



Klimat effekterna av elektrobränsle för flyg

The climate effects of electrofuel in aviation

Jonatan Persson

Examensarbete/Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institution för Energi och teknik
Biologi och miljövetenskap – kandidatprogram
Examensarbete 2023:02 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2023



Miljöeffekterna av elektrobränsle för flyg

The climate effects of electrofuel in aviation

Jonatan Persson

Handledare: Gunnar Larsson, Sveriges Lantbruksuniversitet, Energi och Teknik
Examinator: Åke Nordberg, Sveriges Lantbruksuniversitet, Energi och Teknik

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E
Kurstitel: Självständigt arbete i Miljövetenskap
Kurskod: EX0896
Program/utbildning: Biologi och miljövetenskap - kandidatprogram
Kursansvarig inst.: Institutionen för Energi och Teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2023
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2023:10
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: Livscykelanalys (LCA), växthusgaser, klimatförändringar, Carbon Capture and Utilization (CCU), flygindustrin, utsläppsminskningar, HySkies

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för Energi och Teknik

Sammanfattning

Kan elektrobränsle vara den nyckeln som flygindustrin behöver för att bekämpa klimatförändringarna? Detta arbete handlar om att utföra en livscykelanalys av elektrobränsle för att bedöma dess effektivitet som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan från flygindustrin. Elektrobränsle är en variant av hållbart flygbränsle, SAF (Sustainable Aviation Fuel). Vid tillverkning av elektrobränsle används enbart fossilfri elektricitet, återvunnen koldioxid och vätgas i stället för fossila ämnen som används vid produktionen av fossilt flygfotogen. Flyget står för en betydande del av växthusgasutsläppen och elektrobränsle kan vara en potentiell lösning. Målet med rapporten är att undersöka elektrobränslets totala klimatpåverkan jämfört med fossila bränslen och bedöma dess bidrag till att uppfylla Sveriges miljömål.

Livscykelanalysen av elektrobränsle baserades på data för fem olika processer. Dessa inkluderade infångning av 200 000 ton CO₂/år, transporten av CO₂, elförbrukningen för tillverkning av vätgas samt elektrobränsle, transporten av elektrobränsle och förbränningen av elektrobränsle på hög höjdseffekten. Dessa processer var viktiga för att få en förståelse för hela livscykeln för elektrobränsle och dess klimatpåverkan.

Rapporten avser särskilt på HySkies-projektet, som syftar till att fånga in 200 000 ton CO₂ per år och producera 50 000 ton elektrobränsle per år i Sverige. Efter livscykelanalys resulterar det i att utsläppen av CO₂-e per kilowattimme (kWh) är lägre för elektrobränsle jämfört med fossilt flygfotogen. Elektrobränsle har en utsläppsnivå på 307 g CO₂-e/kWh på hög höjd, medan fossil flygfotogen har en utsläppsnivå på 543 g CO₂-e/kWh. Om man exkluderar utsläppen från höghöjdseffekten har elektrobränslet en lägre utsläppsnivå på 73 g CO₂-e/kWh. Detta motsvarar en minskning på cirka 87% jämfört med fossil flygfotogen.

HySkies projekt har potential att bli en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan, men det kräver fortsatta analyser och åtgärder för att minska utsläppen så mycket som möjligt. Det är också viktigt att fokusera på att få flygplan certifierade för användning av 100% hållbart flygbränsle och fortsätta den tekniska utvecklingen av flygplansmotorer och bränslesystem.

Nyckelord: Livscykelanalys (LCA), Växthusgaser, klimatförändringar, Carbon Capture and Utilization (CCU), flygindustrin, utsläppsminskningar, HySkies

Abstract

Can electrofuel be the key that the aviation industry needs to combat climate change? This work is about conducting a life cycle analysis of electrofuel to assess its effectiveness as a sustainable solution for reducing the climate impact of the aviation industry. Electrofuel is a variant of sustainable aviation fuel (SAF). During the production of electrofuel, only fossil-free electricity, recycled carbon dioxide, and hydrogen are used instead of fossil materials used in the production of conventional aviation fuel. Aviation accounts for a significant portion of greenhouse gas emissions, and electrofuel could be a potential solution. The goal of the study is to examine the overall climate impact of electrofuel compared to fossil fuels and assess its contribution to achieving Sweden's environmental goals.

The life cycle analysis of electrofuel was based on data from five different processes. These included the capture of 200,000 tons of CO₂ per year, the transport of CO₂, the electricity consumption for hydrogen production and electrofuel production, the transport of electrofuel, and the combustion of electrofuel at high altitude. These processes were important to understand the entire life cycle of electrofuel and its climate impact.

The report specifically focuses on the HySkies project, which aims to capture 200,000 tons of CO₂ per year and produce 50,000 tons of electrofuel per year in Sweden. After the life cycle analysis, it results in lower CO₂-e emissions per kilowatt-hour (kWh) for electrofuel compared to fossil aviation fuel. Electrofuel has an emission level of 307 g CO₂-e/kWh at high altitude, while fossil aviation fuel has an emission level of 543 g CO₂-e/kWh. Excluding the emissions from high altitude effects, electrofuel has a lower emission level of 73 g CO₂-e/kWh. This corresponds to a reduction of approximately 87% compared to fossil aviation fuel.

The HySkies project has the potential to be a sustainable solution for reducing climate impact, but it requires further analysis and measures to minimize emissions as much as possible. It is also important to focus on certifying aircraft for the use of 100% sustainable aviation fuel and continue the technical development of aircraft engines and fuel systems.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Greenhouse Gases, Climate Change, Carbon Capture and Utilization (CCU), Aviation Industry, Emission Reductions, HySkies

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	6
Figurförteckning	7
Förkortningar	8
1. Inledning	9
4.1 Bakgrund och problemformulering	9
4.2 Syfte och frågeställningar	10
4.3 Avgränsningar	11
1.4 Planerad anläggning	11
4.5 Teori om elektrobränsle och tidigare forskning	12
2. Metod	15
2.1 Val av metod	15
2.2 Miljöpåverkanskategori	15
2.3 Funktionell enhet	15
2.4 Systemdefinition	16
2.5 Systemgränser	17
2.6 Val av data	19
3. Resultat	22
3.1 Resultat av datainsamling	22
4. Slutsatser och diskussion	29
Referenser	34
Tack	37

Tabellförteckning

Tabell 1 Planerad årlig minskning av växthusgaser från flyget i Sverige enligt lag (2017:1201). 13

Tabell 2 Tabellen visar uppskattade utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av elektrobränsle inklusive höghöjdseffekten. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för alla processer är 307,30 g CO₂-e/kWh. 23

Tabell 3 Tabellen visar utsläppen i ton per år av klimatpåverkande ämnen och processer för produktion av elektrobränsle. Totala utsläppen av CO₂, CH₄ och N₂O är 147 883 ton per år. 24

Tabell 4 Tabellen visar utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av fossil flygfotogen. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för processerna (förbränning av fossilt jetbränsle på hög höjd + utsläppen från råolja med EU-genomsnittligt värde) är 543,06 g CO₂-e/kWh. 25

Tabell 5 Tabellen visar utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av elektrobränsle exklusive höghöjdseffekten. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för alla processer är 72,70 g CO₂-e/kWh. 26

Tabell 6 Tabellen är en visar utsläppsdata för de olika bränslena. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh). 27

Figurförteckning

<i>Figur 1 Förenklad bild av rapportens flödesschema och systemgräns.....</i>	<i>17</i>
<i>Figur 2 Förenklad bild av rapportens flödesschema och systemgräns som visar utsläpp av CO₂-e</i>	<i>22</i>
<i>Figur 3 Diagrammet jämför utsläppsdata för livscykelanalysen mellan elektrobränsle (inkl. höghöjdseffekten) samt elektrobränsle (exkl. höghöjdseffekten) med fossil flygfotogen.....</i>	<i>27</i>

Förkortningar

CO ₂ -e	Koldioxidekvivalent
HVO	Hydrerad Vegetabilisk Olja
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kWh	Kilowattimme
LCA	Livscykelanalys eller life-cycle assessment
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SLU	Sveriges lantbruksuniversitet
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization

1. Inledning

4.1 Bakgrund och problemformulering

Klimatförändringar är ett allvarligt problem som hotar vår planet och växthusgaser från mänsklig aktivitet är den främsta orsaken till uppvärmningen. Flyget är en stor utsläppsbov och enligt FN:s klimatpanel (IPCC) står flyget för 2–3% av koldioxidutsläppen globalt sett. Om man inkluderar den så kallade höghöjdseffekten, som refererar till den ökade påverkan av utsläpp från flygning på klimatet på höga höjder, blir den totala klimatpåverkan uppskattat till 4–5% av den mänskliga påverkan på klimatet. Detta gör flyget till en viktig utmaning i arbetet med att minska växthusgasutsläppen och begränsa den globala uppvärmningen. (Europaparlamentet 2022)

Flyget skiljer sig från marktransporter på flera sätt som gör det svårare att ställa om till hållbara alternativ. Till exempel använder flyget nästan uteslutande fossila bränslen idag, vilket gör det svårt att ersätta dem med förnybara energikällor. Dessutom kräver flyget höga hastigheter och höga höjder för att fungera effektivt, vilket också ökar dess klimatpåverkan. (ICAO, 2018)

För att minska flygets klimatpåverkan gör branschen stora satsningar på hållbart flygbränsle. Ett potentiellt bidrag till att minska flygets utsläpp och begränsa temperaturökningen enligt Parisavtalet är projektet HySkies, som undersöker möjligheten att starta världens första storskaliga produktion av elektrobränsle i Sverige. Elektrobränsle är en typ av hållbart flygbränsle som tillverkas med fossilfri el, återvunnen koldioxid och vätgas i stället för fossila råmaterial som i konventionella bränslen. I detta fall är det viktigt att notera att det elektrobränsle som är tänkt att produceras har en kemisk struktur som liknar de fossila bränslena och kan därför användas som inblandning med fossilt flygfotogen. Vattenfall, tillsammans med SAS, Shell och LanzaTech, har planerat att starta produktionen av elektrobränsle och två anläggningar i Uppsala anses vara intressanta för bio-CCS-teknik (Carbon Capture and Storage). HySkies-projektet kommer att arbeta med Vattenfall Värme Uppsalas fjärrvärme- och kraftvärmeanläggning och kommer att använda Carbon Capture and Utilization-teknik (CCU-teknik) för att

fånga koldioxid och transportera den vidare till en anläggning i Forsmark för produktion av elektrobränsle. (Länsstyrelsen i Uppsala län, 2022)

Sveriges klimatutsläpp dokumenteras och granskas varje år av Naturvårdsverket, och transportsektorn står för ungefär en tredjedel av Sveriges årliga totala klimatutsläpp. Detta gör det nödvändigt att ta itu med utmaningen med transportsektorns utsläpp för att uppnå målet om att inte ha några nettoutsläpp senast år 2045. Transportstyrelsen har ansvaret för att Sverige beräknar och rapporterar in alla utsläppsdata för växthusgaser från flygindustrin i och från Sverige till EU och FN:s klimatkonvention. Detta återspeglas i lagen (2017:1201) om reduktion av växthusgasutsläpp från vissa fossila drivmedel, där flygbränsle (flygfotogen) ingår. Enligt lagen ska utsläppen successivt minska från 0,8% per år från och med 2021 till 27% år 2030. Utsläppsminskningen ska vara minst den procentsats som anges i tabell 1 för varje kalenderår. Detta är en av de skyldigheter som Sverige har att uppfylla. (Transportstyrelsen, 2022)

4.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta arbete är att utföra en livscykelanalys av elektrobränsle för att bedöma dess effektivitet som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan från flygindustrin. Genom att undersöka och utvärdera hur elektrobränsle påverkar klimatet i hela dess livscykel, syftar detta arbete till att förbättra vår förståelse för hur människan kan minska flygindustrins miljöpåverkan.

Målet med detta arbete är att genomföra en utförlig livscykelanalys av elektrobränsle för att kunna besvara vilken typ av utsläppsminskningar elektrobränsle kan bidra till och hur stor den potentiella minskningen är jämfört med existerande flygplan som använder fossilt jetbränsle.

För att uppnå detta ställdes två huvudfrågor:

1. Vilken är den totala klimatpåverkan från HySkies projekt med elektrobränsle för flyg, inklusive koldioxidinfångning, produktion, transport och förbränning på hög höjd, jämfört med fossila bränslen?
2. Hur väl kan HySkies projekt med elektrobränsle för flygtransporter bidra till att uppfylla kraven i lagen (2017:1201) om reduktion av växthusgasutsläpp från vissa fossila drivmedel och vilka ytterligare åtgärder behövs för att säkerställa att projektet effektivt bidrar till att uppnå Sveriges miljömål?

4.3 Avgränsningar

Detta arbete har undersökt klimatpåverkan av elektrobränsle genom en livscykelanalys som täcker hela produktions- och förbränningsprocessen. Produktionsprocessen börjar i Uppsala och förbränningsprocessen sker i flygplansmotorerna. Rapporten har specifikt fokuserat på att undersöka klimatpåverkan av elektrobränsle genom att avgränsa sig till HySkies projekt för produktion av elektrobränsle. Detta innebär att analysen har koncentrerat sig på att studera just detta projekt och dess effekter, vilket har varit den specifika avgränsningen i rapporten. Resultaten har jämförts med produktion och förbränning av fossilt flygfotogen, med undantag för transporten. Avgränsningen har framför allt fokuserat på utsläppen som genereras under ett års tid. Avgränsningen inkluderar höghöjdseffekten men den insamlade koldioxiden antas vara koldioxidneutral, dvs att det används biogen koldioxid.

1.4 Planerad anläggning

Vattenfall, som äger Carpe Futurum i Uppsala, är en fjärrvärme- och kraftvärmeanläggning som har planer på att bygga en anläggning för att fånga in fossilfri koldioxid från rökgaserna från avfallsförbränning och omvandla den till elektrobränsle tillsammans med vätgas. Vid den här processen är tanken att biomassa ska användas som bränsle, eventuellt avfall med biogena bränslen som huvudbeståndsdel för att säkerställa att koldioxiden är helt fossilfri. Genom att infånga fossilfri koldioxid från rökgaserna får man möjligheten att permanent lagra koldioxiden och minska utsläppen genom bio-CCS, eller återanvända koldioxiden till produktion av elektrobränsle för att minska användningen av fossilt bränsle genom bio-CCU.

Vid bio-CCS fångas koldioxiden in från anläggningen och komprimeras innan den transporteras vidare till en lagringsplats djupt nere i marken. Bio-CCS använder biomassa som bränsle och den permanenta lagringen av koldioxid leder till negativa utsläpp och fungerar som en kolsänka, vilket kompenserar för andra fossila koldioxidutsläpp.

Med tekniken bio-CCU fångas koldioxiden också in från rökgaserna likt bio-CCS men komprimeras innan den transporteras vidare och återanvänds till andra

sektorer, exempelvis flygsektorn i stället. Fördelen med denna teknik är att man ersätter fossilt kol och fördröjer tiden innan koldioxiden hamnar i atmosfären.

En ny anläggning ska byggas i Forsmark för produktion av vätgas. För produktionen av vätgas används elektrolys av vatten som metod. Det innebär att vatten sönderdelas till vätgas och syrgas genom att en elektrisk ström leds genom vattnet. För att genomföra denna process krävs transformatorer och likriktare, elektrolysrör för vätgasproduktion, utrustning för gashantering och kompression, och eventuellt luthanteringssystem. Ingående råvaror och produkter består av total avsaltat vatten, elektricitet, ånga/lut, kylvatten och kvävgas. Vätgasen används för att binda till den infångande koldioxiden för att bilda etanol. Med tekniken AtJ (alcohol-to-jet) kan sedan etanolen omvandlas från etanol till elektrobränsle för flyg (Vattenfall, 2022)

4.5 Teori om elektrobränsle och tidigare forskning

Inom flygsektorn finns det förutom elektrobränsle ytterligare två huvudsakliga alternativ för bränsleval som kan bidra till att uppnå klimatmålen:

Drop-in biobränslen, som kan användas i befintliga flygplan och möjliggör snabb implementering. Dock begränsas användningen av biobränslen i flygsektorn av tillgången och konkurrensen från andra sektorer.

Flytande väte som är en specifik typ av elektrobränsle som består av ren vätgas. Elektrobränsle å andra sidan är en bredare term som inkluderar olika bränslen som produceras med hjälp av elektricitet, där vätgas kan vara en komponent. Att övergå till att använda rent flytande väte som bränsle skulle kräva en omfattande förnyelse av flygplansflottan, vilket är en tidskrävande process som sträcker sig över flera decennier. (KTH, 2022)

Elektrobränsle marknadsförs vanligtvis som ett klimatneutralt alternativ. En förklaring till detta är att förbränning av elektrobränsle inte bidrar till en ökning av koldioxidhalten på låg höjd. Genom att se det som att koldioxidmolekylen tillfälligt "lånas" från fjärrvärmeanläggningen och fångas in i stället för att släppas ut och sedan återlämnas vid förbränningen i flygplansmotorerna. Det innebär att ingen ny koldioxid släpps ut i atmosfären. Detta innebär att klimateffekten av elektrobränslet blir neutral då den biogena koldioxiden inte skapar ökade halter av koldioxidnivåerna. (Uniper 2021)

Ur ett miljöperspektiv finns det fördelar men även utmaningar med elektrobränsle. Nackdelarna är bland annat att produktionen av elektrobränsle är en

mycket energikrävande process och ett stort behov av tillgång till ren och hållbar el behövs. Ett annat problem är att den officiella utsläppsstatistiken, enligt ICAO:s internationella riktlinjer, endast fokuserar på bränslemängden och dess motsvarande koldioxidutsläpp. Denna statistik tar inte hänsyn till den ökade climateffekten som uppstår vid förbränning på hög höjd, speciellt över 8 000 meter. Kortare inrikesflygningar som Stockholm-Karlstad påverkas inte av höghöjdseffekter då de inte når sådana höjder. Vid längre resor, exempelvis Stockholm-Köpenhamn, når flygplanet vanligtvis höjder över 8 000 meter och kan därmed bidra till uppvärmningen av jorden genom att påverka strålningsbalansen. I ett av regeringens underlag med analyser om klimatomställning sägs förbränning på hög höjd beräknas i genomsnitt, även om det varierar, nästintill fördubbla climateffekten jämfört med förbränning vid marknivån (Trafikanalys, 2022). Höghöjdseffekten består till stor del av vattenånga och en mindre del kväveoxid, vilket genom olika kemiska reaktioner påverkar växthuseffekten och bidrar till bildandet av ozon i atmosfären. Höghöjdseffekten har tidigare inte fått tillräcklig uppmärksamhet och är fortfarande okända för delar av allmänheten. Även flygindustrin har ännu inte betonat deras existens. På senare år har dock medvetenheten om att flygets totala klimatpåverkan måste minska snabbt och flera aktörer har uppmärksammat frågan (Ibid.).

Airbus arbetar med högst relevanta studier för att ta reda på hur mycket Sustainable Aviation Fuel, SAF, kan minska CO₂-utsläppen under hela livscykeln. Många lovande rapporter pekar på en minskning med upp till 80% jämfört med fossilt bränsle. (Airbus, 2023). Medan andra studier vill betona att SAF inte alls nödvändigtvis minskar partikelutsläppen från flygplan. (Schripp et al. 2022)

Flygbränsle, närmare bestämt flygfotogen, har inkluderats i lagen (2017:1201) om minskning av växthusgasutsläpp från utvalda fossila bränslen. Enligt denna lag ska utsläppen successivt minska från 0,8 % år 2021 till 27% år 2030. Den planerade årliga minskningen av växthusgaser från flyget visas i tabell 1.

Tabell 1 Planerad årlig minskning av växthusgaser från flyget i Sverige enligt lag (2017:1201)

År	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Minskning av växthusgasutsläpp (%)	0,8	1,7	2,6	3,5	4,5	7,2	10,8	15,3	20,7	27

Flygsektorns bidrag till växthusgasutsläpp mäts vanligtvis i absoluta termer som ton koldioxidekvivalenter (CO₂-ekv) per år. Detta inkluderar inte bara koldioxid (CO₂), utan även andra växthusgaser såsom metan (CH₄) och lustgas (N₂O) som

omvandlas till CO₂-ekvivalent för att kunna jämföras och sammanställas. När det gäller att skilja mellan inrikes och utrikes flygresor kan metoden variera beroende på rapporterings- och beräkningsstandarder. I många fall räknas inrikes och utrikes flygresor separat för att ge en tydligare bild av utsläppen i varje kategori. (ICAO, 2022)

Även om elektrobränsle kan bidra till minskning av växthusgasutsläpp jämfört med flygfoto-gen, är det för närvarande så att dagens flygplan endast är certifierade för användning av högst 50% hållbart flygbränsle. Resten av bränslet måste bestå av konventionellt flygbränsle. Denna certifieringsbegränsning är en del av regelverket för att säkerställa att flygplan används med en balanserad och säker bränsleblandning. Förväntningar finns på att certifieringskraven för flygplan kommer att justeras och utvecklas i enlighet med målen och framstegen inom ReFuelEU Aviation. Detta kan innebära att flygplan i framtiden kan bli certifierade för användning av högre andelar hållbart flygbränsle (Vattenfall, 2022).

ReFuelEU Aviation är en förordning som har antagits av Europeiska kommissionen. Syftet med denna förordning är att främja användningen av hållbart flygbränsle inom EU och därigenom minska flygsektorns klimatpåverkan. Det är viktigt att notera att tillgången till elektrobränsle för närvarande är begränsad, men omfattningen av dess användning kan öka över tiden om kraftfulla styrmedel och incitament införs. För att möjliggöra en större andel hållbart flygbränsle i flygsektorn krävs en utökad tillgång och produktion. (Regeringen, 2020)

2. Metod

2.1 Val av metod

För att genomföra detta arbete användes a-LCA (bokföringsinriktad LCA) som grund för att analysera elektrobränslets livscykel. A-LCA valdes som lämplig metod eftersom den fokuserar på att kvantifiera miljöpåverkan från en specifik process genom att undersöka varje steg i dess livscykel, från råmaterialproduktion till avfallshantering. Rapportens a-LCA använde en förenklad livscykelmodell med insamlade data för att uppskatta klimatpåverkan. Denna metod gav en översiktlig bild av en elektrobränslets klimatpåverkan. Denna rapport följer IMRaD som är en vanlig övergripande struktur i tre huvudsteg: inledning, huvuddel (metod och resultat) och avslutning (diskussion).

2.2 Miljöpåverkanskategori

Miljöpåverkningskategorin som valdes var klimatpåverkan. Denna kategori ansågs lämplig för att undersöka en del av miljöpåverkan, då flygning släpper ut stora mängder klimatpåverkande ämnen. De specifika klimatpåverkande ämnena som studerades var CO₂, CH₄ och N₂O.

2.3 Funktionell enhet

I rapporten användes kilowattimme (kWh) som funktionell enhet. Resultaten presenterades som utsläpp av CO₂-ekvivalenter (g CO₂-e/kWh) och genom att använda denna enhet kunde klimatpåverkan från elektrobränsle jämföras med fossilt flygbränsle. Dessutom presenterades resultaten även i ton CO₂-e per år (ton CO₂-e/år) för att ge en uppfattning om den totala klimatpåverkan från elektrobränsle över en längre tidsperiod.

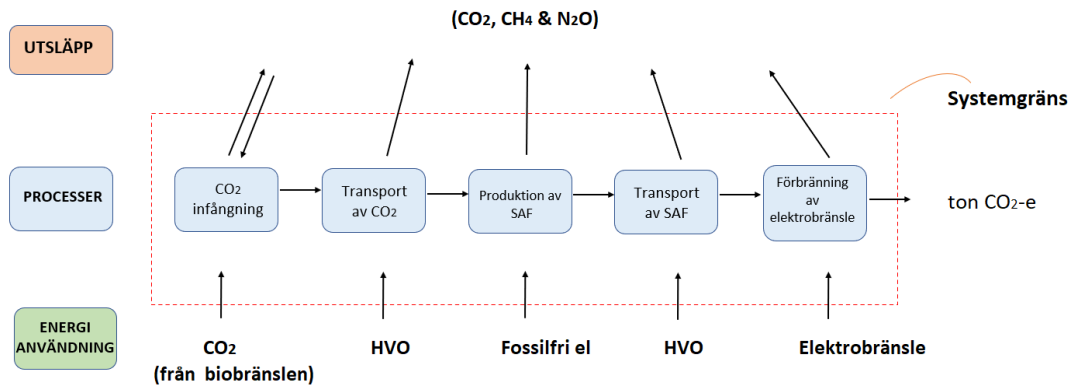
2.4 Systemdefinition

Systemgränserna och de ingående delprocesserna (1–4), som syns i listan nedan, i livscykeln beskrevs inom ramen för CORSIA, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, som är ett globalt program som utvecklats av ICAO, International Civil Aviation Organization, för att minska och kompensera för koldioxidutsläppen från internationell flygtrafik och utgjorde utgångspunkten för utsläppsberäkningarna (ICAO, 2019). Följande utsläpp beaktades för att uppskatta växthusgasutsläppen:

1. Utsläpp från den energi som används vid koldioxidinfångning.
2. Utsläpp från transport av koldioxid till bränsleproduktionsanläggningen.
3. Utsläpp från den förbrukade elektriciteten för produktion av elektrobränsle.
4. Utsläpp vid transport av producerat bränsle till den potentiella blandningsstationen i Gävle.
5. Elektrobränsleförbränning i en flygmotor på hög höjd.

Endast icke-biogena CO₂-utsläpp från bränsleförbränningen inkluderades i beräkningen av CO₂e-utsläpp enligt CORSIA (ICAO, 2019). Men genom att steg 5 inkluderades i livscykelanalysen kunde en mer omfattande bild av utsläppen och bedömningen av elektrobränslets totala klimatpåverkan uppnås. Steg 5 innebar en analys av utsläppen som uppstod vid förbränningen av elektrobränsle på hög höjd, vilket var en betydelsefull aspekt av bränslets användning inom flygindustrin. Genom att inkludera detta steg kunde hänsyn tas till de specifika utsläpp som uppstod vid denna process och bedöma dess påverkan på klimatet. Koldioxid som genererades av fjärrvärmeanläggningen fångades in i det första processteget i stället för att släppas ut i omgivningen, vilket resulterade i att det betraktades som en minskning av de totala utsläppen. När elektrobränslet sedan förbrändes i flygplansmotorerna släpptes den infångade koldioxiden ut i atmosfären igen efter att ha återanvänts en andra gång.

2.5 Systemgränser



Figur 1 Förenklad bild av rapportens flödesschema och systemgräns

I denna LCA-analys har fokus lagts på att bedöma de fem förenklade processer i SAF-kedjan som figur 1 visar, för att uppnå en heltäckande bedömning av dess klimatpåverkan. Bedömningen omfattar både energianvändning samt utsläpp för varje process. Denna förenklade systemmodell syftar till att tydligt definiera och kvantifiera de utsläpp som är kopplade till varje processteg i kedjan. Genom att tydligt bestämma de fem olika processtegen samt systemgränserna kan en helhetsbild av elektrobränsle-kedjans klimatpåverkan definieras och därmed eventuellt bidra till en mer hållbar luftfart.

De olika processtegen:

1. CO₂ infångning:

En viktig faktor som påverkar klimatavtrycket är källan till koldioxid för tillverkning av elektrobränsle. Den process som antogs i denna LCA var den processen som planeras att användas i HySkies projekt. Detta innebär att koldioxid kommer att fångas in från ett befintligt fjärrvärmeverk i Uppsala genom en teknik som kallas CCU (Carbon Capture Usage) där koldioxiden avses vara 100% biogent. Enligt Wilberforce, Olabi, Sayed, Elsaid och Abdelkareem (2020) artikel "Progress in carbon capture technologies" presenteras olika tekniker för koldioxidavskiljning. För att separera koldioxid kan olika typer av tekniker användas, till exempel post combustion, oxy-fuel och pre-combustion. Varje teknik innebär olika metoder för att avlägsna koldioxid från gasblandningen. Separationsprocessen kräver alltid energi, men den nödvändiga mängden kan variera beroende på tekniken. Det finns även pågående forskning för att utveckla och förbättra CO₂-infångningstekniker.

Denna rapport tar inte hänsyn till de specifika stegen i CO₂-infångningen. Detta betyder att systemgränsen tar endast hänsyn till att koldioxiden fångas in i stället för att släppas ut till omgivningen, för att sedan användas till produktion av elektrobränsle. När elektrobränsle sedan förbränns i flygplansmotorerna släpps den infångade koldioxiden ut igen efter att ha använts en andra gång.

2. Transport av CO₂:

Transportmetoden som används för att transportera koldioxiden från Uppsala till Forsmark antas vara lastbil med släp. Bränslevalt för lastbilarna antas vara HVO (Hydrerad Vegetabilisk Olja).

3. Elförbrukning produktion av SAF:

Vid produktion av elektrobränsle är det planerat att byggas en ny anläggning i Forsmark som ska försörjas med enbart fossilfri el. Elen som förväntas komma från kärnkraft är en primär komponent som används för att generera vätgas genom elektrolys. Vidare använder LanzaTechs process, som är känd för att omvandla koldioxidutsläpp till värdefulla produkter genom gasfermentation, koldioxid och vätgas för att framställa etanol. Etanolen används sedan i LanzaJet-processen, även känd som "Alcohol to Jet," vilket möjliggör produktionen av hållbart elektrobränsle avsett för flygindustrin. (Vattenfall, 2021)

4. Transport av elektrobränsle:

För transporten av elektrobränsle har det antagits att lastbil med släp är det mest lämpliga transportmedlet. Bränslevalt för lastbilarna antas vara HVO.

5. Förbränning av elektrobränsle på hög höjd:

Utsläppsberäkningarna av bränsleförbränning beskrevs i CORSIA som att endast icke-biogen CO₂-utsläpp från bränsleförbränning skulle inkluderas i beräkningen av CO_{2e}-utsläpp. (ICAO, 2021) Men detta arbete valde att inkludera alla CO₂-utsläpp för att ge en mer omfattande och noggrann bild av den totala miljöpåverkan från bränsleförbränning. Genom att inkludera alla CO₂-utsläpp kunde man få en bättre förståelse för den totala miljöpåverkan från bränsleförbränning, inte bara de icke-biogen CO₂-utsläppen.

2.6 Val av data

Livscykelanalysen av elektrobränsle baserades på data för fem olika processer. Dessa inkluderade infångning av 200 000 ton CO₂/år, transporten av CO₂, elförbrukningen för tillverkning av vätgas samt elektrobränsle, transporten av elektrobränsle och förbränningen av elektrobränsle inklusive hög höjdieffekten. Dessa processer var viktiga för att få en förståelse för hela livscykeln för elektrobränsle och dess klimatpåverkan. Uppgifter om material- och energiförbrukning samlades in från primärkällor för projektet HySkies och omfattande även forskningsrapporter och litteraturstudier.

Samrådsunderlaget för projektet HySkies (Vattenfall, 2022) var en av de primära och trovärdiga källorna för att samla in uppgifter om den planerade verksamheten. Det användes för att säkerställa kvaliteten på uppskattningen av utsläppsdata.

De uppskattade utsläppsberäkningarna baserades även på uppgifter från Naturvårdverket som lämnade ut handlingar för delar av projektet HySkies i den mån de kunde lämnas ut utan att riskera att den sökandes affärs- och driftsförhållanden kunde antas lida skada. Följande antaganden har gjorts vid uppskattningen:

Med hjälp av bifogade dokument och information från Naturvårdsverket för projektet HySkies kunde information om utsläppsberäkningarna för koldioxidinfångningen beräknas. För att kunna beräkna mängden utsläpp från själva processen CO₂-infångning genererar har det antagits att mängden koldioxid som samlas in från Uppsalas fjärrvärmeverk är 200 000 ton/år. (Vattenfall, 2021). Rapporten innefattar inte en detaljerad analys av den förväntade CO₂-infångningsprocessen eller användningen av el för att driva just de processerna. I stället har utsläppsberäkningarna baserats på uppgifter från Naturvårdverket som lämnade ut uppskattade värden för denna del av projektet. Därav antogs energibehovet till 0,9 MWh värme och 0,18 MWh el per ton infångad koldioxid, baserat på bifogade dokument från Naturvårdsverket. Emissionsfaktorn för värme antogs vara 11 kg/MWh, baserat på antagande om skogsrester som sekundära trädbränslen för Vattenfalls anläggning. Emissionsfaktorn för elektricitet valdes till 90 g CO_{2e}/kWh baserat på en beräkning av det nordiska elsystemets klimatpåverkan (Naturvårdsverket, 2022). För att kompensera för klimatpåverkan räknades den infångade koldioxiden som en råvara, vilket innebar att det betraktades som en minskning av det totala utsläppet.

Utsläppsberäkningarna för all transport i livscykelanalysen beräknades med hjälp av NTMcalc. Denna webbplats som tillhandahåller en databas med miljödata kunde användas för att utföra LCA-analysen och få tillgång till utsläpp av

växthusgaserna för de specifika planerade transportvägarna. Miljödata som användes i denna LCA-analys hämtades från NTMcalc (<https://www.ntmcalc.se>) den 17 april 2023. För att beräkna utsläppen från denna process har det uppskattats att antal transporter vid produktion antas vara 32 st för koldioxiden och 10 st för SAF per dygn tur- och retur. Distansen från Uppsala till anläggningen i Forsmark uppskattas till 73,2 km. För att uppskatta utsläppen från transporten mellan Forsmark och Gävle antas distansen vara 74,2 km, eftersom Gävle är en potentiell plats för blandningsstation för flygbränsle. Utsläppen för en transport från Uppsala till Forsmark uppmättes till 13,2 kg CO₂-e. Utsläppen för en transport från Forsmark till Gävle uppmättes till 10,6 kg CO₂-e.

I tabell 4 som är en uppskattning av klimatpåverkande ämnen och processer från fossilt bränsle har transporten av fossila bränslen exkluderats eftersom livscykelutsläppen för klimatpåverkande ämnen från fossilt flygbränsle orsakas huvudsakligen av utvinning av råolja och bränslets förbränning (Svenska regeringen, 2019). Det är värt att notera att utsläppen varierar betydligt mellan olika råoljefält och raffinaderier. En omfattande rapport som använder data från det globala utsläppssystemet CORSIA (ICAO, 2019) visar att EU-genomsnittet för uppströmsutsläpp är 15 gCO₂e/MJ. Om man inkluderar förbränningsutsläppen blir EU-genomsnittet totalt 86,5 gCO₂e/MJ.

Dessa värden ger en övergripande bild av de utsläppsnivåer som kan förväntas från fossilt bränsle inom flygsektorn. Genom att identifiera och kvantifiera dessa utsläpp blir det möjligt att bedöma och jämföra klimatpåverkan från olika bränslealternativ och därmed främja en mer hållbar flygindustri.

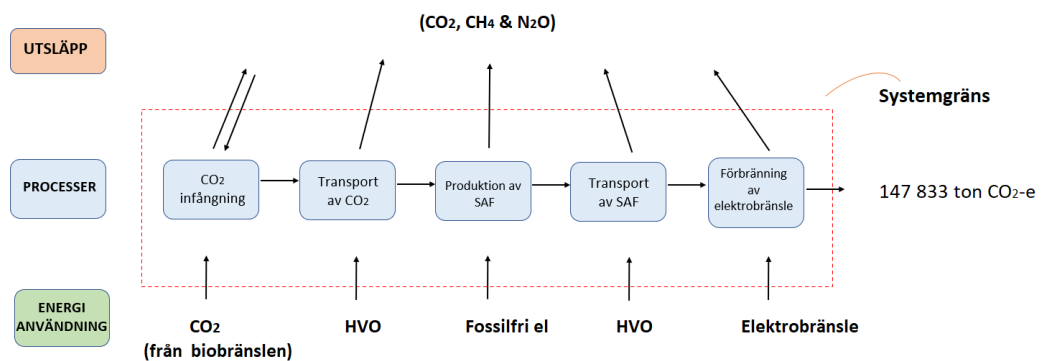
Utsläppsberäkningarna för produktion av vätgas och elektrobränsle slogs ihop eftersom hela SAF anläggningen kommer att dimensioneras utifrån ett effektbehov motsvarande ca 250 MW el (Vattenfall, 2022). I detta arbete var det tvunget att göras ett antagande gällande anläggningens drifttimmar eftersom det inte specificerades i samrådsunderlaget, därför antogs det att anläggningen är planerad att vara i gång dygnet runt. Genom att ta hänsyn till det höga antalet drifttimmar per år kunde LCA-analysen ge en omfattande och exakt bild av den potentiella högsta miljöpåverkan som kan förväntas från elektrobränsleproduktionen. För att beräkna klimatpåverkan från elförbrukningen har en emissionsfaktor på 18 gCO₂-e/kWh antagits, baserat på kärnkraftverks utsläpp av växthusgaser som genereras av den fysiska infrastrukturen och hela försörjningskedjan (IPCC, 2014)

Den årliga producerade mängden elektrobränsle som förväntas förbrännas på hög höjd uppgår till 50 000 ton/år. Det är den mängd som är målet att producera enligt projektet HySkies, så därför har den mängden antagits som förväntat uppskattat värde (Vattenfall, 2021). Rapporten tar inte hänsyn till detaljerna i

massbalansen mellan infångningen av 200 000 ton CO₂ och produktionen av 50 000 ton elektrobränsle, utan utgår från publikt tillgänglig data i stället. Ett generellt referensvärde för elektrobränsle har uppskattats till 71,8 g CO₂/MJ i utsläppsberäkningarna. Mängden koldioxid som genereras är direkt relaterad till innehållet av kol i bränslet. Bränslen med högt kolinnehåll kommer att producera betydligt högre CO₂-utsläpp, medan bränslen med lågt kolinnehåll genererar mindre CO₂. Eftersom kol är den primära källan till både kolet och koldioxiden i avgaserna, är bränslets kolhalt en viktig faktor att beakta i sammanhanget. Det är viktigt att notera att emissionsfaktorn för flygbränsle kan variera beroende på vilken typ av flygplansmotor som används, eftersom utsläppen beror på flera faktorer och tekniska specifikationer. Detta värde är baserat på beräkningar och data från tidigare studier gällande elektrobränsle sammansättning (U.S. Department of Energy, 2020). Denna LCA beaktar den ökade klimatpåverkan som uppstår vid förbränning på hög höjd. I en av statens offentliga utredningar som behandlar att främja användningen av biobränsle för flyget sägs en vetenskapligt etablerad uppskattning på den samlade klimatpåverkan från flygning på höjd vara omkring 1,9 gånger högre än påverkan från endast koldioxidutsläpp (Svenska regeringen, 2019). För att ge en mer korrekt bild av den uppskattade klimateffekten multipliceras utsläppen med en faktor på 1,9 i denna LCA.

3. Resultat

3.1 Resultat av datainsamling



Figur 2 Förenklad bild av rapportens flödesschema och systemgräns som visar utsläpp av CO₂-e

Figur 2 presenterar en förenklad bild av flödesschemat och processerna som används i rapporten för att analysera utsläppen av elektrobränsle i ton CO₂-e per år. Flödesschemat illustrerar de fem olika stegen och processerna som ingår från produktionen till användningen av elektrobränsle, vilket resulterar i 147 883 ton CO₂-e per år. Denna figur spelar en viktig roll för att besvara den primära frågeställningen i rapporten, nämligen att utvärdera den totala klimatpåverkan från HySkies-projektet. Genom att tydligt visualisera processflödet ger figuren en värdefull översikt och möjliggör en enkel analys av utsläppen från elektrobränsleproduktionen.

Tabell 2 Tabellen visar uppskattade utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av elektrobränsle inklusive höghöjdseffekten. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för alla processer är 307,30 g CO₂-e/kWh.

Klimatpåverkande ämnen och processer (SAF)	Utsläpp	Enhet
1. CO₂ infångning (minuspost) (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	-257	g CO ₂ -e/kWh
2. CO₂ infångning (process) (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	8,46	g CO ₂ -e/kWh
3. Transport av CO₂ (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	0,25	g CO ₂ -e/kWh
4. Elförbrukning vid produktion av SAF (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	63,92	g CO ₂ -e/kWh
5. Transport av SAF (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	0,06	g CO ₂ -e/kWh
6. Förbränning av SAF (på hög höjd) (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	491,43	g CO ₂ -e/kWh
Summa utsläpp (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	307,30	g CO ₂ -e/kWh

Tabell 2 presenterar utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktionen av elektrobränsle, med hänsyn tagen till höghöjdseffekten. Syftet med att visa denna tabell är att ge en översiktlig bild av klimatpåverkan från varje enskild process och deras sammanlagda bidrag till utsläppen. Genom att presentera informationen på detta sätt kan de processer som är mest betydelsefulla för den totala klimatpåverkan från elektrobränslet identifieras. Summa utsläpp resulterar till 307,3 g CO₂-e/kWh. En viktig observation från tabellen är att förbränningen av SAF (på hög höjd) och elförbrukningen vid produktionen av SAF utgör en betydande del av utsläppen. Dessa processer genererar höga utsläppsnivåer och är därför viktiga att ta hänsyn till i strävan efter att minska klimatpåverkan från elektrobränslet. Denna tabell är av särskild betydelse för att utvärdera elektrobränslets effektivitet som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan vid höga höjder, vilket är av relevant för utsläppen från utrikesflyg.

Tabell 3 Tabellen visar utsläppen i ton per år av klimatpåverkande ämnen och processer för produktion av elektrobränsle. Totala utsläppen av CO₂, CH₄ och N₂O är 147 883 ton per år.

Klimatpåverkande ämnen och processer	Utsläpp	Enhet
1. CO₂ infångning (minuspost)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	-200 000	ton/år
2. CO₂ infångning (process)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	5 220	ton/år
3. Transport av CO₂		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	154	ton/år
4. Elförbrukning av SAF		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	39 420	ton/år
5. Transport av SAF		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	39	ton/år
6. Förbränning av SAF (på hög höjd)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	303 050	ton/år
Summa utsläpp		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	147 883	ton/år

Tabell 3 fyller en viktig funktion genom att presentera de totala utsläppen av klimatpåverkande processer i ton per år och ger en översikt över elektrobränslets samlade klimatavtryck. Dessutom kan utsläpp från vardera process som visas i figur 2 utläsas i denna tabell. En intressant observation från tabell 3 är att förbränningen av elektrobränsle på hög höjd resulterar i den största klimatpåverkan, med utsläpp på 303 050 ton per år. Detta understryker betydelsen av utsläppen vid förbränning vid höga höjder, något som inrikesflygen ofta undviker. Vidare kan vi se att elförbrukningen av SAF också står för en betydande del av utsläppen, med 39 420 ton per år. Detta indikerar vikten av att använda en klimatvänlig och ren energikälla vid produktionen av elektrobränsle för att minska den totala klimatpåverkan. Sammanfattningsvis ger tabell 3 en tydlig bild av de specifika processerna som bidrar till utsläppen i elektrobränslets livscykel.

Tabell 4 Tabellen visar utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av fossil flygfotogen. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för processerna (förbränning av fossilt jetbränsle på hög höjd + utsläppen från råolja/fält med EU-genomsnittligt värde) är 543,06 g CO₂-e/kWh.

Klimatpåverkande ämnen och processer (Fossilt bränsle)	Utsläpp	Enhet
Utsläppen från råolja/fält/raffinaderier		
EU-genomsnitt	54	g CO ₂ -e/kWh
Utsläppen från förbränning		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	257,40	g CO ₂ -e/kWh
Höghöjdseffekt		
Faktor för höghöjdseffekten	1,9	Dimensionslös
Förbränning av fossilt jetbränsle (hög höjd)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	489,06	g CO ₂ -e/kWh
LCA total		
Summa utsläpp	543,06	g CO ₂ -e/kWh

I tabell 4 presenteras utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av fossil flygfotogen. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh). Utsläppen från råolja/fält/raffinaderier är 54 g CO₂-e/kWh och tillsammans med förbränningen av fossilt jetbränsle inklusive höghöjdseffekten blir den totala utsläppsnivån för processerna 543,06 g CO₂-e/kWh. Detta värde används som referens för att jämföra hur effektivt elektrobränsle är som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan från flygindustrin. Sammanfattningsvis illustrerar tabell 4 de betydande utsläppen från förbränning av fossilt bränsle inom flygindustrin och betonar vikten av att övergå till mer hållbara alternativ som elektrobränsle. Genom att jämföra dessa utsläpp med utsläppen från elektrobränsle i tabell 3 framhävs elektrobränslets potential att vara en mer hållbar och miljövänlig lösning för att minska klimatpåverkan från flygning på höga höjder.

Tabell 5 Tabellen visar utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av elektrobränsle exklusive höghöjdseffekten. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh) och den totala utsläppsnivån för alla processer är 72,70 g CO₂-e/kWh.

Klimatpåverkande ämnen och processer (SAF)	Utsläpp	Enhet
1. CO₂ infångning (minuspost)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	-257	g CO ₂ -e/kWh
2. CO₂ infångning		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	8,46	g CO ₂ -e/kWh
3. Transport av CO₂		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	0,25	g CO ₂ -e/kWh
4. Elförbrukning av SAF		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	63,92	g CO ₂ -e/kWh
5. Transport av SAF		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	0,06	g CO ₂ -e/kWh
6. Förbränning av SAF (på låg höjd)		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	257	g CO ₂ -e/kWh
Summa utsläpp		
(CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	72,70	g CO ₂ -e/kWh

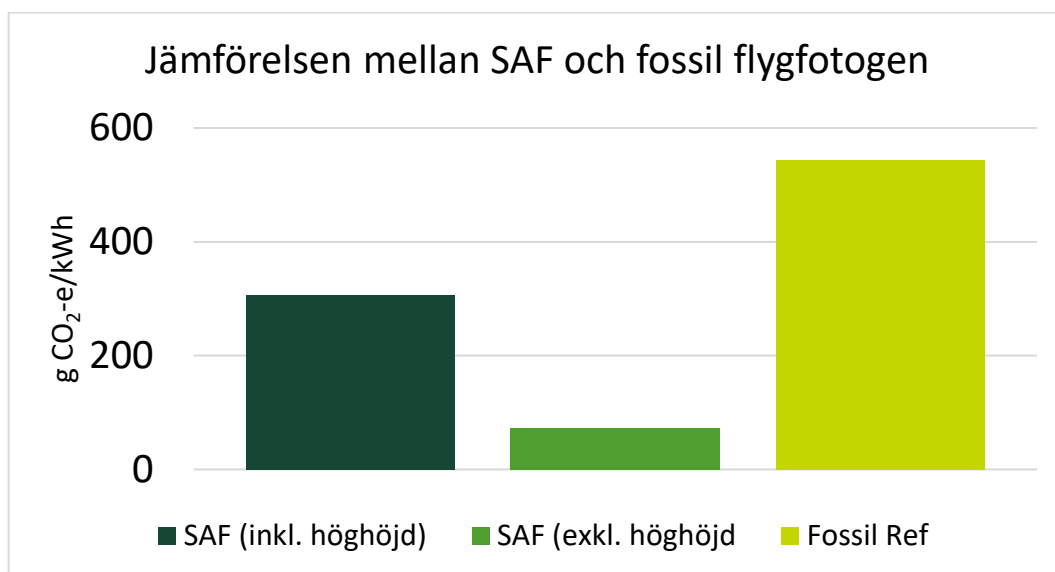
Avslutningsvis presenterar tabell 5 utsläppsdata för de olika processerna i samband med produktion av elektrobränsle exklusive höghöjdseffekten. Detta är de uppskattade utsläppen flyget kan förvänta sig ha på lägre höjd. Summa utsläpp resulterade till endast 72,2 g CO₂-e/kWh. Denna tabell är relevant för inrikesflyg som ofta inte når höjder över 8000 meters höjd. Detta understryker vikten av att övergå till mer hållbara alternativ som elektrobränsle för att minska klimatpåverkan inom inrikesflygindustrin och höghöjdseffektens roll på klimatpåverkan.

Jämförelsen i resultatet tydliggör att användningen av fossilt flygbränsle, enligt presenterade data i tabell 4, resulterar i en hög total utsläppsnivå på 543 g CO₂-e/kWh. Å andra sidan, när vi beaktar användningen av elektrobränsle inklusive höghöjdseffekten, enligt tabell 2, observeras en lägre utsläppsnivå på 307 g CO₂-e/kWh, vilket motsvarar en minskning på cirka 43,5%. Detta resultat är särskilt relevant för flygningar på höga höjder, vilket ofta är fallet vid utrikesflygning. Om vi i stället jämför utsläppen från fossilt flygbränsle med elektrobränsle utan höghöjdseffekten, enligt tabell 5, så minskar utsläppen från elektrobränslet med hela 87% och når en utsläppsnivå på endast 73 g CO₂-e/kWh. Denna avsevärda skillnad i utsläpp är av stor betydelse för många inrikesflygningar som sällan når höga höjder.

Tabell 6 Tabellen är en visar utsläppsdata för de olika bränslena. Utsläppen anges i enheten gram CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (g CO₂-e/kWh).

Bränsle	Summa utsläpp	Enhet
Fossilt flygbränsle	543	g CO ₂ -e/kWh
SAF (inkl. höghöjdseffekten)	307	g CO ₂ -e/kWh
SAF (exkl. höghöjdseffekten)	73	g CO ₂ -e/kWh

För att kunna jämföra elektrobränsle med fossilt flygbränsle har tabell 2, tabell 4 och tabell 5 studerats. Totala utsläppet av CO₂-e/kWh för de olika bränslena har sammanställts i tabell 6. Syftet med denna tabell är att underlätta jämförelseanalysen och ge läsaren en översiktlig bild av vilket bränsle som är mest effektivt som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan. Genom att sammanställa utsläppsinformationen i tabell 6 får läsaren en snabb överblick och underlättar därmed bedömningen av de olika bränslena. Denna tabell spelar en central roll i att presentera resultaten och stödja slutsatserna i undersökningen om hållbara bränslealternativ för att minska klimatpåverkan inom flygindustrin.



Figur 3 Diagrammet jämför utsläppsdata för livscykelanalysen mellan elektrobränsle (inkl. höghöjdseffekten) samt elektrobränsle (exkl. höghöjdseffekten) med fossil flygfotogen.

Figur 3 har skapats för att visualisera och jämföra utsläppsdata för livscykelanalysen av elektrobränsle (inklusive höghöjdseffekten) och elektrobränsle (exklusive höghöjdseffekten) med fossil flygfotogen. Syftet med

figuren är att ge en översiktlig bild av utsläppsnivåerna för de olika bränsletyperna och tydligt visa skillnaderna mellan dem.

En viktig observation från figur 3 är att både elektrobränsle (inklusive höghöjdseffekten) och elektrobränsle (exklusive höghöjdseffekten) har betydligt lägre utsläppsnivåer jämfört med fossil flygfotogen. Utsläppen för elektrobränsle (inklusive höghöjdseffekten) ligger på 307,30 g CO₂-e/kWh, medan utsläppen för elektrobränsle (exklusive höghöjdseffekten) är ännu lägre, endast 72,70 g CO₂-e/kWh. Jämfört med fossil flygfotogen, som har en utsläppsnivå på 543,06 g CO₂-e/kWh, visar båda elektrobränslealternativen betydande fördelar när det gäller minskad klimatpåverkan.

Eftersom dagens flygplan är certifierade för användning av högst 50% hållbart flygbränsle finns det potentiellt 2 huvudtyper av 50/50-blandningar. Den ena halvan består alltid av fossilt flygbränsle. Den andra halvan består av SAF (inkl. höghöjdseffekten) eller SAF (exkl. höghöjdseffekten), se beräkningar nedan:

1. SAF (inkl. höghöjdseffekten)

$$(0,5 \times 543 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}) + (0,5 \times 307 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}) = 425 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}$$

2. SAF (exkl. höghöjdseffekten)

$$(0,5 \times 543 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}) + (0,5 \times 73 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}) = 308 \text{ g CO}_2\text{-e/kWh}$$

Dessa beräkningar ger oss insikt i de förväntade utsläppsnivåerna för de olika 50/50-blandningarna av bränslen. Genom att jämföra resultaten kan vi bedöma vilken blandning som potentiellt skulle ha en lägre klimatpåverkan och därmed vara fördelaktig för att minska utsläppen från flygindustrin.

4. Slutsatser och diskussion

Syftet med rapporten var att utföra en livscykelanalys av elektrobränsle för att bedöma dess effektivitet som en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan från flygindustrin. Livscykelanalysen inkluderade processer från infångning av CO₂ till förbränning av 50 000 ton elektrobränsle på hög höjd, vilket resulterade i en årlig utsläppsmängd på 147 883 ton CO₂-e, se figur 2.

Att höghöjdseffekten är viktig för just flygplan som flyger högt vilket är för längre sträckor, medan flygplan som flyger kortare sträckor flyger lägre och inte har samma effekt.

I resultaten presenterades både elektrobränsle (inklusive höghöjdseffekten) och elektrobränsle (exklusive höghöjdseffekten) för att tydligt visa skillnaden mellan de två. Höghöjdseffekten är viktig för att jämföra exempelvis utrikesresor som ofta flyger högt med inrikesresor som ofta flyger lägre och inte har samma effekt. Elektrobränsle (inkl. höghöjdseffekten) inkluderar utsläppen från förbränningen av elektrobränslet på hög höjd, samtidigt som den infångade koldioxiden betraktas som ett negativt utsläpp som minskar det totala utsläppet. Elektrobränslets främsta fördelar ligger i dess potential att minska utsläppen vid låg höjd (exkl. höghöjdseffekten), vid bedömningen av elektrobränslets klimatpåverkan bör särskild uppmärksamhet riktas mot utsläppen vid denna nivå, där den dominerande utsläppskällan för elektrobränsle är det klimatavtryck som uppstår vid produktionen av den använda elektriciteten. Det beror på att elektrobränslet i sig, när man bortser från den höghöjdseffekten, inte bidrar till en nettotillväxt av växthusgaser. Detta beror på att koldioxidinfångningen och förbränningen av elektrobränslet i huvudsak balanserar varandra, vilket resulterar i en neutral effekt på växthusgasutsläppen. Så skillnaden i minskning av utsläpp från elektrobränsle beror på om höghöjdseffekten tas i beaktning eller inte.

Detta resulterar i att HySkies projekt med elektrobränsle för flygtransporter har goda förutsättningar till att uppfylla kraven i lagen (2017:1201) om reduktion av växthusgasutsläpp från fossila drivmedel. Om det förutsätter att elektrobränslet förbränns på låg höjd och att bränslet innehåller 50% elektrobränsle per flygresor.

För att säkerställa att HySkies projekt effektivt bidrar till att uppnå Sveriges miljömål är en viktig förutsättning att den infångade koldioxiden är fossilfri och att allt kol som finns i elektrobränslet kommer från återvunnen CO₂. Energi i form av fossilt skulle minska effektiviteten av insatserna för att uppnå Sveriges miljömål. Det är därför viktigt att säkerställa att den infångade koldioxiden kommer från fossilfria källor för att öka projektets positiva miljöeffekter.

En ytterligare åtgärd som behöver säkerställas är elektriciteten vid produktion av elektrobränsle. Elektricitetens emissionsfaktor är en avgörande faktor för elektrobränslets totala klimatavtryck, speciellt på låg höjd. Det är stora mängder energi som kommer att behövas vid produktion av elektrobränsle. En av förutsättningarna för att projektet ska klara det kräver elektricitet med lågt klimatavtryck. Det är även viktigt att ta hänsyn till att utsläppssiffrorna bör innehålla indirekta utsläpp för både produktion och distribution eftersom detta kan utgöra en betydande del av den totala klimatpåverkan.

HySkies projekt har identifierats med goda förutsättningar att utgöra en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan, förutsatt att man använder fossilfri el vid tillverkningen och återvinner fossilfri koldioxid. Det är viktigt att partnerföretagen fortsätter att utföra djupanalyser på hur de kan producera elektrobränsle med så låga utsläpp som möjligt. Genom att använda tekniker som bio-CCS och bio-CCU kan Vattenfall bidra till att minska koldioxidutsläppen och öka användningen av förnybara energikällor. Trots att Carpe Futurum markerar ett betydande framsteg för Vattenfall mot deras mål om att bli fossilfria, kvarstår vissa utmaningar. Dessa inkluderar hanteringen av kvarvarande utsläpp från förbränningen och lösningen på problemet med fossil plast från hushållsavfall som bränns i energiåtervinningen. För att ta itu med dessa utmaningar fortsätter Vattenfall sitt arbete att nå målet om att bli helt fossilfria. (Vattenfall 2023)

Tabell 5 visar att SAF (inkl. höghöjdeffekten) inte har lika låga utsläpp som (exkl. höghöjdeffekten). HySkies projektet kan bidra till att minska den totala klimatpåverkan genom att återanvända koldioxid från fjärrvärmeanläggningar för att producera elektrobränsle, under förutsättning att den insamlade koldioxiden anses vara koldioxidneutral. Det är av betydelse att notera att processen inte är fullständigt klimatneutral, då utsläpp av koldioxid fortfarande sker vid användning av elektrobränsle i flygplansmotorer samt på grund av höghöjdeffekten som förstärker climateffekten. Ändå kan projektets miljöpåverkan minskas genom att koldioxiden från fjärrvärmeanläggningen återanvänds.

För att säkerställa att projektet effektivt bidrar till att uppnå Sveriges miljömål är det viktigt att även fokusera på att få flygplan certifierade för användning av 100% hållbart flygbränsle och att gradvis öka andelen hållbart bränsle i flygsektorn. En avgörande faktor för att uppnå detta är den tekniska utvecklingen av flygplansmotorer och bränslesystem. Dessutom behövs en omfattande uppdatering av regelverk och certifieringsprocesser för att erkänna och tillåta användning av 100% hållbart flygbränsle. Genom att fokusera på att successivt ersätta en betydande andel av det fossila bränslet med hållbart bränsle kan det uppnås positiva resultat för att minska klimatpåverkan. Detta kan antingen göras genom att ersätta allt bränsle för en del av flygresorna eller genom att ersätta en del av bränslet för alla flygresor.

För att förstå sambandet mellan rapportens resultat och tidigare forskning är det bra att jämföra och analysera liknande studier och deras slutsatser. Resultatet av denna rapport visar att användningen av elektrobränsle kan leda till en minskning av CO₂e-utsläppen med ungefär 87% när man betraktar hela livscykeln (exkl. höghöjdseffekten). Det är intressant att notera att detta resultat är i linje med resultaten från HySkies LCA, vilket tyder på en överensstämmelse och trovärdighet i min bedömning av utsläppsnivåerna för de olika processerna.

Eftersom flygplan idag bara är certifierade för användning av endast 50% hållbart flygbränsle innebär det att en 50/50-blandning är vad som kan förväntas maximalt per flygplan. Då är det intressant att se om en 50/50-blandning har potential att uppfylla kraven i lagen (2017:1201) om reduktion av växthusgasutsläpp från fossila drivmedel.

Detta innebär att en 50/50-blandning av SAF (inkl. höghöjdseffekten) och fossilt flygbränsle skulle minska utsläppen med cirka 22% per flygresa (jämfört med 543 g CO₂-e/kWh från enbart fossilt flygbränsle). Detta innebär att HySkies projekt kan bidra till att uppfylla kraven i lagen om reduktion av växthusgasutsläpp till år 2029.

En 50/50-blandning av SAF (exkl. höghöjdseffekten) och fossilt flygbränsle skulle minska utsläppen med cirka 43% per flygresa (jämfört med 543 g CO₂-e/kWh från enbart fossilt flygbränsle). Detta innebär att HySkies projekt kan bidra till att uppfylla kraven i lagen om reduktion av växthusgasutsläpp till över år 2030.

En annan viktig faktor att ta hänsyn till är hur stor del 50 000 ton elektrobränsle utgör jämfört med den totala användningen av flygbränsle. Vattenfall påstår att det skulle vara ett avsevärt bidrag till Sveriges mål att nå ett fossilfritt inrikesflyg. Det skulle enligt Vattenfall motsvara 30 % av det flygbränsle som behövs för inrikesflyg (Vattenfall, 2022) Därför är en ytterligare åtgärd som behövs för att säkerställa att projektet effektivt bidrar till att uppnå Sveriges miljömål att i

framtiden nå en produktionsmängd av elektrobränsle som kan täcka ett ännu större behov.

Rapportens styrkor ligger i dess överensstämmelse med tidigare forskning, vilket ger pålitliga och verifierade resultat för elektrobränslets utsläppsnivåer. Genom att både inkludera och exkludera höghöjdseffekten ger rapporten en mer nyanserad och komplett bild av utsläppen från olika perspektiv. Särskilt betydelsefullt är att höghöjdseffekten tas med i betraktandet, eftersom flygplanens utsläpp på hög höjd har nästintill en fördubblande påverkan på klimatet än markbaserade utsläpp.

En annan begränsning är att alla utsläpp i livscykelanalysen bygger på förenklade modeller och uppskattningar. Dessa förenklingar kan inte fullständigt återspegla komplexiteten och variationen i verkligheten. Det är därför viktigt att vara medveten om att de presenterade utsläppssiffrorna kan vara behäftade med viss osäkerhet och att det kan finnas andra faktorer som inte har tagits med i analysen. Man kan även räkna med att det kan bli justeringar i projektet under tiden det utvecklas och anläggningens design kan komma att successivt ändras. En fråga som projektet undersöker för tillfället är om eldrivna lastbilar för transporten av CO₂ från Uppsala till Forsmark är möjligt.

Det finns flera intressanta frågor och områden som bör utforskas i framtida forskning. För att öka tillförlitligheten i utsläppssiffrorna krävs en förbättrad kunskap om den exakta emissionsfaktorn för elektrobränsle, vilket kan uppnås genom mer detaljerade forskningsstudier. Det är också viktigt att genomföra studier som utvärderar de långsiktiga effekterna av elektrobränsle och bedömer dess hållbarhet som en alternativ energikälla inom flygindustrin. Denna typ av forskning skulle ge värdefull insikt och underlag för att fatta välinformerade beslut om elektrobränslets användning på lång sikt. Slutligen bör livscykelanalyser för elektrobränsle fortsätta att förbättras och uppdateras genom ytterligare forskning. Genom att använda mer detaljerade data och realistiska modeller kan osäkerheten minskas och mer exakta bedömningar göras av elektrobränslets klimatpåverkan. Dessa framtidsperspektiv och forskningsområden är av stor vikt för att fortsätta utveckla kunskapen om elektrobränslets potentiella bidrag till minskade utsläpp och en mer hållbar flygindustri

Sammanfattningsvis visar rapporten att elektrobränsle kan vara en hållbar lösning för att minska klimatpåverkan från flygindustrin, men det finns vissa viktiga aspekter att beakta. Livscykelanalysen visade att elektrobränsle har mindre utsläppsmängd jämfört med fossilt flygbränsle i båda fallen när höghöjdseffekten exkluderades samt inkluderades, men en betydande större minskning av utsläppen

observerades när höghöjdseffekten exkluderades. För att effektivt bidra till att uppnå Sveriges miljömål är det nödvändigt att säkerställa att infångad koldioxid är fossilfri och att använda elektricitet med lågt klimatavtryck vid produktionen av elektrobränsle. För att förbättra kunskapen inom området krävs ytterligare forskning, särskilt för att få en mer exakt bild av elektrobränslets emissionsfaktor på hög höjd och dess långsiktiga effekter som en alternativ energikälla inom flygindustrin. Livscykelanalyser bör också uppdateras och förbättras genom användning av mer detaljerade data och realistiska modeller. Kanske det är viktigt att betrakta elektrobränsle som en övergångs teknik, (drop-in) där vi på lång sikt behöver minska på vårt beroende av fossila bränslen för att nå ett hållbart samhälle.

Referenser

- Airbus (2023). *Sustainable aviation fuel Advancing the ecosystem for a proven alternative fuel* <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel> [2023-05-15]
- Europaparlamentet (2022). *Så bekämpar EU klimatförändringarna.* <https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/priorities/klimatforandringar/20180703STO07129/sa-bekampar-eu-klimatforandringarna> [2023-05-02]
- ICAO (2018). *CO₂ EMISSIONS FROM COMMERCIAL AVIATION, 2018* https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_560_rev1_en.pdf [2023-05-30]
- ICAO (2021). *CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values.* <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2007%20-%20Methodology%20for%20Actual%20Life%20Cycle%20Emissions.pdf> [2023-05-12]
- ICAO (2022). *INNOVATION FOR A GREEN TRANSITION* <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf> [2023-05-29]
- Länsstyrelsen i Uppsala län (2022). *Remiss om Energimyndighetens rapport Första, andra, tredje... Förslag på utformning av ett stödsystem för bio-CCS* <https://www.regeringen.se/contentassets/d232104ea40d4234a5ffde3fe7d48b37/lansstyrelsen-i-uppsala-lan.pdf> [2023-05-02]
- KTH (2022) *Långväga resande i linje med Klimatmålen* <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1634181/FULLTEXT01.pdf>

- Naturvårdsverket (u.å.). *Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser*.
<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/> [2023-05-02]
- Naturvårdsverket (2022). *Klimatklivet - Vägledning om beräkning av utsläppsminskning*.
<https://www.naturvardsverket.se/contentassets/9db319015c994a9d88f64fffae725765/vagledning-berakna-utslappsminskning-2022-05-06.pdf> [2023-05-12]
- Regeringen (2020) *Reduktionsplikt för flygfotogen - Prop. 2020/21135*
<https://www.regeringen.se/contentassets/656e55b316c7482db8e31ee828af9306/reduktionsplikt-for-flygfotogen-prop.-202021135> [2023-05-29]
- Schripp et al. (2022). *Aircraft engine particulate matter emissions from sustainable aviation fuels: Results from ground-based measurements during the NASA/DLR campaign ECLIF2/NDMAX*
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0016236122016106?token=861BBD4A9D0F0623E182BE9768DC42E1B1E49775BBA954BE3525BCD819E4901BC4338B9662D7BAD7BC06F3E77364173A&originRegion=e-u-west-1&originCreation=20230515143902> [2023-05-17]
- SLU (2023). *Växthusgaserna - koldioxid, metan och lustgas*
<https://www.slu.se/centrumbildningar-och-projekt/epok-centrum-for-ekologisk-produktion-och-konsumtion/vad-sager-forskningen/klimat/vaxthusgaserna---koldioxid-metan-och-lustgas/> [2023-05-02]
- Svenska regeringen (2019). *Biojet för flyget*
<https://www.regeringen.se/contentassets/6d591e58fd9b4cad8171af2cd7e59f6f/biojet-for-flyget-sou-201911/> [2023-05-17]
- Transportstyrelsen (2022). *Klimat*
<https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Miljo-och-halsa/Klimat/> [2023-05-02]
- Trafikanalys (2022). *Styrmedel för luftfartens klimatomställning*
https://www.trafa.se/globalassets/pm/2022/pm-2022_8-styrmedel-for-luftfartens-klimatomstallning.pdf [2023-05-15]

Transportstyrelsen (2022). *Vanliga frågor och svar om miljö och hälsa i luftfarten*. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/miljo-och-halsa/vanliga-fragor-och-svar/#:~:text=Hur%20stor%20%C3%A4r%20flygets%20totala,de%20totala%20utsl%C3%A4ppen%20av%20koldioxid>. [2023-05-02]

Vattenfall (2021). *SAS, Vattenfall, Shell och LanzaTech ska undersöka möjligheten att producera hållbart flygbränsle*. <https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och-press/pressmeddelanden/2021/sas-vattenfall-shell-och-lanzatech-ska-undersoka-mojligheten-att-producera-hallbart-flygbransle> [2023-05-02]

Vattenfall (2022). *Samrådsunderlag - Projekt High Skies*. https://group.vattenfall.com/se/siteassets/sverige/var-verksamhet/vagen-mot-fossilfritt/samradsunderlag-projekt-hyskies.pdf?t_tags=language%3Asv%2Csiteid%3A00e53530-5acd-4b18-95ba-5eb803679d87&t_hit.id=Corporate_Web_Cms_ContentTypes_Media_PdfFile/_c3463128-d90e-438d-b2f6-bae670423a63&t_hit.pos=2 [2023-05-29]

Vattenfall (2022) *Reduktionsplikten är en nödvändighet för fossilfritt flygande*. <https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och-press/nyheter/2022/reduktionsplikten-ar-en-nodvandighet-for-fossilfritt-flygande> [2023-05-29]

Vattenfall (2023). *Infångning av koldioxid*. <https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/vagen-mot-ett-fossilfritt-liv/infangning-av-koldioxid> [2023-05-02]

Uniper (2021) *Elektrometanol, eller idén som kan förändra världen*. <https://www.uniper.energy/sverige/nyheter/elektrometanol-eller-iden-som-kan-foeraendra-vaerlden/#:~:text=N%C3%A4r%20elektrobr%C3%A4nsle%20som%20bygger%20p%C3%A5,tillbaka%20koldioxiden%20igen%20efter%20f%C3%B6rbr%C3%A4nning>. [2023-05-02]

U.S. Department of Energy (2020). *Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf> [2023-05-17]

Tack

Jag vill tacka min handledare, Gunnar, för hans stöd under hela examensarbetet. Hans kunskaper, expertis och engagemang har varit till stor hjälp för mitt arbete. Gunnar har kommit med feedback, inspirerande idéer och värdefulla insikter som har lyft mitt arbete till en högre nivå. Jag vill även passa på att uttrycka min tacksamhet till SLU, för den fantastiska utbildningen jag har fått ta del av. På SLU har jag fått möjligheten att fördjupa min kunskap och utveckla mina färdigheter inom miljövetenskap.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.