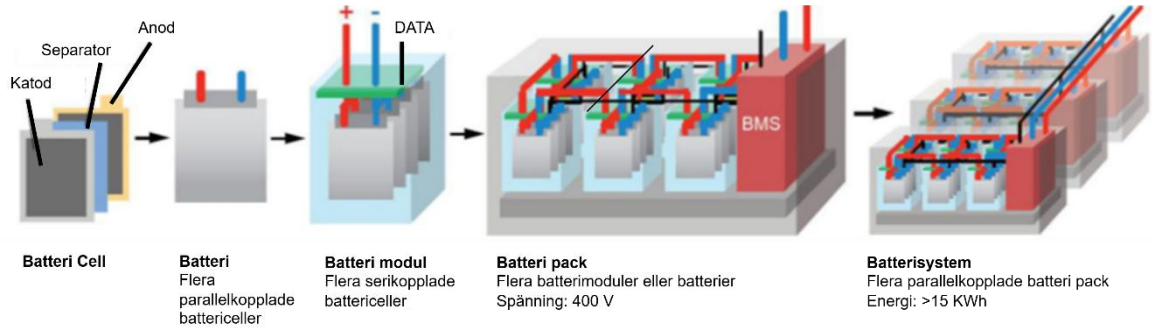
Flyg	**Karaktärsdrag**
Batterielektriskt	Flygplanet har elmotorer som drivs av batterier
Bränslecell	Flygplanets elmotorer drivs av bränsleceller, i vilka vätgas omvandlas till el
Parallellhybrid	Flygplanet har både el- och förbränningsmotor som kan, ensamma eller tillsammans, driva propellrarna
Seriehybrid	Flygplanet har en eller flera elmotorer som drivs av en generator som är kopplad till en turbinmotor och el från bränsleceller eller batterier
Vätgasdrift	Flygplanet drivs med modifierade konventionella motorer men med vätgas som drivmedel istället för traditionellt flygplansbränsle

3.1.1 Elflygplansbatterier

Batteriutveckling för flygplan är än så länge i ett tidigt skede och vilka typer av batterier som kommer finnas i elflygplan i framtiden är osäkert enligt en litteraturstudie av statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) (Salomonsson och Jusslia Hammes, 2020, s. 29). När elflygplan blir aktuella för kommersiellt bruk beror till stor del på batteriutveckling framöver. Batteriutvecklingen drivs framåt av fordonsindustrin som också har ett intresse att elektrifiera sin fordonsflotta. Inom fordonsindustrin är dock hybridösningar ett bra alternativ för att lösa räckviddsproblem, hybridplan förväntas dock bli för tunga på grund av de dubbla bränslesystemen. Det finns pågående projekt för hybridplan men projekt har även lagts ner på grund av vikten som förkortar räckvidden (Trafikanalys, 2020, s. 102).

En viktig faktor i vilken typ av batteri som blir standard för flygplan är batterikapaciteten (Du, Zhang och Yu, 2025, s. 1). Batterikapacitet kan mätas genom batteriets energitäthet som beskriver hur mycket energi som kan lagras per volym eller massa (Salomonsson och Jusslia Hammes, 2020, s. 9). För batterier är det viktigt att skilja på energitäthet på cellnivå och packnivå.

En battericell består av en negativladdad anod, en positivladdad katod samt en elektrolyt som transporterar laddning mellan polerna. Genom elektronvandringen genereras ström (Trafikanalys, 2020, s. 42). Packnivå syftar på när cellerna sätts ihop och inkluderar fler komponenter. Batteripack består förutom av battericeller även av komponenter som gör att energin i cellerna går att använda. Komponenterna kan vara exempelvis styrenheter, elektronik, strömfördelare och kylsystem. Energitätheten på packnivå är därför lägre än på cellnivå (Trafikanalys, 2020, s. 42). I Figur 1 visas hierarkin mellan cell, batteri, modul och batteripack.



Figur 1. Uppbyggnad av ett batterisystem i ett elfordon: från enskilda celler, via batterimoduler och batteripack, till ett komplett batterisystem, modifierad figur från Ghiji m.fl. (2020, s. 5).

Flygfotogen har en energitäthet på 12 400 Wh/kg och om hänsyn tas till verkningsgraden i småturbinmotorer så ligger energitätheten på cirka 3700 Wh/kg (Trafikanalys, 2020, s. 43). Kapaciteten för litiumjonbatterier, som är den dominerade teknologin idag, är betydligt lägre.

På cellnivå är energikapaciteten för litiumbatterier 265 Wh/kg med en utvecklingspotential till 400–550 Wh/kg (Salomonsson och Jusslia Hammes, 2020; Du, Zhang och Yu, 2025, s. 8).

Forskning menar på att litiumjonbatterier är bäst lämpade för elektriska fordon idag då de är flexibla, har hög effekt och energitäthet samt är möjliga att tillverka små och lätta till låga kostnader (Ding m.fl., 2019, s. 2). Andra möjliga alternativ för flygplansbatterier är litium-svavel-, litium-luft- eller solid-state-batterier där kapacitet uppskattas vara högre (Salomonsson och Jusslia Hammes, 2020, s. 9; Trafikanalys, 2020, s. 43). Litium-svavelbatterier uppskattas ha en kapacitet på 800–1250 Wh/kg och litium-luftbatterier ligger högre med en skattning på 1750 Wh/kg (Salomonsson och Jusslia Hammes, 2020, s. 9). I solid-state-batterier har den flytande elektrolyten ersatts med ett fast material eftersom batteriet då klarar högre temperaturer. Solid-state-batterier kan tillverkas med en energidensitet på 400 Wh/kg idag men uppskattas kunna uppnå 750–1002 Wh/kg (Du, Zhang och Yu, 2025, s. 4, 10).

3.1.2 Vätgasbränsleceller

Precis som batterier generar bränsleceller elektrisk energi genom att omvandla kemisk energi (Trafikanalys, 2020, s. 44). Bränsleceller producerar vatten och elektricitet genom att oxidera vätgas i anoden och reducera syre i katoden (Kumar och Gupta, 2025, s. 1). Bränsleceller kan oxidera andra ämnen än vätgas men för flygplan prototyper har valet fallit på vätgas då vätgas är ett energitätämne (Henrich, 2024; Kumar och Gupta, 2025, s. 6; Airbus, u.å.).

Skillnaden mellan batterier och bränsleceller är att batterier konsumerar sina elektroder vid användning. Efter det behöver batterier antingen laddas eller kasseras. Bränsleceller fortsätter producera el under hela sin livslängd så länge de förses med vätgas som bränsle och har tillgång till syre (Trafikanalys, 2020, s. 44). Energiinnehållet per volym för vätgas är lägre jämfört med konventionellt flygplansbränsle och för motsvarande energiinnehåll tar det upp fyra gånger mer utrymme (Trafikanalys, 2020, s. 44).

3.2 Infrastruktur för elflygplan

Med nya typer av flygplan kommer flygplatser behöva förändra sitt utseende och infrastruktur. Hur flygplatser kommer utformas är fortfarande under diskussion men det står tydligt att det kommer krävas unika lösningar för infrastrukturen på enskilda flygplatser (Trafikverket, 2024, s. 3). Både vätgasflyg och batteridrivna flygplan förväntas bli tyngre än konventionella flygplan vilket kommer ställa krav på flygplatsers infrastruktur (Trafikverket, 2024, s. 39; Jiang m.fl., 2025, s. 1269). För batteridrivna flyg vägs det till viss del upp av att elmotorerna förväntas vara lättare än förbränningsmotorer (Trafikverket, 2024, s. 39). Om flygplanen väger över 10 ton så är det dock andra krav på säkerhetskontroller innan avfärd. Det kommer i så fall ställa krav på flygplatsers kompetens, struktur och organisation (Trafikverket, 2024, s. 39).

3.2.1 Laddinfrastruktur

Laddning av elflyg förutses kunna ske på två olika sätt, antingen via fasta eller mobila laddningsstationer (Lundblad m.fl., 2022, s. 78–79). Det första alternativet innebär att elflyget laddas direkt via elnätet genom kabel (Trafikverket, 2024, s. 39). En sådan laddning liknar hur elbilar laddas (Rane m.fl., 2023). Det andra laddningsalternativet är att laddningen sker via mobila batteripack som står på ett fordon (Trafikverket, 2024, s. 39).

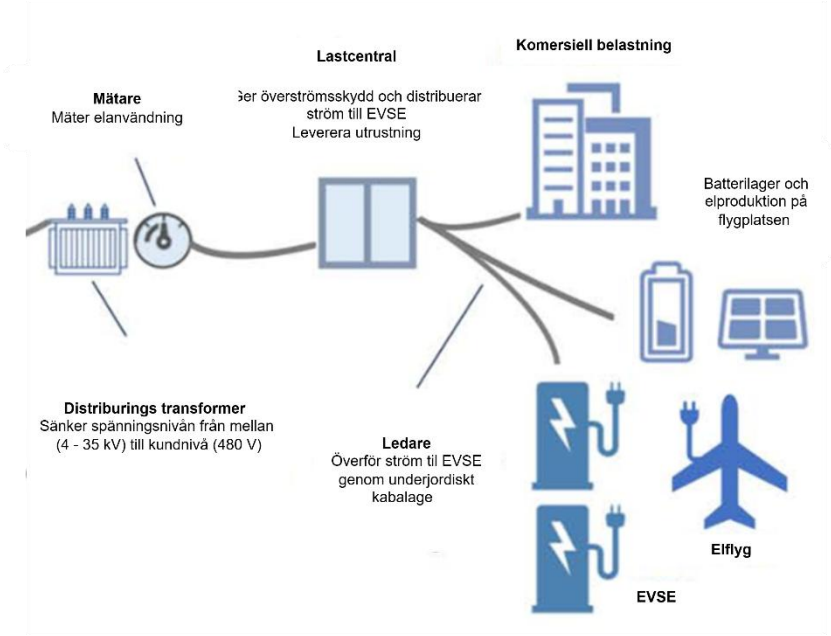
En standardladdare som redan finns ute på marknaden och kan användas på mindre propellerflygplan är Combined Charging System (CCS) (Carey, 2022; Eo.n, 2024). En ny standardladdare är under utveckling som kan ladda med högre effekt som kallas Megawatt Charging System (MCS) (CHARIN, 2025). CCS kan ladda från 11 kW med växelström (AC) och upp till 350 kW med likström (DC) medan MCS är designad för att ladda med en effekt över 1 MW (Rane m.fl., 2023, s. 23; ChargeFinder, 2025).

För elflygplan som kräver en kort vändningstid så undersöks ett tredje alternativ vilket är att byta batteripack i flygplanet men det är osäkert om det är ett alternativ i framtiden (Avinor och Luftfartilsynet, 2020, s. 28; Doctor m.fl., 2022, s. 2). Batterierna är tunga och ställer krav på hantering vilket innebär att en automatisering för detta skulle behövas utvecklas (Smedberg, Norberg och Oja, 2021, s. 17–18).

Eftersom det nästan bara finns utvecklingsprojekt inom elflyg saknas det för närvarande en standard för laddning av elflygplan även om det arbetas mot en Nordisk- eller Nordeuropeisk-standard (Trafikanalys, 2020, s. 52). I Sverige har tre flygplatser installerat laddstationer till elflyg, i dessa fall är laddarna av likadan typ som används för att ladda elbilar, det vill säga CCS. Swedavia, som är en av de största aktörerna inom flygplatsbranschen, angav 2020 att deras strategi för att hantera elflygplan är de tillhandhåller elen på flygplatsen men att flygbolagen själva behöver lösa hur laddningen ska ske (Trafikanalys, 2020, s. 52). I personlig kommunikation med Lisa Larsson, Miljöchef på Swedavias flygplatser på Visby och Ronneby, förklarar Larsson att Swedavia har en plan på hur de kan ta emot elflyg på Arlanda och några av de mindre flygplatserna. Swedavia diskuterar att ha MCS-laddning på plats vid en eller flera flygplatser omkring 2026.

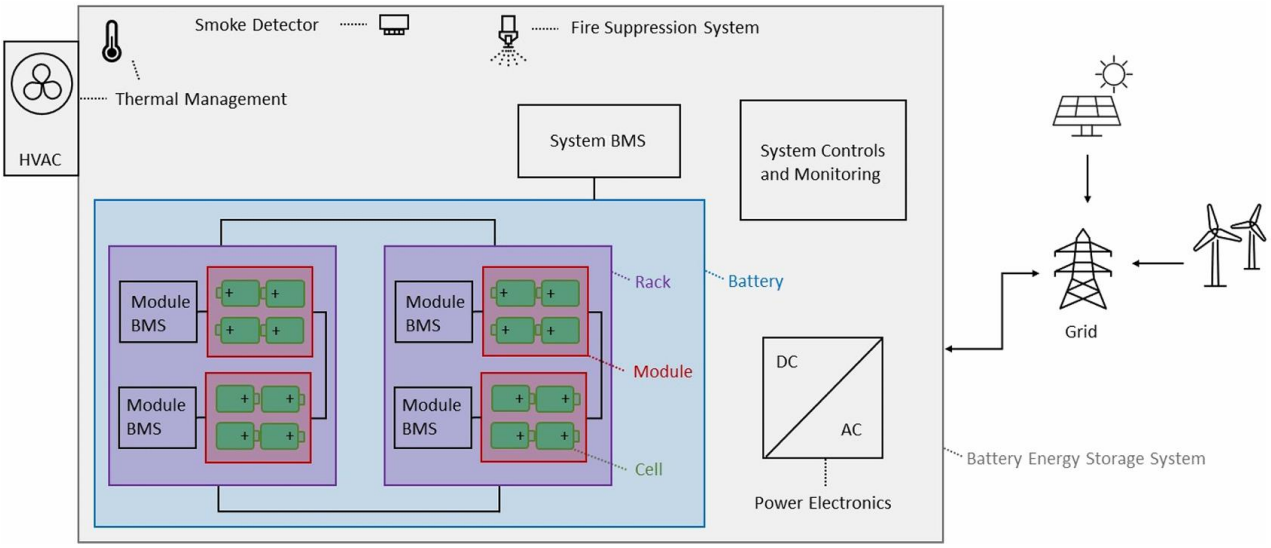
3.2.2 Elförsörjning

För att kunna ladda med MCS eller CCS krävs det att flygplatsen kan leverera tillräckligt med el och effekt för att tillgodose laddningsbehovet. Komponenter för eldistribueringen och elektriska skyddssystem förväntas likna dem som krävs för elfordon. Distribueringssystem för elen på flygplatsen inkluderar komponenter som transformatorer, ledare, samlingsskenor mm. Elektriska skyddssystem inkluderar reläskydd, strömbrytare, säkringar mm. (Rane m.fl., 2023, s. 2). En generell översikt av flygplatsers elektriska distribueringssystem visas i Figur 2.



Figur 2. Översikt av flygplatsers elektriska distribueringssystem, från transformatorn till laddning av elflygplan. Bilden är inspirerad av Rane m.fl. (2023, s. 3)

En lösning på effekt- och elbehovet är ett energilager med batterier, BESS, på flygplatsen som kan laddas upp när efterfrågan är låg (Trafikanalys, 2020, s. 52). De grundläggande komponenterna i BESS är de elektrokemiska celler som bygger upp modulerna. Flera moduler utgör i sin tur batterielagret. Utöver det så finns det ett system som kontrollerar laddning och urladdning, Battery Management System (BMS). BMS varierar i komplexitet men har en viktig roll i att upptäcka avvikelser i cellerna (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2730). Temperatur och ventilation kontrolleras i sin tur av ett separat system, Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC). För att ladda batterier med BESS används AC/DC inverterare och BESS laddas med DC (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2725). De vanligaste batterierna som används till BESS för elfordon är idag litiumjonbatterier (Trafikanalys, 2020, s. 52). Komponenterna i ett BESS visas översiktligt i Figur 3.



Figur 3. Visar en översikt av BESS komponenter, bild av Jeevarajan m.fl. (2022, s. 2725).

En möjlighet är även att ha solceller som generar el vid behov (Grön Flygplats, u.å.). Exempelvis har Northvolt utvecklat ett mobilt batteri som kan användas i kombination med solceller för att balansera användning och lagring av energi (Trafikverket, 2024, s. 43) Forskare ser även att flygplatser skulle kunna utvecklas, utöka sin verksamhet och ha egen elproduktion, bli energinav (Daniels och Eek, 2024).. På sikt kan de då även bli transporthubbar där även markgående trafik stannar för att ladda med överskottsenergin som produceras (Torstensson och Larsson, 2022, s. 17).

3.2.3 Vätgasinfrastruktur

Det finns idag ingen flygplats som har infrastruktur för att kunna tanka flygplan med vätgas. Det är ett antal aktörer, Airbus, Vattenfall, Swedavia, Avinor och SAS, som gått ihop för att undersöka hur vätgas ska hanteras på flygplatser (SAS, 2024). Målet med projektet är att undersöka vilka regleringskrav som finns, vilka infrastrukturbehov som existerar och logistiken kring tankning av flygplanen (SAS, 2024). En tidig prognos från Trafikverket av vad som krävs är; lagring av vätgas, utrustning för förvätskning och egen vätgasproduktion eller frakt av vätgas till flygplatsen (Trafikverket, 2024, s. 39–40).

Själva logistiken kring leveransen av vätgasen är svår, vätgas är explosivt och flyktigt vilket gör lagring och transport komplicerad. Det är tveksamt om leveranser med tankbilar är möjligt, framförallt för större flygplatser. En lösning är att ha rörledningar som levererar gasen men det skulle kräva enorma mängder energi. Problemen minskar om vätgasen är i flytandeform i stället för i gasform då det väger mer. För att frakta flytande vätgas behöver tankarna vara kylda och trycksatta då vätgas avdunstar vid -253 °C vid atmosfärtryck (Trafikverket, 2024, s. 40). Det övervägs därför om flygplatserna kan ha egen produktion av vätgas då de skulle undvika kostnader för frakt och distribution. En egen lokal produktion

skulle kräva tillgång till el och stora ytor för produktionsanläggning, kompression och lager (Trafikverket, 2024, s. 40).

Förvaringen på flygplatser kan ske antingen i komprimerad gasform, flytande form eller kemiska föreningar (Gu m.fl., 2023, s. 6; Jiang m.fl., 2025, s. 1269). Lagring av vätgas i gasform kräver enligt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) högt tryck och då molekylerna är små och flyktiga och därför kan, lättare än många andra gaser, läcka igenom material (MSB, 2024). En andra anledning att komprimera gasen är på grund av dess låg energidensitet. Desto högre tryck desto mindre volym tar lagringen. Men även under högt tryck (700–800 bar) har vätgas en låg energidensitet (Jiang m.fl., 2025, s. 1270).

Viss forskning menar på att det är säkrare att förvara det i flytande form än gasform eftersom vätskan är mer svår antändlig vid läckor (Jiang m.fl., 2025, s. 1270). Lagring av flytande vätgas skulle i så fall ske i kryogena tankar som har den dubbla kapaciteten jämfört med komprimerad vätgas. (Sankir och Demirci Sankir, 2018). Själva tankarna är utformade så att de har ett vakuumlager för att ge ett extra skydd om en olycka sker (Jiang m.fl., 2025, s. 1269). Oavsett aggregationstillstånd kommer det krävas stora lagringsytor och tankgårdar för att lagra vätgas (Trafikverket, 2024, s. 40).

Potentiellt kommer även nya terminaler behövas byggas. Vätgasflyg förutspås bli längre än dagens konventionella flyg och i så fall inte rymmas på rutorna avsedda för flygplan idag (Gu m.fl., 2023, s. 7).

3.2.4 Vätgas tankning

Själva tankningen av vätgas till framtida flygplan skulle ge antingen genom lastbilar eller tankposter och även om flygplatser idag inte har den tekniken finns den tillgänglig (Gu m.fl., 2023, s. 7). Tankning med vätgas kommer se annorlunda ut från tankning med flygbränsle då flytande vätgas behöver hållas extremt kallt och under högt tryck. Flytande vätgas dunstar vid temperaturer runt -253 °C vid atmosfärstryck och för superkritisk vätgas kan den temperaturen höjas till -173 °C. Alla tankar och rörledningar kommer därför behöva ha ett betydligt högre tryck än de för flygbränsle (Gu m.fl., 2023, s. 8). Delarna vid takningen behöver vara kylda exempelvis kommer rörledningarna behöva ha en dubbelbarriär och vara vakuumisolerade. För resterande delar räcker en barriär (Kikukawa, Mitsuhashi och Miyake, 2009, s. 1137).

Säkerhetszonerna kommer behöva vara betydligt större kring vätgasflygplan och bränslecellsplan än konventionella flygplan. Säkerhetszonen vid tankning av konventionellt flygbränsle sträcker sig med en 3 m radie från flygplanets bränsletank (Gu m.fl., 2023, s. 9). Hur stor säkerhetszonen för flyg som tankas med vätgas behöver vara beror på hur regelverket utformas, uppskattningar har en stor bredd och visar från 8–20 meter till 30–60 meter (Braun och Classen, 2023, s. 89; Gu m.fl., 2023, s. 9). Säkerhetszoner innebär bland annat att inga tändkällor får befinnas sig inom avsatt område (Gu m.fl., 2023, s. 9).

3.3 Risker med infrastruktur för elflygplan

Risker som medföljer att introducera elflygplan på svenska flygplatser kommer variera utifrån deras utformning och läge i landet. Faktorer som påverkar är vilken typ av elflygplan de tar emot, utsatthet för väder och vind samt kompetens bland inblandad personal (Rane m.fl., 2023, s. 11). En fara är att det på flygplatsen kommer blandas många olika drivmedel och det finns en risk att batterier, vätgas eller annan laddningssinfrastukturen fattar eld. Potentiellt kan en sådana olyckor få allvarliga konsekvenser om det finns annat lättantändligt bränsle i närheten (Rane m.fl., 2023, s. 10). Att ha tre olika typer av drivmedel ökar också komplexiteten på hela flygplatsverksamheten och öppnar upp för nya typer av risker (Braun och Classen, 2023, s. 87).

3.3.1 Risker med eldistribuering och laddning

Det finns ännu inga lagar som reglerar hur flygplan ska laddas men batterihantering och laddning är inte riskfritt (Trafikanalys, 2020, s. 24). Laddningsplatserna för elflyg kan behöva vara inom ett särskilt område där laddningen kan ske säkert vilket ställer krav på hur terminalerna är utformade (Trafikverket, 2024, s. 39).

Vilka risker som finns vid laddning och magnituden av dem beror delvis på vilken typ av laddare det är och vilken effekt som är aktuell. I många laddningssystem finns DC snabbladdnings komponenter (exempelvis inverterare och DC bus) och om dessa används utanför deras avsedda driftförhållanden eller skadas kan det få allvarliga konsekvenser. Skador på laddningsutrustning kan orsaka elektriska stötar, ljusbågar, bränder eller att laddningssystemet blir överbelastat. Även slitage av användning eller väder och vind kan skada utrustningen och öka risken för elektriska överslag eller kortslutning (Rane m.fl., 2023, s. 8).

En av osäkerheterna som finns är kring de elektriska magnetfält som genereras vid laddning av batterier. När batterier laddas bildas stora magnetfält och det finns en oro för Elektromagnetisk störning (EMI) vilket framkommer i en intervju med Stefan Niska, elsäkerhetsexpert på Trafikverket som utfördes i sammanband med Trafikverkets rapport 2024 om elflyg. Oron är att magnetfälten skulle kunna störa ut annat som ligger nära flygplatsen. Exempelvis skulle radarsystem eller magnetröntgen kunna påverkas (Trafikverket, 2024, s. 44).

För det elektriska distribueringssystem finns flertalet risker. Risken finns att elektriska faror som ljusbågar, gnistor eller kortslutning uppstår. Det finns även en risk att systemet överbelastas. Hanteras utrustningen fel ökar risken för olyckor och skador, vilka kan få allvarliga konsekvenser (Rane m.fl., 2023, s. 8). Exempelvis kan interna och externa fel på transformatorer leda till strömavbrott för stora delar av flygplatsen och tas inte rätt åtgärder kan transformatorn börja brinna (Rane m.fl., 2023, s. 8). Det finns även risker med att lastprofilen på transformatorn ser annorlunda ut från vad som återfinns idag antigen laddas elflygen med maximal effekt eller så laddas elflygen inte och då tas ingen effekt alls ut. Det

innebär att de termiska cyklerna kommer vara stora och transformatorn kommer slitas av de termiska känningarna (Backman, 2025).

3.3.2 Risker med batterier

Risker med batterier kan delas in i tre kategorier, elektriska, kemiska och användningsmiljö, deras magnitud varierar beroende på storleken på system (Rane m.fl., 2023, s. 9). I den här studien gås främst riskerna med litiumjonbatterier igenom eftersom det är det den dominerande tekniken i BESS och för flygplansbatterier.

De vanligaste elektriska olyckorna med litiumjonbatterier är över urladdning/laddning samt externa och interna kortslutningar (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2726). Över urladdning/laddning och mekaniska skador kan leda till en av de primära riskerna med batterier, *termisk rusning* (Ghiji m.fl., 2020, s. 6). Termisk rusning innebär en okontrollerad frigörelse av battericellernas energi och orsakar bränder som är nästintill omöjliga att släcka (Elsäkerhetsverket, 2022). Litiumjonbatterier har, tillskillnad från vissa andra batterier, en elektrolyt som är av ett brandfarligt organiskt ämne vilket innebär en risk om batteriet får termisk rusning (Ghiji m.fl., 2020, s. 1). Exempelvis kan solid-state batterier potentiellt vara säkrare när det gäller termisk rusning då elektrolyten är mindre brandfarlig eftersom den är fast istället för flytande form (Yu m.fl., 2023).

Litiumjonbatterier är effektiva och vanliga energilagringsenheter, men deras funktion är starkt beroende av att de används inom tillverkarens tekniska specifikationer. Om batterierna laddas, urladdas eller används i miljöer som avviker från rekommenderade temperaturintervall kan elektrolyten – som är mycket brandfarlig – bli instabil (Rane m.fl., 2023, s. 9). Detta kan i sin tur leda till att batteriet sväller, överhettas eller i värsta fall börjar brinna (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2726–2729).

Temperatur spelar en avgörande roll för batteriets säkerhet och livslängd. Både höga och låga temperaturer påverkar elektrolytens stabilitet negativt, vilket kan orsaka interna kemiska reaktioner och försämra batteriets prestanda (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2729). När elektrolyten blir instabil ökar risken för kortslutningar inuti batteriet, något som kan skada de elektriska ledarna som är kopplade till battericellerna. En annan kritisk aspekt är risken för överladdning eller djup urladdning. Sådana tillstånd kan leda till att metalliska strukturer, så kallade dendriter, börjar växa inuti batteriet (Rane m.fl., 2023, s. 9). Dessa kan tränga genom separatorn mellan anod och katod och orsaka en intern kortslutning, vilket i sin tur kan utlösa en termisk rusning (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2726–2729)

Det är också viktigt att notera att battericeller är mer känsliga för överladdning än batterimoduler, eftersom battericellerna i regel saknar inbyggda skyddssystem mot sådana tillstånd (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2726). Därför är det avgörande att systemen som övervakar batteriets laddningsstatus är pålitliga och att användningen av batteriet anpassas till dess specifikationer för att minimera säkerhetsrisker (Rane m.fl., 2023, s. 9).

Mekaniska skador[1] på batterier kan göra elektroderna instabila eller skada de olika skikten i batteriet vilket kan leda till intern kortslutning. Externa kortslutningar kan istället orsakas av hög eller låg impedans i batteriet (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2727). Kortslutning kan leda till att läckor av elektrolyter och termisk rusning som i sin tur kan orsaka att giftiga gaser läcker ut, bränder och explosioner (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2729).

3.3.3 Risker med vätgas

För att förstå riskerna med vätgasinfrastruktur behövs en förståelse för vätgasens egenskaper och vilka faror som finns med vätgas som ämne. Vätgas är en brandfarlig gas som brinner med en het och ofta osynlig låga. Det som gör gasen brandfarlig är att den har ett högt energiinnehåll per viktenhet, en låg antändningsenergi och ett stort brännbarhetsområde (MSB, 2024). Gasen omfattas därför av lagen om brandfarliga och explosiva varor (LBE 2010:1011). Eftersom gasen har en låg antändningsenergi kan den antända om det bildas gnistor eller uppstår statisk elektricitet. Vätgas kan även bli explosivt under särskilda förhållanden om det blandas med luft och det finns en tändkälla (Jiang m.fl., 2025, s. 1272–1273). Gasen är lätt och om den läcker så evaporerar den snabbt, dess antändningstid är därför kort (Vätgas Sverige, u.å.). Det är dock endast en fördel utomhus där gasen kan spridas, inomhus innebär det istället att vätgasen riskerar att samlas nära taket (Runefors, 2023, s. 5). Dessa egenskaper utgör en risk i all hantering av vätgas.

Ett farligt fenomen vid hantering av både flytande vätgas och vätgas är väteförsprödning. Fenomenet innebär att material som är i kontakt med väte blir svagare och sprött då vätet tränger i metallen och orsakar sprickor. Väteförsprödning är en risk vid lagring och tankning av både flytande vätgas och vätgas som kan leda till vätgasläckor (Jiang m.fl., 2025, s. 1269–1270).

I studie av Hoseyni, Mesbah Mostafa och Cordiner (2024) om att förmildra risker inom vätgasdriven transport har oavsiktliga vätgasutsläpp pekats ut som en risk för tankstationer för markfordon. Utsläppen kan leda till eldsvådor och explosioner som kan orsaka stor skada. Utsläppen kan orsakas av bland annat korrosion av vätgastanken, blockerat utlopp i slangen, ett fel i trycksäkerhetsanordningarna eller en olycka som påverkar integriteten hos systemet (Hoseyni, Mesbah Mostafa och Cordiner, 2024, s. 1032). Även det höga lagringstrycken och reaktiviteten vätgas har som utpekats som en fara vid en tankruptur kan kombinationen orsaka en tryckvåg (Runefors, 2023, s. 6).

En oro som finns är att mänskliga fel kan orsaka skada, det finns en risk att kompetens hos operatörer och mekaniker är bristande som servar eller bygger tankstationerna. Hoseyni, Mesbah Mostafa och Cordiner (2024 s. 1029–1030) menar även på att forskningen är bristande och det inte finns tillräckligt bra underlag för att ordentliga riskbedömningar ska kunna utföras.

[1] Med mekaniska skador menas trauman som är orsakade av en yttre omständighet, exempelvis att påkörda batterier kan bli buckliga eller ihoptryckta.

3.3.4 Risker med flytande vätgas

Flytande vätgas behöver förvaras kallt och den låga temperaturen för med sig risker. Vid tankning av flytande vätgas är trasiga ventiler och slangar en stor risk eftersom vätgasläckor är en fara för utrustning och människor. Läckor av flytande vätgas kan leda till kryogena brännskador (brännskador som orsakas av extremt kalla ämnen) vilket kan skada både människor och utrustning (Jiang m.fl., 2025, s. 1268). Läckor av flytande vätgas kan även orsaka explosioner då flytande vätgas kan förångas och explodera när det kommer i kontakt med syre (Kikukawa, Mitsuhashi och Miyake, 2009, s. 1136–1137).

Vid lagring av flytande vätgas är det viktigt att temperaturen hålls, extern värmetillförsel kan få trycket i tanken att öka till farliga nivåer. Flytande vätgas lagras vid en aning högre tryck än atmosfärstrycket och om fluiden värms upp börjar den koka och bygga upp ett tanktryck (Svensson, Oliveira och Grönstedt, 2024, s. 654). Flytande vätgas kan även kondensera syre och spontanantända om det kommer i kontakt med vatten (Runefors, 2023, s. 6).

Om ett litet hål uppstår i tankar eller rörledningar med flytande vätgas som har vakuumisolerade lager beror händelseförloppet på om det uppstår i den första barriären eller andra. Ett hål i den yttersta väggen innebär att luft kan läcka in i behållaren och värma upp den flytande vätgasen så den förångades. Varpå trycket inuti röret/tanken ökar och vätgasen släpps ut genom en säkerhetsventil. Om ett hål i stället uppstår i den innersta väggen så läcker flytande vätgas ut i vakuumutrymmet och förångas. Det höjer trycket på tanken och vätgas släpps ut genom en ventil för vakuumet. Om vätgasen är flytande så kan det orsaka köldskador och om gasen inte antänds utgör den en kvävningsrisk då gasen tränger undan syre (Kikukawa, Mitsuhashi och Miyake, 2009, s. 1136–1137).

3.3.5 Risker med vinterförhållanden

Några av flygplatserna som är aktuella för elflygplan ligger norrut i Sverige och i norra Sverige finns en hel del snö. Ett kallt och hårt klimat sliter mer på infrastrukturen och vissa batterilager bör inte användas i lägre temperaturer. Snöröjningen menar Rane m.fl. (2023, s. 5–6) utgör en risk för känslig infrastruktur som laddningsinfrastruktur. Om plogbilar råkar skada utrustning som transformatorer, laddningsutrustning eller batterier kan det orsaka elektrolytläckor, kortslutning eller elchocker. Vid omkonstruktionen av flygplatsen bör det tas hänsyn till att snöröjningen inte alltid sker i bra siktförhållanden och hjälpmedel för föraren bör installeras på infrastrukturen (Rane m.fl., 2023, s. 7).

3.4 Erfarenhet, kunskap och kompetens

Erfarenhet, kunskap och kompetens är faktorer som påverkar utfallet av olyckor. Människor kan vara orsaken till olyckor och det behövs skyddsmekanismer för minska konsekvenserna av misstag. Kunnig personal kan också medverka till att olyckor minskar och om de inträffar, till att konsekvenserna av dem förmildras.

Att införa en ny typ av drivmedel kommer innebära nya utmaningar och risker för flygplatser. Flygplatspersonal är vana och erfarna att hantera risker med flygbränslen men varken flygplatser eller certifieringsmyndigheter har samma kunskapsbas om batterier eller vätgas (Trafikanalys, 2020, s. 43–44). Miljön kommer bli mer komplex och risken för misstag kommer öka när de nya drivmedlen interageras (Braun och Classen, 2023, s. 87).

Det är därför vitalt att anställda får rätt träning och att den hålls uppdaterad när systemen förändras (Gu m.fl., 2023, s. 9; Rane m.fl., 2023, s. 6). Även om det inte finns någon erfarenhet av vätgas i flygindustrin så är den större i industrin. Där finns det mycket kompetens att hämta då många industrier har arbetat med vätgas länge (Trafikverket, 2024, s. 41).

3.5 Säkerhetsåtgärder

3.5.1 Batterier

För laddningen och användande av ett BESS ska kunna ske säkert behövs skyddsåtgärder på flera nivåer, från batteriernas cellnivå till hela systemet (Ghiji m.fl., 2020, s. 19). Det krävs även att beredskaps finns om en olycka sker. Eftersom termisk rusning och bränder i batterier är en av de allvarligaste och vanligaste riskerna behöver det finnas effektiv släckningsutrustning om en sådan brand skulle uppstå. Släckningsmedel för litiumjonbatteribränder är vatten, CO2, skum, sand, kvävgas eller andra typer av kemiska pulversläckare men mer forskning krävs för att bestämma vilken typ av släckningsmedel som är mest effektivt (Ghiji m.fl., 2020, s. 12).

Laddare för både flygplansbatterierna och BESS bör vara av hög kvalitet och vara anpassade för batteriet (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2727). Skyddsmekanismerna installerade i batterier för att motverka externa kortslutningar bör testas. Det är viktigt att batterierna kontrolleras under tillverkning för att minimera defekta batterier, då det skulle minska risken för intern kortslutning. Trots det bör användare kontrollera batterierna själva för att hindra att celler av dålig kvalité installeras i BESS (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2728). Ventilation anpassade för batterier är också nödvändigt. Batteriers livslängd beror på deras användning och kvalité men hänsyn bör tas till batteriets ålder då det påverkar elektrolyterna. En annan viktig säkerhetsåtgärd är att de ska vara möjligt att bevaka och upptäcka avvikande förhållanden i batteriet på distans för att kunna upptäcka defekter i tid. Det bör forskas vidare på vilka risker som finns med stora stationära BESS då nuvarande forskning främst fokuserad på mindre BESS eller enskilda celler (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2730).

Kortslutningar i batterier orsakade av hög impedans kan minimeras igenom att ha en lämplig design. Kortslutningar orsakade av låg impedans inträffar när batteriet har en resistans som är lika eller mindre än den interna resistansen av komponenten och kan minimeras med inbyggda säkringar (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2727).

BESS behöver en HVAC som bibehåller en bra termisk miljö, det ökar dessutom batteriets livslängd. En HVAC är ännu viktigare i miljöer där extremväder[2] finns och där klimatet varierar (Jeevarajan m.fl., 2022, s. 2729). Utöver det behöver är det viktigt att BESS får kontinuerligt underhåll och att status av batterierna bevakas för att minimera sannolikheten för felfunktioner (Rane m.fl., 2023, s. 9).

3.5.2 Säkerhetsåtgärder eldistribuering

Eldistribuering utformas väsentligen som i industrin där det finns skydd för felfall och effekttillförsel. Elsystem på flygplatsen behöver ha skyddssystem installerade som uppdateras när systemet växer. En viktig säkerhetsåtgärd är att elfel kan isoleras så de inte påverkar andra delar av systemet. All elektriskskyddsutrustning som reläskydd, säkringar, strömbrytare och återanslutningar behöver regelbundet inspekteras och bytas vid behov för att minska fel utigenom systemet (Rane m.fl., 2023, s. 13).

3.5.3 Säkerhetsåtgärder vätgas

För vätgas kan säkerhetsåtgärderna delas upp i tre delar, förbyggning, upptäckt och begränsning. Förvaring ska ske i lämpliga behållare för att förhindra väteförsprödning. Materialval är viktigt, insidan av tankarna ska vara ytbehandlade för att hindra vätet att tränga in (Runefors, 2023, s. 8; Jiang m.fl., 2025, s. 1269). Det går dessutom att designa strukturen för materialet på ett sätt som effektiv hindrar väteförsprödning. Det behöver finnas bevakningssystem och sensorer som larmar om det läcker vätgas och om trycket eller temperaturen förändras. Sensorerna och bevakningen behövs både vid förvaringen och längs rören (Du, Zhang och Yu, 2025, s. 1139–1140; Jiang m.fl., 2025, s. 1269).

Vätgasen bör även förvaras så att det inte är möjligt att en kedjereaktion startas om det sker en explosion och förvaringsutrymmet bör vara utrustad med lämplig brandskyddutrustning (Jiang m.fl., 2025, s. 1269). Ventilation ska hindra att vätgasen samlas i på farliga platser vid små läckor (Runefors, 2023, s. 12). En lämplig skyddsåtgärd vid tankstationer är att bygga en invallning/mur runt tankarna som ett fysiskt skydd. Personalen bör behöva certifieras för att få hantera dessa system i vätgashantering (Jiang m.fl., 2025, s. 1275). Utrustningen bör även genomgå regelbunden inspektion. Med det sagt kan vi idag designa säker förvaring av vätgas och det finns vätgastankstationer för bilar som är godkända runt om i världen (Jiang m.fl., 2025, s. 1275–1276).

3.6 Regelverk för elflygplan

För att få driva en operativ flygplats i Sverige ska regelverk från Transportstyrelsen och Europeiska unionens byrå för luftfartssäkerhet (EASA) följas. Tillstånd för att få ha en flygplats med kommersielltrafik behöver sökas och godkännas av Transportstyrelsen. Det sker

[2] Med extremväder menas väder som skiljer sig mycket emot vad platsen normalt har för väder. Ofta rör det sig om stora temperaturförändringar, torka, stormar eller översvämningar som brukar få stora konsekvenser för samhällen och miljön (WWF, u.å.).

antingen genom att följa Transportstyrelsens föreskrift och allmänna råd om godkännande av flygplats (TSFS 2019:18) eller Europeiska kommissionens förordning (EU) 139/2014 om krav och administrativa rutiner för flygplatser. Det finns även regelverk för att få fortsätta driva flygplatsen då den måste vara adekvat för transport av människor och gods (Trafikanalys, 2020, s. 24).

Det ställs också krav på flygplatser riskhantering i Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhetsledning av godkänd flygplats (TSFS 2019:20). Enligt 4§ TSFS 2019:20 ska felfunktioner och deras konsekvenser minimeras på en flygplats. Vidare ska det även finnas en process som *"säkerställer att riskkällor förenade med flygverksamheten identifieras"* enligt 9 § TSFS 2019:20. Befintliga system, ändringar i system och nya system ska analyseras och värderas med avseende på risker kopplade till identifierade riskkällor. Mest relevant för flygplatser som ska installera nya system är att innan nya system sätts i drift eller system ersätts ska en säkerhetsbevisning redovisas för Transportstyrelsen för de system som finns med i certifikatet. Säkerhetsbevisningen ska innehålla ett utlåtande om att flygplatsens säkerhetsstandard är uppfylld (10 § TSFS 2019:20).

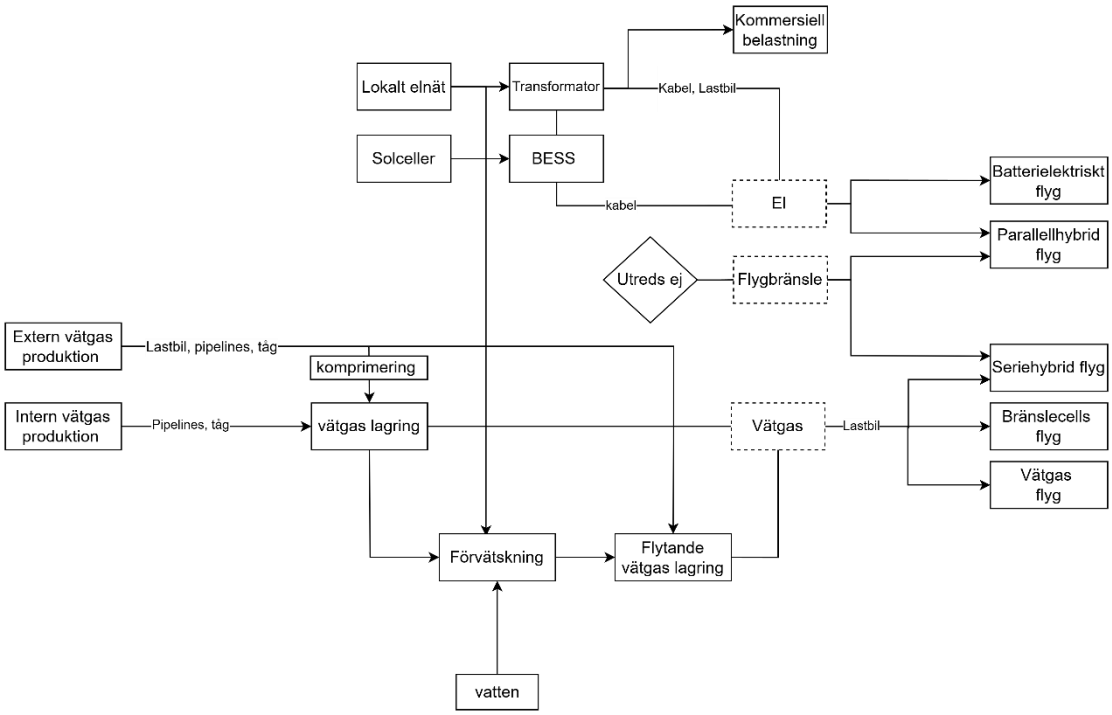
Det saknas idag ett uppdaterat regelverk som visar på hur säkerheten kring elflygplan ska hanteras. Det förväntas att EASA i sin regelutveckling av European Plan for Aviation Safety (EPAS) 2026 inkluderar regler specifikt för elflyg (Lundblad m.fl., 2022, s. 80). Även regelverk för hur batterier ska hanteras på flygplatser med avseende på bränder och räddning saknas. Samt hur risker kopplade till de elektromagnetiska fält som genereras av batterierna ska regleras (Trafikverket, 2024, s. 82–83).

Det finns regelverk som reglerar att det ska finnas räddningstjänst på flygplatser och hur den ska vara utformad. Enligt Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om beredskap för räddningsinsatser samt räddningstjänst på flygplats (TSFS 2019:25) behöver flygplatser ha en räddningstjänst. Räddningstjänsten ska vara anpassade efter flygplatsens verksamhet och de kommer behöva utvecklas för att kunna hantera riskerna med elflyg. Nya angreppsmetoder, ny hantering av släckmedel och utbildning är några av sakerna som kommer krävas (Trafikverket, 2024, s. 39). Det behöver även kontrolleras att rätt utrustning finns för insatser med olyckor som rör både vätgas och batterier (Trafikverket, 2024, s. 41).

4. Flygplatsprognos

I det här avsnittet förklaras flygplatsinfrastrukturen som krävs för elflygplan. Succesivt byggs tre scenarion upp om hur en hypotetisk flygplats kan se ut år 2035 för att kunna ta emot elflygplan. Tyngdpunkten låg på att scenariona skulle vara nåbara och majoriteten av komponenterna skulle vara tillgängliga i nutid, prognosen kan därför ses som konservativ.

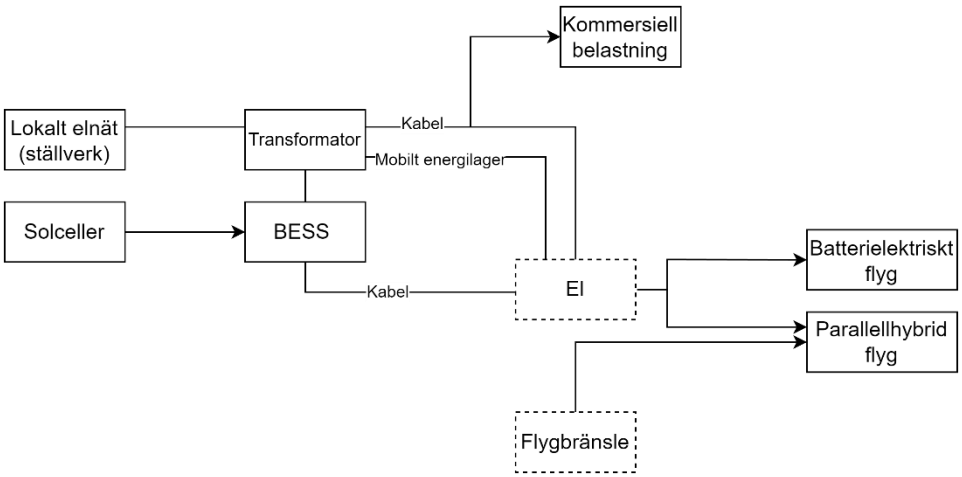
För att systematiskt kunna utreda säkerhetsrisker och riskreducerande åtgärder relaterade till flygplatsinfrastruktur för elektriska flygplan utformades en prognos för framtidens elflygplatser. Tidshorisonten valdes till tio år vilket innebär prognosen syftade till att beskriva en flygplats som tar emot elflyg år 2035. Prognosen grundades på den bakomliggande litteraturstudien, en intervju med Henrik Littorin[3] som är med och utvecklar en testbädd för elektriska flygplan på Skellefteå flygplats samt information från flygplansbranschen. Information hämtades även från närliggande transportsektorer som befann sig längre fram i sin elektrifiering vid tidpunkten för prognosen. Exempelvis var teknologins mognadsgrad högre i lastbilsbranschen där ellastbilar redan fanns ute på marknaden för kommersiell användning (Scania, 2025a; Volvo, 2025). I Figur 4 visas ett blockdiagram över den huvudsakliga infrastrukturen som krävs för att tillgodose elflygplans laddningsbehov.



Figur 4. Blockdiagram över flygplatsinfrastrukturen som behövs för elflyg. Diagrammet visar hur elflyg kan tankas eller laddas och vilken infrastruktur som krävs för de samt hur elen respektive vätgas transporteras inom flygplatsen.

[3] Frågorna till intervjun med Henrik Littorin finns i bilaga A och intervju upplägget beskrivs även under metodavsnittet.

Efter vidare undersökning av seriehybridflyg, bränslecellsflyg och vätgasflyg, som alla drivs av vätgas, framkom det att informationen som fanns tillgänglig om dessa var knapphändig. Vätgasdrivna flyg låg inte lika nära marknaden som elflyg, teknikens mognadsgrad (Technology Readiness Levels, TRL[4]) bedömde jag befann sig mellan TRL-nivåerna 2–4. Vilket kan jämföras med elflygplan som bedömdes vara på en TRL nivå 6 eller högre. Eftersom vätgasdrivna flyg befann sig tidigt i sin tekniska utveckling var även infrastuktursplaneringen för vätgasflyg outvecklad. Det bedömdes då inte vara möjligt att analysera riskerna med infrastrukturen på ett lämpligt sätt inom ramarna för detta arbete och vätgasdrivna flyg uteslöts från scenariona. Systemet omdefinierades till att innefatta infrastrukturen som visas i Figur 5.



Figur 5. Blockdiagram över flygplatsinfrastrukturen som krävs för elflyg som kan vara på plats om tio år. Bilden visar en framtidsprognos för flygplatser med laddinfrastruktur för elflyg år 2035, modellerad utifrån att passa en svensk medelstor flygplats.

4.1 El- och effektkapacitet

Två centrala designparameterar för flygplatsutformningen var vilken el- och effektkapacitet elflygplan maximalt kommer kräva under en dag. För att beräkna det krävdes två nyckelvariablar: det maximala antalet elflygplan som laddas under en dag och maximala antalet elflygplan som behöver kunna laddas parallellt. Utöver det behövdes även tekniska specifikationer om laddare och flygplansbatterier uppskattas.

För att kunna göra dessa uträkningar behövdes följande förenklingar och antagande tas;

- Samtliga elflyg (både hybridflygplan och batterielektriska flygplan) kommer ha samma typ av batteri och laddas på liknande sätt.

[4] TRL är en skala på en viss tekniks mognadsgrad, man graderar tekniken från 1–9 där TRL-nivå 9 innebär att tekniken är implementerad och beprövat i den avsedda miljö och TRL-nivå 1 innebär att de endast utförts basforskning (KTH, u.å.).

- Elflyg kommer trafikera inrikeslinjer och ersätta regionala flygsträckor då deras räckvidd är kortare än konventionella flygplan (Alfredsson m.fl., 2022, s. 12–15).
- I samtliga beräkningar har spänningsbortfall inte tagits hänsyn till.

4.1.1 Trafik på en medelstor svensk flygplats

För att uppskatta hur många elflyg som ska kunna laddas per dag användes flygtrafikstatistik från Transportstyrelsen (2025). Relevant för uppskattningen var antalet inrikes landningar per år eftersom elflyg initialt förväntas dominera inom regional flygtrafik. Endast flygplatser som låg inom ett intervall mellan 1000–5000 inrikes landningar per år inkluderades i uträkningen. Detta då syftet med uppskattningen var att räkna ut behovet för en regional svensk flygplats och små och stora flygplatser exkluderades [5]. Medelvärdet för antalet inrikes landningar för en flygplats var 6,3 flyg per dygn.

Medelvärdet för antalet inrikes landningar användes som ett riktmärke för att uppskatta hur många flyg som maximalt behöver laddas per dag. Då antalet flyg varierar beroende på om det är hög- eller lågsäsong antogs det att dubbelt så många flyg landar under en högsäsongsdag. Maximala antal flyg per dag blir då $6{,}3 \cdot 2 = 12{,}6 \approx 13\ st$. Det innebar att 13 elflyg ska kunna bli fulladdade under en dag. Ett ytterligare krav som ställdes i modellering var även att de ska kunna laddas under dagen, det vill säga mellan under en tidsperiod av 12 timmar.

4.1.2 Flygplansbatterier

Flygplansbatterierna antogs vara litiumjonbatterier. Antagande byggde på att det är det mest marknadsnära batteriet idag och batteriteknologin som kommer vara aktuell för kommersiella flyg år 2035 redan bör vara välutvecklad idag. Litiumjonbatterier finns implementerade i mindre privata flygplan idag och är den nuvarande tekniken i ellastbilar (Airbus, 2022; Littorin, 2025; Scania, 2025b).

Vilken batterikapacitet elflygplan kommer ha är ännu oklart, prognoserna som finns tillgängliga är sprida och varierar mellan cirka 500–3000 kWh (RISE, 2024, s. 14). De första elflygplansprojekten har inte varit så stora, exempelvis används på Skellefteå flygplats små elflygplan med en kapacitet på cirka 20 kWh (Littorin, 2025). Vidare har Airbus utvecklat större flygprototyper som har en batterikapacitet på 350 kWh (Airbus, 2022).

I denna studie antogs det att batterikapaciteten kommer ligga på 800 kWh per flygplan. Värdet baserades på räckvidden som behövs för inrikesflyg och är värdet Alfredsson m.fl. (2022) uppskattade i *Infrastrukturmodellering för storskalig introduktion av elflyg och flygtrafikledning (MODELflyg).* Vidare enligt Alfredsson m.fl. (2022, s.38) modellering så antogs det att flygplansbatteriet ska ha en säkerhetsmarginal på tio procent. Vilket innebar att

[5] Även Göteborg-Landvetter uteslöts även om antal landningar/år var inom intervallet då det är Sveriges 2.a största flygplats och därför inte kan anses klassas som en medelstor flygplats. I bilaga B går det att se vilka flygplatser som inkluderades i uträkningen och antal inrikes landningar per flygplats.

flygplansbatteriet laddas ur till tio procent av dess kapacitet (80 kWh) och upp till 90 procent av dess kapacitet (720 kWh). Det innebär att en fulladdning av batteriet kräver 640 kWh.

4.1.3 Maxeffekt och vändningstid

För att räkna ut effekten som krävs för att ladda elflyg användes sambandet att effekten (P) är andelen energi (E) som överförs per tidsenhet (t), vilket kan beräknas genom formeln som visas i ekvation 1,

$$P = \frac{E}{t}. \tag{1}$$

För att beräkna maxeffekten på laddaren användes först laddningstiden för elflyg, som definierades som vändningstiden (Turn around time, TAT), och batterikapaciteten (E_{flyg}) . Det var en förenkling då vändningstiden är definierad som tiden från planet ankommer till flygplatsen tills det lyfter igen och flyget troligtvis inte kommer kunna laddas hela den tiden (GlobeAir, 2025). Median för vändningstid på svenska flygplatser låg mellan 30–45 minuter under åren 2019–2023 (RISE, 2024, s. 13). I denna modellering sattes vändningstiden, TAT, till 45 min (0,75 h). Den uppskattade effekten (P_{flyg}) för att ladda ett elflyg var, enligt ekvation 2, då

$$P_{flyg} = \frac{E_{flyg}}{TAT_1} = \frac{640\ \text{kWh}}{0{,}75\text{h}} \approx 850\ \text{kW}. \tag{2}$$

Dock begränsas laddningseffekten av vilken effekt laddaren klarar. Studien utgick ifrån en ellastbilsladdare som fanns ute på marknaden av typen CCS. Den kan ladda med en effekt mellan 360–400 kW (Circle K, 2025). I den här undersökningen bestämdes det att laddarens effekt ($P_{laddare}$) kommer ligga på 400 kW. Eftersom $P_{flyg} > P_{laddare}$ blev effekten laddaren klarar av den begränsade faktorn med vilken effekt flygplansbatteriet kunde laddas med. Vändningstiden för flygplanet blev enligt ekvation 3 istället då

$$TAT_2 = \frac{E_{flyg}}{P_{laddare}} = \frac{640\ \text{kWh}}{400\ \text{kW}} \approx 1{,}6\ \text{h}. \tag{3}$$

Bedömningen utifrån vändningstiden (TAT_2) och maximala antal flyg per dag var då att två flyg ska kunna laddas parallellt. Detta för att möta behovet att 13 flyg ska kunna laddas under 12 timmar. Enligt ekvation 4 hade två laddare en maxeffekt på

$$P_{max} = 400\ kW \cdot 2 = 800\ kW. \tag{4}$$

Mellanstora flygplatser har cirka 10 MW i anslutningskapacitet och har idag en maximal användning på 5–7 MW (RISE, 2024, s. 20). Det innebär att det finns utrymme kvar för att kunna ladda elflyg direkt från elnätet utifrån ett effektperspektiv.

4.1.4 Dagselförbrukning

Dagselförbrukningen för 13 elflyg av det modellerade planen är summan av energin som krävs för att ladda 13 plan och uppskattades enligt ekvation 5 till att vara

$$E = \sum E_{flyg} = 640\ kWh \cdot 13 = 8{,}3\ MWh. \tag{5}$$

Vilket kan jämföras med en genomsnittlig årselförbrukning för en villa som ligger på 20 MWh (Konsumenternas Energimarknadsbyrån, 2025)[6].

4.2 Laddningsscenarion

Laddningen av elflygplan bedömdes kunna utföras på tre olika sätt:

- Via laddningsstolpar vars elförsörjning kommer från elnätet
- Via laddningsstolpar vars elförsörjning kommer från elnätet och/eller BESS
- Via laddbilar

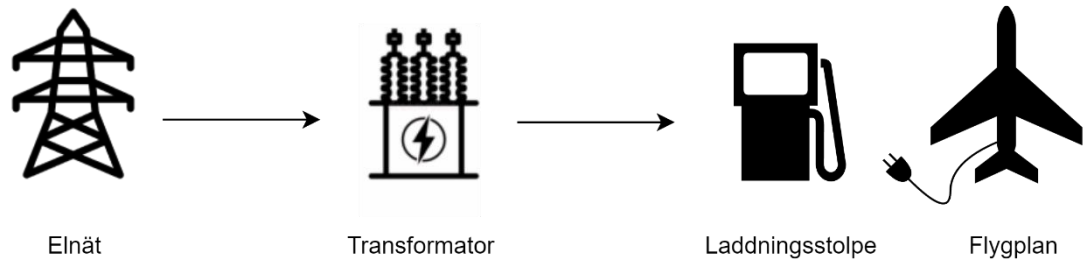
Dessa scenarion beskrivs mer ingående under sina respektive rubriker nedan. De baseras på scenarion som framkommit i ett samarbetsprojekt *Fossilfritt flyg i Norra Sverige* av Umeå kommun, Research Institutes of Sweden (RISE), Swedavia, Processum, BioFuel Region och Energimyndigheten samt i examensarbetet *Utvärdering och implementering av laddinfrastuktur för elflygplan* av Berg och Haglind vid Linköpings Universitet (Lundblad m.fl., 2022, s. 78–79; Berg och Haglind, 2023, s. 20–23).

I samtliga scenarion utgicks det ifrån att hybridplanen kan tankas med flygplansbränsle efter eller innan de laddas. Det är ännu osäkert om laddningen kommer kunna ske samtidigt som det finns passagerare i planet, som tankningen sker idag, då regelverket kring det ännu inte är satt (Lundblad m.fl., 2022, s. 81). Den här studien utgår dock ifrån att passagerare kommer befinna sig på planet och on/off boarding kan ske under laddning då vändningstiden annars blir ohållbart lång.

[6] Förutsatt att vattnet och huset värms upp av el.

4.2.1 Laddscenario 1: Laddningsstolpar med elförsörjning från elnätet

I scenario 1 sker laddningen av elflyg via en laddningsstolpe vars elförsöjning kommer från det lokala elnätet. Scenariot visas i Figur 6.



Figur 6. Laddscenario 1, elförsörjningen fås från det lokala elnätet där en transformator sänker spänningen och sedan förs elen via kablar till laddningstolpar där elflygplan kan laddas.

En viktig aspekt i scenariot var hur stor ström och spänning kablar samt laddare hade i scenariot då det påverkar magnituden av riskerna som finns i systemet. Scenariot utgick från att spänningen in från elnätet på flygplatsen var 11 kV (vilket är ett exempel på vad Umeå flygplats har idag) (Lundblad m.fl., 2022, s. 91). Spänningen sänks sedan av transformatorn från 11 kV AC till 690 V AC. Att flygplatser ska ha en spänning på 690 V i sitt lokala elnät är en rekommendation från en studie till flygplatser som ska implementera elflyg utförd av RISE (2024, s. 104). För att räkna ut vilken ström som går igenom kabeln till laddningsstolparna användes att strömmen (I) igenom en elektrisk krets är effekten (P) dividerat med spänningen (U) i krets. Den maximala strömmen till laddningsstolparna beräknades enligt ekvation 6 till,

$$I_{max,kabel} = \frac{P_{max}}{U_{kabel}} = \frac{800\ kW}{690\ V} = 1160\ A. \tag{6}$$

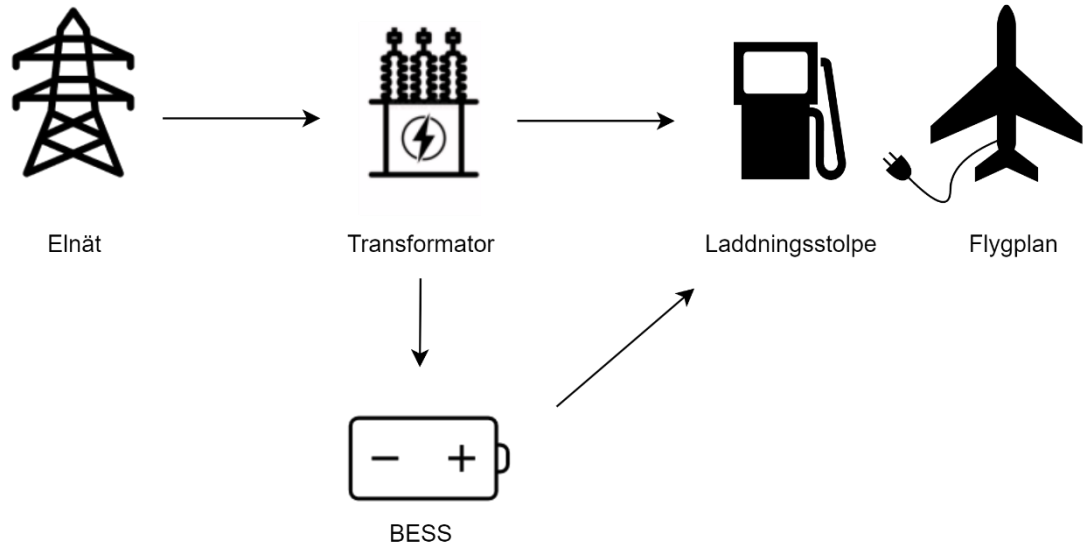
Kabeln kommer sedan dela sig i två för att försörja två laddningsstolpar med ström, eftersom det ska vara möjligt att ladda två elflyg samtidigt. Kablarna närmst laddningsstolpar har därför en maximal ström på $1160\ A\ /\ 2 = 580\ A$. Det bedömdes även troligt att kablarna fram till och med laddningsstolpar kommer vara under mark. Varje laddare hade maximal spänning ut på 800 V (DC) och strömmen in i batteriet från laddaren beräknades enligt ekvation 7

$$I_{laddare} = \frac{P_{laddare}}{U_{laddare}} = \frac{400\ kW}{800\ V} = 500\ A. \tag{7}$$

Kabeln upp till flygplans laddningsuttag bedöms bli tung. Den ska vara designad för att tåla en ström på 500 A och vara tillräcklig lång för att nå upp till laddningsuttaget. Det antogs därför att kabeln blir för tung för att manövrera utan mekanisk hjälp.

4.2.2 Laddscenario 2: Laddningsstolpar med elförsörjning från BESS och elnät

I scenario 2 sker laddningen av elflyg via en laddningsstolpe vars elförsöjning kommer från det lokala elnätet eller BESS. Scenariot visas i Figur 7.



Figur 7. Laddscenario 2, elförsörjningen fås från det lokala elnätet varpå en transformator sänker spänningen. Elen kan sedan gå två vägar till elflygplanen antingen via ett BESS och sen till laddningsstolpen eller direkt till laddningsstolpen.

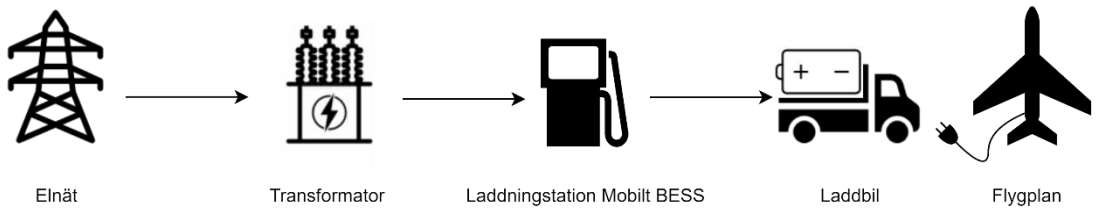
För att uppskatta vilken energi- och effektkapacitet BESS:et behövde ha antogs det att flygplatser vill täcka halva elbehovet per dag under högsäsong med ett BESS. Samt ha en säkerhetsmarginal på tio procent när BESS:et laddas ur/upp. BESS energikapacitet sattes utifrån det till 5 MWh med en effektkapacitet på 6 MW. Det var även en rimlig storlek baserat på andra stora energilagerprojekt som genomförs i Norden (Arvid, 2022, s. 15; Baker, 2024). BESS antogs bestå av litiumjonbatterier då det är den vanligaste typen av batterier för den här typen av energilager (Arvid, 2022, s. 2). Uppladdning av BESS sker genom kontrollerad laddning (även kallad smartladdning) under nattetid för att dra nytta av när elpriset är lågt. Elpriset är ofta lågt mellan kl. 23–05 vilket innebar uppladdningen av BESS skulle ske på 6 h (Vattenfall, u.å.). Effekten som krävs vid uppladdningen av BESS beräknades enligt ekvation 8 till

$$P_{BESS,uppladdning} = \frac{5\ MWh}{6\ h} = 833\ kW. \tag{8}$$

Effekten på urladdningen av BESS uppskattas till mellan 380–760 kW beroende på om flygplatsen vill ladda ett eller två flyg parallellt och om all elförsörjning ska komma från BESS:et. För att förenkla felfunktionsanalysen antogs det att resterande infrastruktur liknar det som beskrivits i scenario 1.

4.2.3 Laddscenario 3: Laddning med ett mobilt BESS

I det 3.e scenariot laddas flygplanen med mobila laddstationer, laddbilar. Laddbilar skulle fungera som tankbilar på en flygplats gör idag och öka flexibiliteten för flygplatsen (Lundblad m.fl., 2022, s. 79). Scenariot visas i Figur 8.



Figur 8. Laddscenario 3, elförsörjningen fås från det lokala elnätet där en transformator sänker spänningen och sedan förs elen via kablar till laddningstationer för laddbilarna. Laddbilarna laddas för att sedan köra till laddningsplatserna för elflygplanen och i sin tur ladda flygplanen.

Här förutsattes det att om tio år så finns det mobila BESS som har en effekt och energikapacitet som matchar det som krävs för elflyg[7]. Laddbilarna kan då ladda flygplansbatterierna med en effekt på 400 kW som matchar CCS och har en energikapacitet på 640 kWh.

Studien utgick ifrån att det mobila BESS rymdes på en lastbil och därmed krävs det minst fyra laddningsbilar för att kunna ladda två flygplan parallellt. Med förutsättningen att de mobila BESS:en kan laddas upp under samma tidsförlopp som de laddas ur.

Övrig infrastruktur som krävdes i det här scenariot var två laddningsstationer för att ladda laddbilarna från elnätet samt en transformator som sänkte spänningen in från elnätet från 11 kV AC till 690 V AC. Eventuellt krävs även en laddningsstolpe i laddbilen för att kunna ladda flygplansbatterierna direkt från det mobila BESS:et (Berg och Haglind, 2023, s. 31).

[7] Det finns idag mobila BESS som kan leverera 300 kW och 600 kWh (POWR2, 2025)

5. Riskmetodik

I riskmetodavsnittet redovisas det varför metodvalet föll på en felfunktionsanalys och hur den har applicerats på laddscenario 1, laddscenario 2 och laddscenario 3. Det förklaras även vilken roll andra metoder som felträdsanalyser, enkätstudie och intervjuer spelat in i felfunktionsanalysen.

Inom riskhantering finns flera olika metoder som exempelvis Feleffektanalyser (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA), HAZOP (Hazard and Operability Study) och HAZID (Hazard Identification) för att hitta, bedöma och utvärdera risker för infrastruktur. Metodvalet för att undersöka riskerna med de tidigare beskrivna scenariona föll i den här undersökningen på en felfunktionsanalys (FMEA). Traditionellt har felfunktionsanalyser använts flitigt inom flygindustrin, bilindustrin och elektronikindustrin. Metoden har historiskt varit lämplig inom sektorerna då den passar för att analysera komplexa mekaniska system vars fel kan få allvarliga konsekvenser (Sutton, 2014, s. 166). Fördelen med en felfunktionsanalys är att verktyget är möjlig att använda tidigt i projekt och är designad för att informationen som finns tillgänglig kan vara knapphändig (Britsman, Ottosson och Tobiasson, 1993, s. 24). Riskmetoderna HAZOP och HAZID är även begränsade på så sätt att de inte kvantifierar riskerna vilket är möjligt i en felfunktionsanalys.

5.1 Felfunktionsanalys

Felfunktionsanalysen utfördes med inspiration av *Handbok i FMEA* av Britsman, Ottosson och Tobiasson (1993) samt *Failure mode and effect analysis* av Stamatis (2003). Det är en induktiv analysmetod som kan användas för att identifiera fel och risker i system på ett systematiskt sätt i syfte att värdera konsekvenserna av felfunktioner (Britsman, Ottosson och Tobiasson, 1993, s. 10). En felfunktionsanalys börjar nedifrån och går uppåt, vilket innebär att först identifieras en felfunktion och efter det undersöks dess konsekvenser och orsaker.

Det finns ingen universell mall för metoden som passar till alla system och processer utan det är ett dynamiskt verktyg som ska anpassas till sitt ändamål (Stamatis, 2003, s. 111). Analysen utförs bäst i ett tvärvetenskapligt team även om den ofta utförs i ett litet team med 2–3 ingenjörer. Om en enskild ingenjör utför den bör andras åsikter tas i beaktning i uppskattande av potentiella felorsaker, upptäckningsmetoder samt för kvantifieringen av dessa (Britsman, Ottosson och Tobiasson, 1993, s. 10; Stamatis, 2003, s. 28).

För att ge denna undersökning bredd och trovärdighet har felfunktionsanalysen kompletteras med felträdsanalyser, en enkätstudie och en intervju. För att göra felfunktionsanalyser starkare bör den kombineras med en metod som går uppifrån och sedan nedåt (Sutton, 2014, s. 166). Valet föll här på felträdsanalyser, vilket är en rekommenderad kompletterande metod till felfunktionsanalyser (Stamatis, 2003, s. 45; Sutton, 2014, s. 166). Eftersom metoden bygger på att åsikter från flera individer utfördes en enkätstudie där respondenterna var experter inom närliggande områden, mer om detta finns under 5.1.5 Enkät. Jag har även intervjuat två olika experter, en innan riskanalysen påbörjades och i slutet av analysen, mer om detta finns under interjuver 5.1.6.

5.1.1 Risk priority number - RPN

Grunden i en felfunktionsanalys är att utföraren definierar tre komponenter utifrån vilka man kan rangordna olika felfunktioner. Komponenterna är allvarlighetsgraden (Severity, S), felintensiteten (Occerence, O) och upptäckningssannolikheten (Detection, D) (Stamatis, 2003, s. 28). Dessa multipliceras till ett RPN (Risk priority number) enligt $RPN = O \cdot S \cdot D$. Om felfunktionens RPN var högre än det satta tröskelvärdet indikerar det att åtgärder måste tas. Det finns ingen standard för vilken risknivå som är acceptabel utan den utgår från det valda konfidensintervall och skalan på respektive *O, S, D* (Stamatis, 2003, s. 30,34). I den här undersökningen användes en skala på 1–10 för O, S och D, där ett högre värde innebär en högre risk. Skalorna med beskrivning av vad de olika värdena speglar återfinns i bilaga C, de graderades med inspiration från Stamatis (2003) och Britsman, Ottosson och Tobiasson (1993). Då ett 95 procentigt intervall ansågs lämpligt och $RPN_{max} = O_{max} \cdot S_{max} \cdot D_{max} = 1000$ blev RPN-tröskeln enligt ekvation 9

$$RPN_{tröskeln} = RPN_{max} - 0{,}95 \cdot RPN_{max} = 50. \tag{9}$$

5.1.2 Utformande av FMEA-formulär

Efter att RPN-tröskeln hade graderats utformades ett FMEA-formulär som passade syftet med undersökningen. Utöver de obligatoriska kolumnerna i FMEA-formuläret kan utföraren välja att addera ytterligare kolumner efter behov (Stamatis, 2003, s. 111). Kolumnerna som inkluderades i den här felfunktionsanalysen visas i Tabell 2.

Tabell 2. Kolumner i FMEA-formuläret med beskrivning av deras syfte. Formuläret inspirerades av Stamatis (2003) formulär för en system-FMEA.

Kolumn	Syfte
System	Namngav systemet.
Systemfunktion	Beskrev systemets syfte, mål eller objektiv. Det utgicks från användarens behov, önskan och förväntan. Om det var en funktion som beskrevs skulle den vara specifik.
Felfunktion	Angav problemet, oron eller felet. Utgick från förlust av systemfunktionen och skulle vara specifik.
Feleffekt	Beskrev vad händer om felfunktionen inträffar. Vad blir konsekvensen för systemet, produkten, användaren eller regelverk.
Allvarlighetsgrad (S)	Graderade hur allvarlig feleffekten var.
Felorsak	Angav grundorsakerna till problemet/felfunktionen. Generellt finns det två kategorier, specifika fel eller fel på grund av livslängd (utslitna eller inte inkörda än).

Fortsättning tabell 2. Kolumner i FMEA-formuläret med beskrivning av deras syfte.

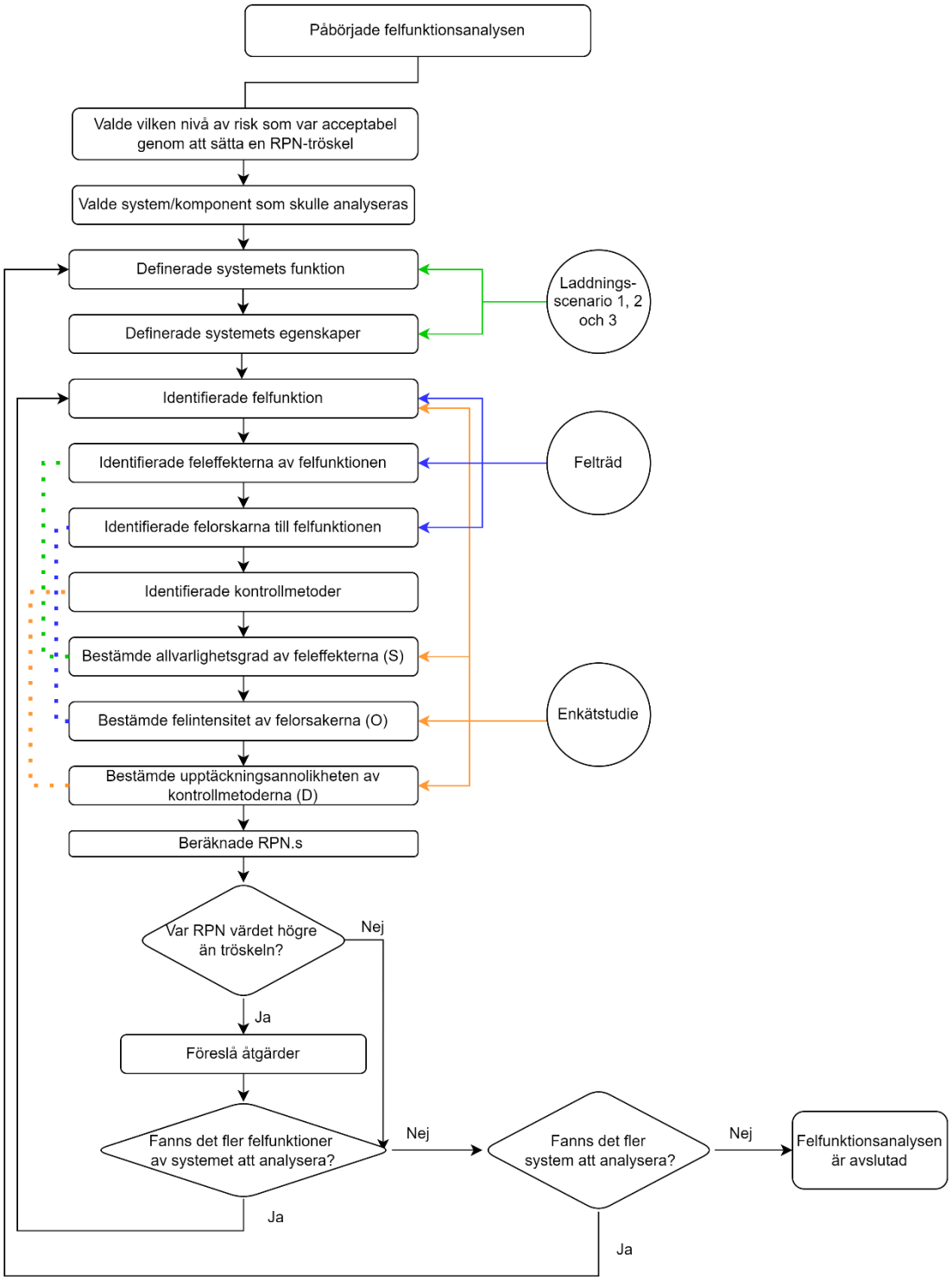
Felintensitet (O)	Var ett uppskattat värde på antal fel som uppstår under systemets livslängd. Med andra ord är det frekvensen av en specifik felfunktion.
Kontrollmetod	Beskrev kontrollmetoden som används för att kunna hitta felfunktioner hos systemet. Användes som hjälpmedel för upptäckningssannolikheten.
Upptäckningssannolikhet (D)	Graderar hur sannolikt det var att en potentiell felfunktion upptäcks. Ifall det inte finns någon kontrollmetod eller om den inte kunde uppskattas sattes den till 10.
RPN	$RPN = O \cdot S \cdot D.$
Rekommenderad åtgärd	Förklarar vilken väg som bör tas utifrån resultatet från FMEA.

5.1.3 Utförandet av felfunktionsanalysen

När formuläret var utformat påbörjades arbetet att utföra felfunktionsanalysen utifrån laddscenario 1, 2 och 3. Laddscenariona definierade vilka system som skulle inkluderas i felfunktionsanalysen, vilka var

- Elnät på flygplats
- Transformatorstation
- BESS
- Laddbilar
- Laddningsutrustning för elflyg utomhus
- Flygplansbatterier

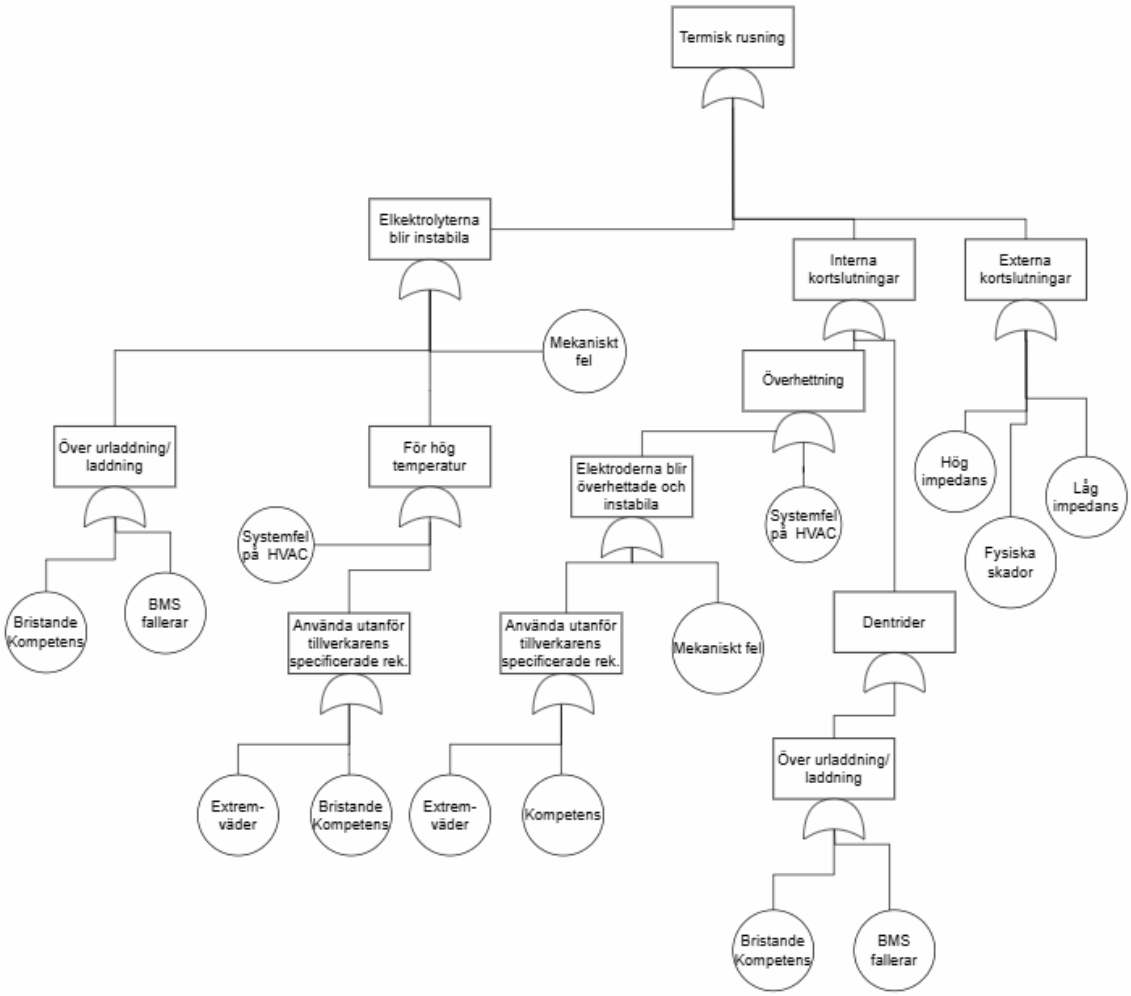
Arbetsflödet följde strukturen att först identifierades systemet som skulle analyseras, sen definierades dess funktion och egenskaper. Varpå en felfunktion och dess effekter samt orsaker identifierades med hjälp av felträd. Efter det identifierades olika upptäckningsmetoder för felfunktionen. Med hjälp av enkätstudien kvantifierades sedan allvarlighetsgraden, felintensitet och upptäckningssannolikhet för felfunktionen. Om jag bedömde att det inte fanns en tydlig upptäckningsmetod för felorsaken som skulle innebära att orsaken kunde förhindras, gavs upptäckningssannolikhet värdet 10 enligt praxis för felfunktionensanalyser. Utifrån allvarlighetsgraden, felintensitet och upptäckningssannolikhet beräknades RPN och om det var högre än RPN-tröskeln föreslogs åtgärder. Annars gick felfunktionensanalysen vidare till nästa felfunktion. Felfunktionsanalysen avslutades när det inte fanns flera felfunktioner och system kvar att analysera. Metodiken för hur arbetet utfördes visas i Figur 9.



Figur 9. Visar en översikt av tillvägagångsättet för undersökningen. De streckade linjerna visar på hur S, O och D kopplar till feleffekter, felorsaker och upptäckningsmetoder. Pilarna visar var laddscenriona, felträd och enkätstudien har kommit in i undersökningen.

5.1.4 Felträd

I syfte att komplettera felfunktionsanalysen och identifiera felorsaker, feleffekter och felfunktioner utfördes felträd för majoriteten av systemen. Felträd är en modell som grafiskt beskriver olika kombinationer av event som kan orsaka ett oönskat toppevent. Trädet utgår från ett oönskat toppevent och söker succesivt olika systemtillstånd som orsakat toppeventet tills grundorsakerna är identifierade. Fördelarna med felträd är att det är en visuell analyseringsmetod som tillåter analytikern att fokusera på ett systemfel åtgången (Stamatis, 2003, s. 45). För metoden finns standardiserade symboler, de vanligaste återfinns i bilaga D (s.65). Symbolerna byggs samman och bildar tillsammans ett felträd. Ett exempel från den här undersökningen visas i Figur 10, resterande felträd återfinns i bilaga E.



Figur 10. Felträd över termiskrusning i ett BESS, visar hur olika bashändelser kan leda till termiskrusning.

5.1.5 Enkätstudie

I syfte att skapa en opartisk och tydlig enkät användes artikeln *Enkätmetodik – en svår konst* av Jakobsson och Westergren (2005) i utformade av enkäten. Fördelarna med enkäter är att de

kan vara mer opartiska än interjuver och möjliggör att få in data från fler respondenter. Nackdelarna är att det krävs att respondenter påminns och att respondenter i större utsträckning väljer att inte svara på frågor jämfört med interjuver (Jakobsson och Westergren, 2005, s. 73).

Enkäten användes i syfte att få in kompletterande åsikter och bedömningar till felfunktionsanalysen. Målet var att få svar från respondenter med olika typer av kompetens och bakgrund för att få in olika perspektiv i undersökningen. Då elflyg är ett nytt område tillfrågades personer i närliggande områden efter deras expertis. Dessa områden identifierades som flygplatser, batterisystem, elsystem, laddning av elfordon samt riskhantering av dessa. Respondenter söktes inom myndigheter och statliga organisationer som är involverade i elektrifieringen av fordon[8]. Även respondenter inom den akademiska världen söktes, forskare och doktorander tillhörande olika universitet och RISE tillfrågades. För att få en koppling till näringslivet tillfrågades även risk- och brandkonsulter, personal anställd vid svenska flygplatser och företag som tillverkar ellastbilar och BESS. Även elföretag tillfrågades om deltagande. Enkäten var anonym och endast information om respondenternas arbetsområde och arbetslivserfarenhet samlades in. De till frågades även i början av enkäten om tillåtelse att använda deras svar i det här arbetet och om svaret var nej exkluderades deras enkätsvar.

Syftet med frågorna var att kvantifiera allvarlighetsgrad, felintensitet och upptäckningssannolikhet samt undersöka om respondenterna kunde uppmärksamma ytterligare felfunktioner. Respondenterna ombads att på en skala från 1–10 kvantifiera allvarlighetsgraden, felintensitet och upptäckningssannolikhet för olika felfunktioner[9]. Medianen av dessa svar användes sedan för att räkna ut RPN:et för respektive felfunktion.

Enkätens disposition följde Jakobsson och Westergren rekommenderade upplägg, den började med en inledning, för att sedan ställa bakgrundsfrågor och gick till sist vidare till olika frågeblock (Jakobsson och Westergren, 2005, s. 72). I inledningen presenterade vad enkäten skulle handla om och dess syfte. Där fanns även information om laddscenario 1, 2 och 3. Bakgrundsfrågor syftade till att klargöra respondentens expertis och handlade om vilken bakgrund samt kompetens respondenten hade. Frågeblocken var indelade efter de olika systemen som felfunktionsanalysen omfattade[10]. Inför varje frågeblock blev respondenten informerad om viktiga detaljer om systemet så svaren blev specifika för de scenarion som var aktuella i den här undersökningen.

Eftersom ett av de vanligaste problem med enkäter är att få besvarar den togs åtgärder för att öka antalet svarande (Jakobsson och Westergren, 2005, s. 72). För att öka mängden som kunde besvara enkäten gavs den ut på engelska. Eftersom för långa enkäter har en tendens att ha en lägre svarsfrekvens togs åtgärder för att korta ner enkäten. Frågor som rörde batterier i

[8] Svar söktes från Trafikverket, Transportstyrelsen, Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) samt Elsäkerhetsverket.
[9] Skalorna återfinns i bilaga C och enkätfrågorna återfinns i bilaga H.
[10] Systemen var därför internt Elnätet på flygplatsen, transformatorstation, BESS, laddbilar, laddningsutrustning för elflyg utomhus och flygplansbatterier

BESS, laddbilar och flygplansbatterier slogs där det var möjligt samman. Omfånget för frågor om transformatorn och elnätet minskades. Detta då det bedömdes viktigare att få svar på frågor om system som skulle vara nya i flygplatsmiljö.

5.1.6 Interjuver

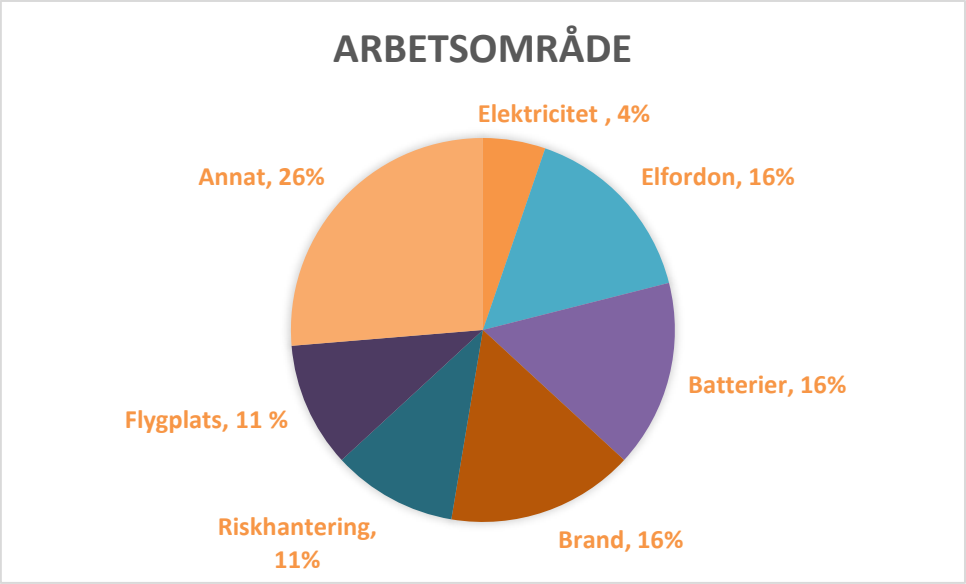
För arbetet genomfördes två interjuver. Den första intervjun genomfördes med Henrik Littorin och användes både i flygplatsprognosen och felfunktionsanalysen. Den var semistrukturerad och frågorna återfinns i bilaga A. Den andra intervju genomfördes med Magnus Backman som var R&D manager på ABB och kunnig inom eldistribuering. Syfte med intervjun var att få en djupare förståelse för felfunktioner i transformatorstationer och underlätta felfunktionsanalysen för det systemet. Målet var även att undersöka om det fanns risker som var specifika för den aktuella transformatorn i flygplatsscenarion jämfört med andra ordinära transformatorer. Intervjun var ostrukturerad och även Christer Törnkvist som är ämnesgranskare för detta examensarbete deltog. Det fanns några förhållningspunkter som intervju utgick ifrån vilka återfinns i bilaga H. Båda intervjuerna spelades in och transkripterades för analys, både Backman och Littorin gav sin tillåtelse att deras svar skulle spelas in och användas i arbetet. Vid arbetets slut raderades både transkriptionerna och ljudfilerna.

6. Resultat

I resultatet presenteras först vilka som svarat på enkätstudien för att ge en förståelse för vad RPN:et i felfunktionsanalysen baserats på. Efter det gås respektive systems felfunktionsanalys igenom. Åtgärder föreslås löpande för felfunktioner som har ett RPN över RPN-tröskeln på 50.

6.1 Enkätstudie

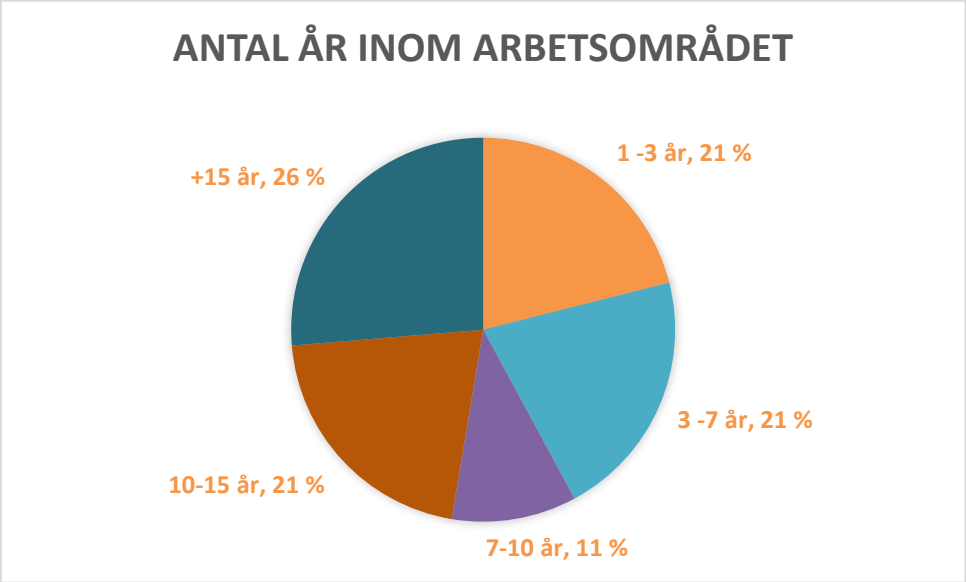
Enkätstudien syftade på att kvantifiera allvarlighetsgrad, felintensitet och upptäckningssannolikhet samt samla in andra perspektiv på risker med laddinfrastruktur i flygplatsmiljö. Studien mejlades ut till personer som var kunniga inom områdena och var möjlig att besvara under ca 2 veckor. Totalt svarade 19 personer på enkäten och i genomsnitt svarade 12 personer på respektive fråga som syftade till att kvantifiera allvarlighetsgrad, felintensitet eller upptäckningssannolikhet. Samtliga respondenters arbetsområde visas i Figur 11. Av myndigheterna som kontaktades svarade majoriteten att kompetensen som efterfrågades inte fanns där. En av myndigheterna valde att kommentera på varför de inte kunde besvara frågorna, de förklarade att eftersom de nuvarande regelverken för flygplatser i dagsläget inte behandlar infrastruktur för elektrifiering har de inte haft anledning till att behandla frågorna. I en vidareutveckling av svaret beskrev de kort att de ansåg att det föreligger en regulatorisk utmaning, då befintliga säkerhetsföreskrifter i stor utsträckning inte är anpassade till den nya teknikens särdrag. Utvecklingen av standarder och riktlinjer för laddinfrastruktur för elflyg befinner sig fortfarande i ett inledande skede.



Figur 11. Visar respondenternas arbetsområde, först anges arbetsområdet och sedan anges andel procent som angav respektive svar.

Av respondenterna som uppgav ett annat arbetsområde så angavs; långsiktig planering för flyginfrastruktur, elektromobilitet (laddinfrastruktur), forskning, myndighet inom skydd av

kritisk infrastruktur samt transportforskning. Respondenternas arbetslivserfarenhet inom deras individuella arbetsområde visas i Figur 12.



Figur 12. Respondenternas arbetslivserfarenhet inom deras individuella arbetsområde, först anges deras arbetslivserfarenhet och sedan anges andelen procent som angav respektive svar.

I enkäten fanns det möjlighet att kommentera på alla frågor och vissa kommentarer återkom under enkäten för flera system från flera av respondenterna. Det var att sammanhanget kring systemen behövde vara mer specifikt för att kunna utvärdera konsekvenserna. Det framkom även att konsekvenserna av felfunktionerna ibland var svåra att värdera då de var av olika storlek. Exempelvis ombads respondenterna kvantifiera konsekvenserna för överhettning i en transformator, vilka var brand, förkortad livslängd, skadad utrustning och strömavbrott. Vissa av respondenterna menade då på att strömavbrott kan få olika allvarliga konsekvenser beroende på om hur omfattande det var. Vissa var även av åsikten att brand och förkortad livslängd inte gick att bedöma tillsammans. Slutligen så påpekades det även att felintensitet varierar över en komponentslivslängd och därför var svårbedömt.

I slutet av enkäten frågades respondenter om de ansåg att det fanns risker eller felfunktioner som inte tagits upp. Frågan syftade till att få in eventuella risker eller felfunktioner som inte fångats upp tidigare. Ekonomiska risker och externa bränder samt risker som kommer med att ha olika typer av drivmedel inom ett begränsat område pekades då ut.

6.2 Risker med elnätet på en flygplats

Felfunktioner som undersöktes för elnätet på en flygplats var strömavbrott, att elnätet överbelastas och att den elektromagnetiska interferensen blir för hög. Deras feleffekter, felorsaker och upptäckningsmetoder med respektive gradering samt RPN presenteras i Tabell 3. Scenariona som hade ett RPN över 50 var strömavbrott orsakat av dåliga väderförhållanden (RPN=175) och för högt EMI vilket kan störa annan elektronisk utrustning (RPN=56). I det första fallet beror det höga RPN:et bland annat på att det inte finns en upptäckningsmetod som

kan förhindra felfunktionen dåliga väderförhållanden. I det andra fallet beror det höga RPN:et på att effekterna av ett för högt EMI bedömdes allvarliga och att det inte bedömdes så sannolikt att upptäcka felet i tid för att ta åtgärder.

Tre respondenter valde att kommentera på frågorna om EMI, de menade att om regelverket kring EMI följs så kommer inte elektromagnetiska störningar vara en risk. Två av dem menade även på att elektromagnetiska fält mäts på flygplatser redan idag och att miljön är välreglerad. Om nya installationer innebär för höga mätvärdena tillåts de inte vara kvar i drift. Dessa kommentarer gällde inte enbart elnätet utan återkom för EMI-frågor i sammanband med systemen BESS och laddningsutrustning. Det var dock endast elnätets RPN som var över RPN-tröskeln. Utifrån felfunktionsanalysen behöver åtgärder tas för att öka sannolikheten för att upptäcka EMI innan en olycka sker. Det krävs mer forskning om EMI och EMC inför att introducera elflyg på flygplatser som är en känslig och välreglerad miljö. Det är ingen lösning att om mätvärdena är för höga så installeras inte elektriska komponenterna då elflyg är beroende av att utbyggnationer av elnätet är möjlig.

Gällande strömavbrott orsakade av väderförhållanden var det svårt att föreslå åtgärder, då vädret inte går att kontrollera. Även om RPN:et var högt är det en risk som redan har accepteras av flygplatser eftersom infrastrukturen redan är installerad och endast skulle utökas för att kunna ta emot elflyg. Det som krävs är en upptäckningsmetod som minskar konsekvenserna.

Tabell 3. Felfunktionsanalys över elnätet på en flygplats. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Strömavbrott	Brand, ljusbåge och/eller viktiga system som ej har reservsystem slås ut (5)	Fel på elkabel (kabelkorrosion, kabelbrott eller dålig isolering) (3)	Jordfelsövervakning för mindre kablar, för större kablar riktade jordfelsskydd (2,5)	37,5
		Dåliga väderförhållanden (3,5)	- (10)	175
		Trasig transformator (3)	Systemövervakning (2)	30
Elnätet överbelastas	Elnätet kan inte leverera el (6)	Kapacitetsbrist eller för många laster (3)	Systemövervakning (2)	36

Fortsättning tabell 3. Felfunktionsanalys över elnätet på en flygplats

EMI stör elektroniska system	Navigationssystemfel, vilket kan leda till flygplanshaverier (7)	Oskärmade komponenter eller otillräcklig skärmning för komponenter (2)	EMI mäts vid större elinstallationer (4)	56

6.3 Risker med en transformatorstation på en flygplats

Det var få av de analyserade felfunktionerna för transformatorn som hade ett RPN som översteg RPN-tröskeln. Av felfunktionerna överhettning, överbelastning, internt fel, oljeläcka och extern olycka som skadar transformatorn var det endast en extern olycka som hade ett RPN (RPN=120) över RPN-tröskeln. Den fullständiga felfunktionsanalysen för transformatorstation redovisas i Tabell 4. Risken med en olycka som påverkade transformatorn ansågs allvarlig av respondenterna inte endast för skadorna som förföll transformatorn utan även på grund av övrig utrustning och personal som i så fall skulle vara inblandad i olyckan. I enkäten framkom även att placeringen av transformatorn var central, dels för konsekvenserna vid en olycka dels för hur sannolikt det var att en olycka sker. Det är därför viktigt att transformatorn placeras lämpligt utifrån ett säkerhetsperspektiv och att det installeras en barriär om risken för att transformatorn ska bli påkörd kvarstår.

För att minimera skadorna vid en olycka bör det ses över vilken typ av transformator som installeras. Felfunktionsanalysen utgick från att transformatorn var oljeisolerad men under undersökningen framkom det att ett alternativ kan vara en torrisolerad transformator. Isoleringsformen bör undersökas ur ett riskperspektiv och sedan vägas mot för- och nackdelarna som finns med torrisolerad respektive oljeisolerad transformator. För även om torrisolerade transformatorer har en lägre brandrisk är de tillverkade för lägre effekter än oljeisolerade transformatorer.

Tabell 4. Felfunktionsanalys över en transformatorstation på en flygplats. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Överhettning	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Överbelastning (3)	Övervakning, underhåll och skyddsrelä (2)	36
		Dåligt underhåll (2)	Interna rutiner (2)	24
		Otillräcklig kylning (2,5)	Temperatursensorer (2)	30
Överbelastning	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Designfel (ex under dimensionering, fel på reläskydd osv) (2)	Testkörning vid installation och interna kontroller (2)	24
Överbelastning	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Operatörsfel (ex dåligt underhåll eller felaktig användning av transformatorn) (3)	Interna rutiner (2)	36
Internt fel	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Designfel (2)	Testkörning vid installation och interna kontroller (2)	24
Internt fel	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Operatörsfel (3)	Interna rutiner (2)	30
Oljeläcka	Brand, minskad livslängd, skadad utrustning, strömavbrott (6)	Designfel (2)	Testkörning vid installation och interna kontroller (2)	24

Fortsättning tabell 4. Felfunktionsanalys över en transformatorstation på en flygplats

		Operatörsfel (ex installeringsfel) (3)	Interna rutiner (2)	36
		Dåligt underhåll (ex ej bytta packningar eller ej tagit åtgärder för läckor) (2)	Interna rutiner (2)	24
Extern olycka	Brand, personskador, strömavbrott (6)	Påkörd av flygplan eller markfordon, åska eller översvämning (2)	- (10)	120
Kortslutningar[11]	Sliter på systemet och förkortar livstiden	Externa orsaker från anslutande system ex kabelbrott	-	-
Termiska känningar[12]	Sliter på systemet	Lastprofilen är annorlunda från ett ordinärt nät, det är antingen full effekten eller noll effekt. Vilket innebär att temperaturen kommer gå i större cykler än vanligt	Tillståndövervakning	-

6.4 Risker med BESS

För det lokala BESS:et på flygplatsen utreddes felfunktionerna; intern kortslutning, extern kortslutning, instabila elektrolyter, stora magnetfält vid laddning, att laddningen/urladdningen av BESS misslyckas samt att batterierna i BESS var av undermålig kvalité. Resultatet av dessa redovisas i Tabell 5. Scenariona med ett RPN över 50 var intern kortslutning orsakad av bristande kompetens (RPN=175) eller extremväder (140), instabila elektrolyter orsakade av bristande kompetens (175) och batterierna i BESS var av undermålig kvalité (RPN=245).

[11] Tillkom efter enkätundersökningen, från intervjun med Backman och kvantifierades därför inte.
[12] Tillkom efter enkätundersökningen, från intervjun med Backman och kvantifierades därför inte.

För att minska risken i dessa scenarion kan olika åtgärder tas. Risken med att personalen har en bristande kompetens kommer vara högre i början av installeringen och avta med tid. För att risken ska minska behöver personalen få utbildning och det behövs en metod för att kontrollera personalen har nödvändig kompetens. Flera respondenter påpekade att BMS.et bör förhindra flera fall av bristande kompetens och det är möjligt att BMS:et kan ses som en upptäckningsmetod. Gällande att extremväder kan orsaka kortslutningar i BESS genom att det laddas i för varma eller kalla temperaturer behöver antingen felorsaken elimineras alternativt behöver konsekvenserna minimeras. Det är inte möjligt att eliminera extremväder men det är möjligt att ändra hur extremväder påverkar BESS. De kan också vara möjligt att installera upptäckningsmetoder som kan minimera effekterna av termisk rusning i tid för att konsekvenserna inte ska bli så stora. För att minska risken för termisk rusning orsakat av batterier av undermålig kvalité kan flygplatsen själva kontrollera batterierna innan de installeras i BESS. Alternativt behövs en transparens i batteritillverkningen och transporten så flygplatser kan försäkra sig om att batterierna är oskadade och av bra kvalité. För att minska feleffekterna ifall en termisk rusning sker är det även viktigt att BESS placeras rätt på flygplatsen.

Tabell 5. Felfunktionsanalys över BESS på en flygplats. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Intern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (7)	BMS fallerar (3)	Egenkontroll, systemet själv larmar (2)	42
		Bristande kompetens (ex systemet används utanför dess tekniska specifikationer) (2,5)	- (10)	175
		Systemfel i HVAC (2)	Självständigt larm som varnar om ventilationen eller temperatur förändras kraftigt (2)	28

Försättning tabell 5. Felfunktionsanalys över BESS på en flygplats.

Intern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (7)	Extremväder (2)	- (10)	140
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	42
Extern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (7)	För hög/låg impedans (3)	BMS (2)	42
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	42
Instabila elektrolyter	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (7)	BMS fallerar (3)	Egenkontroll, systemet larmar själv (2)	42
Instabila elektrolyter	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (7)	Systemfel på HVAC (2)	Självständigt larm som varnar om ventilationen eller temperatur förändras kraftigt (2)	28
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	42
		Bristande Kompetens (ex systemet används utanför dess tekniska specifikationer) (2,5)	- (10)	175

Försättning tabell 5. Felfunktionsanalys över BESS på en flygplats.

Stora magnetfält vid laddning.	EMI stör ut annan elektronik, bland annat flygplans navigationssystem (3,5)	Skärmningen är ej tillräcklig/fungerar ej, EMI filter är inte tillräckliga/ fungerar inte, Jordningen är ej tillräcklig/fungerar ej (3)	Testning/mätning innan implementering (3)	31,5
Laddningen/ urladdningen av batterierna misslyckas	BESS kan inte förse laddningsstolparna med ström (3)	Skadade kablar/ defekt laddningskontakt (3,5)	BMS (2)	21
		Extremväder (2)	- (10)	60
Batterierna är av undermålig kvalité	Kortslutning, brand med utsläpp av giftiga gaser (7)	Bristande regelverk och testning. Ingen transparens i tillverkningen (3,5)	- (10)	245

6.5 Risker med laddbilar

För laddbilar analyserades fem felfunktioner, av dessa fem hade fyra minst ett scenario vars RPN var över RPN-tröskeln. Den första av dessa felfunktioner var att lastbilen inte kommer fram till elflygplanet orsakat av dåliga väderförhållanden (RPN=120). Den andra felfunktionen med RPN över 50 var att batterierna skulle ta skada under transport. Det kunde orsakas av felaktig lastning av batterierna (RPN=90), att lastbilen krockar (RPN=120) eller skadliga vibrationer (RPN=90). Den tredje felfunktionen var att lastbilen är med i en olycka orsakat av ett förarfel (RPN=280) eller en dåligt planerad rutt (RPN=84). Den sista felfunktionen med ett scenario som gav ett RPN över 50 var att laddningen/urladdningen av laddbilarna inte var möjlig för att vädret inte tillåter det (RPN=120). Den fullständiga felfunktionsanalysen är tillgänglig i Tabell 6.

Majoriteten av felfunktionerna vars RPN var för högt hade ingen upptäckningsmetod. För dessa scenarion behövs det främst införas en upptäckningsmetod som kan förhindra felorsaken eller minska eleffekterna. Angående scenariona som hade upptäckningsmetoder behöver andra åtgärder tas. För att undvika att batterierna i laddbilarna tar skada under transporten av vibrationer eller felaktig lasting behövs vidare undersökning för att undersöka hur risken kan minska.

Tabell 6. Felfunktionsanalys över en laddbilar på en flygplats. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Lastbilen kommer inte fram till elflygplanet	Elflygplan kan inte laddas vilket leder till förseningar (3)	För dåliga väderförhållanden (4)	- (10)	120
		Fel på lastbilen (3)	Regelbunden service och besiktning (2,5)	23
Batterierna på lastbilen får termisk rusning	Kraftig brand som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion (8)	Internkorslutning (2)	BMS (2)	32
		Extern kortslutning (2)	BMS (2)	32
		Instabila elektrolyter (2)	BMS (2)	32
Batterierna på lastbilen får termisk rusning	Kraftig brand som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion (8)	Instabila elektrolyter (2)	BMS (2)	32
		BMS fallerar (2)	Egenkontroll, systemet själv larmar (2)	32
Batterier i laddbilarna tar skada under transport	Flygplan kan inte laddas, batterierna behöver bytas ut eller kortslutning i BESS:et (6)	Felaktig lastning av batterier (3)	Inspektion av personal (5)	90
Batterier i laddbilarna tar skada under transport	Flygplan kan inte laddas, batterierna behöver bytas ut eller kortslutning i BESS:et (6)	Lastbilen krockar (2)	- (10)	120
		Vibrationer under transport (3)	Vibrationskontroll innan användning av lastbilarna (5)	90

Fortsättning tabell 6. Felfunktionsanalys över en laddbilar på en flygplats.

Lastbilen är med i en olycka	Personskador och materiella skador (7)	Förarfel (4)	- (10)	280
		Dålig planerad runt (4)	Testning av rutt innan, simuleringar, feedback (3)	84
		Allvarligfel på lastbilen (2)	Regelbunden service och besiktning (2,5)	35
		Skadade kablar eller defekt laddningskontakt (4)	BMS (2)	24
Laddningen/ urladdningen av batterierna misslyckas	Flygplanen kan inte laddas vilket leder till förseningar (3)	Väderförhållanden (för kallt eller varmt) (4)	- (10)	120

6.6 Risker med laddningsutrustning för elflyg utomhus

I felfunktionsanalysen för laddningsutrustning utreddes felfunktionerna skadade kablar, defekt laddningskontakt, stora magnetfält vid laddning, överladdning av flygplansbatterier och att den mekaniska manövreringen av laddningskabeln inte skulle fungera. I Tabell 7 redovisas dessa felfunktioners effekter, orsaker och upptäckningsmetod samt RPN: Ett scenario hade ett RPN över 50, vilket var att skadade kablar eller en laddningskontakt skulle orsaka en elstöt, ljusbåge eller brand (RPN=56). För att öka säkerheten kan en åtgärd vara att minska frekvens med vilken dess felorsaker felaktig hantering, korrosion och mekaniska skador uppstår. För att minska korrosion och mekaniska skador kan utrustningen bytas ut i högre frekvens. För att felaktig hanteringen av personal ska minska behövs det undersökas hur utrustningen i så fall skulle hanteras fel för att kunna föreslå åtgärder.

Tabell 7. Felfunktionsanalys över laddningsutrustning utomhus på en flygplats. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Skadade kablar, defekt laddnings-kontakt	Elstöt, ljusbåge, brand (7)	Felaktig hantering. korrosion, mekaniska skador (4)	Flygplanssystem larmar om kabeln är defekt (2)	56
Stora magnetfält vid laddning	EMI stör ut annan elektronik, bland annat radar (4)	Skärmningen är inte tillräcklig (3)	Testning innan implementering (2)	24
Överladdning av flygplansbatteri erna	Flygplans-batterierna slits, det finns även risk för termiskrusning (7)	Systemfel (3)	Flygplanets-laddningssystem larmar (2)	24
		Kompetensbrist (förutsatt att det inte finns en systemspärr för överladdning alt att den satts ur spel) (3)	- (10)	42
Mekanisk manövering av laddningskabeln fungerar ej[13]	Flygplanet kan ej laddas då det inte är möjligt att lyfta elkabeln	Teknisk fel på utrustning	Regelbunden inspektion	-

6.7 Risker med flygplansbatterier

I felfunktionsanalysen över flygplansbatterier inkluderades intern kortslutning, extern kortslutning, instabila elektrolyter och att systemövervakningen av batterierna fallerar. Felfunktionsanalysen över flygplansbatterierna liknar analysen av batterilagret eftersom båda systemen består av litiumbatterier men systemen skiljs åt i användning och storlek. Det krävs därför separata felfunktionsanalyser. Den fullständiga felfunktionsanalysen för flygplansbatterier redovisas i Tabell 8.

[13] Hur den mekaniska manövreringen av laddningskablar för elflyg ska fungera är ännu inte löst och jag valde därför att inte kvantifiera feleffekter, felorsak och upptäckssannolik och förutspå ett RPN för det.

Flera av felfunktionerna för flygplansbatterier bedömdes ha ett RPN över 50. Det berodde främst på att respondenterna ansåg att feleffekter som involverade termisk rusning att vara extremt allvarlig. Den första åtgärden bör därför vara att undersöka om det är möjligt att minska konsekvenserna av termisk rusning i batterierna. Exempelvis undersöka åtgärder som innebär att förloppet saktas ner så mer tid ges åt evakuering och räddningstjänst. Feleffekterna skulle heller inte vara så allvarliga om laddning inte skedde samtidigt som passagerare är ombord.

I flera fall beror ett högt RPN på att det saknas en tydlig upptäckningsmetod. Det gällde bristande kompetens som kan leda till intern kortslutning i flygplansbatteriet och instabila elektrolyter. För att kontrollera att personal har rätt kompetens kan anställda genomgå utbildningar och det kan införas certifieringskrav som syftar till att verifiera att rätt kompetens finns. För att elflyg ska kunna introduceras på ett säkert sätt krävs det även regelverk för hur flygsäkerhet kring elflyg ska se ut som redovisar hur exempelvis sådana verifieringar ska se ut. Ytterligare en felorsak utan tydlig upptäckningsmetod var väderförhållanden som inte är säkra att ladda i, det ställer krav på att antingen personal eller BMS kan säga ifrån om det är för osäkert att ladda. En lösning kan även vara att det finns laddningsstationer inomhus där det är möjligt att kontrollera laddningsmiljön.

Tabell 8. Felfunktionsanalys över flygplansbatterier. I tabellen anges respektive felfunktions feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod samt RPN. Kvantifieringen av feleffekter, felorsaker och uppräkningsmetod anges i parentes under.

Felfunktion	**Feleffekt** **(S)**	**Felorsak** **(O)**	**Upptäckningsmetod** **(D)**	**RPN**
Intern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (9)	BMS fallerar (2)	Egenkontroll, systemet själv larmar (2)	36
		Bristande kompetens (ex systemet används utanför dess tekniska specifikationer) (2,5)	- (10)	225
		Systemfel i HVAC (2)	Självständigt larm som varnar om ventilationen eller temperatur förändras kraftigt (2)	36

Fortsättning tabell 8. Felfunktionsanalys över flygplansbatterier

Intern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (9)	Väderförhållanden (ex laddning i för höga/låga temperaturer) (2)	- (10)	180
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	54
Extern kortslutning	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (9)	För hög/låg impedans (3)	BMS (2)	54
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	54
Instabila elektrolyter	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (9)	BMS fallerar (2,5)	Egenkontroll, systemet larmar själv (2)	45
		Systemfel på HVAC (2)	Självständigt larm som varnar om ventilationen eller temperatur förändras kraftigt (2)	36
		Mekanisk skada (3)	BMS (2)	54
		Bristande Kompetens (ex systemet används utanför dess tekniska specifikationer) (2,5)	- (10)	225
System-övervakningen fallerar	Termiskrusning som kan leda till utsläpp av giftiga gaser, explosion och brand (9)	Systemfel (3)	Systemlarm (2)	54

6.8 Övergripande åtgärder

Felfunktionsanalysen visar på att det finns åtgärder att ta som skulle höja den övergripande säkerheten på flygplatsen. En feleffekt som återkom för flera olika scenarion var brand. Termisk rusningen var en risk i alla batterier och bränder kan även orsakas av trasig elektronik. Det kommer därför vara viktigt att räddningstjänsten får rätt träning och utrustning för att hantera sådana bränder. Det kommer även vara viktigt att inkludera räddningstjänst i arbetet när ny infrastruktur införs så de kan ge sin insikt i vad de behöver för att kunna utföra sitt arbete. Eftersom det finns mycket lättantändligt bränsle på en flygplats och batterier är känsliga för externa bränder behöver de snabbt och effektivt kunna begränsas. Utredningen visar även på att kompetens var viktigt utigenom alla yrken som rör underhåll och användning av laddningsinfrastrukturen. Det behövs att certifieringar införs för att kunna verifiera att personal är kunnig och kapabel att hantera den nya infrastrukturen. Speciellt där det inte finns tekniska spärrar för att hantera mänskliga misstag.

7. Diskussion

I diskussionsavsnittet analyseras först resultatet av felfunktionsanalysen och vad det innebar för de olika laddscenariona i ljuset av syftet för undersökningen. Syftet var att identifiera vilka risker som finns med infrastruktur för elflyg på flygplatser och föreslå åtgärder som kan tas för att minska dessa risker. Efter det diskuteras metodvalet för rapporten och varför en kvantifiering av risk användes i den här studien. Till sist diskuteras det vilken typ av risk som undersökts i studien och framtida forskning föreslås.

7.1 Risker med laddscenariona

Laddscenariona som riskanalyserades var avsiktligt konservativt konstruerade, då syftet var att undersöka scenarion som realistiskt kunde var på plats om tio år för möjliggöra att flygplatser kan ta emot elflyg. Det var svårt att utröna vart branschen befann sig i utvecklingen av elflygplan, då den information som fanns tillgängligt främst var från start-ups eller större företags pilotprojekt, vars syfte ofta var att antingen attrahera investerare eller förbättra sin image. Ett av antagandena som gjordes i laddscenariona visade sig senare i undersökningen vara för försiktigt, det var att laddningen av elflyg skulle ske med CCS. Det uppdagades senare i undersökningen att Swedavia planerar att installera MCS på en eller flera av sina flygplatser inom de närmsta åren (Badola, 2025). Det innebär att elflyg kan laddas med högre effekt, och att laddningen kommer gå snabbare än beräknat i scenariona. Att effekten höjs innebär att risken också höjs, då konsekvenserna av en eventuell olycka skulle bli större.

Generellt visade resultatet av felfunktionsanalysen på att de tillfrågade respondenterna uppfattade större risker med infrastruktur som var ny för flygplatser jämfört med risker som uppfattades med befintlig infrastruktur som behöver utökas och vars användningsprofil ändras.

Det minst komplexa laddningssystemet var laddscenario 1, som innebar att elflyg laddades direkt från elnätet utan laddbilar eller BESS. Det var även, utifrån felfunktionsanalysen, det minst riskfyllda scenariot, förmodligen eftersom färre fel kan uppstå då färre komponenter inkluderas. Scenariot kan dock vara mindre robust då det inte finns en energireserv och elflyg riskerar att bli strandade om det inte skulle vara möjligt att ladda direkt från nätet.

I laddscenario 2 inkluderade ett BESS och det fanns möjlighet att ladda både direkt från elnätet och BESS:et. BESS:et skulle innebära att det finns en möjlighet att minska elkostnader men innebär också att ytterligare en brandrisk introducerades på flygplatser. Det bör bara installeras om det finns utrymme på flygplatser att placera det lämpligt och kompetensen för att hantera det existerar. Ett BESS skulle innebära att det kan vara möjligt för flygplatser att verka i ö-drift vid behov, och de eventuella ekominska vinsterna av BESS bör vägas emot brandrisken. BESS är kostsamma och det behöver också utredas om det är ekonomiskt gynnsamt att installera ett.

Laddscenarion 3, som innebar att elflygen laddades via laddbilar, var väldigt riskfylld enligt felfunktionsanalysen. Hälften av scenariona i felfunktionsanalysen för laddbilar hade ett RPN över 50. Baserat på det kan laddscenariot inte rekommenderas ur en risksynpunkt utan att flera åtgärder tas. Att laddscenario 3 bedömdes så riskfyllt kan bero på att mobila batterilager bedöms osäkra. Mobila batterilager var ett nytt system som ännu inte har implementerats i större utsträckning vid tillfället för rapporten, varken i industrin eller transportbranschen. Dess huvudsakliga marknad var att förse platser med el där det inte var möjligt att ha fast elförsörjning, exempelvis på byggplatser eller i avlägsen glesbygd. De var mobila i syftet att de kan omlokaliseras men de förväntades inte förflyttas flera gånger per dag. Mobila batterilager kan dock minska den ekonomiska risken för flygplatser då det kan vara billigare att investera i det än i fast infrastruktur.

7.1.1 Brand

Den primära risken som identifierades på flygplatser för elflyg var brand, antingen på grund av diverse elfel eller termisk rusning. Termisk rusning är en risk i alla litiumjonbatterier och kan få allvarliga konsekvenser i samtliga batterisystem. Det är dock värt att uppmärksamma att konsekvenserna av termisk rusning ansågs mer allvarlig i flygplansbatterier än i andra batterisystem. En anledning till det kan vara att flera personer bedöms kunna vara i riskzonen eftersom ett flygplan kan ha passagerare ombord. Termisk rusning i ett stort BESS kan dock utvecklas till en betydligt större brand om den inte isoleras tidigt, vilket bedöms vara svårt. Eftersom risken för termisk rusning i batterisystem inte kan elimineras idag behöver batterier, oavsett om de är i laddbilar, elflygplan eller i BESS, kunna brinna ut utan risk för annan infrastruktur eller fara för liv. Det ställer krav på BESS placering och på att laddbilar samt elflygplan kan laddas och parkeras på ett sådant sätt att räddningstjänst kan dra dem till en säker plats att brinna ut vid behov. Eftersom placering av laddinfrastruktur är så kritiskt för att minska riskerna med den innebär det även att det finns en risk att vissa flygplatser får platsbrist.

7.1.2 Kompetens

Den här undersökningen precis som tidigare forskning visar på att personalens kompetens på flygplatsen kommer vara central (Gu m.fl., 2023, s. 9; Rane m.fl., 2023, s. 6). Flygplatser behöver redan nu investera i att utveckla kompetens att hantera det nya drivmedlet. Felfunktionsanalysen visar på att risken blir betydligt lägre med de olika batterisystemen om kunskap finns hur deras risker ska hanteras hos personalen. Utmaningen kommer vara som störst i övergångsfasen då både flygbränsle och el ska hanteras. Det beror på att drivmedelinfrastrukturen då kommer vara som mest komplex och därför sårbar samtidigt som laddsystemen inte ännu kommer vara helt inarbetade hos personalen. Förändringen kommer dock inte ske över en natt utan förmodligen kommer elflygplan introduceras succesivt vilket ger verksamheten en möjlighet att bygga upp kompetens och säkerhetsrutiner.

7.1.3 Regelverk

Det finns ännu inget regelverk som hanterar säkerheten kring elflygplan även om ett sådant förväntas inkluderas i EASA:s regelutveckling 2026 (Lundblad m.fl., 2022, s. 80). Det är centralt att ett regelverk för elflygplan implementeras innan elflyg introduceras kommersiellt och inte släpar efter eller fördröjer introduktionen. Det är dels viktigt att en omställning till fossilt fritt flyg sker för miljön men det är också viktigt att flygplatserna vet vilka förhållningsregler som gäller så de kan planera sin riskhantering. Det krävs även att det finns ett anpassat regelverk så flygplatser blir tvungna att upprätta hålla en bra standard på säkerheten kring laddning av elflyg. Det är viktigt att det inte blir som för laddning av elbilar där det ännu inte finns ett regelverk som reglerar riskhanteringen av laddning av elbilar eller ställer krav på brandskydd för elbilsgarage. Trots att det är krav på att det ska finnas laddning för elbilar på parkeringsplatser och i garage som är av en viss storlek enligt Boverkets föreskrifter och allmänna råd om utrustning för laddning av elfordon (BFS 2021:2). EASA och Transportstyrelsen behöver hålla jämna steg med utvecklingen av elflygplan för att kunna reglera den.

7.2 Undersökningens felfunktionsanalys

För att analysera tillkomna risker för flygplatser med elflygplan valdes metoden felfunktionsanalys. Metodvalet berodde på att metoden historiskt använts inom branscherna som undersökningen rörde och på att metoden ska vara bra för att analysera komplexa mekaniska system. Under undersökningen framkom det att det var ett bra verktyg för att använda på enskilda system men svår att applicera så helheten av infrastrukturen inkluderades. En flygplansmiljö är komplex och systemen samspelar, en risk som finns i ett system kan få konsekvenser för andra system. Scenarion som var en kombination av fel eller fel i samarbetet mellan olika system var svåra att inkludera. Exempelvis framkom inte risken av att kombinera olika drivmedel som flygbränsle och el tydligt.

Metoden valdes också på grund av att den möjliggjorde att sätta värden på risker. Kvantifiering har fördelar och nackdelar men är ett sätt att mäta risk och fördelaktig om system ska jämföras. Även om målet med arbetet inte var att jämföra risker ville jag att det skulle vara möjligt då jag ansåg att det skulle vara intressant att i framtiden kunna jämföra risker med elflygplan och traditionellt flygplansbränsle. I den här metoden valde jag att kvantifiera feleffekter, felorsaker och upptäckningsmetoder utifrån sannolikhet och allvarlighet med hjälp av expertkunskap. Det innebär att studien visar hur stora, experter anser att risker kommer vara grundad på deras kunskap. Jag valde att kvantifiera RPN med hjälp av enkätstudie då jag ansåg att det var bättre än alternativet som var kvantifiera dessa nyckelvärden med statistisk. Problemet med att kvantifiera nyckelvärdena med statistik var att det var svårt att hitta statistik som var tillräcklig specifik för systemen i Laddscenariona, framför allt för system som var nya eller ännu inte helt utvecklade. Som exempel var syftet att få nyckelvärden inte bara för en transformator utan för en oljeisolerad transformator med en specifik lastprofil.

Idén med enkätstudien var att få in många respondenter från olika områden som kompletterade varandra. Syftet var att de tillsammans skulle utgöra en pålitlig grund för att kvantifiera RPN-värden. I genomsnitt var det tolv respondenter som besvarade varje fråga med 19 respondenter totalt. Under arbetets gång kontaktades ungefär 75 experter som hade relevans inom de olika riskområdena som undersöktes. I efterhand skulle enkäten förkortats och delas upp i flera olika delar så det var enklarare svara inom sin expertis för att få upp svar frekvensen. Den låga svar frekvensen kan dock även till viss del bero på att området elflyg fortfarande var så nytt att de som kontaktades inte var bekväma att besvara enkäten.

I felfunktionsanlysen inkluderades mänskliga faktorer som felorsaker, exempelvis underhållsmisstag eller kompetensbrist. De behandlades i undersökningen på likande sätt som tekniska problem. Det är inte okontroversiellt att inkludera mänskliga faktorer på det här sättet då att kvantifiera mänskliga misstag är svårt. Det kan ifrågasättas etiskt efteresom det kan sätta fokus på individfel. Det var dock viktigt att mänskliga faktorer inkluderades i undersökningen då kompetensbrist hade identifierats som en risk genom den bakomliggande litteraturstudien. Felorsaken ska dock inte ses som ett individfel utan det intressanta var strukturen bakom felet. Ofta beror mänskliga misstag på bakomliggande strukturella problem, att tekniken inte var användarvänlig eller organisationer inte gett personalen förutsättningar att klara av arbetet.

7.3 Vätgasdrivna elflygplan

Under undersökningen valdes det att utesluta vätgasflyg, bränslecellsflyg och seriehybridflyg som alla drivs av vätgas, från riskanalysen. Uteslutningen berodde på att utvecklingen av flygen inte var tillräckligt långt fram och infrastrukturplaneringen för att försörja planen därför inte var tillräckligt färdigställd. Vätgasdrivna plan var intressanta ur perspektiven, att om det fungerar, så har vätgas ett väldigt högt energiinnehåll och är möjligt att framställa igenom elektrolys, vilket kan göras fossilfritt. Det finns dock stora tekniska och säkerhetsmässiga utmaningar kvar för att få vätgasdrivna flyg att fungera. Riskerna med drivmedlet är stora, förmodligen större än med elflygplan i storskalig användning på grund av vätgasens explosiva egenskaper. I och med de utmaningarna återstår det att se om vätgasdrivna flyg kommer bli ett alternativ i framtiden, Airbus har nu skjutit på sitt vätgasdrivna flygprogram som tidigare planerade att lansera kommersiella flyg 2035 och kapat sin budget till en fjärdedel (Harrington, 2025). Införs vätgasinfrastruktur på flygplatser kommer det dock öka risken med andra elflyg också då det skulle öka komplexiteten på flygplatsen.

7.4 Risk för vem?

En viktig aspekt när riskutredningar utförs är i vilket syfte de utförs och vilken risk som undersöks. I den här undersökningen har främst tekniska risker som kan leda till kroppslig eller materiell skada undersökts. Undersökningen var även begränsad till flygplatserna geografiska område. Det är dock även relevant att undersöka vilka andra risker som finns med den nytillkomna infrastrukturen. Det finns även ett argument att risker i exempelvis

batteritillverkningen kan ses som flygbolags och flygplatsers ansvar och risker, då det är deras underleverantörer.

Förhoppningen med elflyg är att Sveriges koldioxidavtryck ska kunna minskas och föra landet närmare sina mål om minskade utsläpp av växthusgaser. Det är dock viktigt att vi genom elflygplan inte endast flyttar eller förändrar riskerna. Det finns två viktiga aspekter att ta hänsyn till ur en hållbarsynpunkt, hur hållbart är elflyg miljömässigt och hur hållbart det är etiskt. Det behöver fastställas att batterier är bättre ur en miljösynpunkt än fossila bränslen och att det inte endast påverkar miljön på ett annat sätt. Ur ett etiskt perspektiv är batteritillverkning heller inte problemfritt, gruvbrytningen efter metallerna som krävs i batterier är förknippat sociopolitiska problem. Arbetsvillkoren i många gruvorna är dåliga och det förekommer barnarbete samtidigt som närliggande samhällen inte alltid får ta del av vinsten (Sveriges geologiska undersökning, 2018; Surma, 2023). Det behöver även fortsättas forskas på hur litiumjonbatterier kan återvinnas och återanvändas mer effektivt så metallerna inte förbrukas och deras klimatpåverkan blir mindre. Med flygplansbatterierna skulle det kunna vara aktuellt att de kan återanvändas i batterilager då det ofta finns kvar kapacitet i fordonsbatterier när de slutas användas (Melin, 2025, s. 19–20). Sammantaget behöver de negativa aspekter med elflyg vägas emot systemet som finns idag inom flygbranschen med fossila bränslen för att kontrollera att elflyg kan vara mer hållbara.

7.5 Framtida forskning

Förslag på vidare forskning som kan komplettera denna undersökning hade varit att utföra andra typer av riskanalyser som HAZARD, HAZOP, FHA eller PHA för laddinfrastruktur för elflygplan. Att utföra olika typer av riskanalyser skulle säkerställa att fler relevanta risker inkluderades. Som tidigare nämnt i diskussionen så kvantifierades nyckelvärdena till RPN:et med hjälp av en enkätstudie som besvarades av experter. En utveckling av den här undersökningen hade därför även varit att komplettera felfunktionsanalysen med tillgänglig statistik.

De tidigare nämnda riskanalyser skulle sedan kunna jämföras med riskanalyser för traditionell flygplansinfrastruktur för att bedöma vilket drivmedel som vore att föredra ur ett säkerhetsperspektiv. Jämförelsen borde i så fall utföras med hänsyn till att även om elektriska flygplan kommer med vissa risker innebär det inte att det skulle vara ett sämre alternativ än vårt nuvarande system. Människor brukar vara tveksamma till ny teknologi och det kan vara bättre att introducera ny teknik som har vissa risker men som ändå är ett steg framåt och bättre än det gamla alternativet.

Undersökningen som utförts hade även kunnat upprepats för en specifik flygplats i Sverige för att scenariona ska kunna bli mer specifika. Det skulle då vara enklarare att bedöma riskerna för olika laddscenarion. Som exempel visade felfunktionsanalysen på att batteriernas mående kan kopplas till temperaturförhållanden. Detta tyder på att flygplatser lokaliserade i norra Sverige kommer behöva ställa andra krav på batterier och laddningsutrustning än i södra Sverige. Utrustning kommer även slitas olika beroende på hur klimatet är. För att få en mer

noggrann riskutredning behövs därför mer information om specifika förhållanden på flygplatserna.

Till sist vore det även aktuellt att undersöka hur säkerhetsläget i Sverige påverkar riskbedömningar för flygplatser och se hur den antagonistiska hotbilden mot Sverige spelar in i det. Det vore även intressant att inkludera antagonistiska hot i en riskstudie om elflygplansinfrastruktur för att analysera om den vore säkrare än dagens infrastruktur eller om den öppnar upp för nya typer av attacker.

8. Slutsatser

Syftet med undersökningen var att identifiera och analysera vilka primära risker som i framtiden kommer tillkomma för flygplatser med infrastruktur för elflygplan samt förslå riskreducerande åtgärder som skulle kunna implementeras för att hantera sagda risker. Riskerna undersöktes genom en felfunktionsanalys på tre olika laddscenarion och utifrån den föreslogs sedan specifika åtgärder för att minska riskerna.

I samtliga laddscenarion var den primära risken brand, som kunde orsakas av elfel eller termisk rusning som berodde på bristande kompetens eller underhåll som kan leda till eldsvådor. För att minska risken för brand behövdes det generellt införas kontrollmetoder för att säkerställa att personal har rätt kompetens. Förslaget var då att det skulle finnas krav på certifiering och utbildning hos personal som hanterade infrastrukturen. I och med brand var den vanligaste och ofta allvarligaste konsekvensen av de undersökta felfunktionerna ansågs det även viktigt att räddningstjänsten har förutsättningar för att hantera de typerna av bränder som kan uppstå.

För att personal på flygplatsen ska ha rätt kompetens behövs det att flygbranschen nu investerar i kompetensökning och forskning inom relevanta områden. De bör dra nytta av erfarenheten som finns inom industrin, med batterier och ellastbilars laddinfrastruktur. Infrastrukturen på flygplatsen kommer öka i komplexitet när elflyg introduceras och den nya infrastrukturen behöver implementeras med en genomtänkt strategi och riskmedvetet. För att säkerställa att det sker behövs det ett anpassat regelverk som reglerar inrättandet laddinfrastruktur för elflygplan.

Många av riskerna som uppkom i undersökningen var inte nya, industrier hanterar redan risker med el, vätgas och batterier idag. Det var miljön och omständigheterna som var ny. Elanvändningen och effektnivåerna av energi som kommer hanteras av flygplatser bedöms också bli större än vad de är vana vid men förändringen kommer inte ske över en natt. Med investeringar i kompetens, utredningar och ett anpassat regelverk för laddning av elflyg så är min bedömning att det kommer vara möjligt för flygplatser att hantera elflyg på ett säkert sätt.

Referenser

Airbus (2022). *Airbus' high-voltage battery technology prepares for EcoPulse flight test and beyond | Airbus*. https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2022-03-airbus-high-voltage-battery-technology-prepares-for-ecopulse-flight-test [Hämtad: 2025-02-26].

Airbus (u.å.). *Airbus Aerostack*. https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe/airbus-aerostack-gmbh [Hämtad: 2025-04-01].

Alfredsson, Hampus, Nyman, Joakim, Joborn, Martin, Staack, Ingo och Oliver, Petit (2022). *Infrastrukturmodellering för storskalig introduktion av elflyg och flygtrafikledning (MODELflyg)*. Göteborg: RISE. No. 2022:49. https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1688604/FULLTEXT01.pdf [Hämtad: 2025-01-21].

Arvid, Björemark (2022). *Energilager i transmissionsnätet för ökad överföringskapacitet*. Sundbyberg, Sweden: Svenska kraftnät. No. 10336447, rev.04. https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2022/energilager-for-okad-overforingskapacitet---2022-12-02.pdf [Hämtad: 2025-02-19].

Avinor och Luftfartilsynet (2020). *Forslag til program for introduksjon av elektrifiserte fly i kommersiell luftfart*. Avinor och Luftfarttilsynet. https://www.regjeringen.no/contentassets/048b277dfe9d4e76a059b0796bbe8b52/200305_rapport-elektrifiserte-fly-i-kommersiell-luftfart_final.pdf [Hämtad: 2025-01-24].

Baker, Elizabeth (2024). *Copenhagen Airport installs battery for green energy storage*. Passenger Terminal Today. https://www.passengerterminaltoday.com/news/sustainability/copenhagen-airport-installs-battery-for-green-energy-storage.html [Hämtad: 2025-02-19].

Berg, Edvin och Haglind, Sebastian (2023). *Utvärdering och implementering av laddinfrastuktur för elflygplan*. Kandidatuppsats. Linköping universitet. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-195196 [Hämtad 2025-03-18].

Braun, Matthias och Classen, Axel B. (2023). Qualitative risk assessment for future hydrogen-enabled airports. *Transportation Research Procedia*, 75, s. 86–95, doi:10.1016/j.trpro.2023.12.011. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523012541 [Hämtad 2025-02-07].

Britsman, Claes, Ottosson, Åke och Tobiasson, Sven Olof (1993). *Handbok i FMEA: failure mode and effect analysis.* Uppsala: Hans & Sveriges verkstadsindustrier.

Carey, Bill (2022). Beta Outlines eVTOL Charging Considerations. *Aviation Week: Network*, 2022-10-25. https://aviationweek.com/business-aviation/beta-outlines-evtol-charging-considerations [Hämtad: 2025-01-24].

ChargeFinder (2025). *CCS laddare*. https://chargefinder.com/se/stats/charger/ccs [Hämtad: 2025-01-24].

CHARIN (2025). *Megawatt Charging System (MCS)*. https://www.charin.global/technology/mcs/ [Hämtad: 2025-01-24].

Circle K (2025). *Laddning för tung trafik*. https://www.circlek.se/elbilsladdning/foretagsladdning/truck [Hämtad: 2025-03-12].

Daniels, David och Eek, Magnus (2024). *The airport as an energy hub*. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). No. 2023/0209–8.1. https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1841546&dswid=8509 [Hämtad: 2025-01-23].

Ding, Yuanli, Cano, Zachary P., Yu, Aiping, Lu, Jun och Chen, Zhongwei (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), s. 1–28, doi:10.1007/s41918-018-0022-z. https://link.springer.com/article/10.1007/s41918-018-0022-z [Hämtad: 2025-04-01].

Doctor, Faiyaz, Budd, Thomas, Williams, Paul. D., Prescott, Matt och Iqbal, Rahat (2022). Modelling the effect of electric aircraft on airport operations and infrastructure. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, s. 121553, doi:10.1016/j.techfore.2022.121553. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522000853 [Hämtad: 2025-01-23].

Du, Haozhe, Zhang, Xu och Yu, Haijun (2025). Design of high-energy-density lithium batteries: Liquid to all solid state. *eTransportation*, 23, doi:10.1016/j.etran.2024.100382. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116824000729 [Hämtad -202-01-29].

Eo.n (2024). *Hitta rätt laddkabel till din elbil och laddhybrid*. Eo.n. https://www.eon.se/ladda-elbil/laddbox/laddkablar [Hämtad: 2025-01-24].

Fossilfritt Sverige (u.å.). *Flygbranschen*. https://fossilfrittsverige.se/roadmap/flygbranschen/ [Hämtad: 2025-05-08].

Ghiji, Mohammadmahdi, Novozhilov, Vasily, Moinuddin, Khalid, Joseph, Paul, Burch, Ian, Suendermann, Brigitta och Gamble, Grant (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*, 13(19), doi:10.3390/en13195117. https://www.mdpi.com/1996-1073/13/19/5117 [Hämtad: 2025-01-30]

GlobeAir (2025). *What does "Turnaround Time" mean?* https://www.globeair.com/g/turnaround-time [Hämtad: 2025-03-13].

Grön Flygplats (u.å.). *Målbild 2045*. https://gronflygplats.se/malbild-2045/ [Hämtad: 2025-01-23].

Gu, Yue, Wiedemann, Mirjam, Ryley, Tim, Johnson, Mary E. och Evans, Michael John (2023). Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges. *Sustainability*, 15(21), s. 15539, doi:10.3390/su152115539. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15539 [Hämtad 2025-02-06]

Harrington, Tony (2025). Airbus delays its ZEROe hydrogen aircraft as UK CAA expands hydrogen programme. *GreenAir News*, 2025-02-10. https://www.greenairnews.com/?p=6742 [Hämtad: 2025-05-05].

Henrich, Isabel (2024). A brief guide: How the Flying Fuel Cell works. *AEROREPORT*. https://aeroreport.de/en/good-to-know/a-brief-guide-how-the-flying-fuel-cell-works [Hämtad 2025-04-01]

Hoseyni, Seyed Mojtaba, Mesbah Mostafa, Mohamed Osman och Cordiner, Joan (2024). Mitigating risks in hydrogen-powered transportation: A comprehensive risk assessment for hydrogen refuelling stations, vehicles, and garages. *International Journal of Hydrogen Energy*, 91, s. 1025–1044, doi:10.1016/j.ijhydene.2024.10.074. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924042654 [Hämtad: 2025-01-17]

Jakobsson, Ulf och Westergren, Albert (2005). Enkätmetodik — en svår konst. *Nordic Journal of Nursing Research*, 25(3), s. 72–73, doi:10.1177/010740830502500315. https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/010740830502500315?utm_source=summon&utm_medium=discovery-provider [Hämtad: 2025-03-28]

Jeevarajan, Judith A., Joshi, Tapesh, Parhizi, Mohammad, Rauhala, Taina och Juarez-Robles, Daniel (2022). Battery Hazards for Large Energy Storage Systems. *ACS Energy Letters*, 7(8), s. 2725–2733, doi:10.1021/acsenergylett.2c01400. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c01400 [Hämtad:2025-01-27]

Jiang, Kangrui, Tian, Zhongbei, Cullis, Ian, Proud, William G. och Hillmansen, Stuart (2025). Towards sustainable mobility: A systematic review of hydrogen refueling station security assessment and risk prevention. *International Journal of Hydrogen Energy*, 105, s. 1266–1280, doi:10.1016/j.ijhydene.2025.01.348. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992500391X [Hämtad: 2025-02-17]

Kikukawa, Shigeki, Mitsuhashi, Hirotada och Miyake, Atsumi (2009). Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), s. 1135–1141, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.10.093. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908014456 [Hämtad: 2025-02-18]

Konsumenternas Energimarknadsbyrån (2025). *Normal elförbrukning och elkostnad för villa*. http://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elkostnader/elforbrukning/normal-elforbrukning-och-elkostnad-for-villa/ [Hämtad: 2025-03-13].

KTH (u.å.). *TRL - Technology Readiness Levels*. https://intra.kth.se/forskning/extern-forskningsfin/internationell-finan/eu-finansiering/cross-cutting-issues/trl-technology-readiness-levels-1.406254 [Hämtad: 2025-03-12].

Kumar, Anuj och Gupta, Ram K. (2025). Chapter 1 - Basics of fuel cells. I: Kumar, Anuj och Gupta, Ram K. (red.) *Fuel Cells Technology and Electrode Materials for a Sustainable Future*. Elsevier, s. 1–21. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443240386000010 [2025-04-01].

Lundblad m.fl. (2022). *Fossilfritt flyg i norra Sverige*. RISE, Biofuel, Swedavia, Umeå Kommun.

https://www.umea.se/download/18.7812482218690c087286287b/1678713938302/PO_555_FFFLYG_V10_ho%CC%88gupplo%CC%88st%20(1).pdf. [2025-05-09]

Lupton, Deborah (2013). *Risk*. 2nd ed. London: Routledge.

Melin, Eric (2025). Forskningsöversikt om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier. *Circular Energy Storage*. https://www.energimyndigheten.se/4a2d67/globalassets/forskning--innovation/overgripande/forskningsoversikt-om-atervinning-och-aterbruk-av-litiumjonbatterier-2019.pdf [Hämtad: 2025-05-05]

MSB (2024). *Vätgas*. https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/brandfarligt-och-explosivt/brandfarliga-gaser/vatgas/ [Hämtad: 2025-01-21].

Nationalencyklopedin (u.å.). risk. I: *Nationalencyklopedin AB*. https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/risk [Hämtad: 2025-03-31].

POWR2 (2025). *POWRBANK MAX Can Handle It*. https://powr2.com/powrbank-max/ [Hämtad: 2025-03-14].

Rane, Jayaraj, Solanki, Bharatkumar, Cary, Scott, Joshi, Prateek och Ganguly, Subhankar (2023). *Overview of Potential Hazards in Electric Aircraft Charging Infrastructure*. Gloden: National Renewable Energy Laboratory. No. NREL/TP--5R00-83429. https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/83429.pdf [Hämtad: 2025-01-24].

RISE (2024). *AIR-Charge: Feasibility study on system demonstrator for high-power charging of battery-electric aircraft*. Göteborg: RISE, Heart Aerospace, Swedavia, KEMPOWER, AstaZero, Lindholmen Sience Park. No. 2024:88. https://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1917736&dswid=783 [Hämtad: 2025-03-12]

Runefors, Marcus (2023). *Säker vätgashantering i tätbebyggda områden*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). No. MSB2209 – oktober 2023. https://rib.msb.se/Filer/pdf/30476.pdf?utm_source=chatgpt.com [Hämtad: 2025-02-18].

Sager, Anna, Alfredsson, Hampus, Esbjörnsson, Mattias och Holmberg, Per-Erik (2022). *Internationell forskning och finansiering för elflyg*. RISE Research Institutes of Sweden, Mobility and Systems. Omvärldsanalys No. 2022:74. https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1658970/FULLTEXT01.pdf [Hämtad: 2024-11-21].

Salomonsson, Johan och Jusslia Hammes, Johanna (2020). *Det kommersiella elflyget – verklighet eller dröm?* VTI. No. VTI rapport 1039. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1422314/FULLTEXT02.pdf [Hämtad: 2025-01-21].

Sankir, Mehmet och Demirci Sankir, Nurdan (2018). *Hydrogen storage technologies*. 1st edition. Hoboken, NJ: Wiley.

SAS (2024). *SAS i hydrogen-samarbete med Airbus, Vattenfall, Swedavia och Avinor - SAS*. https://www.sasgroup.net/newsroom/press-releases/2024/sas-i-hydrogen-samarbete-med-airbus-vattenfall-swedavia-och-avinor/ [Hämtad: 2025-01-22].

Scania (2025a). *Batteridriven ellastbil*. https://www.scania.com/se/sv/home/products/trucks/battery-electric-truck.html [Hämtad: 2025-03-12].

Scania (2025b). *A closer look at Scania's next-generation battery*. https://www.scania.com/group/en/home/electrification/e-mobility-hub/a-closer-look-at-scanias-next-generation-battery.html [Hämtad: 2025-03-12].

Smedberg, Arne, Norberg, Ida och Oja, Simon (2021). *Electric aviation 2021: technology overview*. FAIR. https://www.kvarken.org/wp-content/uploads/2021/06/Electric_aviation_2021_technology_overview.pdf [Hämtad: 2025-01-23].

Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Second edition. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press.

Surma, Katie (2023). Corruption and Rights Abuses Are Flourishing in Lithium Mining Across Africa, a New Report Finds. *Inside Climate News*. https://insideclimatenews.org/news/15112023/lithium-mining-africa-human-rights-violations-corruption/ [Hämtad: 2025-05-05].

Sutton, Ian (2014). Chapter 5 - Safety and Environmental Management Systems. I: *Offshore Safety Management*. Oxford: William Andrew Publishing, s. 139–212. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323262064000058 [Hämtad: 2025-03-26].

Svensson, Christian, Oliveira, Amir A. M. och Grönstedt, Tomas (2024). Hydrogen fuel cell aircraft for the Nordic market. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, s. 650–663, doi:10.1016/j.ijhydene.2024.02.382. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924008243

Sveriges geologiska undersökning (2018). *Kobolt – en konfliktfylld metall*. https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2018/januari/kobolt--en-konfliktfylld-metall/ [Hämtad: 2025-05-05].

Grönflygplats. *Grönflygplats: Målbild 2045*. Grönflygplats. https://gronflygplats.se/wp-content/uploads/2022/06/Gro%CC%88n-flygplats-Rapport-Ma%CC%8Albild-2045.pdf [Hämtad: 2025-01-23].

Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om godkännande av flygplats, (TSFS 2019:18). Transportstyrelsen. https://transportstyrelsen.se/TSFS/TSFS%202019_18.pdf

Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhetsledning av godkänd flygplats. (TSFS 2019:20). Transportstyrelsen. https://www.transportstyrelsen.se/TSFS/TSFS%202019_20.pdf

Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om beredskap för räddningsinsatser samt räddningstjänst på flygplats. (TSFS 2019:25) https://www.transportstyrelsen.se/TSFS/TSFS%202019_25.pdf

Trafikanalys (2020). *Elflyg – början på en spännande resa – redovisning av ett regeringsuppdrag*. Rosenlundsgatan 54, 118 63 Stockholm: Trafikanalys. No. 2020:12. https://www.svensktflyg.se/wp-content/uploads/2020/12/rapport-2020_12-elflyg_borjan-pa-en-spannande-resa.pdf [Hämtad: 2025-01-21].

Trafikverket (2024). *Förutsättningar för elflyg i upphandlad flygtrafik*. Borlänge: Trafikverket. No. 2024:100. https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1863566/FULLTEXT01.pdf [Hämtad: 2025-01-21].

Transportstyrelsen (2024a). *Klimat*. https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/miljo-och-halsa/Klimat/ [Hämtad: 2024-11-20].

Transportstyrelsen (2024b). *Åtgärder för att minska flygets klimatpåverkan*. https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/miljo-och-halsa/Klimat/atgarder-for-att-minska-flygets-klimatpaverkan/ [Hämtad: 2024-11-20].

Transportstyrelsen (2025). *Landningsfrekvens per flygplats 2024*. https://www.transportstyrelsen.se/sv/om-oss/statistik-och-analys/statistik-inom-luftfart/flygplatsstatistik/ [Hämtad: 2025-02-27].

Vattenfall (u.å.). *När är elen billigast på dygnet?* https://vattenfallsales-web-prd.azurewebsites.net/fokus/tips-rad/nar-ar-elen-billigast/ [Hämtad: 2025-03-18].

Volvo (2025). *Våra ellastbilar*. https://www.volvotrucks.se/sv-se/trucks/electric.html [Hämtad: 2025-03-12].

Vätgas Sverige (u.å.). *Vätgas och säkerhet*. https://vatgas.se/fakta/vatgas-och-sakerhet/ [Hämtad: 2025-02-17].

Yu, Xiqian, Chen, Rusong, Gan, Luyu, Li, Hong och Chen, Liquan (2023). Battery Safety: From Lithium-Ion to Solid-State Batteries. *Engineering*, 21, s. 9–14, doi:10.1016/j.eng.2022.06.022. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809922006282 [Hämtad: 2025-01-31]

WWF (u.å.). *Extremväder*. https://www.wwf.se/klimat/extremvader/#vad-ar-extremvader [Hämtad:2025-06-16]

Bilaga A

Intervju upplägg Henrik Littorin:

Presentera mig och fråga honom vilken roll han har.

Diskutera vilka risker han ser med en implementering av elflyg och vad som planeras implementeras.

Frågor:

Får jag spela in och använda materialet i mitt examensarbete?

Vad är du kunnig inom?

Hur långt är ni i planeringen? Är allt hypotetiskt eller har det börjat byggas?

Vilka typer av ”gröna flyg” planerar ni att kunna ta emot?

Har du koll på regelverket kring batterier?

Planeras ett energilager? Hur stort?

Hur ska laddningen gå till? Kabel direkt från elnätet?

Vilken effekt bedömer ni är rimligt att erbjuda?

Energiproduktion på plats?

Planeras det för vätgas? Flytande eller gasform? Hur mycket?

Vilka risker ser du med infrastrukturen för elflyg? Hur hanterar ni den?

Vilka risker ser du med infrastrukturen för vätgas? Hur hanterar ni den?

Kan du nåt om elektromagnetisk interferens och har det någonting ni arbetar med?

Bilaga B

Tabell B.1. Inrikes landningar på medelstora flygplatser i Sverige (Transportstyrelsen, 2025).

Flygplats	**Inrikes landningar (st)**
Ängelholm	1968
Åre-Östersund	1788
Visby	3162
Umeå	4856
Skellefteå	1385
Ronneby	1213
Malmö	3519
Lycksele	1087
Luleå	4203
Kiruna	1104
Gällivare	1033

Bilaga C

Tabell C.1. Allvarlighetsskala för felfunktionsanalysen och enkäten.

Effekt på systemet	Grad	Definition
Ingen	1	Felet orsakar ingen olycksrisk eller inverkan på systemet
Väldigt liten	2	Felet orsakar ingen olycksrisk eller ringa skada, systemfunktionen förblir intakt
Liten	3	Felet leder till ringa skada eller kan orsaka lindriga personskador
Väldigt låg	4	Felet leder viss skada eller personskador kan inte uteslutas
Låg	5	Felet leder skada eller viss personskada
Medel	6	Felet leder till distribuerad skada eller personskada
Hög	7	Fel leder till personskador och materiella skador
Väldigt hög	8	Fel leder till allvarliga skador eller allvarliga materiella skador
Oerhört hög	9	Felet leder till mycket allvarliga skador eller till och med dödsfall, eller betydande materiella skador
Katastrofal	10	Felet leder till många dödsfall och stor materiell förstörelse

Tabell C.2. Felintensitetskala för felfunktionsanalysen och enkäten.

Beskrivning	Grad	Definition
Nästan aldrig; Fel är osannolikt	1	Mindre än 1 gång/100 år eller 1/1 000 000 event
	2	Mindre än 1 gång/10 år eller 1/100 000 event
Låg sannolikhet; Relativt få fel inträffar	3	Mindre än 1 gång/5 år eller 1/50 000 event
	4	Mindre än 1 gång /1 år eller 1/10 000 event
	5	1 gång /1 år - 1 gång/6 månader eller 1/1000 event
Måttlig sannolikhet; Enstaka fel inträffar	6	1 gång/3 månader eller 3/1000 event
	7	1 gång/1 månad eller 1/100 event
Hög sannolikhet; upprepande fel inträffar	8	1 gång/1 vecka eller 5/100 event
	9	1 gång/veckan - 1 gång/1 dag eller 1/10 event
Mycket hög sannolikhet; misslyckande är nästan oundvikligt	10	En gång/dag eller 1/1 event

Tabell C.3. Upptäcktsannolikhetskala för funktionsanalysen och enkäten.

Upptäckt	Grad	Definition
Nästan helt säkert	1	Felet är uppenbart eller så det finns en automatisk inspektion som underhålls och kalibreras. Alt. Beprövade upptäckningsmetoder används i konceptstadiet
Väldigt troligt	2	Det finns en automatiskt inspektion/kontrollmetod som täcker hela systemet/produkten. Det är möjligt att göra simulationer i designstadiet
Mycket Troligt	3	Viss SPC (statistisk processkontroll) används och åtgärder tas snabbt om okontrollerade tillstånd uppstår. Simulationer eller modellering sker tidigt.
Troligt	4	Viss SPC används och åtgärder tas omedelbart om okontrollerade tillstånd uppstår. Tester sker på prototyper för systemkomponenter
Måttlig	5	Lite SPC används och produkten är inspekterad off-line innan den släpps. Tester sker på förproduktionssystemkomponenter
Låg	6	Produkten inspekteras manuellt go/non-go eller annan typ av protokoll. Tester sker på liknande komponenter.
Mycket låg	7	Produkten inspekteras manuellt i processen. Tester sker på produkter med prototyper med systemkomponenter installerade
Osannolikt	8	Systemet/produkten antas vara säker baserat på slumpmässigt urval eller är svårt att upptäcka. Hållbarhetstester på produkter med systemkomponenter installerade
Mycket osannolikt	9	Systemet/produkten provas/inspekteras sporadiskt eller så är felet osannolikt att upptäckas
Inte möjligt	10	Systemet/produkten kan inte provas/inspekteras och det är osannolikt att det upptäcks

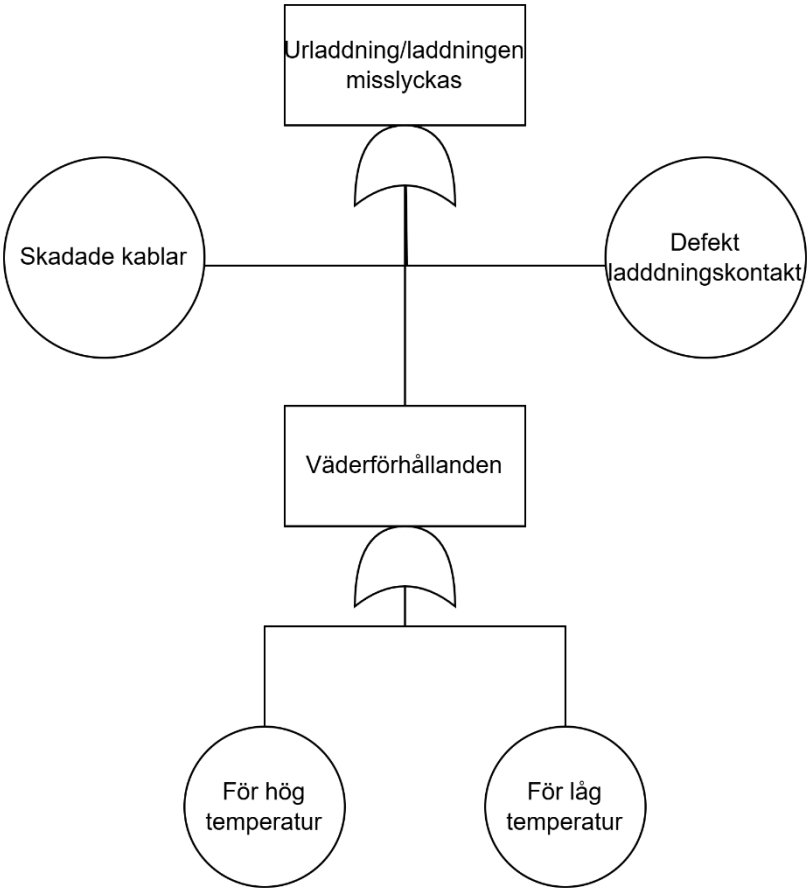
Bilaga D

	OCH -grind
	ELLER-grind
	Bashändelse
	Diamanthändelse (outvecklad händelse)
	Systemhändelse

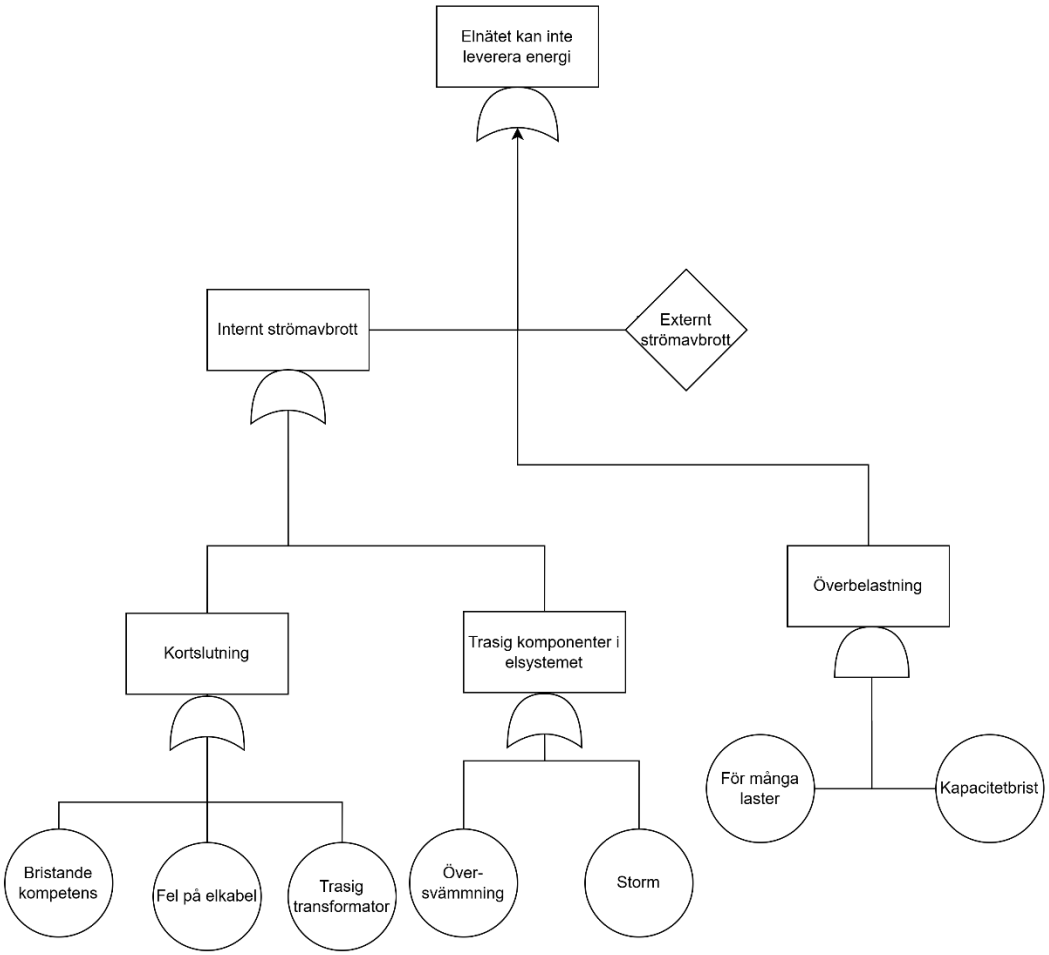
Figur C.1. Visar vanliga symboler för felträd.

Bilaga E

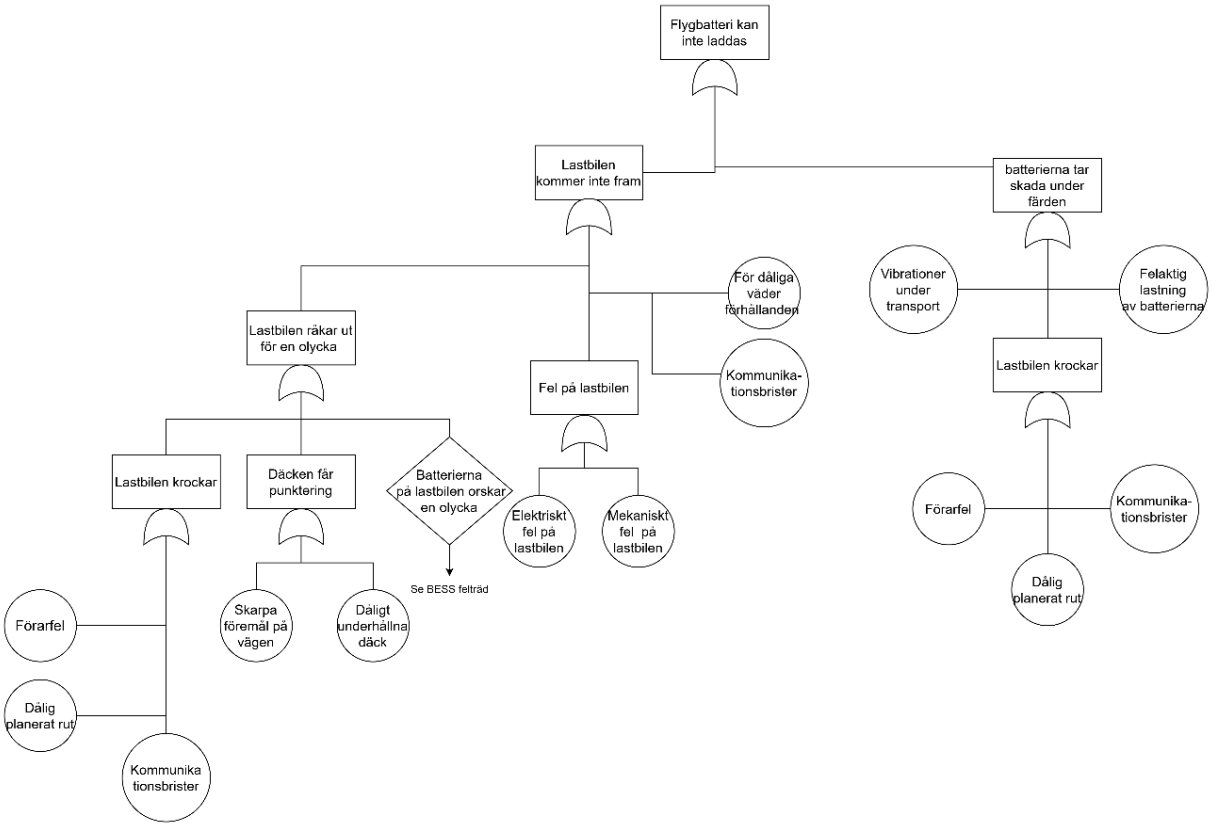
Felträd kopplade till felfunktions analysen.



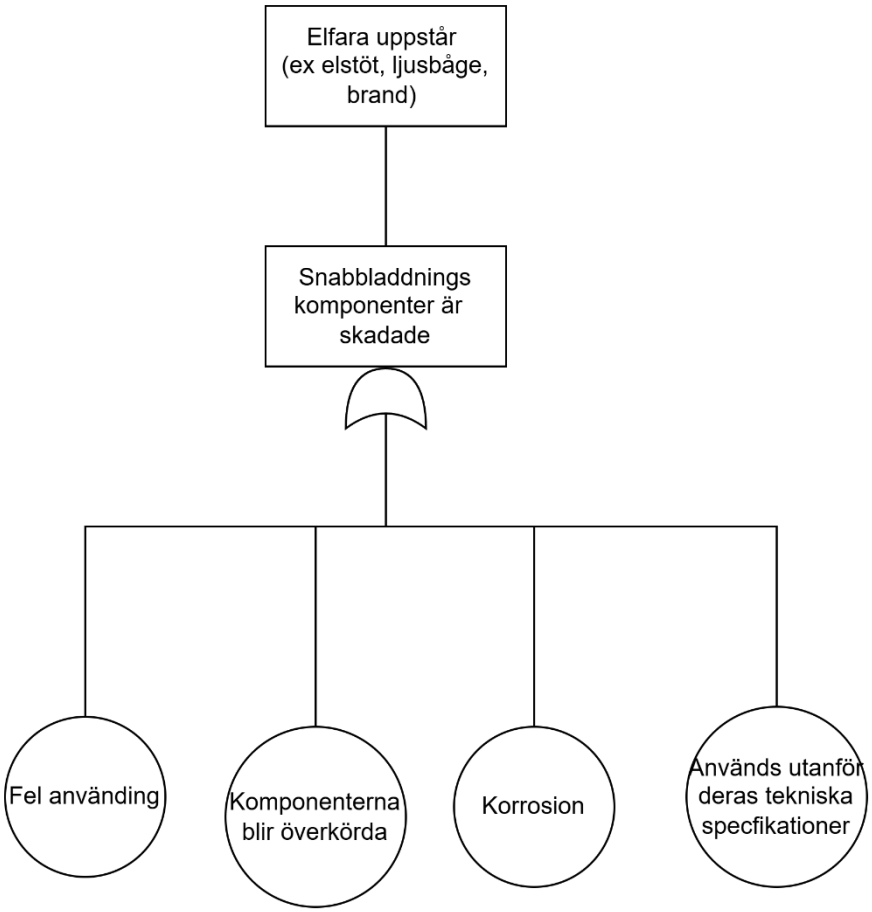
Figur D.1. Felträd över att urladdningen eller laddningen av ett batterisystem misslyckas.



Figur D.2. Felträd över strömavbrott på en flygplats.



Figur D.4. Felträd över att elflygplan inte kan laddas.



Figur D.3. Felträd över att en elfara uppstår.

Bilaga F

Enkätstudiens frågor.

F.1 Bakgrundsfrågor

1. In what field do you work in today? Please choose the word that best describes the area of your work.

2. Approximately how many years have you worked in your field?

3. I accept that my anonymous responses to this survey are published as part of the research project TAKEOFF and the master thesis: Yes or No.

4. Describe your job role in one sentence.

F.2 Frågor om transformatorstationen

5. The transformer can have the following errors; it can overload, have internal faults or an oil leak. Which in turn can have the following effects: fire, reduced lifespan for the trans former, damaged equipment and power outages. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 2)

6. The transformer can also be damaged in an accident (hit by ground vehicles or aircraft) which can have the effects; fire, personal injury, damaged equipment and power outages. How severe are the effects of these kinds of damages? (Antal obesvarade = 2)

7. Overheating of the transformer can be caused by overloading, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 4)

8. Overheating, internal failure and oil leakage in the transformer can be caused by poor maintenance, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 4)

9. Overheating in the transformer can be caused by insufficient cooling, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

10. Overloading, internal faults and oil leakage in the transformer may be due to design er rors/manufacturing defects, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

11. Overloading, internal faults and oil leakage in the transformer can also caused by an oper atoring error, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

12. What do you estimate the frequency of the occurrence of the transformer being hit by an aircraft or ground vehicle to be? (Antal obesvarade = 6)

13. To detect transformer overloading, there are control methods through system monitoring, maintenance and relays. What is the probability that these methods will detect the error in time to take action? (Antal obesvarade = 6)

14. To detect poor maintenance of transformers, there are control methods through internal routines. What is the probability that these methods will detect the error in time to take action? (Antal obesvarade = 6)

15. To detect insufficient cooling of the transformer, there are control metods through temper ature sensors. What is the probability that these methods will detect the error in time to take action? (Antal obesvarade = 6)

16. To detect design/manufacturing errors in the transformer, there are internal control methods and the transformer is tested during installation. What is the probability that these methods will detect the error in time to take action? (Antal obesvarade = 7)

17. There are internal control methods to detect operating errors regarding the transformer. What is the probability that these methods will detect the error in time to take action? (Antal obesvarade = 6)

18. Is there anything you would like to comment on regarding the transformer? Or any error modes/effects/causes you think should be included in the analysis? (Antal obesvarade = 13)

F.3 Frågor om elnätet på en flygplats.

19. There is a power outage, which can lead to the error effects fire, arc flash (ljusbåge) and/or the shutdown of important systems without backup systems. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 5)

20. The power grid can cause electromagnetic interference (EMI) which can have the effect that aircraft navigation systems fails. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 6)

21. If the airports electric grid is overloaded it can have the effect that the grid are unable to deliver electricity. How severe are the error effect? (Antal obesvarade = 5)

22. A power outage may be caused by a fault in an electrical cable (cable corrosion, cable breakage or poor insulation) what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

23. A power outage can also be caused by bad weather conditions (e.g. storm, lightning, etc.) what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

24. A power outage could also be caused by a faulty transformer, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

25. Network overload can be caused by capacity shortages, what do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 7)

26. EMI can be caused by unshielded cables or insufficient shielding. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 7)

27. To detect electrical cable faults in the power grid, there control methods through earth fault monitoring for smaller cables and earth fault protection for larger cables. What is the probability that these methods will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 6)

28. To detect whether the transformer is faulty, there are control methods through systems monitoring. What is the probability that these methods will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 7)

29. To detect overloading in the electrical grid, there are control methods through systems monitoring. What is the probability that these methods will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 7)

30. To detect EMI, disturbances are measured during the installation of larger electrical com ponents. What is the probability that these methods will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 7)

31. Do you have anything you would like to comment on about the electricity grid? Or any mal function/effect/cause you think should be included in the analysis? (Antal obesvarade = 17)

F.4 Frågor om BESS

32. The batteries in the BESS can have the following errors: internal/external short circuits, unstable electrolytes, surveillance monitoring faults or the quality of the batteries are low. All of these erros can lead to thermal runaway, which in turn can result in the release of toxic gases, explosions, and fire. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

33. When charging the BESS magnetic fields are generated which can disturb other electronics. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 5)

34. It is not possible to charge/discharge the BESS which have the effect that it is not possible to use. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 6)

35. An internal short circuit and unstable electrolytes can be caused by a fault in the BMS (Battery Management System). What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

36. Errors may also occur due to lack of competence in personnel, which can lead to overcharging or charging outside the specified temperaturers. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

37. Aninternal short circuit and unstable electrolytes may also be caused by error in the Heating, ventilation, and air conditioning system (HVAC). What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

38. The BESS might be damaged due to extrem weather (due too high or too low temperature). What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

39. The BESS might take damage due mechanical damage. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

40. An extern short circuit can be caused by too high/low impedans. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

41. The EMI can be caused by insufficient shielding, EMI filters are insufficient or the grounding is not sufficient. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

42. The BESS discharge/charge does not work due to damaged cables or defective charging connector. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

43. The batteries in the BESS are of poor quality caused by lack of regulation, testing and there is no transparency in manufacturing. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

44. To detect different errors in the BESS a BMS is used. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 6)

45. What is the probability that BMS will alert that it is something wrong with its own system in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 5)

46. To detect EMI, the magnetic field of the BESS is measured before implementation. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 7)

47. Do you have anything you would like to comment on about the BESS? Or any malfunc tion/effect/cause you think should be included in the analysis? (Antal obesvarade = 14)

F.5 Frågor om mobilt BESS

48. It is not possible to charge/discharge the mobile BESS or the truck can not reach the charging station which means that the aircraft can not be charged. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 6)

49. A thermal runaway can start in the batteries on the truck start which leads to an explosion and a fire. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

50. The batteries on the truck are damaged during the transportation. They can have a short circuit or need to be replaced. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

51. The truck is in an accident which causes both personal injuries and material damage. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

52. The truck does not make it to the charging station due to bad weather conditions. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

53. The truck does not make it to the charging station due to poor communication. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

54. The truck does not make it to the charging station due a fault with the truck. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

55. The batteries start a thermal runaway caused by an external/internal short circuit, unstable electrolytes or a fault in the BMS. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

56. The batteries are damaged during transportation caused by incorrect loading onto the truck. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

57. The batteries are damaged during transportation due to the truck being in accident. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

58. The batteries are damaged during transportation caused by vibrations in the truck. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

59. The truck is involved in an accident due to human factor (driver error, a poorly planned rut or poor communication) . What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

60. The truck is involved in an accident caused by a serious fault with the truck. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

61. Charging/discharging of the mobile BESS fails and is caused by damaged cables or defective charging connector. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

62. Charging/discharging is not possible due to the weather being to hot or cold. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

63. The BMS can detect internal/external short circuit, unstable electrolytes and damaged ca bles/charging contact in the mobile BESS. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 5)

64. What is the probability that the BMS for the mobile BESS alerts that something is wrong with its own system in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 5)

65. To detect improper loading of batteries the truck is inspected by personnel. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 5)

66. To detect vibrations, they are measured by personnel before implementing mobile BESS. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 8)

67. To detect if the route is poorly planned there is an internal feedback system. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 7)

68. To detect serious faults with the truck they undergo regular service and inspection. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 6)

69. Do you have anything you would like to comment on about the mobile BESS? Or any mal function/effect/cause you think should be included in the analysis? (Antal obesvarade = 18)

F.6 Frågor om laddningsutrustning

70. Damaged cables or a defect CCS can result in the following effects; an electric shock, arc f lash (ljusbåge) or fire. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

71. Magnetic fields are generated when charging aircraft and it can have the following effect, it can disturb other electronics (e.g aircraft navigation system). How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 5)

72. The aircraft batteries are overcharged which can have the effects; thermal runaway or wears the batteries down. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 4)

73. The mechanical operation needed for lifting the cable and charger does not work. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 5)

74. A damaged cable or CCS can be due to improper handling, corrosion or that the cable has been run over. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 5)

75. There is EMI because insufficient shielding. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

76. The aircraft batteries are overcharged due to a system fault. What do you estimate the frequency of the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

77. The aircraft batteries are overcharged due to inexperienced personnel. What do you estimate the frequency of the occurrence of this to be? (Antal obesvarade = 6)

78. Assuming that the Aircraft systems will be able to detect and alert if cable or CCS is damaged. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 6)

79. Assuming that the Aircraft systems will be able to detect if its batteries are being overloaded. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 5)

80. To prevent EMI, magnetic fields are measured when a new charging station is installed. What is the probability that this method will detect the error cause in time to take corrective action? (Antal obesvarade = 8)

F.7 Frågor om flygplansbatterier

81. The aircraft batteries can have the following errors; internal/external short circuits, unstable electrolytes, surveillance monitoring faults or the quality of the batteries are low. All of these errors can lead to thermal runaway, which in turn can result in the release of toxic gases, explosions, and fire. How severe are the error effects? (Antal obesvarade = 5)

82. Do you think that the occurrences of such errors mention in question 80 the same, higher or lower than the occurrences you estimated for the mobile BESS? (Antal obesvarade = 6)

83. Assuming the detection methods are the same as for the mobile BESS. Do you think it is the probability to discover errors in time to take action is the same, higher or lower than for mobile BESS? (Antal obesvarade = 6)

F.8 Avslutande fråga

84. This method is built on accounting for multiple views I therefore wonder if there are any risks that you feel are not presented in the scenarios described? (Antal obesvarade = 13)

Bilaga H

Intervju upplägg Magnus backman

Presentera laddscenario 1, 2 och 3.

Diskutera:

- Om laddscenariona är rimliga.
- Risker för transformatorn med scenariona i flygplatsmiljö.
- Hur säkra transformatorer generellt är.
- Hur ser kompetens i branschen ut.