

Energimyndighetens titel på projektet – svenska	
Svenskt hållbart flyg-Teknologi och förmåga bedömning mot 2045	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Swedish Sustainable aviation 2045, technology and capability assessment	
Universitet/högskola/företag Saab AB GKN Aerospace Sweden Linköpings Universitet Chalmers Tekniska Högskola	Avdelning/institution [Klicka här och skriv]
Adress [Klicka här och skriv]	
Namn på projektledare Christopher Jouannet	
Namn på ev övriga projektdeltagare Anders Lundblad GKN Petter Krus Linköpings Universitet Ingo Staack Linköpings Universitet Tomas Grönstedt Chalmers Teknisk Högskola Xin Zhao Chalmers Teknisk Högskola Christopher Jouannet Saab AB Kristian Amadori Saab AB	
Nyckelord: 5-7 st Fossilfritt flyg, vätgas, behovsmodell, elflyg, bränslecell, SAF	

Förord

Detta projekt har finansierats av Energimyndigheten, och genomförts av ett team från Saab AB, GKN Aerospace, Chalmers Tekniska Högskola samt Linköpings Universitet. Projektet vill tacka Magnus Eek som var initiativtagare till projektet.

Innehållsförteckning

Svenskt hållbart flyg-Teknologi och förmåga bedömning mot 2045	1
Tillvägagångssätt	8
Gravitationsmodell (så kallad "Gravity Model")	9
Svenska behovsmodell	13
Finska behovsmodell	13
Norsk behovsmodell	14
Dansk Behovsmodell	14
Nordisk Behovsmodell	14
Sammanfattning av behovsmodellering	15

Vätgas	19
Biobränsle	21
Batteriteknik	23
Flygplansmodeller av Första Approximationsnivå (Första principmodelleringssmetod)	26
Detaljerad flygplansmodellering	30
Framdrivningsteknik	33
Förbränning	33
Elektrisk framdrivning	34
Bränsleceller	36
Flygplansteknik	36
Strukturteknik	36
Aerodynamik	37
Bränsletankar för vätgas	37
Trafikledning (ATM) och operativ användning av flygplan	37
Svenskt perspektiv	41
Scenario 1	42
Scenario 2	44
Scenario 3	46
Sammanfattning Sverige	47
Resultat Finland	48
Scenario 1	49
Scenario 2	50
Scenario 3	51
Sammanfattning Finland	52
Norge	52
Scenario 1	53
Scenario 2	54
Scenario 3	55
Sammanfattning Norge	56
Danmark	56
Scenario 1	57
Sammanfattning Danmark	59
Resultat sammanfattning Sverige och Norden	59

Sammanfattning

Inrikesflyg i Sverige och Norden står inför den stora utmaningen att vara klimatneutral år 2045. Projektet har undersökt hur olika framdrivningstekniker kan bidra till flygets klimatomställning och svara upp till det framtida transportbehovet.

Genom att modellera framtida transportbehov, olika flygplanstorlekar och framdrivningstekniker, har forskarna kunnat identifiera de mest lämpliga lösningarna för olika flygdestinationer och transportbehov. Framdrivningstekniker baserade på batterier, bränsleceller, direkt förbränning av vätgas och Sustainable Aviation Fuels (SAF) har undersökts och jämförts.

Med hjälp av olika scenarier för framtidens passagerarflygtransport, baserade på två olika behovsmodeller, har projektet analyserat hur olika typer av flygplan och storlekar kan bidra till flygets klimatomställning.

Resultaten indikerar att det inte finns en enskild framdrivningsteknologi som löser klimatomställningen för svenskt inrikesflyg eller för skandinaviska flygtransporten. Vätgas har en stor potential, om tekniken hinner utvecklas i tid, vätgasproduktion hinner etableras och kan ske med låga utsläpp, och om infrastrukturen kan tas fram i tid. Även om batteriframdrivna flygplan kan spela en roll för att nå klimatmålen, anses de inte vara de mest avgörande, och deras potential är starkt beroende på batteriteknikutvecklingen. I en övergångsfas visar sig SAF/Biobränsle vara huvudfaktorer för att minska flygets miljöpåverkan.

Summary

Domestic flights in Sweden and the Nordic region face a major challenge to become climate-neutral by 2045. The project has investigated how different propulsion technologies can contribute to the aviation industry's climate transition and meet future transportation needs.

By modeling future transportation needs and aircraft of different sizes and with various propulsion technologies, researchers have been able to identify the most suitable solutions for different flight destinations and transportation needs. Technologies such as batteries, fuel cells, direct combustion of hydrogen, and Sustainable Aviation Fuels (SAF) have been examined.

The project will contribute to different scenarios for the future of aviation, based on two different transportation needs models and how distinct types of aircraft and sizes can contribute to the aviation industry's climate transition.

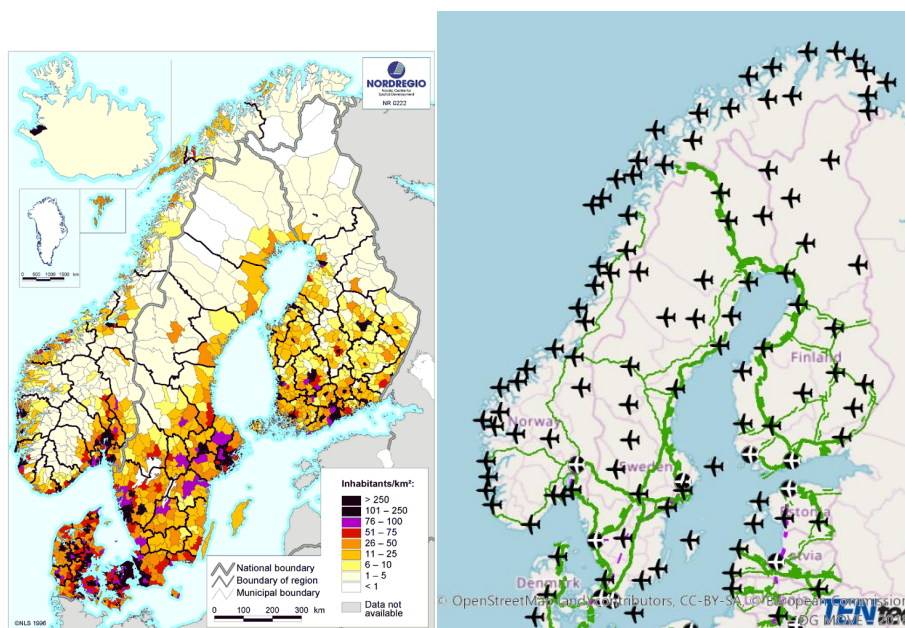
The project's results suggest that there is no single propulsion technology that solves climate change for Swedish domestic aviation or for Scandinavian air transport. Hydrogen has a great potential to contribute, if technology development, hydrogen production and the infrastructure can be developed in time. Battery-powered aircraft can play a role in climate goals but is highly dependent on battery technology development. Battery driven airplane is not considered to be the most decisive technology for green aviation in the envisioned timeframe. In a transition phase, SAF/Biofuel is a main factor in reducing aviation's environmental impact.

Inledning/Bakgrund

Detta projekt syftade till att skapa en bättre förståelse för hur hållbart flyg i Sverige och i Norden kan möjliggöras av ny teknik för att kunna möta den förväntade efterfrågan på flygtransporter år 2045.

Enligt aktuella studier står flygtransporter för endast cirka 3% av de globala utsläppen i världen. Uppskattningsvis, har den globala flyg- och transportindustrin producerat 32,6 miljarder ton koldioxidutsläpp från 1940 till 2018 [1]. Samtidigt stod hela transportsektorn i EU för nästan en tredjedel av de totala koldioxidutsläppen år 2018, främst på grund av dess beroende till olja [2]. Även om flygtransportsektorn endast står för en liten andel av de totala CO₂-utsläppen, har det redan framförts (se t.ex. [3] och [4]) att dess inverkan på den globala uppvärmningen inte kan försummas, både på grund av höjden vid vilka utsläppen sker och utsläppens kemiska sammansättning. En reaktion på detta bland den europeiska befolkningen och i synnerhet i Skandinavien, är ”flygskam” eller ”flight-shaming”. Detta är en trend där människor skäms över att flyga på grund av koldioxidutsläppen som flyget orsakar. Skandinaviska regeringar [[5][6][7][8] försöker påskynda omställningen av inrikes- och utrikesflyg till ett fossilfritt och klimatneutralt transportmedel. Detta har lett till beslut om en aggressiv miljöpolitik för att snabbt nå hållbarhet, även i transportsystemet. Till exempel meddelade Norge att alla dess kortdistansflyg skulle behöva vara elektriska till år 2040, medan Sverige har satt som mål att inrikesflyget skall vara koldioxidneutrala till år 2045 och därefter ha ett nettonegativt bidrag till växthusgaser [[5].

Gundelfinger et al. [9] beskriver Skandinavien som en intressant region. Länderna är glest befolkade (se Figur 1), tåginfrastrukturen är inte lika utvecklad som i kontinentala Europa, det finns betydande geografiska hinder, så som sjöar, hav och berg, och klimatet och Nordpolens närhet gör att flygning är ett populärt färdmedel, speciellt i de norra delarna av regionen. Skandinavien kännetecknas också av en hög grad av miljöengagemang och positiv inställning till ny teknik, vilket till exempel kan observeras när man ser på spridningen av elfordon (särskilt bilar) som växer snabbt [[10].



Figur 1 Befolkningstäthet i Skandinavien och järnvägs- och flygplatsinfrastruktur [11][12]

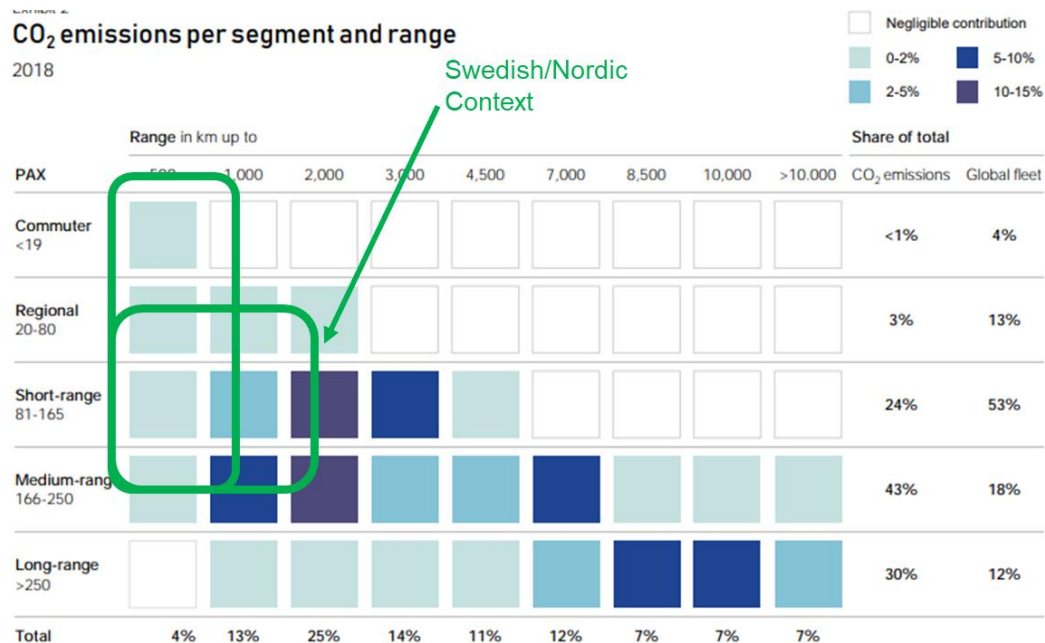
Hållbarhet kan inte uppnås endast med en enda lösning [13], utan kommer att kräva balansering av olika lösningar för de olika transportmedel. Därför ska samspelet mellan olika transport moder inte ses i konkurrens med varandra, utan som bidragande bitar i ett komplext pussel. Detta har delvis observerats och främjats av svenska beslutsfattare, som till exempel har grundat för ett brett utbud av forskningsprojekt som syftar till att driva utvecklingen mot hållbarhet i transportinfrastrukturen (se till exempel program som InfraSweden2030 [14]).

Ett av Sveriges klimatmål är att möjliggöra och nå en hållbar flygtransport inom landet till år 2045, vilket innebär att all intern flygtransport ska vara klimatneutral 2045 [15]. Delmål har även definierats för år 2030 och 2040. För att utforska vilka möjliga vägar finns för att uppnå flygtransportens klimatmål, är det nödvändigt att analysera:

- Efterfrågan på flygtransporter och dess utveckling
- Förväntade antalet passagerare och hur dessa fördelas på olika flygrutter
- Tillgängliga framdrivningsteknologier och hur de kan bidra till att uppnå hållbarhetsmålen och bemöta förväntade efterfrågan
- När ny teknik kan tas i bruk och i vilken takt den ersätter befintlig teknik.

Liknande studier har utförts på världsnivå från bland annat IATA [[15], ICAO [[17] och på europeisk nivå [18]. Utifrån förutsättningarna som finns i Norden och Sverige, är det viktigt att göra en analys utifrån ett svenskt och nordiskt perspektiv och inte bara återspegla de globala trenderna (Figur 2 ger till exempel en illustration av några av skillnaderna mellan global och nordiskt perspektiv). Rutter på svenska och nordiska inrikesflygningar kan mäta upp till ungefär 1500 km, och med en fördelning på medelstora flygplan med kapacitet mellan 80 och 150

passagerare. Även om några rutter flygs med mindre flygplan, är detta segment från ett globalt perspektiv inte den som har störst påverkan på CO₂-utsläpp.



Figur 2 Svensk/Nordisk flygtransport utifrån det globala perspektivet

Inom detta projekt har följande huvudsakliga forskningsmålen formulerats:

- Förstå efterfrågan på flygtransporter i Sverige och i de nordiska länderna (Finland, Norge och Danmark)
- Skapa representativa flygplansmodeller som kan bemöta efterfrågan med hjälp av olika teknikantaganden
- Förstå bidraget av olika framdrivningsteknologier för att nå målet om klimatneutrala flygtransporter i Sverige och i Skandinavien
- Kartlägga utmaningar och möjligheter för beslutsfattare, politiker och utformning av nya forskningsanslag.

Projektet har begränsats sig till att utforska framdrivningstekniker och dess påverkan. Antaganden om hur det olika drivmedel kan framställas eller hur infrastrukturen av flygplatser påverkas har inte tagits med.

Genomförande

Arbetet har varit uppdelat i tre huvuddelar:

- Analys av det svenska och nordiska flygtransportbehovet för att kunna bygga scenarier som beskriver transportbehovet år 2045
- Analys av teknikutvecklingen och dess möjligheter och begränsningar i relation till utvecklingen av framtidens flygtransport
- Föreslå referens flygplansmodeller baserade på de olika analyserade teknologier och se hur de kan bidra till flygtransportens klimatmål år 2045.

Scenario har utvecklats av Linköpings universitet och Saab.

Teknikutvecklingstrender är baserade på den samlade kunskapen från alla inblandade partner samt från information i öppna publiceringar. Utifrån gemensamma modellerings- och teknikantaganden, har Linköpings universitet och Chalmers utvecklat de olika flygplansmodeller. Flygplansmodeller har tagits fram med det kommersiella verktyget Pacelab Suite från TXT [[19], som även används av Saab inom flygplans konceptutveckling. GKN har bidragit med sin expertis på framdrivningssystem och kunnande om trender inom civil flygtransport.

De olika utvecklade flygplansmodeller har därefter kombinerats med prognoser av framtida flygtransportbehovet för att kartlägga omfattningen av olika teknikers bidrag.

Under projektets gång har två kandidatsarbeten genomförts på Chalmers Tekniska Högskola [[20][21]. Ett kandidatsarbete har även genomförts på Linköpings universitet [22]. Under projektets gång har Saab och avdelningen för "Aerospace Systems Design Laboratory" på Georgia Tech universitet samarbetat, vilket har även lett till en gemensam publicering [[23].

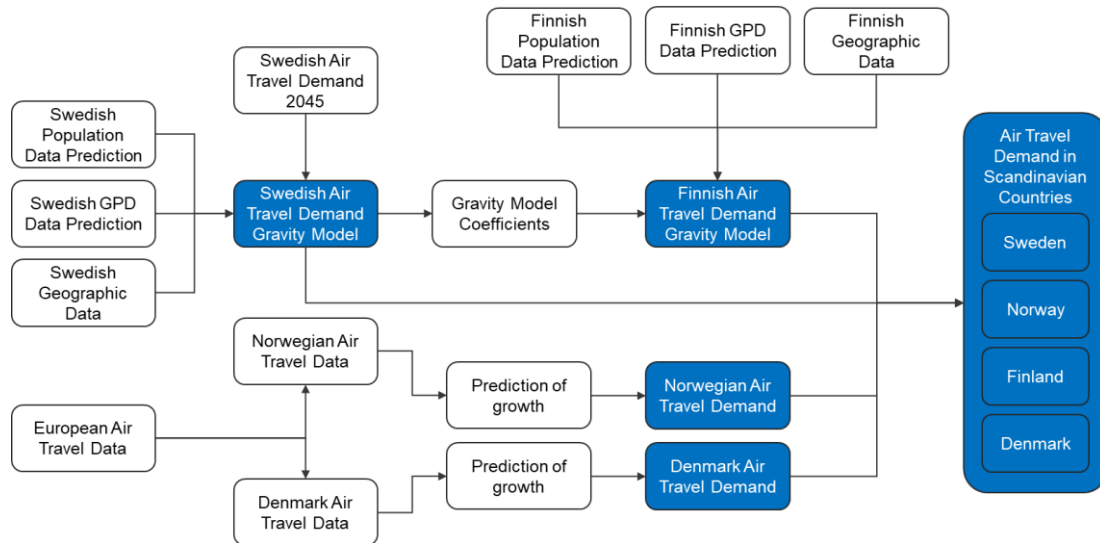
Scenario och behovsmodell

Modellen beskriver transportbehoven i den framtida tidsram som antas för analysen. Trafikverket har tagit fram en detaljerad prognosmodell för reseefterfrågan för år 2040. I modellen, som är tillgänglig på begäran oss Trafikverket, uppskattas passagerarbehovet mellan samtliga kommuner i Sverige. Enligt metoden även sammanfattad i en rapport [24], fördelas sedan dessa behov mellan de olika transportsätt. Ingen liknande modell kunde hittas för Norge, Danmark och Finland. Därför beskriver Figur 3 den process som har använts i projektet för att skapa transportbehovsmodeller för det övriga nordiska länder. Genom att analysera tillgängliga historiska resedata [25] observerades det att det finns grundläggande skillnader mellan det nordiska länder. Norge sticker ut med ett högre inrikes flygresande per capita jämfört med andra nordiska länder. Norge har en bergig topografi och fjordar bryter ständigt upp kustlinjen, vilket bidrar till att öka vikten av flygtransporter och dess framtida utveckling, så som även har beskrivits i en rapport av Avinor [26]. Följaktligen, är landtransporter mindre vanliga än i Sverige, Danmark och Finland, där väg- och järnvägsinfrastruktur utnyttjas mer. Detta återspeglas i betydligt högre passagerarvolymen inom inrikesflyget i Norge och i ett större antal aktiva rutten som förbinder många fler destinationer. Danmark sticker istället ut med väldigt få inrikes flygningar. Vänligen observera att i denna studie har inte resor till Grönland inkluderats.

Flera rapporter beskriver de möjligheter som möjliga framtida flygtransporter kan erbjuda för regional rörlighet inom och mellan Finland och Sverige. Betydande arbete har utförts i Kvarkenregionen och har publicerats av Kvarkens kommuner i FAIR-projektet [27][28]. Dessa aspekter har dock inte tagits med i detta projekt, eftersom de tillgängliga publikationerna inte erbjuder en kvantitativ modell för passagerarefterfrågan, utan snarare beskriver kvalitativt vad som skulle kunna vara möjligt att uppnå. Liknande studier finns också tillgängliga från den finska regeringen, som pekar på de möjligheter som elektriska flygplan skulle kunna erbjuda [29], och presenterar data och analyser på de nuvarande flygruttena med låga dagliga passagerarvolymen. En studie från Nordregio [12] har undersökt vilka rutten under 200 km som skulle erbjuda en fördel om man använder flygplan istället för bil eller kollektiv transport.

Tillvägagångssätt

Metodiken för att utveckla passagerarbehovsmodellen baseras på två olika tillvägagångssätt, den ena utifrån en rak projektion från dagens resande, med data från Eurostat [25], den andra från en så kallad "gravity model". Huvudprocessen för att generera behovsmodellen är beskriven i Figur 3.



Figur 3 Process för att generera behovsmodeller för flygresor för varje nation och för Skandinavien

Det enda hänsyn till COVID19 krisen som tas med här, är att flygresande har återhämtade sig 2024 till samma nivå som 2019. Så den kontinuerliga tillväxten utgår från 2024 och inte 2019.

En begränsning med modellerna är att man inte fullt ut betraktar att behovet kan påverkas av nya transportslag. Ett försök till detta presenterades i samarbetet med ASDL Georgia Tech [[23], och kommer tas upp i slutsatserna.

Gravitationsmodell (så kallad “Gravity Model”)

En gravitationsmodell baseras på attraktivitet mellan två olika städer, och är ett vanligt sätt att modellera resebehov. Grundprincipen är att tänka attraktionen mellan två städer som om den vore en Newtons gravitationskraft mellan två himlakroppar. Istället för kropparnas massa kan olika egenskaper för städerna användas, som till exempel deras population eller ekonomiska tillstånd. Typiska exempel på gravitationsmodeller för flygplanstransportbehov finns i [32][33][36]. Det kan vara praktiskt att uttrycka gravitationsmodellen som skapades i projektet i log-linjäriserad form enligt följande:

$$\hat{V}_{ij} = \alpha + \beta_1 G_{ij} + \beta_2 P_{ij} + \beta_3 D_{ij} + \beta_4 U_{ij} + \beta_1 H_{ij} + \beta_1 C_{ij} \quad (1)$$

Tabell 1 beskriver varje term i gravitationsmodellen. Cirkumflextecknet används för att indikera den uppskattade totala passagerarvolymen mellan start i och destination j . V_{ij} representerar således antalet passagerare som uppskattas resa i båda riktningarna, så att:

$$\hat{V}_{ij} = V_{ij} + V_{ji} \quad (2)$$

Tabell 1 Parametrar och variabler i gravitationsmodellen.

Notation	Functional Form	Data
V_{ij}	$\ln(\text{Volume}_{ij})$	(Estimated) total number of passengers between airport i and j

α	Constant term	Parameter
β_i	Coefficient	Weighting coefficient for each log-term
G_{ij}	$\ln(GDP_i \times GDP_j)$	Metro catchment area GDP in thousands of SEK
P_{ij}	$\ln(POP_i \times POP_j)$	Metro catchment area population in thousands of people
D_{ij}	$\ln(D_{ij} \times D_{ij})$	Great circle distance in km between airport i and j
U_{ij}	$\ln(U_i \times U_j)$	U_i represents the number of universities in metro catchment area of airport i
H_{ij}	$\ln(H_i \times H_j)$	H_i represents the number of hospitals in metro catchment area of airport i
C_{ij}	$\ln(C_i \times C_j)$	C_i is equal to 1 if metro catchment area i contains the nation capital

Alla parametrar i modellen kommer från Statistiska centralbyråerna i respektive land (Statistikmyndigheten SCB och Statistikcentralen STAT). För att modellen ska kunna ge en prognos av resebehovet år 2045, behöver termerna i tabellen också anpassas för året 2045. Till detta har officiella tillväxtprognoser för befolkning och BNP applicerats. Parametrar som antalet sjukhus och universitet har hållits konstanta. Notera att modellen inte baseras på kommun- till kommunbehov, men flygplats till flygplats. Geografiska områden runt flygplatserna skapades för att fördela egenskaperna till flygplatserna. Population allokerades till närmaste aktiva flygplats, baserat på närhetsprincip till flygplatsen, dvs den kortaste restiden från kommuncentrum till en flygplats (denna information togs fram via anrop till Google Map api [34]). GDP allokerades om till flygplatserna baserat på befolkningsallokeringen. Notera att informationen om restid är ett medelvärde på minsta restid under dygnet.

När alla ingående termer är tillgängliga, kunde viktningstermerna α och β optimeras för att så nära som möjligt efterlikna resebehovet angivet av Trafikverkets prognos och därefter återanvända samma koefficienter i kombination med termerna för året 2045 för att slutligen skapa modellen av framtida passagerarbehovet i Sverige.

För att optimera viktningsskoefficienterna definierades en anpassad målfunktion som en viktad summa av strafffunktioner enligt nedan:

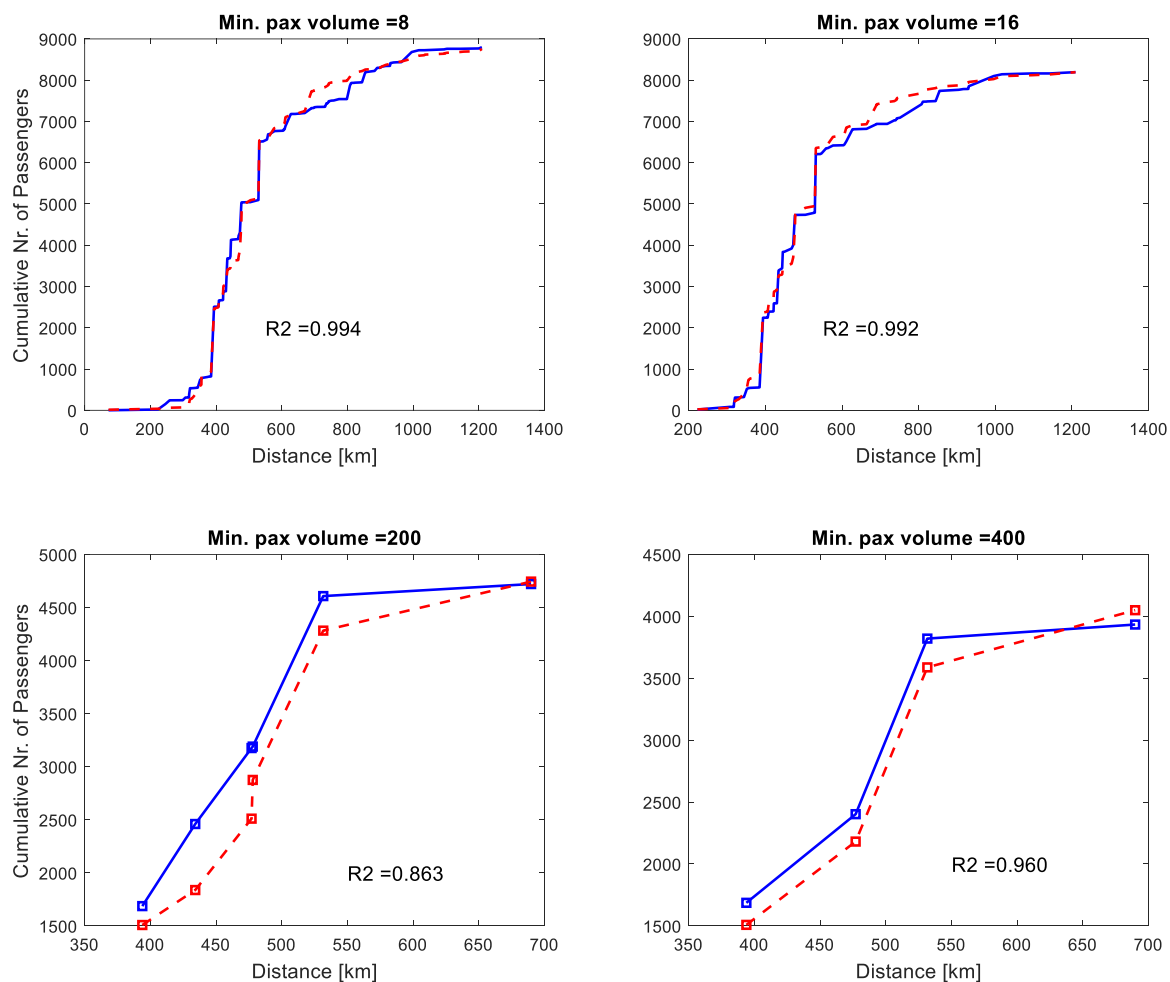
$$\min obj = \sum_i K_i \cdot P_i \quad (3)$$

Där straffen definieras enligt följande:

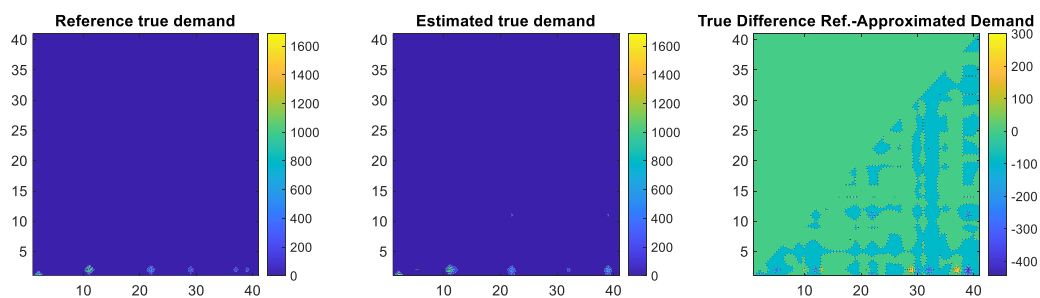
1. P1: skattade behovsmodellfel, dvs.: $error = \frac{1}{n} \sum_{ij} \left(\frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}}{v_{ij}} \right)^2$
2. P2: kvadratskillnad mellan skattade och referens totalt antal passagerare
3. P3: kvadratskillnad mellan skattade och referens kumulativ passagerarfördelning

4. P4: kvadratskillnad mellan skattade och referens kumulativ passagerarfördelning på huvudrutter
5. P5: R^2 korrelationskoefficient.

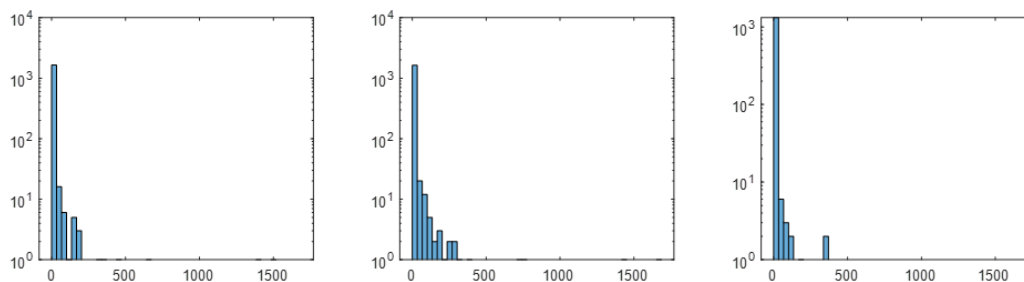
Det är svårt att få en perfekt matchning av referensdata för reseefterfrågan. En huvudorsak är att den svenska reseefterfrågan är mycket koncentrerad till ett fåtal sträckor mellan storstäderna (se diagrammen längst till vänster i Figur 5 och Figur 6), medan de återstående sträckorna endast står för en mycket begränsad volym. Figur 4 visar hur den slutliga gravitationsmodellen återspeglar de viktigaste egenskaperna hos referensdata, både vad gäller total passagerarvolym och individuella krav på huvudrutter. Referensdata har filtrerats med ett lägsta antal passagerare per dag, så som beskrivet för vardera diagram i Figur 4. I studien antas det att vi enbart betraktar linjer som har reguljär daglig trafik. Den fjärde straffunktion i objektivfunktionen skräddarsyddes för att fokusera på de stora ruterna, vilket kan ses i den tredje grafen i Figur 4, där endast ruterna med minst 200 passagerare visas. Det framkommer tydligt att den skillnaden i kumulativ passagerarfördelning till största delen beror på de mindre rutterna.



Figur 4 Jämförelse mellan approximerad gravitationsmodell (blå heldragen linje) och referensdata för resebehov (röd streckad linje), beräknat i antal tur- och returpassagerare per dag på varje rutt



Figur 5 Jämförelse mellan referens och uppskattade passagerarvolymer



Figur 6 Passagerarnas volymfrekvens över rutternas längd för referens och uppskattade modeller

Svenska behovsmodell

Utifrån kontakt med Trafikverket i Sverige fick projektet tillgång till en transportbehovsmodell för 2040 i Sverige, vilken sammanfattas i referens [24]. Denna modell är en basprognos för 2040 för realiserade resor över 10 mil, som omfattar 12 matriser med uppskattade antal långturer per årsmedeldygn mellan kommuner år 2040, från en basprognos år 2020. Tre matriser för varje transportslag: arbetsresor, tjänsteresor och privatresor, där tåg-, buss-, flyg- och bilresor betraktas. Formatet av resorna är av typ Produktion/Attraktion, inte ursprung/destination, därav inte symmetriska i grunden. I projektet beslutades det att ta ett medelvärde och transformera detta till ursprung/destination. Enbart flygresorna användes, så inget antagande av omfördelning mellan de olika transportslagen har genomförts. Modellen uppskattar resebehovet för varje kommunpar. Enligt metoden beskriven i föregående kapitel, har passagerarvolymerna aggregerats till närmaste aktiva flygplats. Totalt har 41 svenska flygplatser används, genom att välja de som idag har fortfarande en civil aktivitet och har en fungerande infrastruktur, dvs att flygplatser som idag inte har ett flygtorn (alternativt "remote tower") räknades ej med. I Göteborg betraktades enbart Landvetter flygplast. För Stockholm togs ett beslut att ej betrakta Bromma, då det antogs att den kommer läggas ner fram till 2045. Detta innebar att modelleringskomplexiteten reducerades, eftersom dimensionaliteten hos den efterfrågade modellen blev mindre.

Ytterligare en behovsmodell togs fram, baserad istället på dokumenterade passagerarvolymerna för inrikesflyg år 2019. Det predikterade behovet år 2045 innehåller samma rutter som 2019 men med en justerad passagerarvolym baserad på tillväxtsiffror från Trafikverket [[35], med en inrikes ökning med 0,68% per år fram till 2045 från 2019 nivå, justerad med att 2024 blir samma som 2019. I detta fall betraktas Bromma fortfarande vara i drift.

Alla data som har tagits fram representerar antal passagerare per dag och sträcka.

Finska behovsmodell

För att skapa en behovsmodell för Finland antogs det att Sverige och Finland är tillräckligt lika när det gäller resmönster, infrastrukturell tillgänglighet och

topografi. Därför antogs det att resekraven i de två länderna skulle påverkas på liknande sätt av liknande faktorer. Detta är ett antagande som inte har kunnat verifieras, och som naturligtvis kan ha stor inverkan på modellerings- och analysresultaten, men som påtvingades av bristen på andra källor för prognoser om reseefterfrågan. Med detta antagande, användes samma gravitationskoefficienter som optimerades för det svenska fallet. Befolknings- och BNP-data samlades in för finska kommuner från Statistikcentralen [37] och framåt daterades sedan till år 2045 med hjälp av tillväxtprognoser. Antalet sjukhus och universitet år 2045 antas vara detsamma som idag. Den erhållna behovsmodellen ”ändrades” slutligen så att den totala inrikespassagerarvolymen skulle matcha historiska data, justerade med tillväxtfaktor.

Det är inte möjligt att genomföra en validering av modellen, av två huvudsakliga skäl. Den första är att aktuella resedata visar passagerarvolymen på aktiva linjer, medan modellen som utvecklats är tänkt att representera resebehovet mellan alla tillgängliga flygplatser. Det betyder att nuvarande data mäter resor "som ett resultat" medan modellen beskriver "viljan" att resa. Därför är att antalet rutter i modellen betydligt större än i nuvarande data, så enbart en begränsad jämförelse var möjlig, men den visade likheter i trenderna.

Som för Sverige, togs även för Finland en andra resemodell fram baserad på inrikesflyg år 2019, där det predikterade behovet år 2045 innehåller samma rutter som 2019 men med en justerad reservvolym baserad på tillväxtsiffror från EUR Control [40], med en inrikes ökning med 1,1% per år fram till 2045 från 2019 nivå.

Norsk behovsmodell

Som tidigare nämnt, visar statistik på flygresor i Norge att det finns grundläggande skillnader jämfört med Sverige och Finland, med ett betydligt mer utvecklat nätverk och större volymer av inrikespassagerare. Därför antogs ett annat tillvägagångssätt för Norge.

Inrikes flygresor i Norge betjänar redan idag ett mycket större antal destinationer. Därför antogs det att år 2045 skulle antalet rutter vara detsamma, vilket motsvarar att föreställa sig att ingen större omvandling av väg- och järnvägsinfrastruktur kommer att ske förrän då. Sedan ökade passagerarvolymerna på varje inrikes rutt enligt resetillväxten predikterad från [38][39], det vill säga 0,7% per år.

Dansk Behovsmodell

Den danska modell är byggd på samma sätt som den norska modellen. Då Danmark idag har ett lågvolym sinrikes flyg med en väl etablerad infrastruktur, så antogs det att den framtida behov kommer att utväxlas med 0,9% per år, baserat på data från EUROCONTROL [40].

Nordisk Behovsmodell

Den nordiska modell skapades genom sammanslagningen av de nationella modellerna med tillägg av resor mellan de olika länder. Resorna mellan nordiska

länder antas vara samma som data från europeisk statistik från 2019 [25]. Notera att inga extra resor har tagits upp, exempel på sådana resor som kan hittas i studien FAIR och från Kvarkenregionen [[27][28].

Sammanfattning av behovsmodellering

Två olika modeller för Norden vilket återspeglas av den valda behovsmodelleringen. Det som skiljer båda modellerna är hur Sverige och Finland har modellerats. Detta leder till att två behovsscenarier bildas enligt följande:

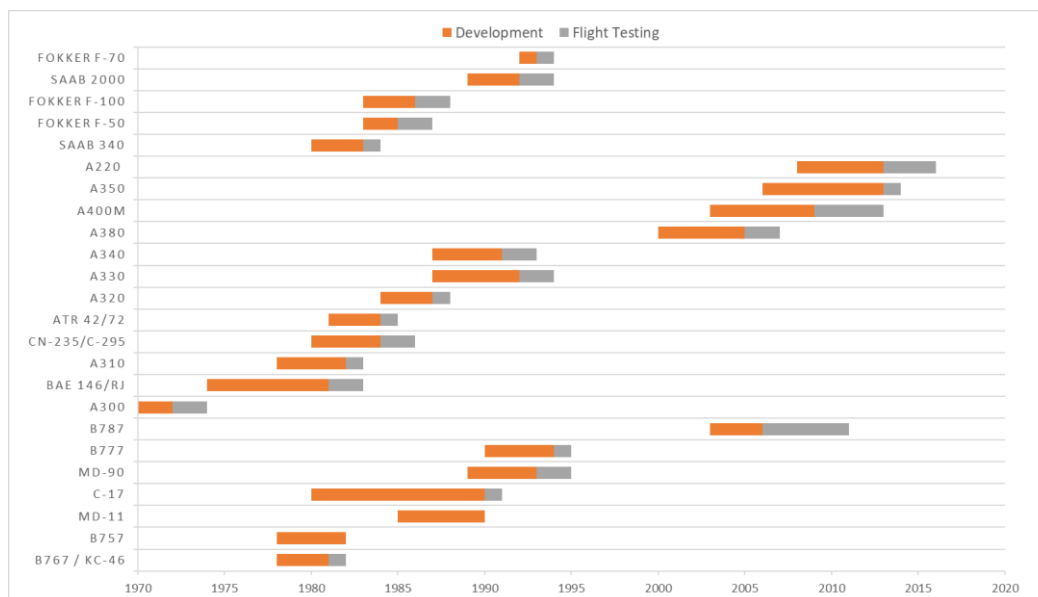
- Behovsmodell 1 (BM1)
 - Baserad på Eurostat-data justerad fram till 2045 med hjälp av antaganden på årlig flygplanstrafiktillväxt
- Behovsmodell 2 (BM2)
 - Baserad på data från Eurostat-data för Danmark och Norge, samt på gravitationsmodellen för Sverige och Finland.

Omsättning av flygplansflottan

Studien syftar till att se hur fossilfritt inrikes flyg kan åstadkommas i Sverige och Norden 2045. Detta innebär att flygplansflottan måste vara fossilfri år 2045. Inom flygbranschen finns det olika huvudfaktorer som påverkar detta:

- Utvecklingen av nya fossilfria flygplan
- Ersättningen av befintliga flygplansflottan med nya flygplan.

Båda dessa faktorer kräver en viss tidsperiod för att åstadkommas.

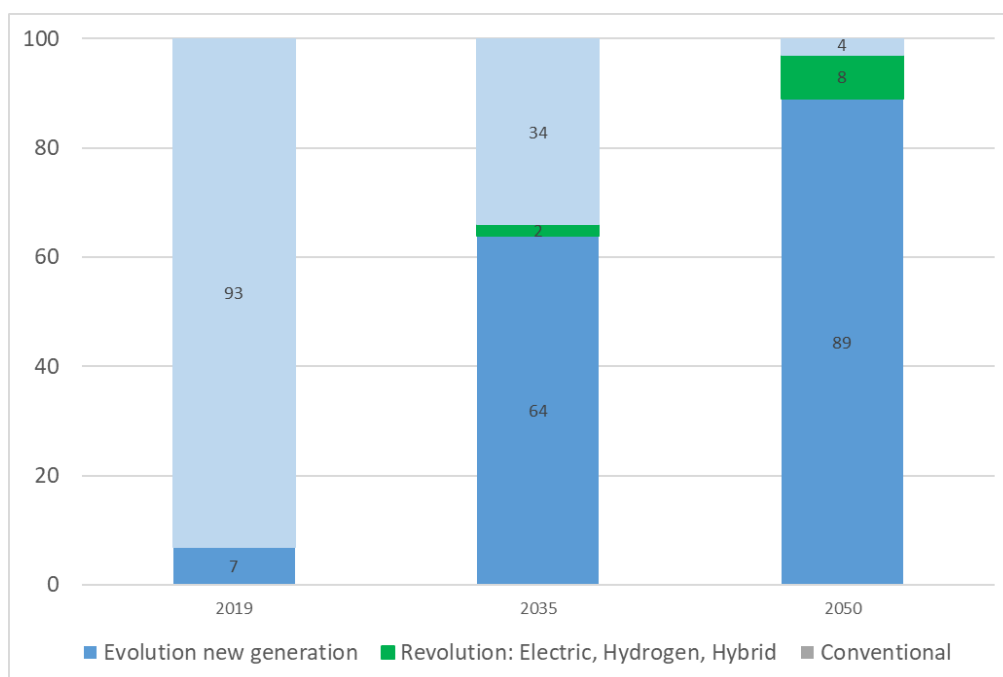


Figur 7 Utvecklingstider av civila flygplan inom CS-25 kategori, från programstart till första leverans

Historiskt data illustrerad i Figur 7 visar att, under förutsättningen att man använder känd teknik och certifieringsbas, kan utvecklingstiden för ett modernt flygplan anses vara mellan 5 och 7 år från starten av ett program till första leveransen. Certifieringsbasen kan i sin tur kopplas till kraven för certifiering och dessa krav på säkerhet. Som exempel kan man betrakta hur säkerhet kopplas till säkerhet på tekniska system inom flygbranschen. För CS-25 certifiering utgår man från att ett katastrofiskt event bara får inträffa varje miljonte flygtimme, eller 10^{-6} gånger per timme. Av dessa får enbart en tiondel få bero av tekniska fel, vilket leder till att tekniska fel bara får inträffa en gång per 10 miljoner flygtimmar, eller 10^{-7} gånger per timme. För ett flygplan inom CS-25 utgår man från att det finns 100 system som kan leda till katastrofala event, därav fås att varje tekniskt system bara tillåts falla en gång per miljard flygtimme, eller 10^{-9} gånger per timme. Liknande resonemang kan appliceras för CS-23, men med utgångspunkten att ett katastrofalt fel bara får inträffa en gång per 100 tusen flygtimmar, eller 10^{-5} gånger per timme. Ytterligare skiljer CS-23 från CS-25 i och med att man antar att finns enbart 10 kritiska system, vilket leder till att varje kritiskt system tillåts falla varje 10 miljoner flygtimmar, eller 10^{-7} gånger per timme. Mer information om flygplanssäkerhet kan hittas på EASA regelverk [[41]].

Sammanfattningsvis, om ett flygplan skall vara i service år 2030 bör dess utveckling baseras på teknik som är redan mogen idag. Teknik som kommer att vara mogen år 2030 kan förväntas återfinnas i flygplan som tas i tjänst runt 2035–37. Utöver detta måste man även lägga till upprampning av produktion, ekonomiska förutsättningar och tillgängliga regelverk och certifieringsbas.

I detta projekt har ingen egen modell för omsättning av flyglottans tagits fram. Istället har man antagit modellen från Eurocontrol [15] som visas i Figur 8. Målet är att påvisa att det tar tid att ersätta en helflygplansflotta. Denna kan dock påverkas av många olika faktorer så som, politiska incitament och policy, ekonomiska styrningar med mera. Inom ramen för projektet har inte hänsyn tagits till omsättningen av flygplansflottan, men enbart konstaterat att den kommer att ha en stor påverkan och att det leder till att nödvändiga teknologier bör vara mogna senast 2035, om omställnings skall kunna påbörjas i tid.



Figur 8 Omsättnings av flygplansflottan baserad på Eurocontrol[15]

Som en begränsning inom projektet har man valt att utforska om klimatneutral inrikesflygtransport i Sverige och Norden skulle kunna uppnås utifrån följande antaganden:

- Flygplan som studeras i detta projekt antas vara införda i god tid för att hela den nordiska flygplansflottan blir ersatt 2045
- All teknologi som betraktas antas vara fullt mogen senast 2028–2030 för att nya flygplan ska kunna ersätta befintlig flotta
- Det tar 5 till 7 år att utveckla ett nytt flygplan baserad på känd teknik.

Detta begränsar designfriheten av flygplanskoncepten och sätter perspektiv på teknik- och produktutvecklingens utmaningar som finns inom flygindustrin.

I projektet antas tre huvudspår:

- Biobränsle och SAF är den lösning som kan introduceras i en snabbare takt, denna kommer i första hand att vara beroende av produktionsmöjligheter för biobränsle
- Introduktion av batteridrivna mindre flygplan kan genomföras från 2030, men räckvidden kommer vara begränsad. Bränsleceller på mindre flygplan kan följa efter batteridrivna flygplan
- Introduktion av flygplan med vätgasförbränning kan ske runt 2035.

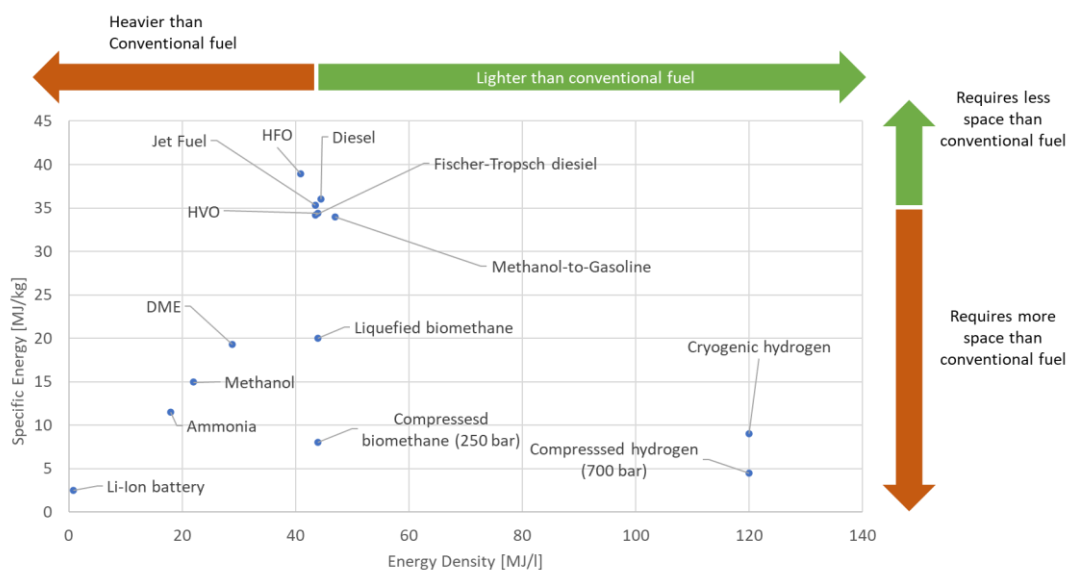
Inga detaljerat antaganden av hur fort det olika flygplanstyperna kan levereras har gjorts. Som ett exempel, har Airbus ambitionen att uppnå en produktionstakt på 75 A320 per månad från och med år 2025. Detta anses vara extremt högt och kan ej ses som en riktlinje på produktion av nya flygplan med ny teknik, eftersom detta har uppnåtts efter en lång upprampning av produktion över många år.

Framdrivning och energikällor

En central del i framtidens flygtransport är att ersätta det traditionella fossila bränslet till alternativa framdrivningsmedel med lägre miljöpåverkan.

Olika typer av bränsle har olika egenskaper. Några viktiga faktorer att betrakta är: specifik energi och energidensitet. Ett urval av olika energikällor är presenterade i Figur 16. Inom denna studie så betraktas följande:

- Batterier
- Flytande vätgas
- Biobränsle (SAF).



Figur 9 Olika energikällor och dess specifika energi och energidensitet

Utifrån Figur 9 kan man konstatera att förutom biobränsle så har både batterier och vätgas nackdelar jämfört med dagens jetbränsle i förhållande till vikt och volym för samma energimängd. För batterier så finns det nackdelar med vikt och volym, medans för vätgas finns det en viktsfördel men ett volymstraff. Detta är dock inte den kompletta bilden då man bör jämföra effektiviteten av framdrivningen mellan de olika energikällor, vilket analyseras senare i rapporten.

Vätgas

Vätgas har fått ökad uppmärksamhet, även om utmaningar kvarstår. Många rapporter och initiativ i Europa [18][86][87] och över hela världen [17] fokuserar på väte för flygplansenergi.

Figur 10 illustrerar förhållandet mellan tryck och temperatur för vätgaslagring. Inom flygindustrin är det region 1 i bilden som är av intresse, då vikten på tankarna anses bli lättare än högtryckstankar. Men temperaturerna i region 1 är så låga som -253 grader Celsius, av vilket följer en rad utmaningar för:

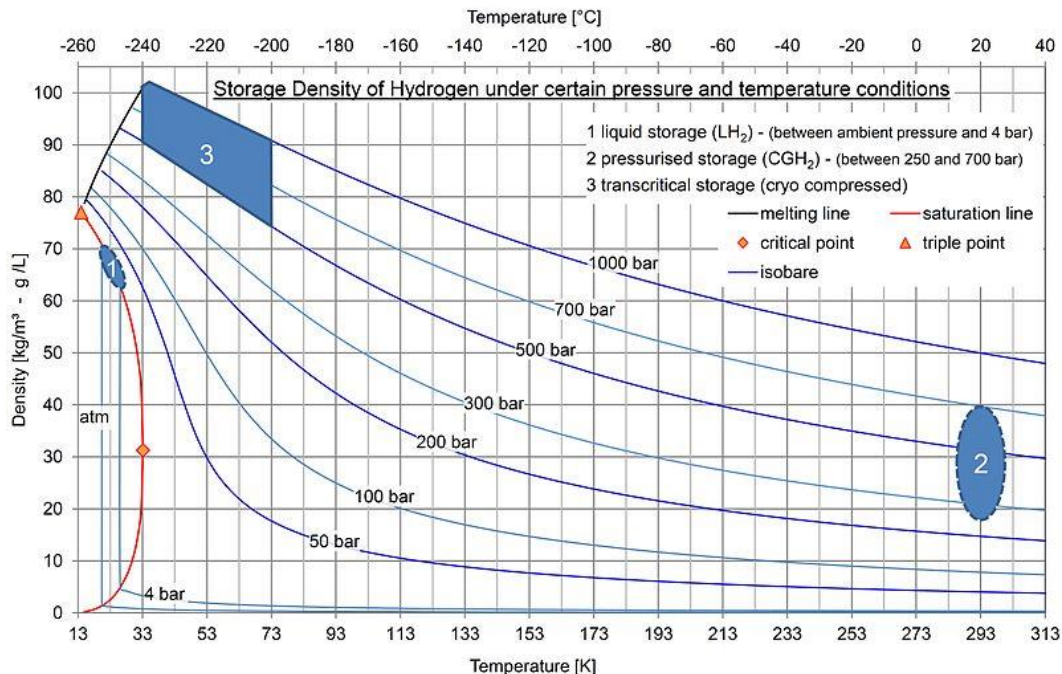
- Lagring av vätgas

- Bränslesystemets utformning
- Distribution av vätgas från tankar till bränslecell eller motor
- Isolering för att klara det extremt låga temperaturer
- Hantering av vätgasen vid flygplatser.

Ur ett energiperspektiv är vätgas attraktivt med en hög specifik energitäthet och dess förbränning sker utan att bidra med kolväten, men har en nackdel i form av låga volymetriska energin, se Figur 9. Även i vätskeform vid kryogen temperatur (minst -253 grader Celsius) eller komprimerad (upp till 700 bar) är vätgasens volymetriska energin fortfarande mindre än en tredjedel av den hos jetbränsle. Därför behövs en större bränsletank för att lagra samma mängd energi under en flygning, vilket i sin tur förklarar varför användningen av vätgas för flygplansframdrivning innebär förändringar i flygplansarkitekturen. När man betraktar vätgasbaserad framdrivning bör man ta hänsyn till detta, och ett godhetstal för vätgastankar blir då:

$$(\eta_{grav} = \frac{m_{H_2}}{m_{tank} + m_{insulation} + m_{H_2}}).$$

Konceptarkitekturer som presenteras av Airbus (2020d) - ZEROe-konceptflygplanet – antar en längre flygplanskropp jämfört med dagens flygplan. Lagringen av vätgasen är en av de stora utmaningarna med vätgasbaserad framdrivning inom flygindustrin.

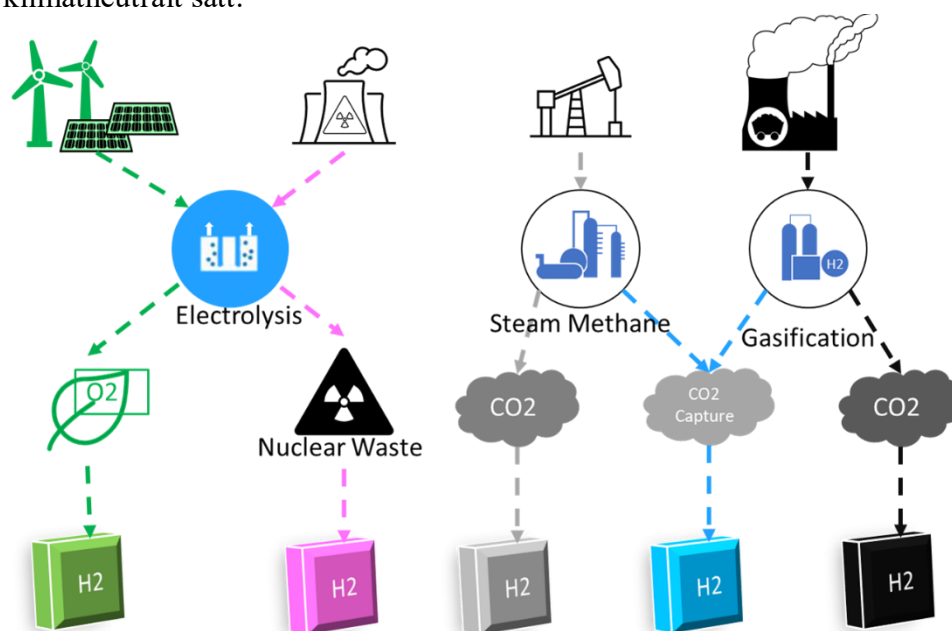


Figur 10 Lagringstäthet av väte under vissa tryck- och temperaturförhållanden. (1) vätskelagring - LH₂, (2) trycksatt lagring CGH₂, (3) transkritisk lagring (kryokomprimerad) wiki common ILK Dresden, Moritz Kuhn

Andra hinder kommer från ett ekonomiskt perspektiv som Dahal [88] tar upp, där kostnaden för vätgasframtagningen och dess inverkan på direkta driftskostnader adresseras. Infrastrukturen kommer att påverkas och måste anpassas; infrastrukturförändringar tar ofta lång tid och kommer att påbörjas bara om det finns ett visst förtroende eller tydlig policy [89][90].

Försörjningskedjan och produktion av vätgas är också en annan viktig utmaning som Hoelzen [86] beskriver och försöker kvantifiera. För att vara hållbar är den så kallad "well to wing"-analysen av högsta vikt, illustrerad för SAF i Figur 12.

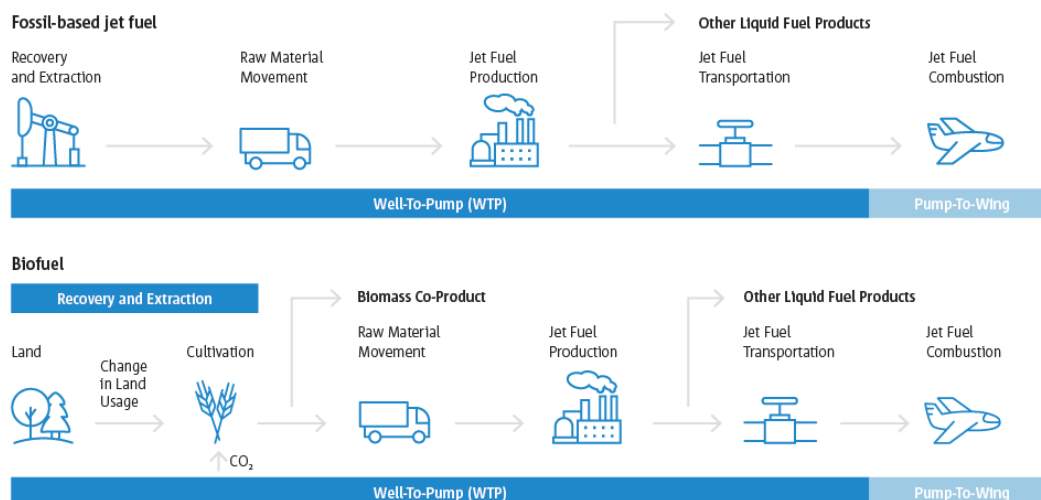
Produktionen av vätgas kan vara mycket energikrävande och måste vara hållbar för att kunna bidra positivt till klimatomställningen. Olika typer av vätgas framställningsprocesser beskrivs i Figur 11, för att vätgas skall kunna bidra till klimatomställningen är det viktigt att vätgasen framställs på ett miljövänligt sätt, och då anses elektrolysomvandlingen vara det mest miljövänliga alternativet, under förutsättningen att el kan produceras i tillräckliga mängder och på ett klimatneutralt sätt.



Figur 11 Vätgasproduktions principer

Biobränsle

Sustainable Aviation Fuel (SAF) är ett hållbart, icke-konventionellt alternativ till fossilbaserat flygbränsle. Flera definitioner och benämningar kan gälla, beroende på regelverk, råvarubas och produktionsteknik. Inom detta projekt så används samma definitioner som har antagits inom CORSIA avtalet [92]. Inom avtalet så har 7 olika biobränslen godkänts för användning i kommersiella flygplan. Dessa olika bränslen finns i Tabell 2 med indikation om deras mognadsgrad (Technology Readiness Level - TRL). Dessa 7 biobränslen klassas som "Drop-in SAF" och kan därmed blandas med vanligt jetbränsle till en viss grad av inblandning, enligt Tabell 2.



Figur 12 "Well-to-wing" principbild från EASA [94]

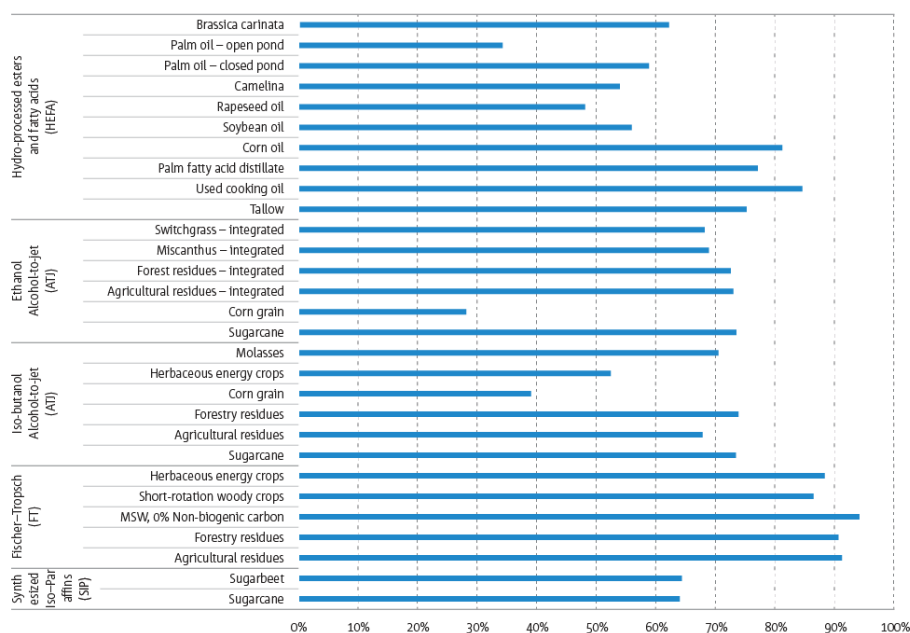
Det pågår arbete inom bränslestandardkommittéer från IATA/ICAO för att underlätta användningen av 100 % SAF i flygplansmotorer, med en första tidslinje för att ha godkända bränslen klara till 2030.

Tabell 2 godkända drop-in biobränsle enligt CORSIA avtalet [93]

Production pathway	Feedstocks ³⁰	Certification name (blending limit)	TRL
Biomass Gasification + Fischer-Tropsch (Gas+FT)	Energy crops, lignocellulosic biomass, solid waste	FT-SPK ³¹ (up to 50%)	7-8
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)	Vegetable and animal fat	HEFA-SPK (up to 50%)	8-9
Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)	Conventional sugars, lignocellulosic sugars	HFS-SIP ³² (up to 10%)	7-8 or 5 ³³
Biomass Gasification + FT with Aromatics	Energy crops, lignocellulosic biomass, solid waste	FT-SPK/A ³⁴ (up to 50%)	6-7
Alcohols to Jet (AtJ)	Sugar, starch crops, lignocellulosic biomass	ATJ-SPK (up to 50%)	7-8
Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ)	Vegetable and animal fat	CHJ or CH-SK ³⁵ (up to 50%)	6
HEFA from algae	Microalgae oils	HC-HEFA-SPK ³⁶ (up to 10%)	5
FOG Co-processing	Fats, oils, and greases	FOG (up to 5 %)	-
FT Co-processing	Fischer-Tropsch (FT) biocrude	FT (up to 5 %)	-

Olika processer för att framställa biobränsle leder till olika stora minskningar av klimatpåverkan. Det olika godkända processer för biobränsletillverkningen enligt CORSIA avtalet finns sammanställda i Figur 13. Från ett svenskt perspektiv har projektet "Fossilfritt flyg 2045"[95] tagit fram rekommendationer och vägval för användning av biobränsle för svenskt flyg.

Ett avgörande steg är att klara av upprampningen av produktionstakten av SAF för att bemöta efterfrågan och reducerar produktionskostnaderna.



Figur 13 LCA-utsläppsminskningar för CORSIA-godkända SAF-processer och råmaterial [93]

Batteriteknik

Batteriutvecklingen är en nyckel för framgången av elektrisk flygning. De viktigaste parametrarna är: volymetrisk densitet (Wh/l); energidensitet (Wh/kg), specifik effekt (W/kg) samt livscykler, urladdnings- och laddningshastigheter.

Den nuvarande batteriutvecklingen drivs huvudsakligen av kraven från fordonsindustrin. Specifikationer för fordonsindustrin har beskrivits av bland annat av EUCAR [76], EUROBAT[77], och Europeiska kommissionen [[78]. Nuvarande teknik har uppnått cirka 250-300 Wh/kg på packningsnivå, men man kan förvänta sig cirka 500–600 Wh/kg på cellnivå för året 2030. Man kan räkna med en minskning av ~30% av energidensiteten på packningsnivå pga integrationen i flygplanet och batteritemperaturkontroll (se [78] för detaljer). Andra typer av batterier, baserade på andra kemiska kompositioner, som t.ex. beskriv i referenserna [79][80][81], visar mycket hög potential, dock är status och framtida tillgänglighet oklart.

Enligt Figur 14, om det mest optimistiska värden i grafen används, kan årliga utvecklingen av batterier inom fordonssektorn i bästa vara cirka 4,8%. Om man enbart betraktar batterier av SDI-typen, är den årliga utvecklingen cirka 4,1%. Det är dock svårt att bara betrakta historiska trender då nya batterisammansättningar utvecklas kontinuerligt.

Från liknande studier såsom [82][83][84][86], konstaterar man att beroende på flygplanskategorierna bör en energidensitet vara cirka 500-600 Wh/kg för ett installerade batterier, såvida flygplanen inte ska begränsas till enbart mycket kort räckvidd. Nuvarande batteritillverkare har precis gjort anspråk på nya batterier som är tänkta till flygindustrin, ett exempel är Northvolt/Cuberg [96] som presentera ett batteri som har 405 Wh/kg på cellnivå och indikerar 280 Wh/kg på modulnivå, dock inte på fullt installerat. Utgår man från en årligen ökning av energidensitet på 4,8% så kommer kommersiella batterier på 600 Wh/kg finnas tillgängliga inom 10 till 15 år, om inte en radikalt ny batterityp uppfinnes. Den batteritekniken som är tillgänglig år 2035 kommer typiskt att representera vad som kan förväntas i ett flygplan som tas i drift cirka år 2040, om man antar 5 års utveckling för ett nytt flygplan och om man räknar med certifieringen av en ny batterityp.

Utveckling av Flygplansmodeller

I projektet har flygplanen modellerats i två olika steg. Först har modeller av grövre approximation skapats baserade på styrande huvudprinciper. Därefter har mer detaljerade modeller tagits fram med högre upplösning och med hänsyn tagen till framdrivningssystemen.

I studien har olika flygplansstorlekar valts ut, baserade på gällande regelverk för civil flygtransport. Flygplanstorlekar som inkluderas är fördelade i olika certifieringskategorier från EASA[41]:

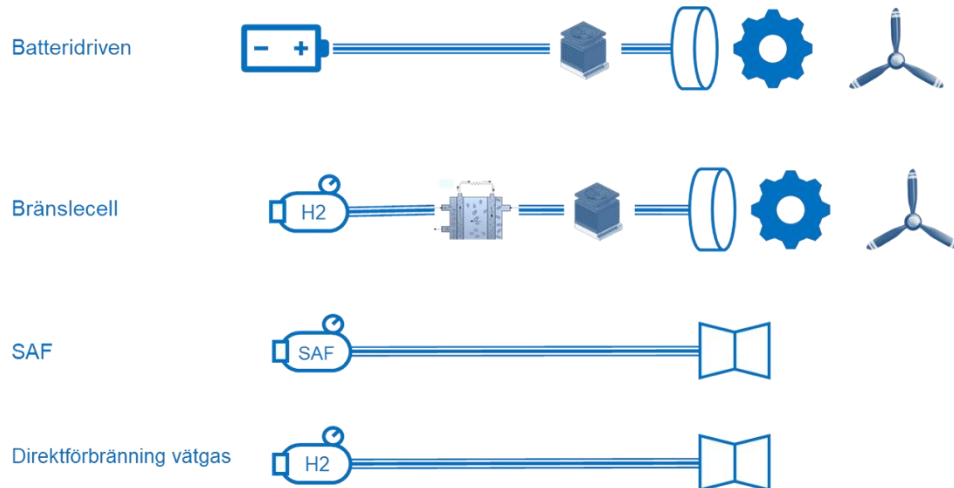
- CS-23 och FAR 23 certifieringsregler
 - 9 och 19 passagerare
- CS-25 och FAR 25 certifieringsregler
 - 34 och 50 passagerare,
 - 76 passagerare (maximal vikt på 86 000 lb för att respektera den så kallade "scope clause" [42][41])
 - 90 passagerare
 - 120 och 150 passagerare.

De regler som EASA och FAR har för certifiering av transportflygplan täcker för närvarande inga av de nya framdrivningsprinciper som presenteras i denna studie förutom för användning av SAF. Inom denna studie antas att liknande certifieringsregler kommer tas fram för att betrakta även de nya teknikerna. Antaget här är att passagerarkategorierna som styr antalet kabinpersonal ombord på flygplanen kommer förbli liknande som idag och att det förblir två certifieringsregelverk liknande CS-23 och CS-25. Inom denna studie antas det även att USA kommer bibehålla någon regel liknande "scope clause", som delar upp piloter i olika kategorier och skapar en begränsning i flygplansstorlek (maximal vikt 86 000lbs) och antal passagerare (max 76 stycken). För att lyda enligt dagens CS-23 regelverksutformning är flygplans maximala startvikt 8618 kg.

I studien har flygplanen i listan ovan modellerats med olika framdrivningsprinciper, med målet att uppnå användbar räckvidd för varje klass av flygplan. En förenklad principiell vy av de olika framdrivningar som betraktats visas i Figur 15. Huvudsakliga energikällor och framdrivningsprinciper är enligt följande:

- Energikällor:
 - Jetbränsle (Jet A1), används i studien som referens
 - SAF, där ursprunget och tillverkningsmetoden måste övervägas för att ta itu med dess klimatpåverkan
 - Vätgas
 - Batterier

- Framdrivningsprinciperna:
 - Elektrisk framdrivning
 - Batterier eller vätgas (via förbränning i bränslecell)
 - Direkt förbränning av vätgas
 - Direkt förbränning av SAF.



Figur 15 Det olika framdrivningsprinciper, schematisk vy

Inom denna studie kommer konventionella flygplanskonfigurationer att betraktas. Antagandet är att förändringen av framdrivning och energikällor är ett tillräckligt komplext problem för flygindustrin, så införande av revolutionerande konfigurationer (så som flygande vingar och distribuerad framdrivning) betraktas ej. Detta kan ses som en konservativ inställning, men antagandet är att om dessa konfigurationer kommer så kommer det vara tillgängliga för en andra generationens flygplan med ny framdrivning. Mer exotiska konfiguration kan återfinnas i litteraturen. Boeing och Airbus har presenterat koncept och bilder på möjliga framtida konfigurationer, men har indikerat att dessa fortfarande är till för teknikutveckling och ska ännu inte ses som kommande kommersiella produkter. Detta stämmer med antaganden för denna studie.

Flygplansmodeller av Första Approximationsnivå

Tillvägagångssättet är tänkt att illustrera de viktigaste och styrande principerna för designen av dessa flygplan och ge en första överblick över begränsningar och möjligheter för olika tekniker, utan att gå igenom alla detaljer. Målet här är att ge en "realistisk" storleksordning för vissa huvudsakliga framdrivningstekniker utan att helt detaljera modellerna. Detta är för att hjälpa läsaren att få en inblick och egen uppfattning utifrån grundläggande fysikaliska samband.

Det första styrande sambandet är baserat på Breguets räckviddsekvation:

$$R = \left(\frac{\Delta h_{fuel}}{g} \cdot \eta \right) \cdot \frac{L}{D} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{m_{fuel}}{M_{TOW}}} \right) \quad (1)$$

Ekvation (1) är Breguets räckviddsekvation uttryckt för flygplan vars bränslemassa minskar under flygning, och Δh_{fuel} representerar den bränslespecifika energin. För flygplan vars massa är konstant under flygningen, dvs. batteridrivna flygplan, kan Breguets ekvation skrivas om till följande:

$$R = \left(\frac{E_{battery}}{g} \cdot \eta \right) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{m_{battery}}{M_{TOW}} \quad (2)$$

Flygplanets totala massa kan uttryckas enligt ekvation (3):

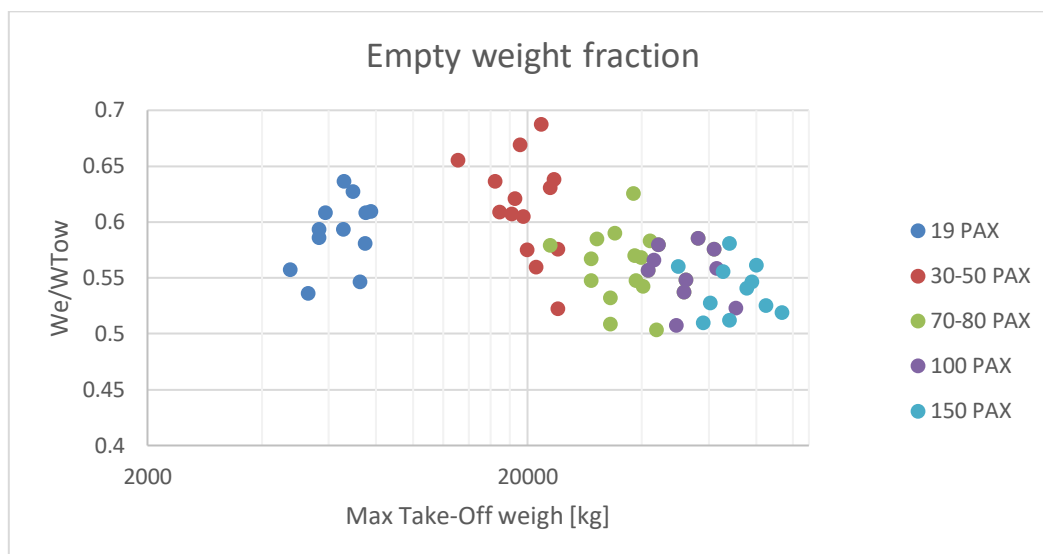
$$1 = \frac{m_{empty}}{M_{TOW}} + \frac{m_{payload}}{M_{TOW}} + \frac{m_{fuel \text{ or } battery}}{M_{TOW}} \quad (3)$$

Olika vikter relevanta för ett flygplan och en typisk viktsnedbrytning är presenterade i Figur 16.

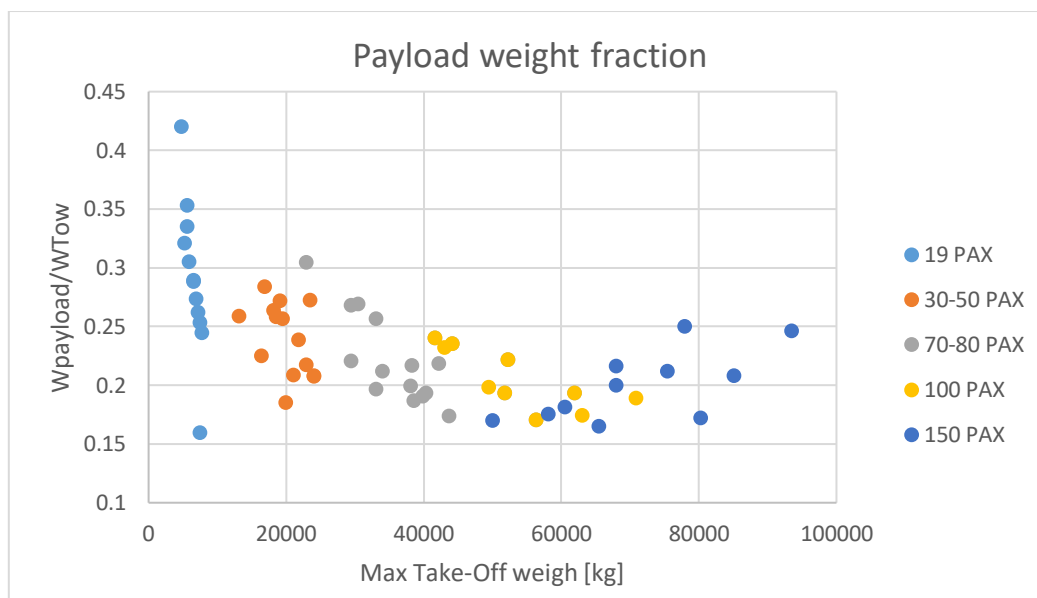
Wing, Fuselag, tail surface, control surfaces, fairing, ..	Structure		Empty Weight	Oprating Empty Weight OEW	Maximum Take-Off Weight MTOW
Engines, engine mounts, engine control, fuel system, ...	propulsion	Systems			
Tanks, Batteries, electrical system, ventilation, pressurisation, de-icing,...	Other systems				
Seats, galeys,lavatories, loading equipment..	Fixed equipment				
Non-usable fuel					
In-flight meals, life vests, water	Moveable equipment				
Pilots, cabin personnal	Crew				
Passengers, cargo	Payload				
Useable fuel, batteries					

Figur 16 Typisk viktsnedbrytning för flygplan

En initial uppskattning av de olika viktfraktioner kan baseras på statistik från existerande och kända flygplan. Man kan anta att kvoten mellan tomvikt (M_{empty}) och maximal startvikt (M_{TOW}) - som representerar flygplanets strukturella effektivitet - kommer att förbli i samma storleksordning för framtida flygplan. Struktureffektiviteten kan naturligtvis ändras och påverkas av teknikval, men ett konstant värde kan antas som ett giltigt första tillvägagångssätt. Viktfraktionsstatistiken för kända flygplan presenteras i Figur 17 och Figur 18. Utifrån ett flygplans utvecklingsperspektiv antas det att ett nytt flygplans som utvecklas inom snar närtid kommer att ha liknande kvoter.



Figur 17 Tomvikts kvot som funktion av maximal startvikt



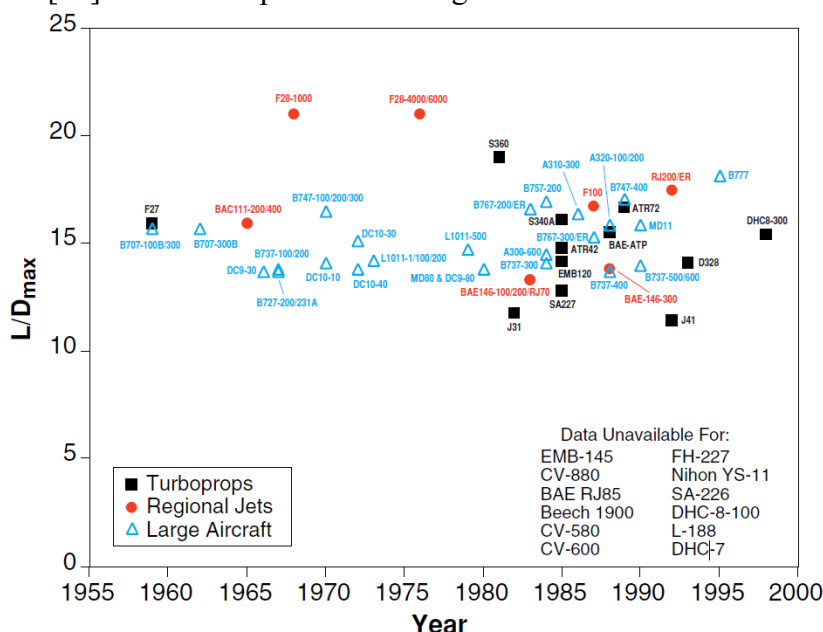
Figur 18 passagerarviktsfraktion som funktion av maximal startvikt

Den specifika energin hos de olika energikällorna presenteras i Tabell 3. Observera att batterierna beskrivs med en intervall som representerar battericeller från 320 Wh/kg till 1000 Wh/kg. Observera att siffrorna endast är på cellnivå och inte representerar den operativa användbara specifika energin, där installationen (förpackningen och temperaturreglering), livslängden och andra parametrar ej betraktas [43] [44]. För vätgas och jetbränsle kommer en volymmetrisk lagringsbegränsning att påverka vad som kan betraktas som användbar energi. För att ta hänsyn till detta införs en gravimetrisk effektivitet, baserad på studier från ATI [45]. I detaljstudien kommer denna gravimetriska verkningsgraden att ersättas och modelleras av modeller av tankarna och bränslesystemet.

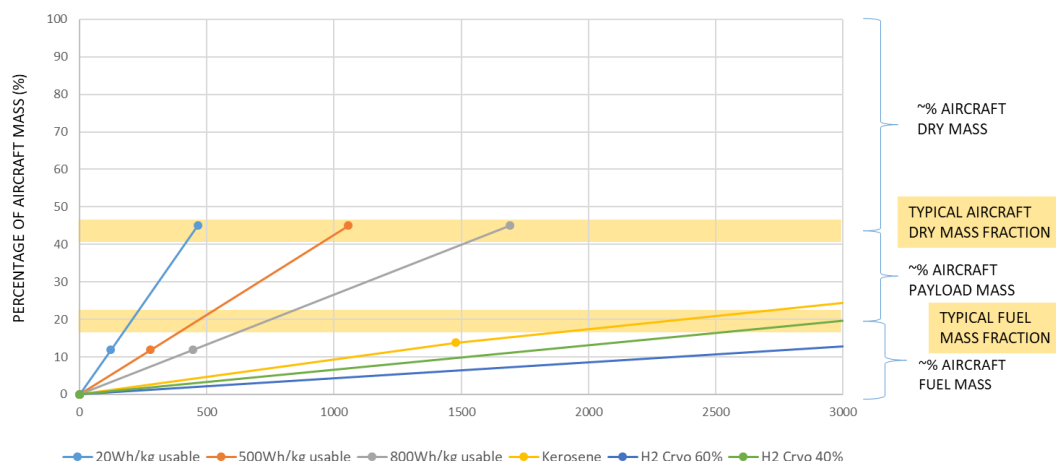
Tabell 3 Specifik energi för olika energikällor

	Enheter	Väte	Jetbränsle	Batteri
Specifik energi	MJ/kg	~140	~46	0.9–3.6
Gravimetrisk effektivitet	%	60	98	

För att kunna använda ekvationerna (1) och (2) behövs också uppskattningar av flygplanens glidtal (L/D), vilket ses som ett uttryck för aerodynamiska effektiviteten. En initial indikation för glidtal kan baseras på statistik publicerad av Babikian [46] och finns representerat i Figur 19.


Figur 19 Glidtal L/D för historiska flygplan, data från Babikian[46]

Med hjälp av dessa uppskattade egenskaper, kan Breguets räckviddsekvation användas för att beräkna räckviddsintervaller i relation till olika teknologier. Dessa räckviddsintervaller inkluderar inga reserver, tar inte någon hänsyn till andra flygsegment än planflykt på konstant marschhöjd och inkluderar inte att olika system ombord flygplanen har visst effektbehov. I studien, har ett glidtal (L/D) på 16 antagits för alla framdrivnings principer. I verkligheten kommer glitalet att variera mellan olika flygplanstorlekar och som funktion av flyghastigheten, men det valda värdet är inom rimliga gränser. För flygplanens viktuppskattning har historiska data från Figur 17 och Figur 18 används. Resultaten från denna enkla modellering finns i Figur 20, där de gula banden representerar den typiska variationen mellan de olika flygplansklasserna. Alla batterivärden representerar effekten på paketsnivå, 200, 500 och 800 Wh/kg. Räckvidden som uppnås med vätgas kan ses som mycket optimistiskt eftersom den extra volymen som krävs för vätgastankarna kommer att påverka negativt. Utifrån denna första grova approximationen kan vi notera att flygplan med batteridrivning har en begränsad räckvidd, och har en stor känslighet till batteriutvecklingen.



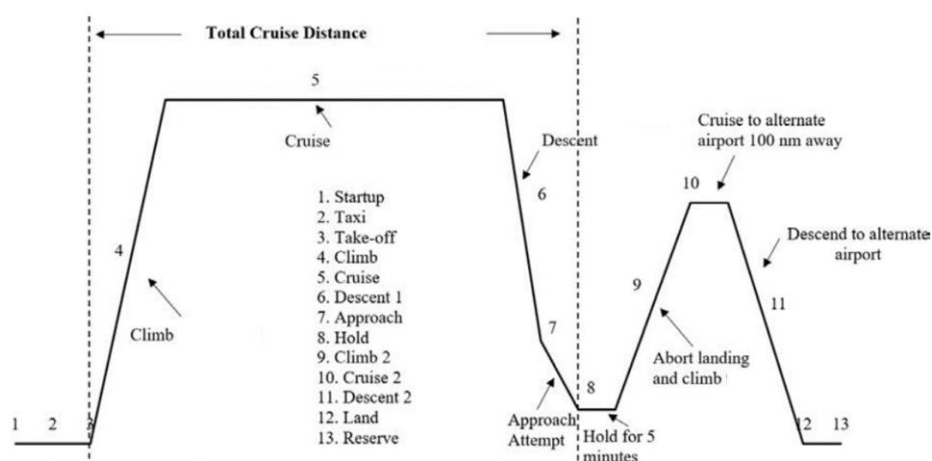
Figur 20 räckvidd för olika framdrivnings principer baserade på första principmodellering.

Detaljerad flygplansmodellering

Målet med dessa modeller är att representera flygplanen med en högre detaljeringsgrad som möjliggör att representera skillnaderna mellan de olika framdrivningstekniker. Till dessa modeller har verktyget Pcelab Suite från TXT använts. Det är samma verktyg som används av Saab för tidiga flygplanskonceptstudier. Analysmetoderna inbyggda i Pcelab Suite baseras på semi-empiriska och statistiska metoder, kalibrerade med hjälp av data och erfarenhet från industrin.

För att kunna modellera alla flygplan så antogs det en så kallade standard flygprofil för civila flygplan. Den beskriver på ett förenklat sätt hur flygplanen tar sig från start till destination och tar hänsyn till att det skall finnas tillräckliga energireserver, antingen för att kunna flyga vidare till en alternativ flygplats eller för att vänta innan landningen i närheten av destinationen. Flygprofilen som har används visas i Figur 21. Flygreserverna är beroende av certifieringsbasen, rekommendationer, geografiska regionen, typ av operation (VFR, IFR, etc.). National Business Aviation Association (NBAA) [50] ger en rekommendation för extraräckvidden till en alternativ flygplats, som är en del av den obligatoriska reserven för flygning enligt instrumentflygreglerna. Reservräckvidden antas vara 100 NM för turbopropflygplan och 200 NM för jetflygplan. Inom ramen för detta projekt har 100 NM antagits som bas. Dessutom antas alla flygplan som modellerats ha IFR-kapacitet, även om detta kan ses som konservativt för 9- och 19-passagerarflygplan, där VFR-förhållanden kan vara tillräckliga för korta flygningar. Valet att anta IFR-tillstånd för projektet gjordes på grund av att den nordiska miljön kan ge varierande väderförhållanden och att reguljära flygtrafiken

bör kunna fortsätta dagligen i alla väder.



Figur 21 Nominellt flyguppdrag för kommersiella flygplan

Flygplansmodellerna utvecklade inom projektet kan representera olika framdrivningsprinciper, med parametrar som beskriver effektivitet för elsystemen och bränsleeffektivitet för förbränningsarkitekturerna, samt de enskilda vikterna för de olika huvudkomponenter i de olika framdrivningssystemen. För uppskattningen av flygplansstruktursvikten nyttjades de standardkvationer som finns implementerade i Pacelab Suite.

Följande antagande har tagits i modelleringen:

- Elektrisk motor:
 - Effektivitet 98 %,
 - Effekttäthet 5 kW/kg
- Fotoelektrokemisk cell:
 - Effektivitet 98 %
 - Effekttäthet 2,2 kW/kg
- Kabeleffektivitet 99 %
- Effekttäthet bränsleceller 1,5 kW/kg
- Effekttäthet kylsystem 2 kW/kg.

För batterielektriska framdrivningssystem tillämpades samma antaganden för motor- och kabelverkningsgrad som för bränslecellsvarianten. Den batterispecifika energitätheten antogs vara 440Wh/kg för ett installerat batteri, vilket motsvarar ungefär 630Wh/kg på cellnivå. Detta anses vara optimistiskt, och skall balanseras med att alla elektriska flygplan också betraktar 100 NM i reserv till alternativ flygplats.

För direkt vätagasframdrivningen tillkom utvecklingen av en modell för vätagastankarna, som togs fram av Elenius [[21]] och implementerades i Pacelab. Inom projektet beslutade det att inte modellera hybridflygplan, då det kan vara svårt att utvärdera olika hybrid lösningar utifrån hur man väljer att implementera hybridiseringen, och optimering av varje sådant flygplan blir beroende av valet på

hybridiseringsfaktor, räckvidd med mera. Detta var en nödvändig begränsning i studien.

De resulterande flygplanen finns i Tabell 4, där flygplanen märkta EL är elektriska flygplan med batterier, flygplan märkta HD är med direkt förbränning av vätgas, HFC står för vätgasbränsleceller. I tabellen hänvisas antingen till flygplanens namn (PC12, Beechcraft 1900, Saab 340 och Saab 2000, ATR72, Embraer 190, Airbus A220 och A320), eller till författarna till publikationer varifrån flygplansmodellen kommer ifrån. För alla flygplan baserade på biobränsle (SAF) antas samma räckvidd som dagens ursprungliga flygplan. Notera att inga flygplan från pågående utvecklingsprojekt har tagits med inom denna studie.

Tabell 4 Olika flygplanskoncept, modellerade och från publicerade källor, EL, HD och HFC har modellerats, andra kommer från tillgängliga publikationer [[51][52][53][54][55][56][57][22][23][24][25][26][27][28] eller värden från typcertifikat

[illegible]

Teknologier

Idéen med studien är att ge en bred översikt av teknikområden som har påverkan på flygets klimatomställning och som bör betraktas. Målet är att lyfta fram teknologier som har störst påverkan på de olika framdrivningslösningars möjlighet att bidra till miljömålen. Vänligen notera att studiens slutliga lista kan per definition inte vara heltäckande och bör betraktas därefter.

Vanligtvis, när man analyserar teknologiutveckling så refererar man till Technology Readiness Level (TRL). Denna skala utvecklades på 1970-talet av NASA för att kunna beskriva mognadsgraden hos teknologier under utveckling och dess kopplade risk med målet att stödja produktutvecklingen som drevs av rymdstyrelsen. Figur 22 presenterar skalans olika nivåer och vad varje steg motsvarar.



Figur 22 TRL skala och dess betydelse

Tekniker som har potential att bidra till omställningen emot hållbara flygtransporter har indelats i olika grupper enligt följande:

- Förbättringar av flygplans- och motorteknik
 - Inklusive alternativa energikällor
 - Material och aerodynamik
- Förbättringar av flygledningen (Air Traffic Management - ATM)
- Drop-in miljövänliga flygbränslen
- Batteriteknik.

Framdrivningsteknik

Förbränning

Det är sannolikt att en stor andel av framtidens flygplan kommer att utrustas med framdrivningssystem baserade på förbränningen av någon sorts bränsle, till exempel vätgas eller SAF. Utvecklingen av nya motorer är en viktig del av flygets miljöomställning. En utmaning med SAF är att få fram motorer som är anpassade till den typ av bränsle för att ytterligare förbättra verkningsgrader och minska utsläpp. Forskning pågår och från ett svenskt perspektiv är GKN Aero i Trollhättan en av nyckelaktörerna inom området.

När det gäller vätgasframdrivningen pågår idag många utvecklings- och forskningsprojekt., bland annat Roll-Royce [99] och Airbus[99]. En del av

utmaningarna är inte enbart på motortekniksidan men även på hela systemsidan, som inkluderar en mängd komponenter som till exempel bränslepumpar, distributionssystem i flygplanet, värmeväxlare med mera. Ett sådant projekt, H2JET[97][98], leds just nu av Chalmers, GKN och RISE i Sverige på uppdrag av Energimyndigheten, med målet att undersöka hur delsystem bör utformas och integreras.

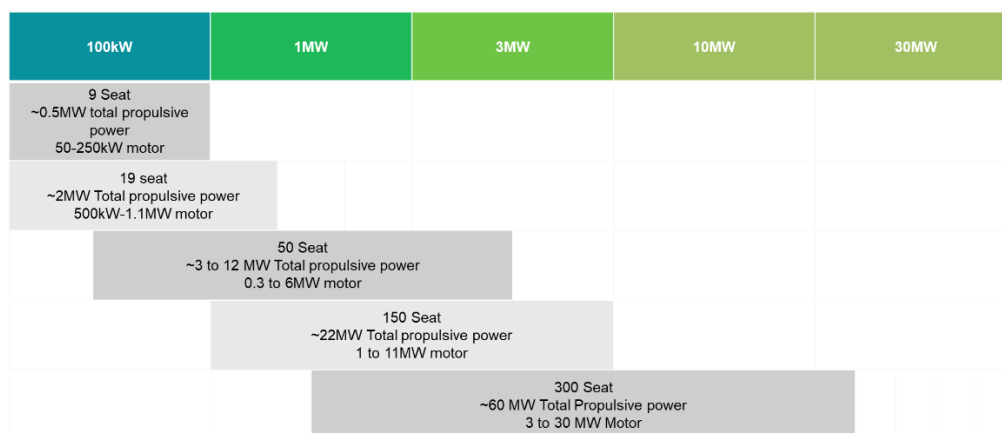
Utmaningar med vätgasturbiner:

- Material: förbränningskammare för vätgas opererar i högre temperaturer än traditionella brännare och ställer därmed högre krav på material och teknik. Detta kan göra utvecklingen av vätgasturbiner för flygindustrin mer utmanande
- Bränslekonditionering och leverans till brännkammaren är en viktig utmaning eftersom bränslet är mycket kallt och har hög kompressabilitet jämfört med konventionella flygbränslen
- Att designa en robust vätgasbrännare under de kommande fem till tio åren är utmanande jämfört med tidigare tidsskalor för förbränningsteknik
- Att leverera testanläggningar och infrastruktur i tid för att stödja teknikutvecklingsplanen
- Att förstå den atmosfäriska påverkan från förbränning av vätgas inom flyget är väsentlig kunskap som krävs i den tidiga fasen av detta program.
- Bränsle- och styrsystem: utveckling inom de grundläggande delarna av bränsle- och styrsystemet krävs för att realisera flyganpassade vätgasturbiner.
- Värmeväxlarcykeln avser den termiska hanteringen av bränslet. Innan förbränningen i en gasturbin, måste temperaturen ökas hos flytande vätgas eftersom det lagras i flygplanets tankar vid extremt låga temperaturer. Detta kan utnyttjas ytterligare för att skapa öka den termiskverkningsgraden i förbränningen.
- Kryogena bränslepumpar har huvudsakligen använts i rymdindustrin och är i en annan storlekskala än vad som behövs inom flygindustrin. Därför krävs utveckling av pålitliga, hållbara pumpar tillämpade till transportflygplan.

Elektrisk framdrivning

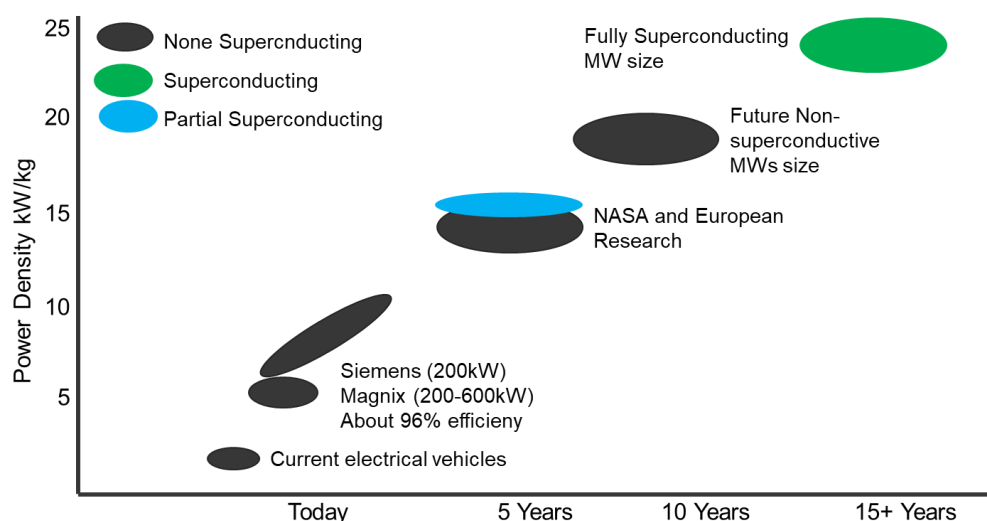
Ett flertal tekniska utmaningar finns inom elektrisk framdrivning. Många framsteg har genomförts de senaste åren av elektrisk framdrivning inom fordonssektorn. Men flyget har annorlunda krav, behöver högre effekter, har annorlunda livscykler, säkerhetskrav och viktskrav bland annat. Elektrisk framdrivning består inte enbart av motorer och batterier. Andra komponenter och aspekter måste också betraktas, så som kraftelektronik, elöverföring (kablar), temperaturkontroll. Enbart en kort översikt av motorteknikutveckling och kraftelektronik presenteras i rapporten.

Figur 23 ger en överblick av exempel på olika motorutvecklingsdomäner som behövs för olika flygplansklasser. Man kan notera att storleksordningen på varje motoreffekt är färgsatt utifrån TRL-nivån på det olika motoreffektstorlekar.



Figur 23 Exempel på effekt elektrisk installerad effekt och motoreffekt, adapterad från NASA[58]

Det finns olika parametrar som är av intresse för motorutvecklingen, till exempel vikten som alltid är av stort intresse inom flygindustrin, men även andra godhetstall som motorns krafttäthet (kW/kg) och dess effektivitet (minimera förluster). Idag så ligger några motorer runt 4-5 kW/kg med en maxeffekt på 250 kW. Krafttätheten minskar med ökande uteffekt, så för ~600 kW uteffekt blir krafttätheten ungefär 3 kW/kg, vilket är en av dagens begränsningar tillsammans med termiska begränsningar. En utmaning inom motorutvecklingen är användningen av högttemperatur supraledande material för att höja krafttätheten och minska förlusterna i motorn. Pågående forskning inom olika projekt indikerar att en ökning upp till 10 kW/kg [[60] för motorer runt 1MW kan vara möjlig och att det finns en potential upp emot 20 kW/kg [61]. Alla dessa projekt siktar på högre effektivitet inom en större del av motorns användningsområde.



Figur 24 Motorteknik utveckling, adapterad från NASA [59]

Andra viktiga delar i elektriska framdrivningssystem är effektiv styrelektronik och omvandlare om man har en hybridlösning. Inom elektronik är det snarlika parametrar som för elmotorer som är av största intresse, dvs. krafttäthet (kW/kg) och dess effektivitet.

Bränsleceller

Bränsleceller genererar ström från vätgas. För närvarande är deras specifika effekt 1-2 kW/kg för bränslecellstacken, exklusive ytterligare nödvändiga komponenter för kylning, kompression och så vidare. Detta begränsar för närvarande bränslecellernas användning till demonstrationsmodeller för mycket små flygplan så som demonstreras av bland andra ZeroAvia.[101] Utmaningen är att vidareutveckla bränslecellstekniken och anpassa den så att flygplanskrav kan uppfyllas. Installationsaspekter, vibrationer och användningscykler skiljer sig från nuvarande användningsområde för tillgängliga bränsleceller. Svenska företaget PowerCell[102] är ledande bland bränslecellsutveckling. PowerCell har gått med i Newborn-projektet, en del av EU:s Clean Aviation. Projektet kommer att fokusera på att utveckla ett flygcertifierat bränslecellsdrivsystem i megaWatt-klassen, som kommer att drivas av vätgas.

Flygplansteknik

Under denna rubrik sammanfattas huvudteknologier som kommer att påverka de olika flygplanskonfigurationerna. Målet är att ge en överblick och beskriva hur de kommer att gynna miljöomställningen för svensk flygtransport. Teknikerna som kan främja hållbara flygtransporter finns rapporterade i olika publikationer, som till exempel: Destination 2050 [13], IACO [17] och NASA N+3 [48][49] och NASA N+4 [47]. Några urvaldata huvudteknologier presenteras härnäst. I denna rapport redovisas enbart teknikerna som anses vara tillräckligt mogna inom kommande 5–8 år eller senast inom 10-15 år.

Strukturteknik

Strukturförbättringar som leder till viktminskning ses som en nyckelfaktor för framtida flygplan [[47] [48][49], i vilka en högre användning av komposit [62] och multifunktionella material har stor potential att bidra till betydande viktminskning. Nämnbara teknologier är: avancerade metalliska strukturer; ultrahögpresterande kolfiber [63]; kostnadseffektiva integrerade strukturer [64][65]; integrerade aeroservoelastiska strukturer [[66][67]; multifunktionell struktur [[65]. Avancerad additiv tillverkning (så kallad ”3D printing”) ingår i domänen för avancerade metalliska strukturer och visar stor potential för vissa strukturella element och kan bidra till viktminskningen.

För att möjliggöra vätgasdrivna flygplan måste ny materialkunskap tas fram med hänsyn till de extrema temperaturerna. Det handlar om till exempel materialegenskaper, utmattningsskarakteristik, hållfastighet och sprödhet i relation till extrema temperaturer, permeabilitet, med flera.

Aerodynamik

Aerodynamiska förbättringar kan komma från olika faktorer, till exempel formoptimering, nya material eller aktiv styrning av kontrolltytor för att minimera luftmotståndet.

Laminärt flöde har varit ett stort forskningsområde genom många år. De framsteg som har genomförts på senaste åren tyder på lovande resultat och en signifikant minskning av luftmotståndet [68][69][70]. Genomförbarhet av laminärt flöde har demonstrerats inom ramen för Clean Sky BLADE projektet [71] och har visat lovande resultat. Laminärt flöde anses vara enklare att uppnå vid lägre hastigheter. Detta kan också kombineras med vingar med högre sidoförhållande, vilket minskar det inducerade motståndet [72][73]. Vingar med högre sidoförhållande kan begränsas av hur mycket plats de kan ta vid flygplatsen och därför kan teknik som fällbara vingar behövas på vissa typer av flygplan.

Förbättringar inom beräknings- och analysdiscipliner och multidisciplinär optimering möjliggör ytterligare förbättringar av aerodynamiska egenskaper som kommer att bidra till effektivare flygplan. Exempel på detta finn i referenserna [73][74][75].

Bränsletankar för vätgas

Som tidigare förklarat fokuserar man inom flygindustrin i första hand på vätgas i dess flyttande form. Ett sätt att uppnå flyttande vätgas är att kyla ner gasen till mycket låga temperaturer (-253°C). Därför är en av utmaningarna med vätgastankar för kryogeniksväte är att de skall vara lätta men ändå klara av den extremt låga temperaturen.

För att möta dessa utmaningar har det pågått intensiv teknikutveckling och forskning inom området. En viktig utveckling har varit att minska vikten på vätgastankarna genom att använda nya material som kolfiberkompositer eller nanoteknologi, samtidigt som man upprätthåller en hög termisk isolering för att förhindra värmeöverföring från omgivningen. Annan forskning tittar på användning av nya metallegeringar. Inom rymd industrin har man realiserat olika vätgastankar under en längre period. En stor skillnad är att vätgastankarna inom rymdindustrin töms inom bara minuter efter start.

Olika lösningar för isolering är under utveckling, så som vakuumisolering, där vätgastanken kapslas in i ytterligare en tank med vakuum emellan dem. Andra tekniker betraktar olika typer av isoleringar så som aero-geler, för att ytterligare förbättra vätgastankarnas prestanda.

Trafikledning (ATM) och operativ användning av flygplan

Ett viktigt område att tänka på när man tar upp flygets framtid är operativa aspekter. Vanliga sådana aspekter är till exempel ekonomiska och underhåll, men dessa tas inte upp i denna studie.

Ett viktigt område ur ett svenskt perspektiv för framtida drift och användning är utnyttjandet av mindre trafikerade flygplatser, såsom tidigare beskrivet i efterfrågebedömningen av Sverige. För att möjliggöra användningen av dessa

flygplatser måste förbättringar från trafikledning (Air Traffic Management – ATM) och möjligheter som erbjuds av lösningar så som ”Remote Tower” inkluderas [103]. Modern ATM kommer också att hjälpa till med bättre planering och mer optimala rutter. SESAR är ett exempel på förbättringar på europeisk nivå som kan bidra med potentiellt stora energibesparingar.

Förbättringar inom flygledningen och flygverksamheten bedöms vara ett viktigt bidrag till att minska flygets koldioxidutsläpp på kort till medellång sikt. Tre huvudområden är: flygbolagsverksamhet, luftrum- och flygtrafikledning samt markhantering på flygplatser.

Andra viktiga aspekter som allvädersförmåga är en nyckelfaktor för att kunna använda alla flygplatser. Andra aspekter, såsom passagerartid på flygplatsen och ombordstigningsförfarandet, måste stämma överens med användningen av mindre flygplatser. Ytterligare en viktig faktor för att möjliggöra kostnadseffektiv drift skulle vara möjligheten att enbart ha en pilot på mindre flygplan.

Slutligen, flygplatsernas infrastruktur behöver uppdateras och anpassas till de nya flygplanen och det nya krav som alternativa framdrivningsprinciper medför. Förändringar i infrastrukturen är vanligtvis tidskrävande och kräver långsiktig planering för att vara på plats när nya typer av flygplan ska börja användas.

Allokering av Flygplan till rutter

Passagerarbehovsmodellerna beskriver dagliga passagerarbehoven på vardera rutt. Målet med allokeringen är att undersöka vilka typer av flygplan kan möta dessa behov och samtidigt minimera miljöpåverkan.

Referensen för flygplansallokeringen är att anta att alla flygningar sker med flygplan drivna med SAF. Till det målet väljs flygplan så att antalet avgångar på vardera rutt minimeras, dvs att största möjliga flygplan väljs, dock med hänsyn till att minsta tillåtna kabinfaktor ska vara 65%. Därefter är målet att ersätta så många SAF-flygningar som möjligt med mer miljövänliga framdrivningar. Flygplanen som kan utnyttjas är finns beskrivna i Tabell 4.

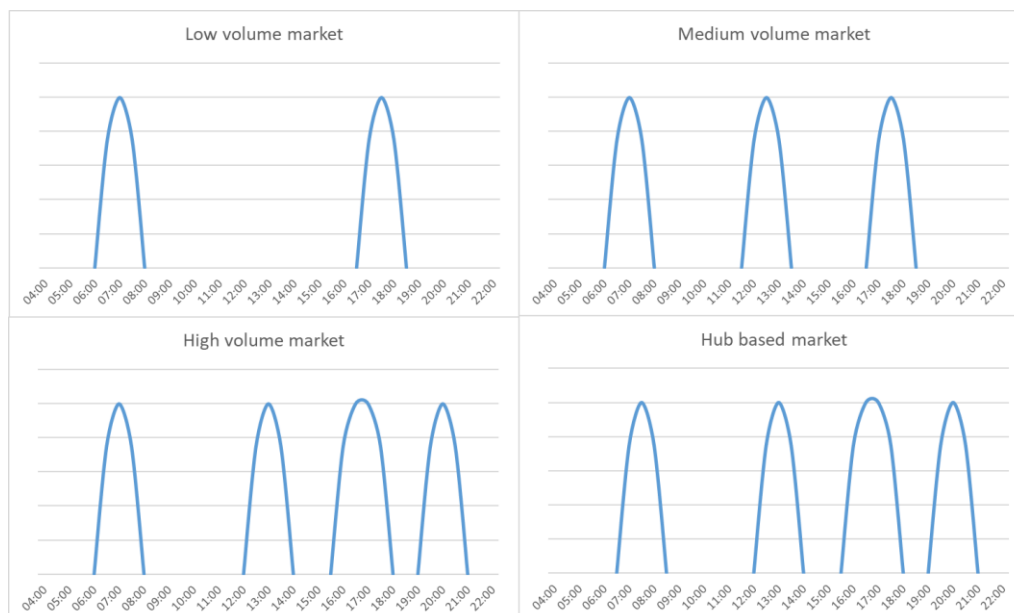
Logiken för att allokeringen är baserad på följande principer:

- På samtliga flygningar måste det valda flygplanet ha tillräcklig räckvidd så att krav på reserver uppfylls
- Maximalt kan 15 flygningar per dag åläggas på en och samma rutt (dvs. tre tvåtimmarstider om dagen med avgångar var 30:e minut)
- Omfördela batterielektriska flygplan istället för SAF-drivna flygplan på så många rutter som möjligt, med räckvidd som begränsande faktor
- På de resterande linjer som fortfarande trafikeras av SAF-flygplan, omfördela flygplan med vätgasbränsleceller med hänsyn till räckvidd
- På de slutligen resterande rutter som fortfarande trafikeras av SAF-flygplan, omfördela flygplan med direktförbränning av vätgas med hänsyn till räckvidd.

Några observationer kan göras:

- I samtliga fall krävdes en minsta kabinfaktor på 65%, vetandes att en sådan låg belägningsgrad skulle kräva statliga subventioner för att vara kommersiellt gångbar
- Den maximala flygplansstorleken motsvarar ett Airbus A321-flygplan med en kapacitet på 180 passagerare. Analys av passagerardata visar att ett ännu större flygplan skulle kunna vara lämpligt på vissa rutter i Norge där den dagliga passagerarvolymen är mycket hög
- Alla sträckor under 150 km exkluderades från att trafikeras med flygplan om det finns tåg- eller vägförbindelser, eftersom det antogs att på så korta avstånd skulle andra transportsätt vara mer realistiska. Observera dock att detta inte gjordes för Norge, eller flygningar till öar, där även kortare flygningar kan vara rimliga för att resa över fjordar eller geografiska hinder
- Antalet flygningar per dag baseras på att man vill ha en minsta marknadsvolym för att flygförbindelser skall vara praktiskt gångbara. Detta leder till att ett minimum av 4 resor (dvs. 2 tur- och returer) per

start-destination par anses vara ett minimum. Det andra man måste ta hänsyn till är att flygavgångar inte fördelas jämnt över dygnet, vilket illustreras principiellt i Figur 25. Detta leder till att antalet avgångar per dygn mellan två flygplatser begränsas, så som indikerat ovan.



Figur 25 Dagliga flygtider för olika marknader, adapterade från [36]

Ett annat antagande för ruttallokeringen är att det kommer finnas prioriterade timmar under dagen, motsvarande en högvolymsmarknad. I detta fall har totala antalet resor begränsats till att det genomförs maximalt 16 tur- och returesor på en sträcka eller 32 flygturer. Detta kan jämföras med sträckan Oslo-Bergen där det är mellan 14 och 25 tur- och returflygningar per dag. Det andra antagandet är att korta sträckor kommer ofta att kännetecknas av resenärer som dagspendlar. Därav det blir marknadsbilden karakteriserad med avgångar som koncentreras vid morgon- och kvällstider, vilket också begränsar hur många flygningar som det är rimligt att planera per dag.

Observera att studien inte har haft till avsikt att skapa tidtabeller men att istället försöka analysera fördelningen på en högre nivå av olika flygplanstyper på de olika rutten. Inom ramen för projektet gjordes inte heller överväganden om att skapa ett operativt flygbolagsnätverk med möjliga knutpunkter, eller några ekonomiska analyser. Inom denna studie har resultaten enbart baserats på att möta en viss efterfrågan för att skapa en första förståelse för de möjligheter som erbjuds av miljövänliga konceptflygplan enligt beskrivningen i Tabell 4.

Resultat

Resultat för vardera land samt för Skandinavien i sin helhet presenteras utifrån att följande scenarion har studerats:

- Scenario 1 - Alla flygresor utförs med SAF-drivna flygplan förutom det sträckor som kan opereras med batterielektriska flygplan
- Scenario 2 - Som Scenario 1 förutom att det sträckor som kan flygas med flygplan drivna med vätgasbränsleceller ersätter SAF-drivna flygplan.
- Scenario 3 – Mest optimistiska, där alla flygsträckor opereras med de flygplan som har lägsta miljöpåverkan enligt Figur 26.

	CO ₂	NO _x	Water vapor	Contrails, cirrus	Climate impact reduction potential
SAF	0% -80%	0%	0%	-10-40%	-30-60%
Hydrogen Direct combustion	-100%	-50-80%	+150%	-30-50%	-50-75%
Hydrogen Fuel Cell	-100%	-100%	+150%	-60-80%	-75-90%
Battery	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Figur 26 Miljöpåverkan av olika framdrivnings principer

Utifrån det två behovsmodellerna som beskrivits tidigare kan man beräkna totala antalet rutter som vardera modell innehåller. Så som tidigare förklarat, har man satt krav på ett minsta antal passagerare per rutt och dag för att flygplan ska allokteras på en rutt, vilket leder till att en filtrering har skett enligt Tabell 5.

Tabell 5 passagerarefterfrågan för de tre länderna före och efter att ha infört begränsningar för minsta antal passagerare och minsta reseavstånd baserad på behovsmodell 1

	Sweden		Finland		Norway	
	Daily Pax Demand	Nr. of Flights	Daily Pax Demand	Nr. of Flights	Daily Pax Demand	Nr. of Flights
On all routes	9541.6	820	15778	351	89938	101
On routes with more than 24.6 pax/day	7699.7	46	14401	101	89938	101
On routes over 150 km	7699.7	46	13636	87	n/a	n/a

Svenskt perspektiv

Det finns en relativ stor skillnad mellan de olika behovsmodellerna (se figurer för respektive scenario). I behovsmodellen baserad på gravitationsmodellen så finns totalt 820 rutter representerade. Genom att avkräva ett minsta antal passagerare på 24,6 passagerare/dag (dvs. 2 flygningar per dag, med det minsta flygplanet med lägsta tillåtna kabinfaktor) så reduceras detta till 46 rutter. Intressant nog, denna

tillsynes drastiska reducering minskade den totala passagerarefterfrågan med endast 15%. Det kumulativa diagrammet för passagerare per kilometer som presenteras i Figur 27 visar att ett fåtal rutter står för den betydande delen av alla resor. Det finns en dock skillnad mellan resorna i de två modellerna, där de dominanta resorna ej överensstämmer exakt mellan modellerna. Den totala dagsvolymen på resande är dock mycket likt.

I BM 1 så representerar de 3 största passagerarsträckorna cirka 38% av all passagerarvolym. Dessa 3 sträckor är Stockholm-Göteborg, Stockholm-Malmö och Stockholm-Luleå, där Stockholm-Göteborg och Stockholm-Malmö står för ungefär 27% av allt inrikesflyg.

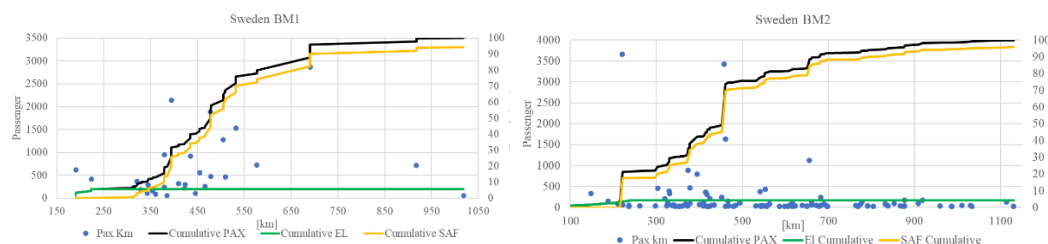
I BM 2 så representerar i stället de 3 största rutterna cirka 40% av all passagerarvolym. Dessa rutter är Stockholm-Göteborg, Stockholm-Malmö och Stockholm-Umeå, där Stockholm-Göteborg och Stockholm-Malmö, står för cirka 33% av alla flygpassagerare i Sverige.

Eftersom tåginfrastruktur finns på dessa sträckor, och restiden är cirka 3 respektive 4 timmar, är det möjligt att flygresor skulle åtminstone delvis kunna ersättas med bättre användning av tågen. Många flygningar är mellan 350 och 600 km långa, vilket motsvarar sträckor där det finns en mer betydande tidsbesparing jämfört med alternativa transportsätt. I båda behovsmodeller så återfinner man en återspeglning av svensk befolkningsfördelning, se Figur 1. I BM 2 så finns det betydligt mer flygningar på avstånd 600 till 1100 km än i BM 1. Det flesta av dessa flygningar representerar en låg passagerarvolym, förutom två rutter i BM1 som inte återfinns i BM 2.

Båda behovsmodellerna har ett stort ”syd-nordfokus”, och det är viktigt att konstatera att inga av dessa modeller verkar fånga upp behovet av resor mellan städer i Norrland.

Scenario 1

I Scenario 1 undersöks hur de modellerade passagerarbehoven kan bemötas med hjälp av eldrivna flygplan. Oberoende av behovsmodellen så kan man konstatera att batteridrivna flygplan bara kan komma att representera en liten andel av det kumulativa resandet, ungefär 10%. I BH 1 kan man konstatera att eldrivna flygplan (med batteri) fångar upp de korta resorna med relativt låg volym av passagerare, med behov av flygplan med upp till 34 passagerare. I BM kan man observera liknande resultat. I BM 1 begränsas användningen av eldrivna flygplan av en kombination av räckvidd och passagerarkapacitet. För BM 2 kan man konstatera att det skulle finnas behov av mindre flygplan men att räckviddsbegränsningen hos eldrivna flygplan blir den begränsade faktorn.

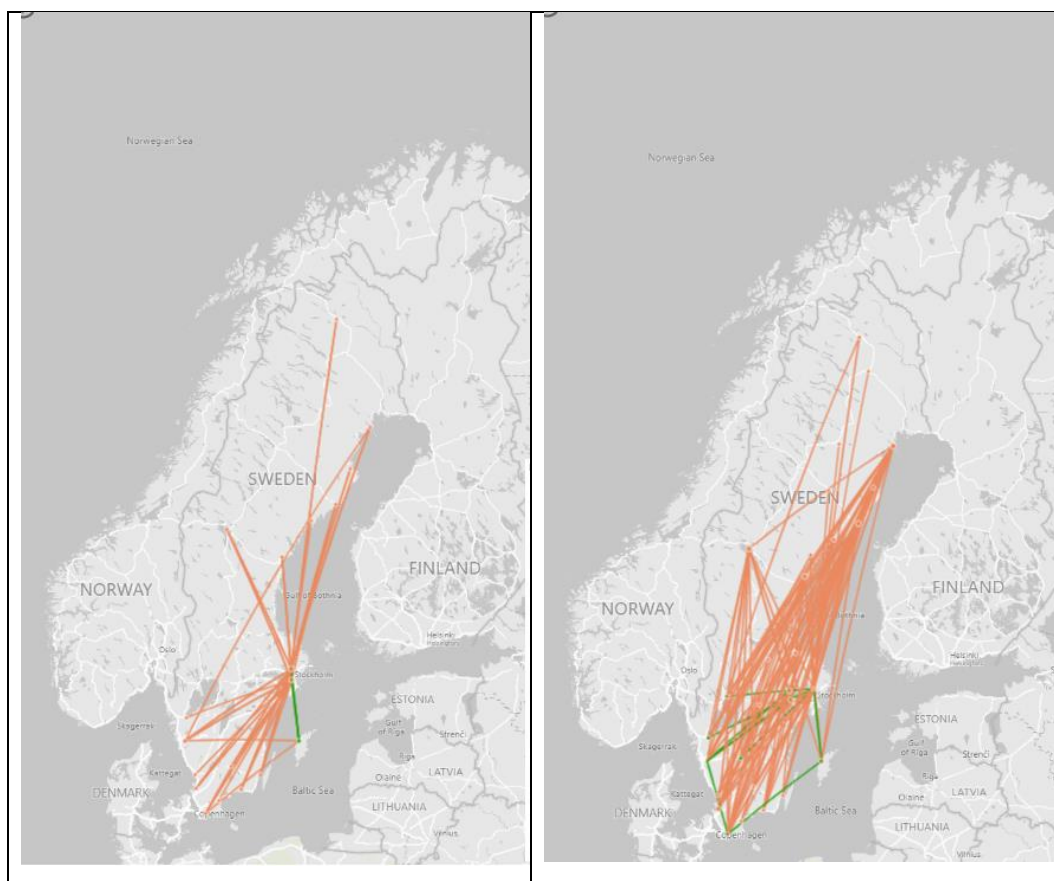


Figur 27 Dagliga flygbehovet med passagerare per kilometer och den kumulativa % av passagerare per framdrivningsteknologi för scenario 1 i Sverige

Figur 28 Karta över dagliga rutten inom Scenario 1, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

I Scenario 1 är det få sträckor som tas upp av elektriskt drivna flygplan, vilket syns tydligt i Figur 28, där det grönmarkerade sträckorna representerar flygningarna som trafikerar av denna typ av flygplan. Dessa rutten återfinns i enbart i södra Sverige. Notera att för rutten Stockholm-Visby så ingår det fortfarande trafik både mellan Bromma-Visby och Arlanda-Visby, därav det relativt höga antalet dagliga flygningar med flygplan i 34 passagerarklassen. Notera att om Bromma flygplats inte skulle räknas med i behovsmodellen så skulle allokeringssalgoritmen valt att använda SAF-drivna flygplan istället, i syftet att försöka minimera antalet avgångar per dygn och rutt. Båda modellerna visar på att det finns en relativt liten andel rutten trafikerade av eldrivna flygplans utifrån de antaganden som har gjorts i projektet. Största begränsningen är räckvidd och antal passagerare.

Tabell 6 sammanfattar de dagliga flygningar per flygplanstyp och storlek. Notera att de stora volymer av passagerare på vissa av rutten leder till att flygplan i 220-passagerarklassen dominerar BM1, medan i BM2 kan en större variation observeras med flera flygningar med färre passagerare, som leder till en högre nyttjandegrad av flygplatser.



Figur 28 Karta över dagliga rutter inom Scenario 1, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

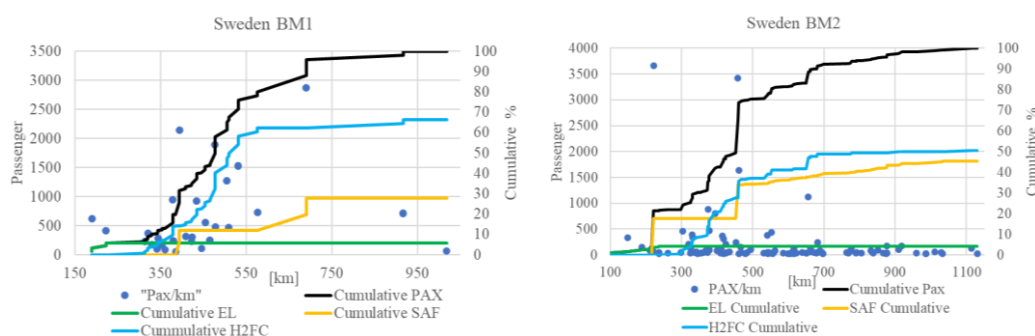
I Scenario 1 är det få sträckor som tas upp av elektriskt drivna flygplan, vilket syns tydligt i Figur 28, där det grönmärkade sträckorna representerar flygningarna som trafikerar av denna typ av flygplan. Dessa ruter återfinns i enbart i södra Sverige. Notera att för ruten Stockholm-Visby så ingår det fortfarande trafik både mellan Bromma-Visby och Arlanda-Visby, därav det relativt höga antalet dagliga flygningar med flygplan i 34 passagererklassen. Notera att om Bromma flygplats inte skulle räknas med i behovsmodellen så skulle allokeringssalgoritmen valt att använda SAF-drivna flygplan istället, i syftet att försöka minimera antalet avgångar per dygn och rutt. Båda modellerna visar på att det finns en relativt liten andel rutter trafikerade av eldrivna flygplans utifrån de antaganden som har gjorts i projektet. Största begränsningen är räckvidd och antal passagerare.

Tabell 6 Dagliga flygningar per framdrivningsteknologi och flygplansstorlek, scenario 1 för Sverige

Daily Flight BM1				Daily Flight BM2			
Pax	EL	SAF	Total	PAX	EL	SAF	Total
9		8	8	9	4	134	138
34	68	2	70	19	8	42	50
50		2	2	34	24	30	54
76		4	4	50		16	16
120		8	8	76		8	8
150		26	26	90		10	10
186		12	12	120		4	4
220		150	150	150		14	14
Total	68	212	280	186		2	2
				220		70	70
				Total	36	330	366

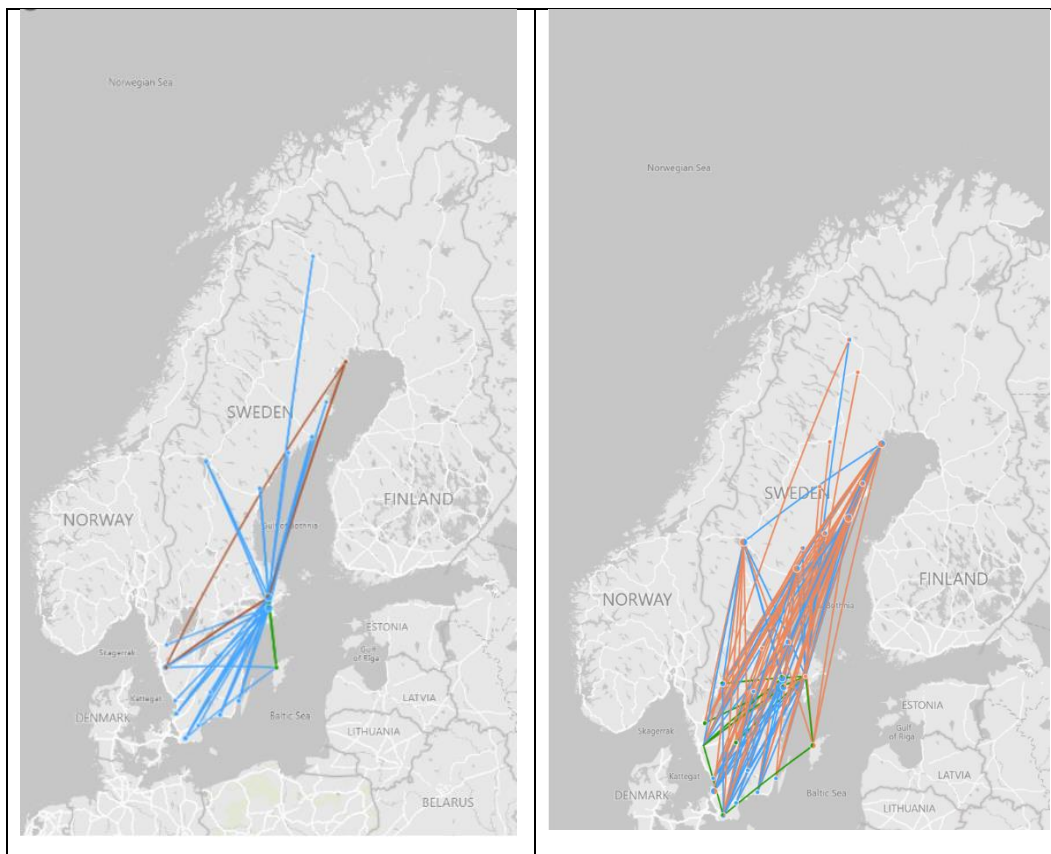
Scenario 2

I Scenario 2 tillkommer flygplan drivna av vätgasbränsleceller. Detta leder till att en stor andel av alla flygrutter blir tilldelade till denna flygplanstyp, vilket syns tydligt i Figur 29. Den kumulativa andelen passagerare som allokeras till bränslecellsdrivna flygplan blir cirka 60% för BM1, och cirka 50% för BM2.



Figur 29 Dagliga flygbehovet med passagerare per kilometer och den kumulativa % av passagerare per framdrivningsteknologi för scenario 2 i Sverige

I behovsmodellerna är det främst bränslecellsflygplan med kapacitet för upp till 76 passagerare som fördelas till de olika rutter. För BM 2 så finns det en större variation. Det är tydligt att räckvidden hos bränslecellsflygplan har en bra potential även vid flygplan med mindre passagerarkapacitet. Marknaden som återstår för SAF-drivna flygplan är i första hand rutter med lågt antal passagerare per dag, där flygplan med kapacitet för 9 till 34 passagerare och med relativ lång räckvidd behövs (se kartan av rutter i Figur 30 och sammanfattningen i Tabell 7).



Figur 30 Karta över dagliga rutter inom Scenario 2, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

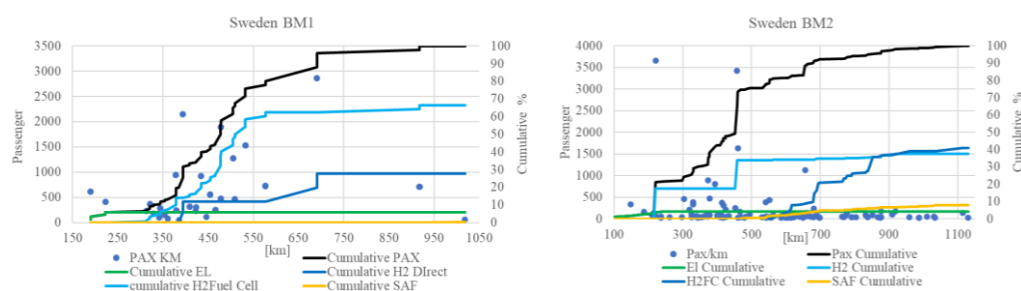
De återstående SAF-drivna flygplan med högre kapacitet tilldelas till sträckor med högt antal passagerare eller sträckor som är för långa även för bränslecellsdrivna flygplan.

Tabell 7 Dagliga flygningar per framdrivningsteknologi och flygplansstorlek, scenario 2 för Sverige

Daily Flight BM1					Daily Flight BM2				
PAX	EL	H2FC	SAF	Total	PAX	EL	H2FC	SAF	Total
9			8	8	9	4	40	94	138
19		6		6	19	8	24	30	62
34	68	26		94	34	24	20	20	64
76		344		344	50			10	10
220			48	48	76		146		146
Total	68	376	56	500	120			4	4
					220			34	34
					Total	36	230	192	458

Scenario 3

I Scenario 3 tillkommer vätgasdrivna flygplan, vilket leder till att i båda behovsmodellerna fördelas största delen av flygningarna mätt i kumulativt antal passagerare till bränslecells- eller direktdrivna vätgasflygplan. I BM 1 återstår bara enstaka SAF-drivna flygplan, som används på rutter med fåtal passagerare och lång räckvidd, Luleå-Göteborg. Alla andra flygningar för BM1 tas upp av något alternativ som har mindre miljöpåverkan. BM 2 visar snarlika trender, även om SAF-flygplan används på flera rutter med låg passagerarvolym. Skillnaden mellan BM 1 och BM 2 visas tydligt i kartorna i Figur 32 och i sammanfattningen i Tabell 8.

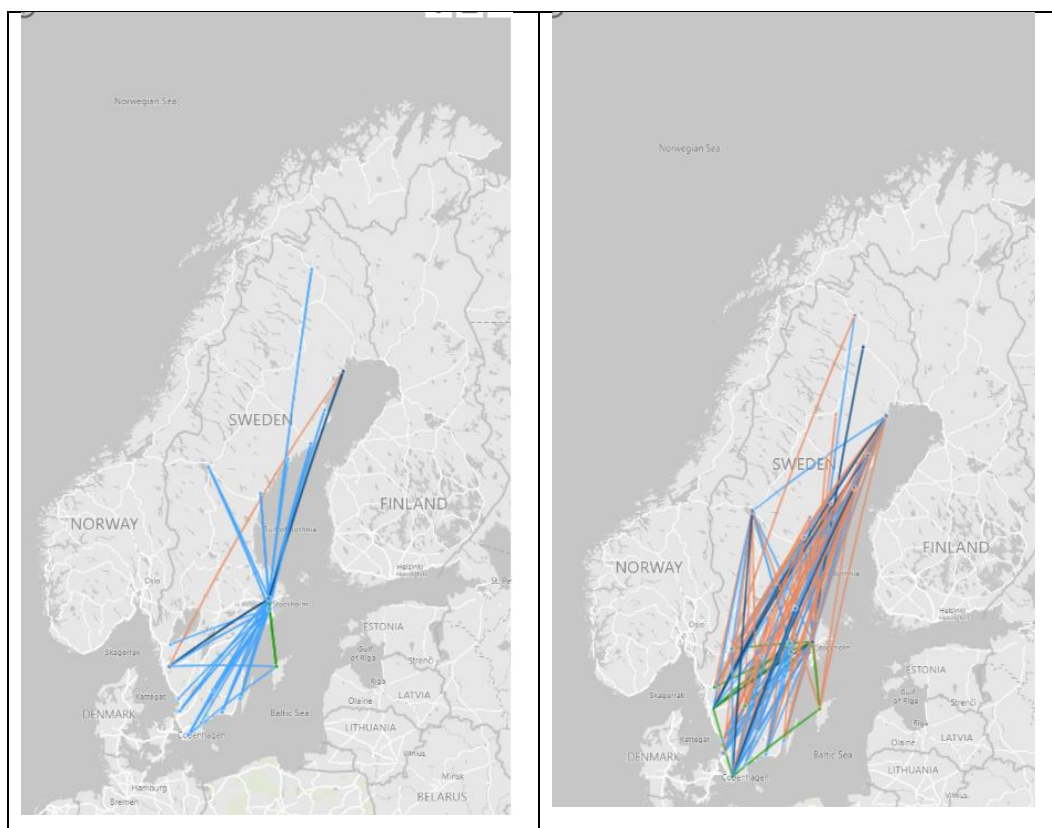


Figur 31 Dagliga flygbehovet med passagerare per kilometer och den kumulativa % av passagerare per framdrivningsteknologi för scenario 3 i Sverige

Detta scenario kan ses som det mest optimistiska scenario där alla flygplan som opereras på inrikesrutter i Sverige skulle ha ersatts av flygplan som har minsta möjliga miljöpåverkan.

Tabell 8 Dagliga flygningar per framdrivningsteknologi och flygplansstorlek, scenario 3 för Sverige

Daily Flight BM1						Daily flight BM2					
PAX	EL	H2	H2FC	SAF	Total	Pax	EL	H2	H2FC	SAF	Total
9				8	8	9	4		40	94	138
19			6		6	19	8		24	30	62
34	68		26		94	34	24		20	20	64
76			344		344	50		10			10
150		72			72	76			146		146
Total	68	72	376	8	524	120		4			4
						150		50			50
						Total	36	64	230	144	474



Figur 32 Karta över dagliga rutten inom Scenario 3, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

Sammanfattning Sverige

En tydlig skillnad mellan båda behovsmodellerna är den större andelen mindre flygplan som tillkommer i BM 2. Detta kan ses som en direkt konsekvens av att flera direkta rutten betraktas och att den glesa svenska befolkningen leder till mindre volymer passagerare. Fördelningen av flygplanen på de olika ruttena visar att bränslecells- och biobränsleflygplanen är de vanligaste framdrivningsteknologier, vilket är en direkt konsekvens av den korta räckvidden hos batteridrivna flygplan. I båda modellerna används de vätgasdrivna flygplanen på de rutten med längre räckvidder och med högre passagerarvolymer och är den teknologi som har störst bidrag till miljömålen. Detta förutsätter dock att infrastrukturutvecklingen och produktionen av vätgas genomförs med förnybar energi och att alla berörda flygplatser kan anpassas till vätgas.

Utifrån det två olika behovsmodellerna så konstaterar man att eldrivna flygplan har en begränsad potential i Sverige, huvudsakligen på grund av räckviddsbegränsningen. Detta är mycket beroende av framtida batteriutvecklingen och utformningen av kraven på reserver. Eldrivna flygplanens potential är störst för flygplan i 34 passagerarklassen. Men inom ramen för denna studie så bidrar det inte i någon större utsträckning till miljömålen som är uppsatta för inrikesflyget 2045.

Det kan ses att de batterielektriska flygplanen tilldelas en knapp kumulativ passagerarvolym i Sverige, vilket är en konsekvens av att många rutter har en räckvidd som inte är för lång för denna typ av flygplan när endast direkta flygningar beaktas. Vätgasdrivna flygplan representerar den största typen i Sverige, vilket är en kombination av storleks- och räckviddsbegränsningar i efterfrågemodellen.

Inom ramen för projektet har det inte betraktats att skapa ett effektivt flygnätverk för att dra nytta av olika tekniker eftersom enbart punkt-till-punkt-flygningar tas upp. Detta är något som bör betraktas för att se hur det skulle inverka på resultatet.

Scenario 3 är ett optimistiskt scenario. Det är troligare att något mindre el- eller bränslecellsdrivet flygplan introduceras först i kombination med en högre användning av SAF. Därför är Scenario 2 troligare, i och med att det inte antar att samtliga flygplan i tjänst idag byts ut med nya miljövänliga alternativ.

Resultat Finland

Som för det svenska fallet så finns det även i Finland stora skillnader mellan båda behovsmodellerna. När enbart rutter med minst 24,6 passagerare per dag betraktas (d.v.s. 2 flygningar per dag med det minsta flygplanet och lägsta kabinfaktor), reduceras i BM 2 antalet rutter från 361 till 91. Utifrån data baserat på referensåret 2019 och inklusive linjär årstillväxt, innehåller BM 1 istället enbart 19 rutter. I BM 1 representerar det 10 mest trafikerade rutterna 47% av all passagerartrafik, där topp 3 rutter endas står för 22% av alla passagerare. Enligt BM 2 skiljer Finland sig markant jämfört med de andra länderna med ett mycket distribuerat nätverk, som återspeglar en mer balanserad befolkningsfördelning jämfört med Sverige eller Norge, vilket är illustrerat i Figur 1.

I BM 1 kan man konstatera att Helsingforsflygplats är navet i alla flygplansruter, se bilderna i de olika scenarier.

Scenario 1

I Scenario 1 betraktas SAF- och eldrivna flygplan enligt tidigare definitioner. Man kan se att det är en stor skillnad mellan båda behovsmodellerna, vilket illustreras tydligt i rutfördelningen i kartan i Figur 33. BM 2 leder till ett komplext nätverk där elflygplanen har en betydande roll.

Tabell 9 Dagliga flygningar per framdrivningsteknologi och flygplansstorlek, scenario 1 för Finland

BM1				DM2			
PAX	EL	SAF	Total	PAX	EL	SAF	Total
34	34		34	9	50	18	68
150		12	12	19	42	10	52
186		16	16	34	140	12	152
220		50	50	50		8	8
Total	34	78	112	76		4	4
				90		6	6
				120		2	2
				150		12	12
				186		6	6
				220		30	30
				Total	232	108	340



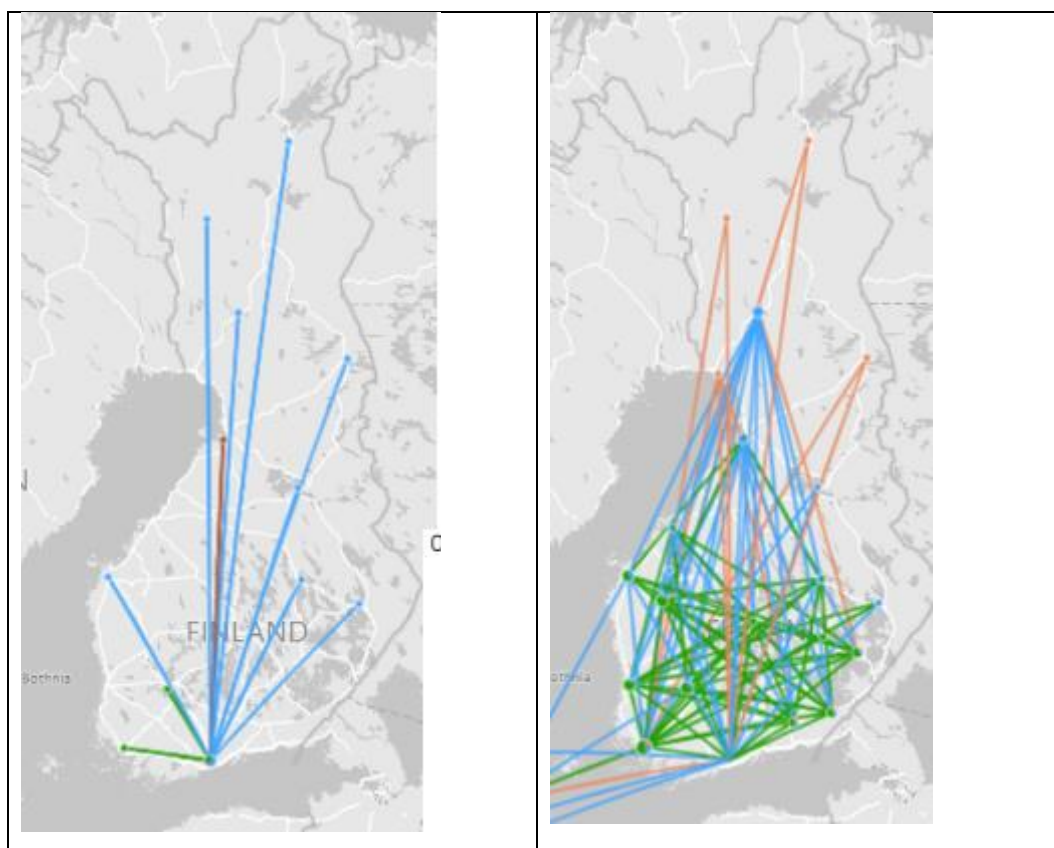
Figur 33 Karta över dagliga rutter inom Scenario 1, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

Error! Reference source not found. visar det totala antalet tilldelade flygningar per flygplanstyp i det framtida finska scenariot. Det är anmärkningsvärt att för BM 2 finns det en tydlig potential för batterielektriska flygplan i Finland, eftersom efterfrågans jämnare fördelning gynnar operationer med små flygplan på

kortare sträckor (se Figur 33). Därför finns det en tydlig potential för ett eldrivet flygplan i 34-passagerarklassen.

Scenario 2

I Scenario 2 tillkommer vätgasbränslecellsflygplan som ersätter SAF-drivna flygplan på de rutter där det är möjligt. I båda behovsmodellerna så har bränslecellsflygplan en stor betydelse och lyckas introduceras på en stor del av rutterna som i Scenario 1 var flugna av SAF-flygplan.



Figur 34 Karta över dagliga rutter inom Scenario 2, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

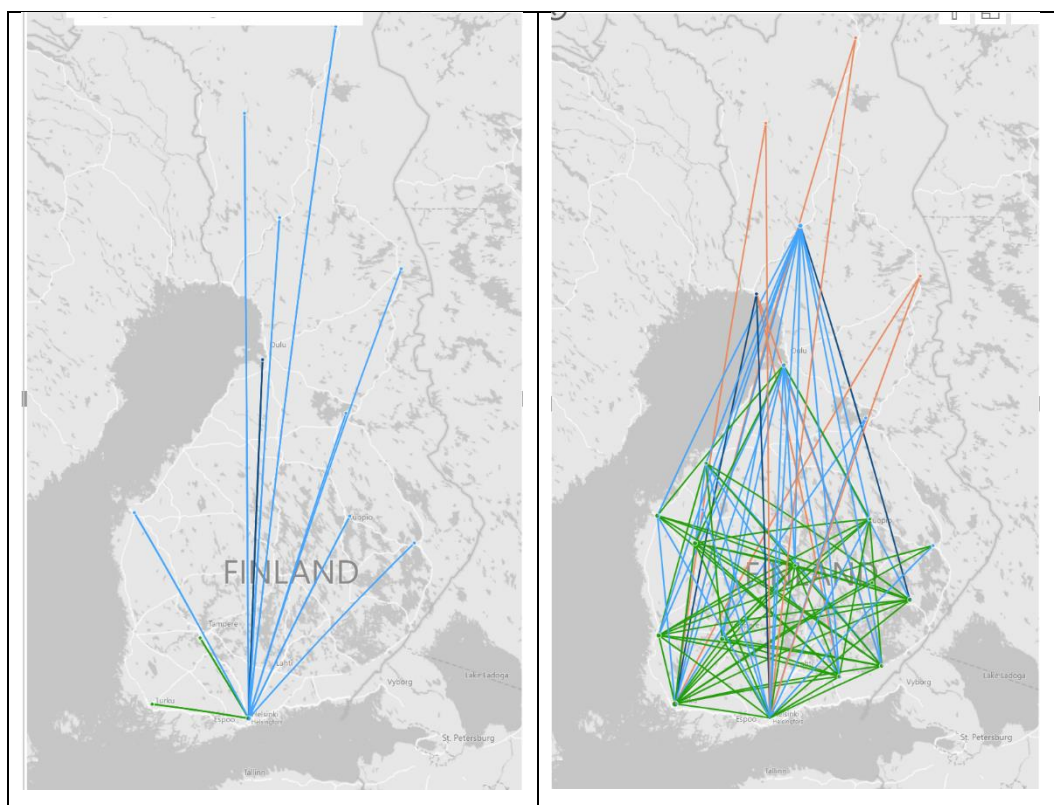
I BM 1 så återstår enbart en rutt med SAF-flygplan, mellan Helsingfors-Uleåborg, som är en rutt med stor passagerarefterfråga. För BM 2 så är det främst rutter med lång räckvidd och lågt antal passagerare som återstår, vilket ses tydligt i sammanfattningen av dagliga flygningar i Finland i Tabell 10.

Tabell 10 Daglig flyg per framdrivningstyp och storlek för Scenario 2 i Finland

BM1					BM2				
PAX	EL	H2FC	SAF	Total	PAX	EL	H2FC	SAF	Total
34	34			34	9	50	6	12	68
76		116		116	19	42	4	6	52
220			24	24	34	140	24	4	168
Total	34	116	24	174	50			6	6
					76		128		128
					Total	232	162	28	422

Scenario 3

I Scenario 3 ersätts SAF-flygplan med flygplan drivna med direktförbränning av vätgas på de möjliga rutterna. För BM 1 resultera detta i att SAF-flygplan kan ersättas på samtliga rutter.



Figur 35 Karta över dagliga rutter inom Scenario 3, behovsmodell 1 till vänster och modell 2 till höger

För BM 2 återstår istället SAF-drivna flygplan främst på de rutter där flygplan med kapacitet mellan 9 och 34 passagerare skulle opereras och där bränslecell-

och batteridrivna flygplan inte har tillräcklig räckvidd. De vätgasdrivna flygplan som tillkommer inom BM 2 är främst för att inget vätgasbränslecellsflygplan på 50 passagerare ingår i studien.

Tabell 11 Daglig flyg per framdrivningstyp och storlek för Scenario 3 i Finland

BM1					BM2					
Pax	EL	H2	H2FC	Total	PAX	EL	H2	H2FC	SAF	Total
34	34			34	9	50		6	12	68
76			116	116	19	42		4	6	52
150		36		36	34	140		24	4	168
Total	34	36	116	186	50		6			6
					76			128		128
					Total	232	6	162	22	422

Sammanfattning Finland

I båda behovsmodellerna har bränslecellsflygplan en stor potential och skulle därmed kunna ge ett stort bidrag till att nå miljövänligt inrikesflyg. Det kan noteras att den kumulativa passagerarvolymen som flygs med det batterielektriska flygplan representerar drygt 20 % av den totala efterfrågan och baseras på resor under 300 km. Vanligtvis skulle detta vara en marknad som skulle kunna utsättas för konkurrens från transporter på väg och tåg om biljettpris och tidsbesparing övervägdes.

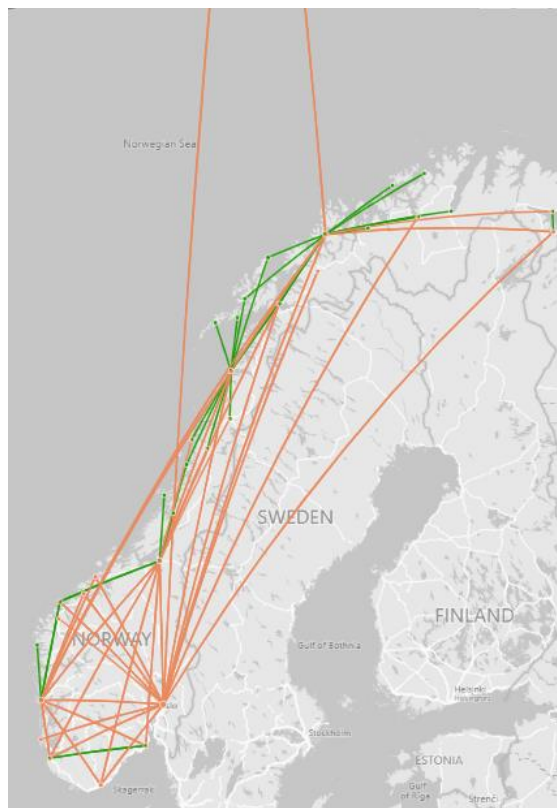
Vätgasdrivna flygplan står för majoriteten av rutterna, med cirka 70 % av alla passagerare. I BM 2 kan mindre elflygplan ge ett stort bidrag emot miljövänligt flyg. Baserat på räckvidd- och passagerarkapacitetskrav, är främst ett flygplan i 34-passagerarklassen som passar in. Utifrån studiens antaganden, har Finland en relativ liten spridning på flygplanstorlekar jämfört med Sverige. En avgörande faktor för Finlands inrikesflyg är dess beroende av ett flygplan i 76-passagerarklassen i båda behovsmodellerna. Så som för Sverige, anses SAF vara en bra övergångslösning, men i Finlands fall finns det en större potential att kunna bli oberoende av SAF om bränslecellsutvecklingen sker i rätt takt och om man kan möta behovet med vätgasproduktion och tillgänglighet.

Norge

Norge har redan idag ett väl utvecklat flygplansnätverk, och samma nätverk ingår i båda behovsmodellerna. Huvuddelen av passagerarefterfrågan är koncentrerad till ett fåtal rutter runt 400 km långa. De 10 högst trafikerade rutter av 101 totala representerar 72% av alla passagerare i Norge och de tre högsta rutter representerar 39% av den totala volymen. Dessa är Oslo-Bergen, Oslo-Trondheim och Oslo-Stavanger.

Scenario 1

Scenario 1 leder till att kortare rutter längs kusten ersätts av en stor mängd eldrivna flygplan, i 19- och 34-passagerarkassen. Trots det höga antalet batterielektriska flygplan täcks endast cirka 10% av den totala passagerarvolymen av dessa mindre flygplan.



Figur 36 Karta över dagliga rutter inom Scenario 1

Kartan över rutterna i Norge visar tydligt att det kortare rutter längst kusten lämpar sig väl till batteridrivna flygplan. I sammanfattningen i Tabell 12 syns tydligt att enligt den antagna behovsmodellen representerar elflygplan enbart en liten del av det dagliga inrikesflyget.

Tabell 12 Daglig flyg per framdrivningstyp och storlek för Scenario 1 i Norge

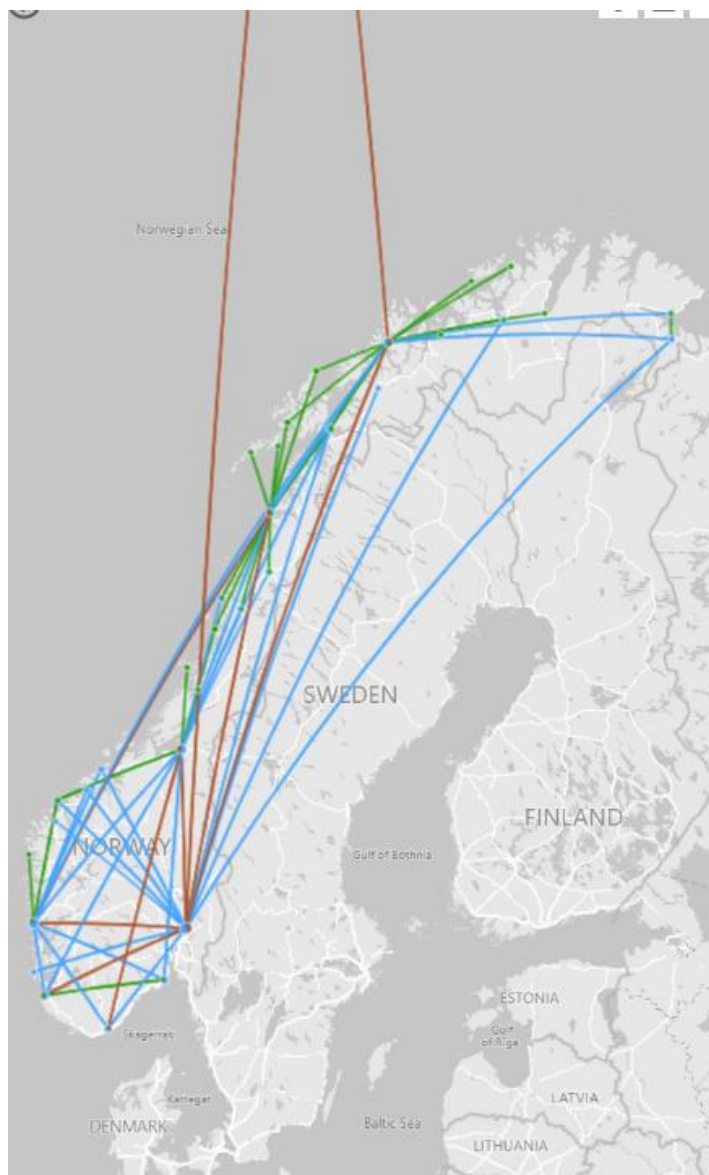
PAX	EL	SAF	Total
19	46		46
34	150		150
50		6	6
76		6	6
90		14	14
120		10	10
150		14	14
186		12	12
220		358	358
Total	196	420	616

Scenario 2

När man introducerar bränslecellsflygplan i behovsmodellen så ersätts en stor del av det rutter som var opererade med SAF-drivna flygplan. Det rutter som återstår med SAF har inte ersatts av två olika orsaker:

- Begränsning i räckvidd på vätgasbränslecellsflygplan
- Begränsningar i kapacitet av batteridrivna och vätgasbränslecellsflygplan,

detta sammanfattas i Tabell 13.



Figur 37 Karta över dagliga rutter inom Scenario 2

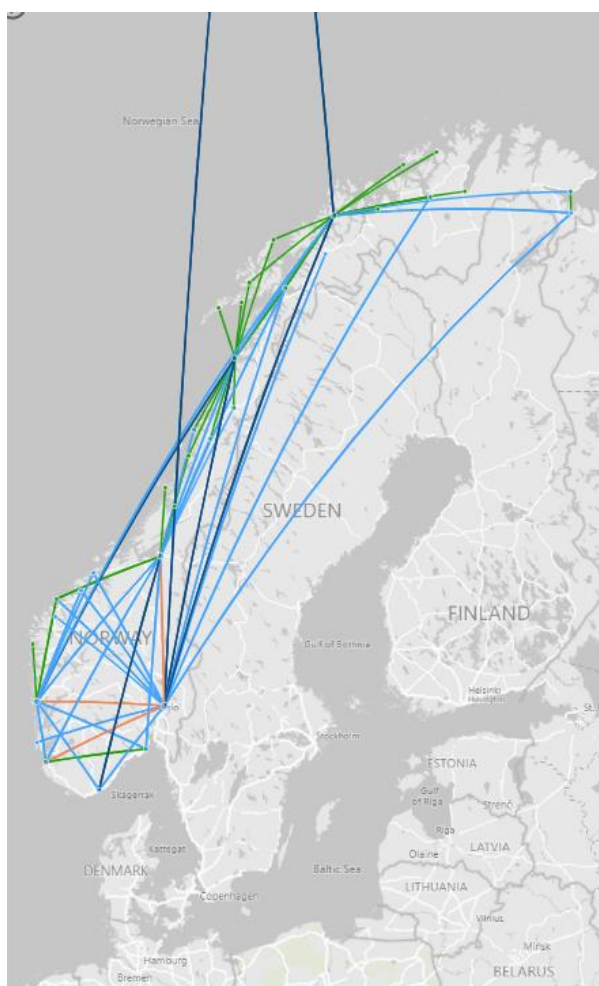
Ruttfördelningen mellan de olika framdrivningstyper är illustrerad i kartan i Figur 37.

Tabell 13 Daglig flyg per framdrivningstyp och storlek för Scenario 2 i Norge

PAX	EL	H2FC	SAF	Total
19	46			46
34	150	20		170
50			2	2
76		442		442
90			2	2
120			6	6
220			212	212
Total	196	462	222	880

Scenario 3

Förutom det 3 rutter med störst passagerarvolym som förblir opererade med SAF-flygplan, ersätts i Scenario 3 alla återstående SAF-flygplan med flygplan med vätgasturbiner. De kvarstående SAF-flygplanen skulle kunna ersättas av någon av vätgasalternativen, antingen med bränsleceller eller direktförbränning, om man kunde ändra ruttfördelning eller accepterade flera avgångar per dag än vad som har antagits i studien.



Figur 38 Karta över dagliga rutter inom Scenario 3

Tabell 14 Dagliga flygningar per framdrivningstyp och storlek för Scenario 3 i Norge

PAX	EL	H2	H2FC	SAF	Total
19	46				46
34	150		20		170
50		2			2
76			442		442
90		10			10
120		6			6
150		78			78
220				152	152
Total	196	96	462	152	906

Sammanfattning Norge

Norge har en stor potential att ersätta större delar av rutterna opererade med SAF-drivna flygplan med andra miljövänliga alternativa framdrivningsprinciper. Inom ramen för de antaganden som har gjorts i projektet, har vätgas och vätgasdrivna flygplan (bränslecell och direktförbränning) en stor potential att stödja miljöomställningen. Som i de andra länderna så har Batteridrivna en potential och en 34 passagerare flygplan är den dominanta storleken.

Det är värt att notera att de dagliga flygrutterna inom ramen för detta projekt kan delas upp i 3 huvudkategorier:

- Rutter opererade av batteridrivna flygplan huvudsakligen i 34-passagerarklassen
- Rutter opererade av bränslecellsflygplan i 76-passagerarklassen
- Rutter opererade av SAF-flygplan i 220-passagerarklassen.

Detta återspeglar en behovsmodell med tre typer av rutter. En med mycket stort passagerarvolym per dag; en medelmarknadsrutt med medeldistanser och medelstor passagerarvolym; till sist en marknad med relativt kort räckvidd och låg passagerarvolym.

Trots det höga antalet batterielektriska flygplan täcks endast cirka 10% av den totala passagerarvolymen av dessa mindre flygplan. Batteridrivna flygplan kommer ha en liten roll i den totala omställningen men är en viktig del på mindre rutter. SAF-flygplan kommer vara viktiga i omställningen i en övergångsfas till mer miljövänliga flygoperationer. Slutligen pekar studien på den stora rollen som vätgas kan komma att spela i miljöomställningen.

Danmark

Inrikesflygningar är begränsade i Danmark med enbart ett fåtal aktiva rutter. Inom ramen för denna studie har rutter mellan Danmarks fastland och Färöarna tagits med, men ej till Grönland. Danmarks inrikesflyg domineras av ruten Köpenhamn-Ålborg, som representerar ungefär 50% av alla passagerare.

Scenario 1

Introduktionen av elflygplan i Danmark skulle bidra till en mycket stor omställning av flygplansrutterna från att vara trafikerade med SAF-drivna flygplan till annan typ av framdrivning. Från ett avståndsperspektiv skulle rutterna som inte går till Färöarna kunna ersättas av batteridrivna flygplan, men den höga passagerare efterfrågan på en rutt medger ej att den ersätts av batteridrivna flygplan. Framdrivningstekniken på de olika rutter illustreras i kartan i Figur 39 och Tabell 15.



Figur 39 Karta över dagliga rutter inom Scenario 1 i Danmark

Resterande rutter skulle kunna opereras med ett elflygplan på 34 passagerare.

Tabell 15 Dagliga flygningar per framdrivningstyp och storlek för Scenario 1 i Danmark

PAX	EL	SAF	Total
34	98		98
76		2	2
220		24	24
Total	98	26	124

Scenario 2

Till skillnad från Scenario 1 så skulle bränslecellsflygplan i Scenario 2 ersätta de SAF-drivna på rutterna till Färöarna. SAF-drivna flygplan skulle enbart finnas kvar på flygningar mellan Köpenhamn och Ålborg. Framdrivningstekniken på de olika rutter illustreras i kartan i Tabell 16 och Figur 40



Figur 40 Karta över dagliga rutter inom Scenario 2 i Danmark

Tabell 16 Dagliga flygningar per framdrivningstyp och storlek för Scenario 2 i Danmark

PAX	EL	H2FC	SAF	Total
34	98			98
76		42		42
220			10	10
Total	98	42	10	150

Scenario 3

I Scenario 3 ersätts SAF-drivna flygplan på den kvarvarande ruten med flygplan med direktförbränning av vätgas. Framdrivningstekniken på de olika rutter illustreras i kartan i Figur 41 och i Tabell 17.



Pax	EL	H2	H2FC	Total
34	98			98
76			42	42
150		16		16
Total	98	16	42	156

Danmark har en högpotential att omsätta sin inrikes flygtransport med miljövänliga alternativ. Begränsningen för elflygplan kommer i första hand från den begränsade passagerarkapaciteten av de batteridrivna flygplanen som ingår i denna studie. Detta påverkar fördelningen på rutten Köpenhamn-Ålborg, där distansen mellan båda flygplatser lämpar sig väl till dessa flygplan, men flygplanens begränsade passagerarkapacitet skulle leda till många dagliga avgångar, vilket kanske inte är kompatibelt med en marknadsmässig fördelning av turer så som beskrivit i Figur 25.

Två olika passagerarbehovsmodeller för de skandinaviska länderna Sverige, Finland, Norge och Danmark har presenterats. En modell är baserad på passagerardata från referensåret 2019, korrigerad med en linjär tillväxt fram till året 2045. En alternativ modell för Sverige utvecklades av Trafikverket och fungerade som bas för att ta fram gravitationsmodellkoefficienter som sedan tillämpades på Finland och Sverige.

Fyra typer av flygplansframdrivningssystem har studerats och applicerats på olika flygplan med varierande passagerarkapacitet. Dessa flygplan har allokerats till de inrikesrutterna för att möta de framtagna framtida passagerarbehoven med syftet att försöka minimera utsläppen och skapa en hållbar inrikesflygtransport i Norden.

För varje land har 3 olika scenarion studerats. Utgångsläget för första scenariot är att alla flygningar görs med flygplan tankade med SAF, och batteridrivna flygplan introduceras på det rutter som tillåter det, utifrån räckvidd och passagerarkapacitet. Andra scenariot bygger på Scenario 1, och introducerar bränslecellsflygplan för att ersätta om möjligt SAF-flygplan på det resterande rutter. Det tredje scenariot syftar till att introducera flygplan med direktförbränning av vätgas istället för kvarvarande SAF-flygplanen om det finns rutter som tillåter det.

Dessa tre scenarion vill ge en bild av vad olika teknologier kan bidra med utifrån de antagande som har gjorts inom projektet och de flygplan som har modellerats, se Tabell 4.

Följande slutsatser för varje land dras:

- Det finns begränsade möjligheter i Sverige för batterielektriska flygplan på grund av den begränsade räckvidden. Flygplan som drivs med bränsleceller har en stor potential att bidra till omställning av svenskt inrikesflyg när teknik och infrastruktur finns. SAF kommer att ha en viktig roll att spela och är nödvändig för att påbörja miljöomställningen.
- Den finska passagerarbehovsmodellen prioriterar inte få huvudlinjer som i Sverige, utan är mer jämt fördelad, vilket gynnar införandet av flygplan med mindre kapacitet. Batterielektriska flygplan och vätgasflygplan verkar ha goda förutsättningar, och står för majoriteten av passagerarefterfrågan.
- Norge har redan idag en betydligt mer utvecklad inrikesflygtransport. På grund av sina egenskaper, erbjuder den norska marknaden möjligheter för både mindre elflygplan och större vätgasdrivna flygplan. Även om det finns ett betydande antal batterielektriska flygplan så representerar det inte en större del av den totala passagerarvolymen.
- Danmarks inrikes marknad är liten och kan dra nytta av batterielektriska flygplan och bränsleceller.

En huvudslutsats är att det inte finns en framdrivningsteknologi som löser hela flygets miljöomställning på egen hand. Varje enskilda teknologi kan bidra, även om i större eller mindre grad.

De generella trenderna i de två olika behovsmodellerna är likartade. Den största skillnaden är att behovsmodellen BM 2 betraktar flera rutter med mindre passagerarvolym, vilket leder till en större utnyttjandegrad av mindre flygplan, se

Tabell 18.

Utifrån båda behovsmodellerna kan man konstatera att utfallet från Scenario 3 visar att vätgasframdrivning, baserad på antingen bränsleceller eller direktförbränning, har en viktig roll i miljöomställningen. De visas också att batteridrivna flygplan har en roll att spela, men att de enbart kan möta en liten andel av den totala dagliga passagerarefterfrågan, cirka 10% av totalen.

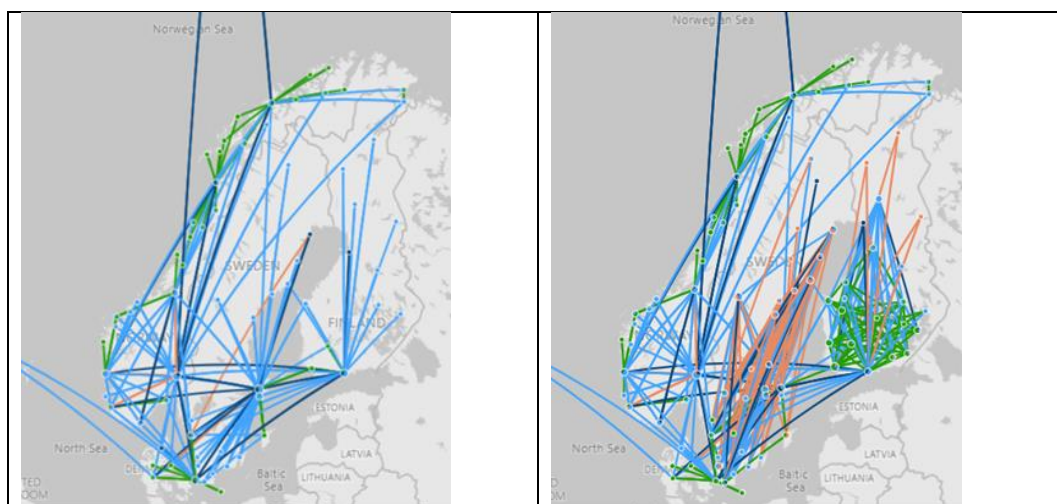
Tabell 18 Sammanställning av dagliga rutter per flygplansstorlek och flygplans framdrivning för Skandinavien

BM1						BM2					
Pax	EL	H2	H2FC	SAF	Total	Pax	EL	H2	H2FC	SAF	Total
9				8	8	9	64		46	106	216
19	46		18		64	19	86		34	36	156
34	414		58	2	474	34	456		74	26	556
50		4			4	50		20			20
76			1144		1144	76			892		892
90		4			4	90		8			8
120		16			16	120		14			14
150		442			442	150		206			206
220				152	152	220				162	162
Total	460	466	1220	162	2308	Total	606	248	1046	330	2230

Det är värt att notera att ett flygplan i 76-passagerarklassen skulle kunna nyttjas i en stor andel av de dagliga flygningarna i båda behovsmodellerna. Bland de studerade batteridrivna flygplan så är det ett 34-passagerar-flygplan som är den oftast förekommande. Gällande flygplan med direktförbränning av vätgas så är det 150-passagerarklassen som skulle bidra mest. Sedan återstår behovet av ett SAF-drivet flygplan med stor passagerarkapacitet.

Utifrån denna studie är det svårt att ge en trovärdig prediktion av hur mycket utsläppen skulle kunna minskas mätt i CO₂-ekvivalent fram till 2045, då teknikutvecklingen kan förändras och styrs av kommersiella villkor. Det slutsatser som ändå kan dras är följande:

- SAF kommer att ha en stor roll i miljöomställningen.
- Batterielektriska flygplan kan spela en roll men den är inte dominant i termer av antal transporterade passagerare, och är mycket beroende av batteriernas teknikutveckling.
- Vätgas har en stor potential, men är beroende på teknikutvecklingen och utbyggnaden av infrastrukturen i en större grad än SAF- och batteridrivna flygplan.
- Den totala miljöpåverkan av alla de olika framdrivningstekniker är starkt beroende på framställningen och distribution av energikällan.
- Batteri- och bränslecellsdrivna flygplan har den minsta teoretiska miljöpåverkan under själva flygningen.



Figur 42 Sammanställning av Scenario 3 för båda behovsmodellerna för Skandinavien.

Diskussion

Resultaten som presenteras i denna rapport är starkt beroende på de passagerarbehovsmodeller som har används, men också på den flygplansallokeringslogiken som utvecklades samt på den prestanda som antas för de olika flygplanen. Bristen på accepterade och överenskomna modeller av framtida passagerarbehov för de skandinaviska länderna är en begränsning. Det antagande som bygger upp det två olika modellerna anses vara representativa men kanske inte fullt kompletta och kan därav ha en betydande effekt på de erhållna resultaten.

Ur flygplansmodellernas perspektiv bör det nämnas att den batteritekniska prestandan har en direkt och stark påverkan på räckvidden och på vilka typer av flygplan som skulle kunna realiseras. Detta är vanligt för studier av det här slaget, men det är värt att upprepa, eftersom tillgänglig batteritäthet är en av de största begränsande faktorerna, och resultaten skulle påverkas markant om idag oförutsedd utveckling skulle plötsligt bli tillgänglig i framtiden.

I denna studie antas att en låg kabinfaktor är kommersiellt acceptabel, vilket betyder att antagandet görs att inrikesflyg i framtiden kommer fortfarande att subventioneras av regeringar för att säkerställa kritiska förbindelser i de skandinaviska länderna. En ändring av den lägsta möjliga kabinfaktorn skulle naturligtvis också ha en stark inverkan på allokeringen av flygplanen på sträckorna.

Ekonomisk lönsamhet för de olika typer av flygplan har inte analyserats i denna studie, detta anses kunna ha en stor påverkan dels på resmönster och behovsmodellen och bör ingå i framtida studier.

I studien har behovsmodellerna bara betraktat flygresor. Detta borde ses över för att få en helhetsbild inklusive alla transportmoder. Inom ramen för samarbetet med Georgia Tech så utforskades det hur restidsminskning kan påverka vilken typ av transport man väljer, vilket skulle kunna leda till ökat intresse för kortare resor med elflygplan. På det mest trafikerade rutten i Sverige bör man analysera hur samspel med tåg skulle kunna utformas.

En viktig faktor som inte tas i med studien är hur de olika energikällor produceras. I studien framgår det att vätgas kan ha en stor betydelse för omställning till miljövänliga flygtransporter för svenskt inrikesflyg och för Skandinavien. För att denna omställning skall ske så behövs först en teknikutveckling och sedan en upprampning av vätgasproduktion och infrastrukturutveckling. Utan infrastrukturutveckling så kommer inte miljöomställningen kunna ske.

SAF är en avgörande faktor för att möjliggöra miljöomställningen. Utifrån de presenterade scenarion, så är SAF grunden till omställningen tills helt nya tekniker blir tillgängliga och kan ersätta dagens teknik och SAF. Detta är starkt kopplat till utvecklingstider och tidsplaner för ersättningen av flygplansflottan.

Några huvudslutsatser, oberoende av behovsmodellen som man använder:

- Batteridrivna flygplan är starkt beroende av batteriutvecklingen och då i första hand av energidensitet (Wh/kg)

- Batteriutvecklingen kommer stå i konkurrens med utveckling av vätgasframdrivningen
- Vätgas är beroende av utveckling av tekniken och vätgasproduktionen
- Vätgasproduktion och distribution är nyckeln till att vätgasdrivna flygplanens framtid
- SAF anses vara en nödvändighet för att bidra till miljövänligare flygtransporter
- Det finns inte en enskild teknologi som löser alla problemen på egen hand
- Utvecklingen av nya flygplan baserad på känd teknik och tillgänglig certifieringsbas tar i medel 5 till 7 år. Därför blir flygplanen som skall tas i bruk 2030 baserade på teknologier som är kända idag
- Ersättningen av alla flygplan tar många år. Därför kommer flygplansflottan år 2045 vara baserad på teknologi som fanns tillgänglig långt före år 2045
- Ersättningen av flygplan kan inte genomföras snabbare än den produktionstak och den infrastrukturella utveckling man kan åstadkomma
- Regelverk för de olika tekniker behöver komma på plats för att säkra att flygplansutvecklingarna kan genomföras och bibehålla samma säkerhetsstandard som idag.
- Utifrån studien kan man se att följande flygplan har störst påverkan på en omställning:
 - batteridrivna flygplan huvudsakligen i 34-passagerarklassen, liknande Heart Aerospace konceptet
 - bränslecellsflygplan 76-passagerare
 - vätgasflygplan 150 passagerare
 - SAF-flygplan i 220-passagerarklassen.

Att nå ett klimatneutralt inrikesflyg i Sverige 2045 är en stor utmaning, för båda behovsmodellerna med det tekniska antagande som har tagits i projektet är det svårt att kunna påvisa att dessa mål kommer nås fullt ut.

Hybridlösningar har inte tagits upp men bör betraktas, som påpekat tidigare så har en 34 passagerare flygplan en roll att spela i det framtagna scenario, en hybridlösning skulle öppna upp för längre räckvidd. Dock framstår det att räckvidd inte är den enda begränsning, då passagerarevolymen på vissa rutter kan vara för stora för att ersättas av mindre flygplan.

Utifrån att projekt ej betraktar det ekonomiska faktorer, anpassat flygplansrutter till tekniken, tidtabeller och intermodalitet bör detta betraktas i framtida studier. En vidare utveckling av arbetet som har genomfört bör kunna hjälpa att skapa vidare förståelse samt försöka kvantifiera olika scenario i term av ekvivalent CO2 utsläpp.

Alla tilltänkta tekniker leder till ökat behov av elproduktion, för att möta SAF eller vätgasproduktionen samt för att kunna ladda det tilltänkta batteridrivna flygplan, detta bör kvantifieras i framtida studier. Detta bör göras i samband med skapande av flygnätverk och hänsyn till tidtabeller. Detta skulle vara en naturlig förlängning

av nuvarande arbetet. I detta skulle referens behovsmodell behövs fastställas och vara enad med de olika aktörer

Publikationslista

Andersson D., Herbertsson F., Karlsson H., Lanner V., Täck E., Törn J., ” Simulering och modellering av bränslecell för vätgasflygplan”, Kandidatarbete 2022:01, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, Chalmers tekniska högskola

Ellénus E., Grahovic D., Qvarnström A., Wennersten J., Åkeson E., ” Utvärdering av prestanda för regionsflygplan med vätgasframdrift” Kandidatarbete 2022, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, Chalmers tekniska högskola

Garrido Domínguez M. A.,” Swedish Traffic analysis for fossil free air transportation in the year 2045”, Bachelor Thesis, LIU-IEI-TEK-G--22/02170—SE, 2022, Linköping Universitet

Sorrentino R.T., Parello R.C., Delage M., Justin C.Y., Mavris D.N. , Jouannet C., Amadori K.,” Zero-Emission regional Aviation in Sweden”, International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2022 Stockholm Sweden

Krus P.; Staack I. and Olivieira A.; Hybrid electric propulsion system optimization for a commuter aircraft, ICAS 2022, Stockholm Sweden

Saab: Elflyg löser kanske inte hela problemet, Nyteknik, Johan Kristensson, Publicerad 13 sep 2021 kl 06.00, Intervju av delar av författarna i samband med pressrelease om projektet.

Saab leder projekt för fossilfritt flyg, Saab Pressrelease, 13 september 2021, <https://www.saab.com/sv/newsroom/press-releases/2021/saab-leder-projekt-for-fossilfritt-flyg>

Jouannet C., Scenarier för flygets behov i ett svenskt och nordiskt sammanhang för tidshorisonten 2035 och 2045, Transportforum 2022, 16-17 Juni 2022 Linköping, Sweden

Jouannet C., Staack I., Grönstedt T., Zhao X., Krus P., Lundblad A., “Sustainable Aviation for Sweden-Technology & Capability Assessment Targeting 2045” 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Stockholm, Sweden 2022.

Amadori K, Jouannet C, Zhao, X.. ["Towards Zero-Emission Transportation in Scandinavia."](#) AIAA 2023-1909. *AIAA SCITECH 2023 Forum*. January 2023.

Intervju i P4 om projektet <https://sverigesradio.se/artikel/saab-leder-projekt-om-fossilfritt-flyg>

Referenser, källor

- [1] Ritchie, H., "Climate change and flying what share of global CO₂ emissions come from aviation", Our World in Data, Vol. 22, 2020
- [2] Claire, B. and Josh, M., "Transport could burn up the EU's entire carbon budget", Online, 2021
- [3] NOAA, "Aviation is responsible for 3.5 percent of climate change, study finds," September 2020
- [4] Lee, D. S., et al., "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018", Atmospheric Environment, Vol. 244, 2021, pp. 117834
- [5] Swedish environmental goals, "Utsläpp av växthusgaser till år 2045", webpage <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2045/>
- [6] Swedish environmental goals, official statement, <https://www.government.se/articles/2021/03/swedens-climate-policy-framework/>
- [7] Norway's Climate Action Plan for 2021–2030; report Meld. St. 13 (2020–2021); <https://www.regjeringen.no/contentassets/a78ecf5ad2344fa5ae4a394412ef8975/en-gb/pdfs/stm202020210013000engpdfs.pdf>
- [8] Finland climate goals, <https://ym.fi/en/the-reform-of-the-climate-change-act>
- [9] Gundelfinger, J., Coto-Millán, P., "Price and demand behaviors in the Scandinavian airline industry following market liberalization", Journal of Utility Policies, Vol.64, Elsevier Ltd., 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101052>
- [10] "Trends and developments in electric vehicle markets", IAE Global EV Outlook 2021, website <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>
- [11] <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html>
- [12] <https://nordregio.org>
- [13] Destination 2050; https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
- [14] The strategic innovation programme InfraSweden2030, webpage <https://www.vinnova.se/en/calls-for-proposals/strategic-innovation-programme-infrasweden2030/>
- [15] Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk, <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/>
- [16] Waypoint 2050, IATA report, https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf
- [17] ICAO 2019 Environmental Report, <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>
- [18] Destination 2050, A route to Net Zero European Aviation, https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
- [19] <https://pace.txtgroup.com/products/preliminary-design/pacelab-suite/>
- [20] Andersson D., Herbertsson F., Karlsson H., Lanner V., Täck E., Törn J., "Simulering och modellering av bränslecell för vätgasflygplan", Kandidatarbete 2022:01, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, Chalmers tekniska högskola
- [21] Ellénus E., Grahovic D., Qvarnström A., Wennersten J., Åkeson E., "Utvärdering av prestanda för regionsflygplan med vätgasframdrift" Kandidatarbete 2022, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, Chalmers tekniska högskola
- [22] Garrido Domínguez M. A., "Swedish Traffic analysis for fossil free air transportation in the year 2045", Bachelor Thesis, LIU-IEI-TEK-G--22/02170—SE, 2022, Linköping Universitet
- [23] Sorrentino R.T., Parello R.C., Delage M., Justin C.Y., Mavris D.N., Jouannet C., Amadori K., "Zero-Emission regional Aviation in Sweden", International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2022 Stockholm Sweden
- [24] Resandeprognos för flygtrafiken 2040 Trafikverkets basprognoser 2020-06-15, <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1443411/FULLTEXT01.pdf>
- [25] Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- [26] Avinor, "Aviation in Norway. Sustainability and social benefit", 4th Report, October 2020
- [27] Electrical Aviation 2022, regional prerequisites for electrical Aviation, 2022, <https://www.kvarken.org/projekt/fair/>
- [28] Mäenpää A., Kalliomäki H. and Ampuja V, Potential Impacts of Electric Aviation in the Kvarken Region Stakeholder views in 2020, April 2021 <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/12435>
- [29] Electric aviation a viable future option in Finland <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/S%C3%A4hk%C3%B6inen%20lent%C3%A4minen%20Suomessa.pdf>

- [30] Lundberg T., "Accessibility study for electric aviation", Nordregio, <https://storymaps.arcgis.com/stories/3b35687163744e69a6966b5b9fad976e>
- [31] The strategic innovation programme InfraSweden2030, webpage <https://www.vinnova.se/en/calls-for-proposals/strategic-innovation-programme-infrasweden2030/>
- [32] McNally, M. G. "The four-step model," Handbook of transport modelling. Vol. 1, Emerald Group Publishing Limited, pp. 35-53, 2007. <https://doi.org/10.1108/9780857245670-003>
- [33] Donnelly, R. Advanced practices in travel forecasting, Vol. 406, Transportation Research Board, 2010, <https://doi.org/10.17226/22950>
- [34] Google Distance Matrix API overview <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>
- [35] Braune R., Frank J., Liss V., Resandeprognos för flygtrafiken 2040; Publikationsnummer: 2020:122; ISBN 978-91-7725-653-3
- [36] Justin, C. Y., Payan, A. P., and Mavris, D. "Demand modeling and operations optimization for advanced regional air mobility," AIAA Aviation 2021 Forum, pp. 3179, 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3179>
- [37] https://www.stat.fi/index_en.html
- [38] Bråthen S., Halpern N. and Williams G., The Norwegian Air Transport Market in the Future, Avinor, "Aviation in Norway. Sustainability and social benefit", 4th Report, October 2020
- [39] Solvoll G., Mathisen T. A., Welde M, *Forecasting air traffic demand for major infrastructure changes*, Research in Transportation Economics, Volume 82, 2020, 100873, ISSN 0739-8859, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100873>
- [40] EUROCONTROL Aviation Outlook 2050, Main Report 2022, <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-04/eurocontrol-aviation-outlook-2050-report.pdf>
- [41] EASA certification specifications, <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications>
- [42] https://en.wikipedia.org/wiki/Scope_clause
- [43] Ajay Misra. Energy storage for electrified aircraft: The need for better batteries, fuel cells, and supercapacitors. IEEE Electrification Magazine, 6(3):54–61, Sep. 2018.
- [44] Aircraft Electric Propulsion and Power Working Group - AIAA. Guidelines for Analysis of Hybrid Electric Aircraft System Studies, 2019
- [45] Realising Zero-Carbon emission flight, Primary Energy Source Comparison and Selection, ATI
- [46] Babikian R., The historical fuel efficiency characteristics of regional Aircraft from technological, operational and cost perspective, SM Thesis, MIT, June 2001
- [47] Bradley, M. K. and Droney, C. K.; Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report; NASA/CR–2011-216847
- [48] E.M. Greitzer, et. al.; N+3 Aircraft Concept Designs and Trade Studies, Final Report Volume 2: Appendices—Design Methodologies for Aerodynamics, Structures, Weight, and Thermodynamic Cycles, NASA/CR—2010-216794/VOL2
- [49] Bruner S., et. Al.; NASA N+3 Subsonic Fixed Wing Silent Efficient Low-Emissions Commercial Transport (SELECT) Vehicle Study Revision A; NASA/CR—2010-216798
- [50] National Business Aviation Association, "NBAA Management Guide," Washington D.C., 2011
- [51] Hoelzen, J.; Liu, Y.; Bensmann, B.; Winnefeld, C.; Elham, A.; Friedrichs, J.; Hanke-Rauschenbach, R. Conceptual Design of Operation Strategies for Hybrid Electric Aircraft. Energies 2018, 11, 217. <https://doi.org/10.3390/en11010217>
- [52] Zamboni J., Vos R; Emeneth M and Schneegans A. "A Method for the Conceptual Design of Hybrid Electric Aircraft," AIAA 2019-1587. AIAA Scitech 2019 Forum. January 2019.
- [53] Krus P.; Staack I. and Oliveira A.; Hybrid electric propulsion system optimization for a commuter aircraft, ICAS 2022, Stockholm Sweden
- [54] J. Hoelzen, D. Silberhorn, T. Zill, B. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach, Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, Issue 5, 2022, Pages 3108-3130, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>.
- [55] Juschus D.; Preliminary Propulsion System Sizing Methods for PEM Fuel Cell Aircraft; Master Thesis, TU Delft, 2021; <http://resolver.tudelft.nl/uuid:fdc14875-175e-4a4b-8cde-f2f4b6028194>
- [56] Reid S. J.; Hybrid electric regional aircraft design with optimal power management; Master Thesis, Royal Military College of Canada, March 2022
- [57] Scholtz D.; Design of Hydrogen Passenger Aircraft – How much "Zero-Emission" is Possible?; Hamburg Aerospace Lecture Series (DGLR, RAeS, VDI, ZAL, HAW Hamburg), Hamburg, Germany, 2020-11-19; <https://doi.org/10.5281/zenodo.4301103>
- [58] Madavan N., A NASA Perspective on Electric Propulsion Technologies for Large Commercial Aircraft ; ESARS-ITEC 2016, Toulouse, France, November 4, 2016

- [59] Misra A., Evolution of Fundamental Technologies for Future Electrified Aircraft, Electric and Hybrid Aerospace Technology Symposium, Cologne, Germany, November 16 – 17, 2018
- [60] Sivasubramaniam, et al., Development of a high speed HTS generator for airborne application, IEEE Trans. Appl. Superconductivity 19 (2009) 1656-1661
- [61] F. Grilli, et al., Superconducting motors for aircraft propulsion: the advanced superconducting motor experimental demonstrator project, J. Phys.: Conference Series 1590 (1) (2020), 012051, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1590/1/012051>, 2020/07/01.
- [62] Miller, A., "Ideas on How AMTAS Can Support the Aviation Industry (and More)," Advanced Materials in Transport Aircraft Structures (AMTAS) Spring 2005 Meeting, 2005.
- [63] Cunniff, P., Auerbach, M., Vetter, E., and Sikkema, D., "High Performance M5 Fiber for Ballistics/Structural Composites," 23rd Army Science Conference, Orlando, Florida, AO-04, 2004
- [64] Locomachs LOW COst Manufacturing and Assembly of Composite and Hybrid Structures <https://cordis.europa.eu/docs/results/314/314003/final1-locomachs-final-publishable-summary-report-r1-0.pdf>
- [65] Smart Intelligent Aircraft Structures <https://cordis.europa.eu/project/id/284562/reporting>
- [66] Shirk, M., Hertz, T., and Weisshaar, T., "Aeroelastic Tailoring – Theory, Practice, and Promise," Journal of Aircraft, Vol. 23, No. 1, pp. 6-18, Jan. 1986.
- [67] Shirk, M.H., Hertz, T.J., and Weisshaar, T.A., "Aeroelastic Tailoring – Theory, Practice, and Promise," AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs, CA, AIAA 1984-0982
- [68] Fuhrmann, H., "Application of Natural Laminar Flow to a Supersonic Transport Concept," AIAA 1993-3467.
- [69] Crouch, J., "Modeling Transition Physics for Laminar Flow Control," 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Seattle, Washington, AIAA 2008-3832.
- [70] Solomon, W. D., Drake, A., Reed, H. & Saric, W., 2004. Design and Testing of a 30-Degree Sweep Laminar Flow Wing for a High Altitude Long-Endurance Aircraft, s.l.: RTO-MP-AVT-111
- [71] Williams, G., "Aerospace Technology Demonstration: BLADE, the Flagship Laminar Flow Project within the Clean Sky Programme," SAE Technical Paper 2017-01-2016, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-2016>.
- [72] E.M. Greitzer, et. al.; N+3 Aircraft Concept Designs and Trade Studies, Final Report Volume 2: Appendices—Design Methodologies for Aerodynamics, Structures, Weight, and Thermodynamic Cycles, NASA/CR—2010-216794/VOL2
- [73] Bruner S., et. Al.; NASA N+3 Subsonic Fixed Wing Silent Efficient Low-Emissions Commercial Transport (SELECT) Vehicle Study Revision A; NASA/CR—2010-216798
- [74] L. Boggero and P. D. Ciampa and B. Nagel; The Application of the AGILE4.0 MBSE Architectural Framework for the Modeling of System Stakeholders, Needs and Requirements; ICAS 2021, doi:10.5281/zenodo.5735416
- [75] P. D. Ciampa and B. Nagel; Accelerating the Development of Complex Systems in Aeronautics via MBSE and MDAO: a Roadmap to Agility; AIAA Avition 2021, AIAA-2021-3056; <https://doi.org/10.2514/6.2021-3056>
- [76] <https://www.eucar.be/battery-requirements-for-future-automotive-applications/>
- [77] https://www.eurobat.org/wp-content/uploads/2022/03/EUROBAT_Battery_Innovation_Roadmap_2030_White_Paper.pdf
- [78] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries_europe_strategic_research_agenda_december_2020_1.pdf
- [79] Wenzhuo Cao, Jienan Zhang, Hong Li, Batteries with high theoretical energy densities, Energy Storage Materials, Volume 26, 2020, Pages 46-55, ISSN 2405-8297, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.024>.
- [80] Fichtner, M.; et. al., Rechargeable Batteries of the Future—The State of the Art from a BATTERY 2030+ Perspective. Adv. Energy Mater. 2022, 12, 2102904. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102904>
- [81] ArmandM; et. al.; Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments, Journal of Power Sources, Volume 479, 2020, 228708, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228708>.
- [82] Schäfer, A.W., Barrett, S.R.H., Doyme, K. et al. (2019), Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. Nat Energy 4, 160–166.
- [83] Viswanathan, V., Epstein, A.H., Chiang, Y.M. et al. The challenges and opportunities of battery-powered flight. Nature 601, 519–525 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04139-1>

- [84] B. J. Brelje and J. R. R. A. Martins. Electric, Hybrid, and Turboelectric Fixed-Wing Aircraft: A Review of Concepts, Models, and Design Approaches, Progress in Aerospace Sciences, 104:1–19, January 2019. doi:10.1016/j.paerosci.2018.06.004
- [85] Staaack, I., Sobron, A. & Krus, P. The potential of full-electric aircraft for civil transportation: from the Breguet range equation to operational aspects. CEAS Aeronaut J 12, 803–819 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00530-w>
- [86] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [87] Exploring hydrogen The impact, challenges and options, Airbus September 2021, <https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2021-11/FAST-article-Exploring-hydrogen-September2021.pdf>
- [88] K. Dahal, S. Brynolf, C. Xisto, J. Hansson, M. Grahn, T. Grönstedt, M. Lehtveer, "Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector", Renewable and Sustainable Energy Reviews", Volume 151, 2021, 111564, ISSN 1364-0321
- [89] Breitschopf, B., Zheng, L., Plaisir, M.; European Commission, Directorate-General for Energy, the role of renewable H₂ import & storage to scale up the EU deployment of renewable H₂: report, (2022). <https://data.europa.eu/doi/10.2833/727785>
- [90] J. Hoelzen, D. Silberhorn, T. Zill, B. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach, Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, Issue 5, 2022, Pages 3108-3130, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>
- [91] Sustainable aviation EASA, <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-och-bord>
- [92] CORSIA agreement <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- [93] EASA drop-in fuel <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-och-bord>
- [94] European Aviation Environmental Report <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables>
- [95] Al-Ghussein Norrman N, Talalasova E. VÄGEN TILL FOSSILFRITT FLYG 2045 : AGERANDE, HINDER OCH BEHOV [Internet]. 2021. Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-52106>
- [96] Northvolt reveals development program for aviation battery systems <https://northvolt.com/articles/northvolt-aviation/> April 23rd 2023
- [97] H2JET Chalmers <https://research.chalmers.se/project/10388>
- [98] H2JET GKN <https://www.gkn aerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-new-swedish-national-project-on-hydrogen-propulsion/>
- [99] Hydrogen power Fuelling a cleaner tomorrow Rolls-Royce, <https://www.rolls-royce.com/innovation/net-zero/decarbonising-complex-critical-systems/hydrogen.aspx>
- [100] Airbus reveals hydrogen-powered zero-emission engine, <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine>
- [101] Zero Avia <https://www.zeroavia.com/>
- [102] PowerCell <https://powercellgroup.com/>
- [103] Remote Tower <https://www.saab.com/products/digital-tower>
- [104] Heart Aerospace <https://heartaerospace.com/>

Bilagor

- Administrativ bilaga
- Scenario_Data_PBI.xlsx Data med flygplanstyper, flygplansstorlek, rutter, antal passagerare per rutt

Andra bilagor kan t ex vara:

- *Vetenskapliga artiklar (färdiga, accepterade, eller inskickade manus)*
- *Ritningar, kartor, fördjupade metodbeskrivningar, resultattabeller etc*
- *Avhandlingar*
- *Känslig information som ej ska publiceras i Energimyndighetens projektdatabas.*

Bilagor som inte ska publiceras externt ska märkas upp genom att "KÄNSLIG INFORMATION" skrivs in i dokumentets rubrik. Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med "KÄNSLIG INFORMATION". Dessutom ska i filnamnet läggas in orden "KÄNSLIG INFORMATION".

Presentationsmaterial

Interaktiv dashboard