

FRAMTIDA BRÄNSLEVAL FÖR FLYG, SJÖFART OCH VÄGTRANSPORTER UR ETT ENERGISYSTEMPERSPEKTIV

Analys av kostnadseffektivitet och andra viktiga kriterier vid bränsleval samt elektrobränslets miljöpåverkan

Februari 2022

Julia Hansson, Erik Fridell
IVL Svenska Miljöinstitutet

Selma Brynolf, Elin Malmgren, Maria Grahn, Karin Andersson
Chalmers tekniska högskola

FÖRNYBARA DRIVMEDEL OCH SYSTEM 2018-2021

Ett samverkansprogram mellan Energimyndigheten och
f3 Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel

FÖRORD

Detta projekt har genomförts inom ramarna för samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system, projektnummer 48357-1. Projektet har finansierats av Energimyndigheten och f3 – Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel.

Energimyndigheten arbetar på regeringens uppdrag med energiomställningen till ett modernt, hållbart, fossilfritt välfärdssamhälle och stödjer forskning om förnybara energikällor, smarta elnät och framtidens fordon och bränslen.

f3 är en nätverksorganisation som fokuserar på utveckling av miljömässigt, ekonomiskt och socialt hållbara förnybara drivmedel. f3 finansieras gemensamt av centrets parter och Västra Götalandsregionen. Chalmers Industriteknik fungerar som värd för centret. Kansliet vid f3 utgör programkansli för samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system. (se www.f3centre.se)

Detta projekt har utförts i nära samarbete mellan IVL Svenska Miljöinstitutet och Chalmers Tekniska Högskola. Flera industriella partners har bidragit till olika delar av projektet vilket inkluderar fordonstillverkare, bränsleproducenter, och bränsleanvändare. Erfarenheterna och input från industripartnerna har varit mycket värdefulla för analyserna och resultaten från projektet.

Denna rapport ska citeras enligt följande:

Hansson, J., Fridell, E., Brynolf, S., Malmgren, E., Grahn, M., Andersson, K., *et. al.*, (2022)
Framtida bränsleval för flyg, sjöfart och vägtransporter ur ett energisystemperspektiv - Analys av kostnadseffektivitet och andra viktiga kriterier vid bränsleval samt elektrobränslets miljöpåverkan.
Rapport nr FDOS 26:2022. Tillgänglig på <https://f3centre.se/sv/samverkansprogram/>

SAMMANFATTNING

Införandet av alternativa sjöfarts- och flygbränslen kommer att spela en nyckelroll för att minska utsläppen av koldioxid (CO₂) från transportsektorn och introduktionen behöver accelerera. Det finns flera olika bränslealternativ. Vilka framtida bränsleval är mest intressanta för att minska CO₂-utsläppen från främst sjöfart och flyg ur ett kombinerat kostnads- och klimatperspektiv med fokus på att hela energisystemet behöver minska sina utsläpp gemensamt och vilka faktorer påverkar? Syftet med denna rapport och det bakomliggande projektet är att analysera dessa frågor och att bidra med en inledande analys för miljöpåverkan av elektrobränslen.

En betydande elektrifiering framstår kostnadseffektiv för både person- och godstransporter på väg i de skandinaviska länderna. Biobränslen behövs också, åtminstone på kort sikt (fram till 2030) för alla vägtransporter, men på längre sikt (2050) särskilt inom sjöfarten och flyget (men kanske också i viss mån för tunga vägtransporter). Biomassabaserade marina bränslen och flygbränslen (biojetbränslen) utgör således kostnadseffektiva åtgärder för att minska CO₂-utsläppen inom den nordiska sjöfarts- och flygsektorn för 2030 och 2050 i alla scenariofall som studerats. Elektrobränslen för flyg- och sjöfartssektorn är i viss mån också ett kostnadseffektivt alternativ, men bara när CO₂-infångning och lagring (CCS) inte introduceras och används i stor skala i någon sektor samtidigt som tillgången på biomassa är begränsad.

Generellt sett är utvecklingen av CO₂-infångning och lagring från biomassabaserad teknik (bio-CCS) och hur dessa potentiellt negativa utsläpp kommer att beaktas vid beslutsfattande viktigt för utvecklingen även inom transportsektorn och för biobränslenas framtida roll. Detta eftersom det kan påverka i vilken utsträckning utsläppen för olika transportslag behöver minska. En kostnadseffektiv bränsle- och teknikmix i den skandinaviska transportsektorn och specifikt inom sjöfarts- och flygsektorn beror dock på flera viktiga faktorer. Dessa inkluderar (i) tillgång till hållbara biobränslen, (ii) utveckling och kostnadsminskningar av nya framdrivningssystem för sjöfart och flygplan (till exempel vätgasbaserade koncept, hel-elektriska och hybridkoncept), (iii) utbyggnad av elproduktion med låga CO₂-utsläpp, (iv) kostnadsutveckling för elektrifierade och vätgasbaserade alternativ i andra sektorer, samt (v) utveckling och implementering av bio-CCS. Implementeringen och utformningen av styrmedel och mål kopplade till alternativa flygbränslen och marina bränslen i de nordiska länderna (såväl som globalt) kommer också att ha ett starkt inflytande på utvecklingen för olika alternativ. Förutom bränslebyte är ökad energieffektivitet och minskad transportefterfrågan kostnadseffektiva åtgärder för att minska CO₂-utsläppen i transportsektorn.

Möjlig miljöpåverkan från användningen av elektrobränslen på fartyg och de faktorer som påverkar utfallet har också undersökts. Miljöpåverkan från elektrobränslen kan vara lägre än konventionella marina bränslen för de flesta av de studerade miljöpåverkanskategorierna. Användning av förnybar el är ett krav för att elektrobränslen ska bidra till en lägre klimatpåverkan. Andra faktorer som har stor inverkan på miljöpåverkan från elektrobränslen är bland annat hållbarheten för den kolkälla som används, marina motorers egenskaper, råvaruutvinning och bränsleproduktionens energibehov. Det finns en risk att elektrobränslen kan leda till en högre påverkan på människors hälsa än dagens konventionella bränslen. I vilken utsträckning är osäkert och påverkas av begränsningar i metoden för livscykelbedömning av marina bränslen. Ytterligare bedömningar behövs för att klargöra potentialen hos såväl elektrobränslen som andra förnybara bränslen för sjöfart och flyg.

SUMMARY

The introduction of alternative maritime and aviation fuels will play a key role in reducing carbon dioxide (CO₂) emissions from the transport sector and the introduction need to accelerate. There are several different fuel alternatives. Which future fuel choices are most interesting for reducing CO₂ emissions from primarily shipping and aviation from a combined cost and climate perspective considering the entire energy system and what factors influence? The aim of this report and the underlying project is to assess these issues and to contribute with an initial assessment of the potential for and environmental impact of electrofuels.

Significant electrification appears to be cost-effective for both passenger and freight transport by road in the Scandinavian countries. Biofuels are also needed, at least in the short term (until 2030) for all road transport, but in the longer term (2050), especially in shipping and aviation (although maybe also to some extent for heavy duty road transport). Biomass-based marine fuels and biomass-based aviation fuels (biojet fuels) thus represent cost-effective measures to reduce CO₂ emissions in the Nordic shipping and aviation sector for 2030 and 2050 in all the scenario cases studied. Electrofuels for the aviation and shipping sector are to some extent also a cost-effective alternative, but only when CO₂ capture and storage (CCS) is not introduced and used on a large scale, in any sector, and when there is a limited supply of biomass.

In general, the development of carbon capture and storage for biomass-based technology (bio-CCS) and how these potentially negative emissions will be considered in policy making is important for development also in the transport sector and for the future role of biofuels (as it may decide to what extent the emissions for different transport modes need to be reduced). However, a cost-effective fuel and technology mix in the Scandinavian transport sector and specifically in the shipping and aviation sector depend on several key factors. These include (i) availability of sustainable biofuels, (ii) the development, and cost reductions of new propulsion systems for shipping and aircraft (e.g., hydrogen-based concepts, all electric and hybrid concepts), (iii) the expansion of low-carbon electricity generation, (iv) cost development of electrified and hydrogen-based options in other sectors, as well as (v) the development and implementation of bio-CCS. Also, the implementation and design of policies and targets linked to alternative aviation and marine fuels in the Nordic countries (as well as globally) will have a strong influence on the development for different options. Besides fuel switch, increased energy efficiency and reduced transport demand represent cost-effective measures for decarbonizing the transport sector.

The potential environmental impact from the use of electrofuels on ships and the factors that affect the outcome have also been investigated. The environmental impact of electrofuels may be lower than conventional marine fuels for most of the environmental impact categories studied. Use of renewable electricity is a requirement for electric fuels to contribute to a lower climate impact. Other factors that have a major impact on the environmental impact of electrofuels include the sustainability of the carbon source used, marine engine properties, raw material extraction and the energy requirements for fuel production. There is a risk that electrofuels may lead to a higher impact on human health than today's conventional fuels. To what extent is uncertain and affected by limitations in the method for life cycle assessment of marine fuels. Further assessments are needed to clarify the potential of electrofuels as well as other renewable fuels for shipping and aviation.

INNEHÅLL

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUKTION | 8 |
| 2 | KOSTNADSEFFEKTIVA BRÄNSLEVAL FÖR FLYG, SJÖFART OCH VÄGTRANSPORTER I SKANDINAVIEN | 10 |
| 2.1 | INLEDNING | 10 |
| 2.2 | METOD | 10 |
| 2.3 | RESULTAT | 12 |
| 2.4 | DISKUSSION OCH SLUTSATSER | 17 |
| 3 | TEKNO-EKONOMISK JÄMFÖRELSE AV ALTERNATIVA BRÄNSLEN OCH FRAMDRIVNINGSTEKNIKER FÖR FLYGSEKTORN | 19 |
| 3.1 | INLEDNING | 19 |
| 3.2 | METOD OCH LITTERATUR..... | 19 |
| 3.3 | RESULTAT: KOSTNADER FÖR ALTERNATIVA FLYGBRÄNSLEN | 20 |
| 3.4 | DISKUSSION OCH SLUTSATSER..... | 22 |
| 4 | KRITERIER FÖR VAL AV FÖRNYBARA BRÄNSLEN I SJÖFARTEN | 24 |
| 4.1 | INLEDNING OCH METOD | 24 |
| 4.2 | RESULTAT OCH DISKUSSION: VIKTIGA KRITERIER ATT BEAKTA VID BEDÖMNING AV MARINA BRÄNSLEN | 24 |
| 5 | GRANSKNING OCH ANALYS AV ELEKTROBRÄNSLENS MILJÖPÅVERKAN..... | 27 |
| 5.1 | INLEDNING | 27 |
| 5.2 | EXISTERANDE LCA PÅ ELEKTROBRÄNSLEN | 29 |
| 5.3 | RESULTAT: MILJÖPÅVERKAN FRÅN ELEKTROBRÄNSLEN | 29 |
| 5.4 | DISKUSSION OCH SLUTSATSER..... | 32 |
| 6 | EFFEKTER AV STYRMEDEL PÅ KOSTNADSEFFEKTIVITETEN FÖR FÖRNYBARA FLYGBRÄNSLEN I SVERIGE | 33 |
| 6.1 | INLEDNING OCH TILLVÄGAGÅNGSSÄTT | 33 |
| 6.2 | RESULTAT, DISKUSSION OCH SLUTSATSER..... | 33 |
| 7 | REFERENSER | 35 |

1 INTRODUKTION

För att kunna nå framtida klimatmål måste koldioxidutsläppen (CO₂) från sjöfart, luftfart och vägtransporter minska drastiskt (UNCTAD, 2011; Eide et al., 2011; Wormslev et al., 2016). Utöver en mer effektiv energianvändning behövs en ökad andel förnybara bränslen i transportsektorns samtliga delar för att utsläppen ska minska. I detta syfte fortsätter utvecklingen av olika alternativa bränslen som biobränslen, eldrift, vätgas samt elektrobränslen eller power-to-x, som framställs av CO₂ och vatten som spjälkas med hjälp av el, för användning i olika transportslag. Intresset för förnybara bränslen är stort, inte bara för användning i vägtransporter, utan även inom sjöfarten och luftfarten.

Det övergripande syftet med denna rapport och bakomliggande projekt är att bidra med ökad förståelse kring den framtida rollen för olika förnybara drivmedel med specifikt fokus på flyg och sjöfart, och vilka drivmedelsalternativ som framstår mest intressanta för att minska CO₂-utsläppen ur ett kombinerat kostnads- och klimatperspektiv (och varför) där hänsyn även tas till utvecklingen inom andra sektorer i samhället. Mer specifikt har forskningen som redovisas i denna rapport fokuserat på följande mål:

- 1) En analys av vilka bränslen och framdrivningstekniker som bedöms vara mest kostnadseffektiva för flyg, sjöfart och väg i framtiden utifrån ett internationellt energisystemperspektiv med hårda CO₂-minskningskrav för olika scenarier.
- 2) En analys av synergier mellan och specifika kriterier och förutsättningar inom framför allt sjöfart och flyg som påverkar val av drivmedel.
- 3) En inledande analys av elektrobränslets miljöpåverkan genom en kartläggning och granskning av existerande livscykelanalyser (LCA) av elektrobränslen och ett förslag till och användande av metodik för att utföra en översiktlig LCA av utvald elektrobränsle-kedja för användning på ett fartyg. Elektrobränslen avser drivmedel gjorda av el, vatten och CO₂ (eller kväve).

De analyser som utförts kopplat till projektet redovisas i ett antal olika publikationer som summeras i sin korthet i denna rapport.

Den analys som beskrivs i avsnitt 2 berör både det första och andra forskningsmålet ovan och har därför givits större utrymme än övriga studier. Deras kopplingar till målen indikeras i listan nedan där det också framgår i vilket avsnitt de sammanfattas. För fördjupning i studierna hänvisas till följande publikationer:

- Andersson, K., Brynolf, S., Hansson, J., & Grahn, M. (2020) Criteria and decision support for a sustainable choice of alternative marine fuels. *Sustainability* 12(9), 3623.
Sammanfattas i avsnitt 4 och bidrar primärt till det andra målet.
- Dahal, K., Brynolf, S., Xisto, C., Hansson, J., Grahn, M., Grönstedt, T., & Lehtveer, M. (2020) Reviewing the Development of Alternative Aviation Fuels and Aircraft Propulsion Systems. Book of abstracts, Vol 1, 3rd ECATS Conference, Making Aviation Environmentally Sustainable.
Sammanfattas i avsnitt 3 och bidrar till det första och andra målet.

- Dahal, K., Brynolf, S., Xisto, C., Hansson, J., Grahn, M., Grönstedt, T., & Lehtveer, M. (2021) Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 1115642021.
Sammanfattas i avsnitt 3 och bidrar till det första och andra målet.
- Hansson, J., Hansson, J., Brynolf, S., Grahn, M., Hagberg, M., Karlsson, K. (2020) Decarbonizing Nordic Transports – The Role of Alternative Aviation Fuels. Book of abstracts, Vol 1, 3rd ECATS Conference, Making Aviation Environmentally Sustainable. *Sammanfattas i avsnitt 2 och bidrar till det första och andra målet.*
- Hansson, J., Hansson, J., Brynolf, S., Grahn, M., Hagberg, M., Karlsson, K. (2021). Fuel choices for different transport modes when decarbonizing the Scandinavian energy system. Proceedings of the European Biomass Conference & Exhibition (EUBCE) 2021, 26-29 April 2021.
Sammanfattas i avsnitt 2 och bidrar till det första och andra målet.
- Malmgren, E (2021). Towards sustainable shipping: Evaluating the environmental impact of electrofuels. Göteborg: Chalmers university of technology. Thesis for the degree of licentiate of philosophy.
Sammanfattas i avsnitt 5 och bidrar till det tredje målet.
- Malmgren, E., Brynolf, S., Fridell, E., Grahn, M., & Andersson, K. (2021). The environmental performance of a fossil-free ship propulsion system with onboard carbon capture – a life cycle assessment of the HyMethShip concept. *Sustainable Energy Fuels*, 5, 2753-2770.
Sammanfattas i avsnitt 5 och bidrar till det tredje målet.
- Trinh, J., Harahap, F., Fagerström, A., Hansson, J. (2021). What Are the Policy Impacts on Renewable Jet Fuel in Sweden? *Energies*, 14, 7194.
Sammanfattas i avsnitt 6 och bidrar delvis till det första och andra målet. Notera att denna publikation är ett examensarbete som vi hade möjlighet att handleda och som kopplar till projektets forskningsområde men som inte specifikt utformats som huvudleverans för något av forskningsmålen ovan. Studien blev dock såpass intressant att vi gärna vill passa på att tipsa om den här.
- Grahn, M., Malmgren, E., Korberg, A., Taljegård, M., Anderson, J., Brynolf, S., Hansson, J., Ridjan Skov, I., Wallington, T. (202X). Review of electrofuel feasibility - Cost and environmental impact. Submitted for publication in Special issue of Progress in Energy (PRGE).
Sammanfattas delvis i avsnitt 5 och bidrar till det tredje målet.
- Brynolf, S., Hansson, J., Anderson, J., Ridjan Skov, I., Wallington, T., Grahn, M., Korberg, A., Malmgren, E., Taljegård, M. (202X). Review of electrofuel feasibility - Prospects for road, ocean, and air transport. Submitted for publication in Special issue of Progress in Energy (PRGE).
Bidrar till det andra målet men sammanfattas inte i denna rapport då den färdigställdes parallellt.

2 KOSTNADSEFFEKTIVA BRÄNSLEVAL FÖR FLYG, SJÖFART OCH VÄGTRANSPORTER I SKANDINAVIEN

2.1 INLEDNING

De nordiska länderna har antagit ambitiösa klimatmål och har därigenom pekat ut växthusgasutsläppen från transportsektorn som en viktig utmaning (Hansson et al., 2019). Omställningen har framför allt satt fart inom vägtransportsektorn, med en stark elektrifiering i Norge, introduktion av biodrivmedel i Sverige och Finland, samt främjande av cykling i Danmark (Hansson et al., 2019).

Utvecklingen mot minskade växthusgasutsläpp inom den internationella sjöfarten stöds av den Internationella sjöfartsorganisationens (IMO) strategi, vars mål är att de sammanlagda växthusgasutsläppen per år från internationell sjöfart ska vara 50 % lägre år 2050 jämfört med år 2008 (IMO, 2018). Omställningen av luftfartssektorn främjas i sin tur av EU:s system för handel med utsläppsrätter (ETS) och av *Carbon Offsetting and Reducing Scheme for International Aviation (CORSA)*, som är ett regelverk med syfte att stabilisera växthusgasutsläppen från flygsektorn till nivån för år 2019 (ICAO, 2019).

Utvecklingen och introduktionen inom luft- och sjöfart fortgår för olika biodrivmedel, biojetbränslen, syntetiska jetbränslen, vätgassystem, elektriska och el-hybridssystem (Wormslev et al., 2016; Chryssakis, et al., 2017; Dahal, et al., 2021; Irena, 2017). I dagsläget används en liten andel biobränsle i flygsektorn genom inblandning av små mängder i konventionella flygbränslen (Irena, 2017; Wormslev & Broberg, 2020; Wang & Tao, 2016). Flytande naturgas (LNG) har introducerats inom sjöfarten som ett alternativ till konventionella bränslen, men det förekommer även eldrift med batterisystem för korta distanser, metanol (främst fossil), biodiesel i form av hydrogenerad vegetabilisk olja (HVO) och biogas i flytande form (LBG) (DNV GL, 2019). Det pågår även projekt som undersöker och testar drift med vätgas och ammoniak (Hansson et al., 2020).

Förutsättningarna för att producera och använda hållbart flygbränsle i de nordiska länderna, har utvärderats av Wormslev et al. (2016) och uppdaterats av Wormslev och Broberg (2020). Scenarier och bedömningar av framtida bränslen inom den globala sjöfarten har presenterats av Taljegård et al. (2014), Gilbert et al. (2014) (2014) och av Halim et al. (2018). Motsvarande bedömningar har utförts av IEA & NER (2013) för Norden, av Skytte et al (2018) för Finland (2018) och av Brahim et al. (2019) för dansk sjöfart. Ofta förväntas det i framtiden att en kombination av olika bränslen används. Potentialen för olika marina bränslen har även utvärderats av Hansson et al. (2019).

Syftet med studien (Hansson et al., 2021 och föregångaren Hansson et al., 2020b) som presenteras i detta avsnitt, är att göra en inledande bedömning av vilka bränslen och framdrivningstekniker, främst inom luft- och sjöfart men även vägtransport, som är mest kostnadseffektiva med hänsyn till utsläppsminskningar och energisystemet i stort, samt att utföra en analys av vilka faktorer som påverkar förutsättningarna för olika bränslen i ett framtida skandinaviskt energisystem. De länder som ingår i studien är Danmark, Norge och Sverige och tidshorisonten sträcker sig fram till år 2050.

2.2 METOD

I den här studien har modellgeneratoren TIMES använts. TIMES är ett ramverk för att skapa en

modell av energisystemet, som byggs med en så kallad bottom-up princip (nerifrån och upp). Modellen baseras på linjärprogrammering i syfte att uppnå ett så billigt energisystem som möjligt, utifrån begränsningar som användaren definierar (ETSAP, 2018).

Den version av TIMES som nyttjas i denna studie baseras på *TIMES Nordic* som utvecklades av Danmarks Tekniska Universitet (DTU) och IVL Svenska Miljöinstitutet, som en del av projektet *Shift- Sustainable Horizons in Future Transport* (Hansson et al., 2019). TIMES Nordic-modellen innefattar länderna Sverige, Norge och Danmark (Salvucci et al., 2019; Salvucci, et al., 2019).

TIMES Nordic-modellen är en multiregionmodell som täcker alla sektorer av de nationella energisystemen, inklusive el och värme, industri, service, bostäder och transporter. Den omfattande täckningen säkerställer att relevanta kopplingar, interaktioner och synergier över sektorsgränser fångas upp. Utöver transportsektorns utveckling tar modellen alltså hänsyn till utveckling inom andra samhällssektorer.

I nuvarande version har modellen en tidshorisont som sträcker sig till år 2050. Passagerartransport representeras av tolv olika transportsätt, varav passagerarflyg är ett. Flygtransport och sjöfart är också tillgängligt för frakt. Flyg- och sjötransporter av passagerare och gods beskrivs av ett urval av bränsle- och fordonsteknikalternativ, inklusive konventionella jetbränslen och marina bränslen, biojetbränslen och marina biobränslen, vätgas och elektrobränslen. För vägtransport betraktas följande bränslealternativ: konventionella fossila bränslen, biobränslen (flytande och gasformiga), el, vätgas, elektrobränslen och för tunga vägtransporter även elvägar. Teknikerna skiljer sig åt vad gäller bränsleanvändning, konverteringseffektivitet och kostnader. Kostnaderna som ingår inkluderar framställningskostnader för olika råvaror, kostnader för investeringar i och drift och underhåll av olika energiomvandlingsanläggningar (uttryckta som en årlig kostnad) och kostnader för fordon och infrastruktur. Kostnaderna utvecklas över tid och antas till exempel minska med teknisk utveckling och lärande för nya tekniker. Både inrikes och utrikes flyg och sjöfart samt inrikes vägtransporter ingår.

Modellen tillgodoser de definierade kraven för hela tidshorisonten genom att implementera teknikmixen med de lägsta kostnaderna samtidigt som den uppsatta CO₂-begränsningen uppfylls. Efterfrågan för de olika sektorer som ingår i modellen uppfylls således med framställning av de energibärare (till exempel biodrivmedel och el) från de energikällor som givet alla kostnader och prestanda bidrar till att nå det uppskatta CO₂-utsläppsmålet till den lägsta kostnaden. Efterfrågan för energi för olika slutändamål (som transportefterfrågan) och framtida prisutveckling för fossila bränslen baseras på IEA and NER (2016) och IEA (2020). Totalkostnaden som summeras i modellen representerar den totala samhällskostnaden för att möta efterfrågan med de valda energibärarna och energikällorna.

Scenarierna som analyseras i den här studien representerar olika vägar för att uppnå målet om inga nettokoldioxidutsläpp år 2050 under olika omständigheter. Modellen tar hänsyn till alla nationella energirelaterade CO₂-utsläpp samt CO₂-utsläpp associerade till bränsleanvändning för internationell sjö- och luftfart (representerad av andelen som bunkras i de inkluderade nordiska länderna). Minskade utsläpp uppnås genom att tillämpa en årlig gräns för CO₂-utsläpp som gradvis minskas tills nettonollutsläppen (eller nära) uppnås 2050. Inga andra politiska åtgärder ingår (det vill säga inga subventioner eller andra styrmedel för till exempel introduktion av elfordon eller biodrivmedel inkluderades).

Ett grundscenari med teknikfokus har använts där fem huvudaspekter har varierats för att sedan resultera i 32 olika modellutfall. De fem aspekterna som varierats i scenarierna inkluderar

- (i) externa förändrings och undvikande åtgärder, shift&avoid (ja eller nej),
- (ii) begränsad biobränsleimport (ja eller nej),
- (iii) storskaligt införande av infångning och lagring av CO₂ (CCS) (ja eller nej),
- (iv) höga kostnader för elfordon och bränslecellsfordon (ja eller nej), och
- (v) storskaligt införande av delade autonoma bilar (ja eller nej).

Införandet av externa förändrings- och undvikandeåtgärder (det vill säga övergång till mer energi-effektiva transportsätt och undviken reseefterfrågan) representerar ett fall med minskad transportefterfrågan. Begränsning av biobränsleimporten representerar den begränsade globala bioenergi-potentialen, och med begränsad biobränsleimport är bioenergianvändningen i de inkluderade länderna begränsad till den inhemska biomassatillförselpotentialen. Utan importbegränsning kan däremot biobränslen importeras från resten av världen till ett antaget marknadspris. I verkligheten kommer marknaden inte att vara helt begränsad till inhemska biomassaresurser i framtiden, men detta fall bör ses som ett exempel på ett fall med lägre tillgång för biomassa för att bedöma dess inverkan.

CCS-tekniker innebär att CO₂ kan fångas upp från punktkällor, transporteras och lagras permanent i lagringsplatser. CCS kan potentiellt vara en framtida nyckelteknik för CO₂-reducering, men med begränsad utbyggnad än så länge. De två CCS-scenarierna representerar ett fall där modellen kan välja att introducera CCS i stor skala om det anses kostnadseffektivt och ett fall där CCS inte är möjligt att introducera i storskalig på grund av acceptansfrågor eller tekniska problem. När det är tillåtet kan CCS tillämpas på biomassabaserade källor.

Kostnadsutvecklingen för el- och bränslecellsfordon är en central faktor för deras utbyggnad men relativt osäker. För att testa påverkan av utvecklingen av framtida kostnadsminskningar för dessa fordon antas i detta fall 20 % högre investeringskostnader för alla elfordonsalternativ för vägtransporter jämfört med basantagandet. Delade autonoma fordon kan i framtiden fungera som förarlösa taxibilar och minska behovet av privatägda fordon vilket kan påverka bränsletillgången även i övriga transportsektorer. I fallet med delade autonoma bilar kan sådana tekniker tillhandahålla upp till 25 % av den levererade bilpassagerarkilometern år 2050.

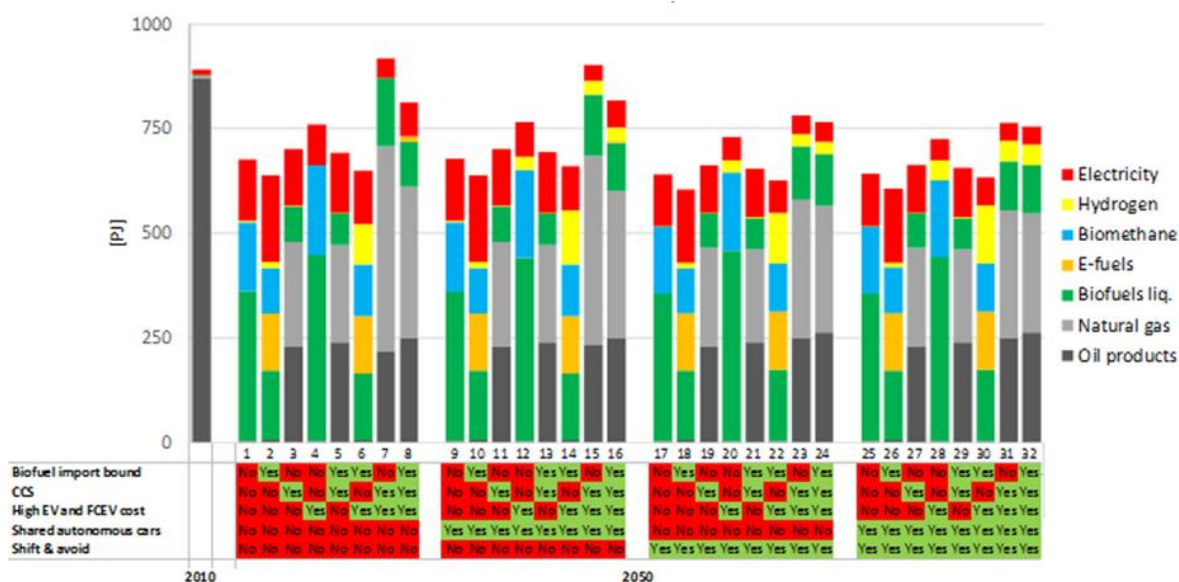
2.3 RESULTAT

Figur 1 visar bränsleförbrukningen i den skandinaviska transportsektorn (inklusive väg, sjöfart och flyg) år 2050 för de 32 modellerade fallen. De simulerade scenarierna visar att biodrivmedel och el är kostnadseffektiva i samtliga fall och att vätgas är ett kostnadseffektivt alternativ i vissa fall. Elektrobränslen är endast kostnadseffektivt som transportbränsle i fall där storskalig produktion av CCS inte antas ske. För lätta fordon är biobränslen och el kostnadseffektiva alternativ vid 2030 innan elektrobränslen har introducerats på marknaden.

I några av fallen kvarstår en viss mängd fossila bränslen. Dessa fall utgår från att CCS får stor utbredning och det blir då kostnadseffektivt enligt modellen att implementera bio-CCS (där CO₂

består av biogent kol). Eftersom bio-CCS innebär negativa utsläpp kan modellen tillåta en del fossila utsläpp och ändå uppnå att nettoutsläppen blir noll. CCS och bio-CCS sker inte främst på transportsektorrelaterade utsläpp utan på utsläppen från andra sektorer. Den övergång som sker till naturgas i vissa fall beror på att naturgas i modellen antas leda till en liten minskning av utsläppen jämfört med bensin och diesel vilket tillsammans med kostnadsskillnaden är skälet till att de introduceras i stället för att man fortsätter använda bensin/diesel. Eftersom fördelningen mellan fossila drivmedel inte är avgörande för resultatet för kostnadseffektiva förnybara bränsleval har vi valt att inte undersöka förutsättningarna för naturgas ytterligare.

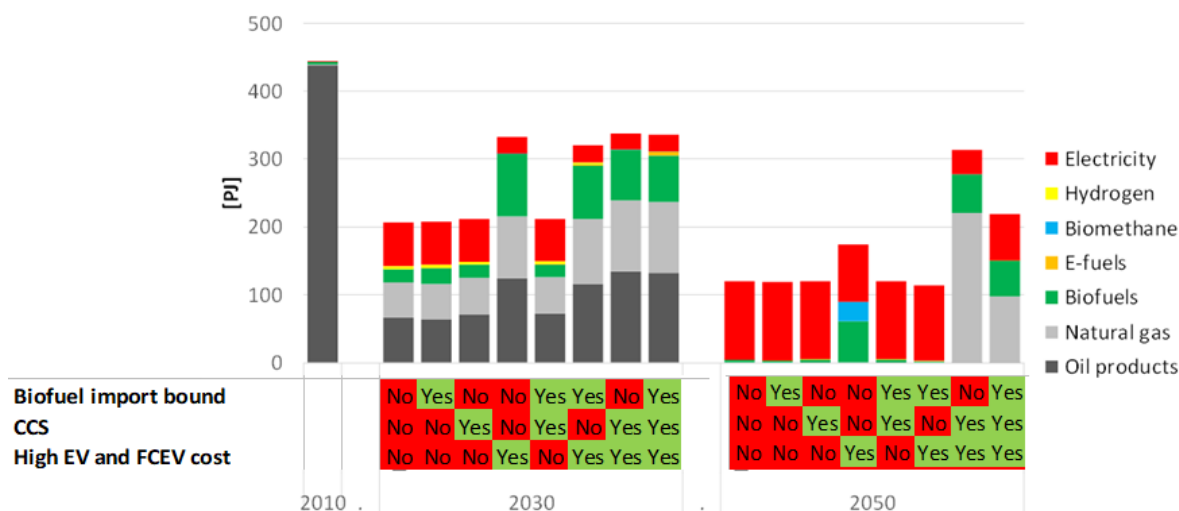
I avsnitten 2.3.1–2.3.4 redovisas resultaten för respektive transportsektor för de åtta första scenariefallen som valts ut för att visa bredden i bränsleutfall. Där inkluderar vi inte scenariefall som specifikt fokuserar på delade autonoma fordon eller införandet av externa förändrings- och undvikandeåtgärder, eftersom de inte bidrar med nya insikter kring kostnadseffektiva bränsleval utan framför allt innebär en sänkt transportefterfrågan.



Figur 1. Total bränsleanvändning i den skandinaviska transportsektorn 2050 för de 32 olika scenariefallen som beskrivs i den löpande texten. Den totala faktiska bränsleanvändningen år 2010 är med för jämförelse. E-fuels representerar electrobränsle, Biomethane: gasformiga biodrivmedel, Biofuels liq: flytande biodrivmedel, CCS: CO₂-infångning och lagring, EV: elfordon, FCEV: bränslecellsfordon, och Shift & Avoid representerar ett fall med minskad transportefterfrågan.

2.3.1 Kostnadseffektiva bränsleval inom lätta vägtransporter

För lätta vägtransporter framstår biodrivmedel och el vara kostnadseffektiva alternativa bränslealternativ år 2030 samtidigt som det inte finns någon introduktion av elektrobränslen (Figur 2). Mot 2050 sker en kraftig elektrifiering av vägtransportsektorn och biodrivmedel framstår bara vara kostnadseffektiva i vissa scenariefall (Figur 2). Biodrivmedel är till viss del kostnadseffektiva i fallen med höga kostnader för el- och bränslecellsfordon i kombination med låg biomasstillgång, eller när CCS inte tillåts i stor skala. Den kraftiga elektrifieringen beror på att elbilsalternativet på sikt blir mer kostnadseffektivt än bilar som körs på biodrivmedel, framför allt på grund av att kostnaderna för elfordon antas sjunka betydligt.



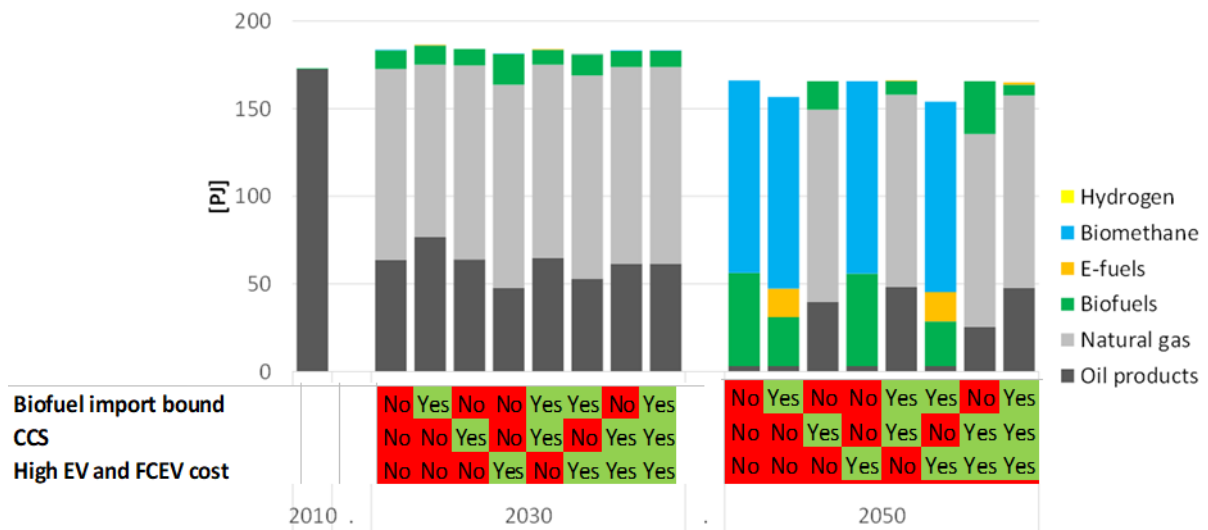
Figur 2. Bränsleanvändning i den skandinaviska lätta vägtransportsektorn 2030 och 2050 för åtta olika scenarior (i PJ per år), vilka motsvarar scenario 1-8 i Figur 1. Bränsleanvändningen 2010 ingår för jämförelse. E-fuels representerar elektrobränslen, biomethane: gasformiga biodrivmedel, biofuels: flytande biodrivmedel, Biofuel import bound: biomassabegränsning Ja/Nej, CCS: CO₂-avskiljning och lagring Ja/Nej, High EV and FCEV cost: Hög el- och bränslecellsfordonskostnad Ja/NEJ.

2.3.2 Kostnadseffektiva bränsleval inom sjöfartssektorn

För sjöfarten är biodrivmedel kostnadseffektiva i alla scenarior både 2030 och 2050 (Figur 3). Elektrobränslen är kostnadseffektiva i ett fåtal fall år 2050 och då i de scenarior med en antagen begränsad biomassainport (som begränsar den totala tillgången på biomassa) och med antagandet att det inte kommer att ske någon storskalig introduktion av CCS.

Som framgår av Figur 3 varierar omfattningen av biodrivmedel för sjöfarten år 2050 avsevärt mellan scenariorna. Omfattningen av biodrivmedel beror på om storskalig implementering av CCS tillåts eller inte. Vid storskalig användning av CCS och i synnerhet bio-CCS är användningen av biodrivmedel lägre. CCS och bio-CCS implementeras inte primärt på produktionen av drivmedel utan i andra industrisektorer. Den relativt stora användningen av gasformiga biobränslen år 2050 beror på övergången till naturgasbaserade bränslen år 2030 (i form av flytande naturgas, LNG) vilket innebär att det då är billigare att byta till gasformiga biodrivmedel än flytande biodrivmedel vid 2050.

Vätgas som marint bränsle tycks inte vara kostnadseffektivt i något av de bedömda fallen, men detta behöver studeras vidare och kostnadsdata uppdateras innan några säkra slutsatser kan dras om vätgas potentiella roll som bränsle för sjöfarten i Norden. Som nämnts i avsnitt 2.2 finns tyvärr inte el med som en lösning för sjöfartssektorn i denna studie men skulle kunna användas för att täcka delar av efterfrågan.

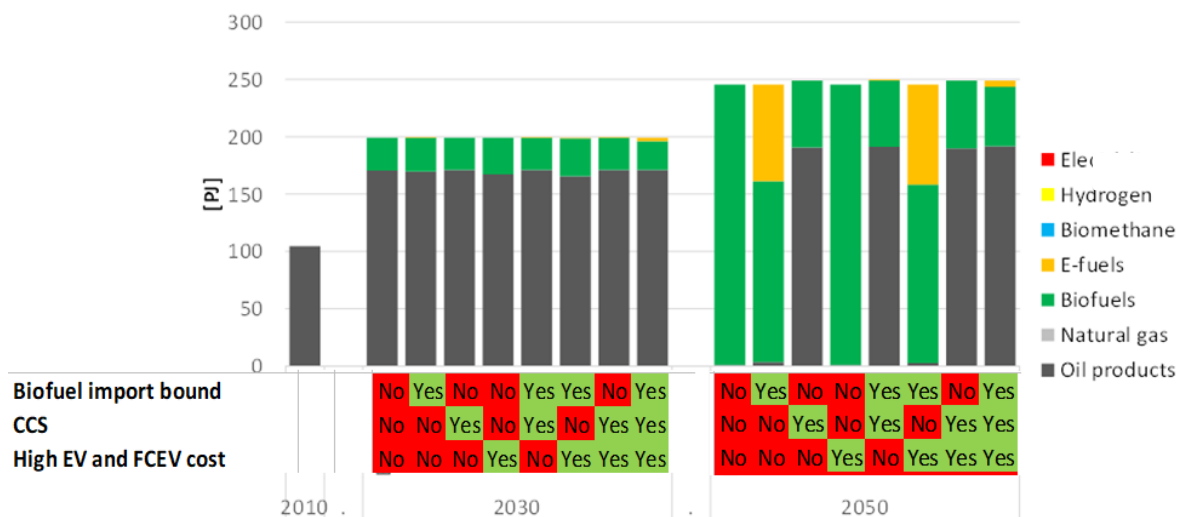


Figur 3. Bränsleanvändning i den skandinaviska sjöfartssektorn 2030 och 2050 för åtta olika scenariofall (i PJ per år), vilka motsvarar scenario 1-8 i Figur 1. Bränsleanvändningen 2010 ingår för jämförelse. E-fuels representerar elektrobränslen, biomethane: gasformiga biodrivmedel, biofuels: flytande biodrivmedel, Biofuel import bound: biomassabegränsning Ja/Nej, CCS: CO₂-avskiljning och lagring Ja/Nej, High EV and FCEV cost: Hög el- och bränslecellsfordonskostnad Ja/NEJ.

2.3.3 Kostnadseffektiva bränsleval inom flygsektorn

För flyget är biojetbränslen kostnadseffektiva i alla scenariofall både 2030 och 2050 (Figur 4), vilket beror på att detta framstår vara det billigaste sättet att minska utsläppen från flygsektorn ur ett systemperspektiv. Elektrobränslen är, liksom för sjöfarten, kostnadseffektiva i vissa fall, främst år 2050 och i de fall där en den totala tillgången på biomassa är begränsad och förutsatt att det inte kommer att ske någon storskalig introduktion av CCS och då framför allt i form av bio-CCS. Liksom för de andra transportsätten beror behovet av alternativa bränslen och i synnerhet bio-bränslen år 2050 på om CCS och bio-CCS införs eller inte. I de fall bio-CCS introduceras finner modellen det kostnadseffektivt att inte minska all användning av fossila bränslen inom flygsektorn.

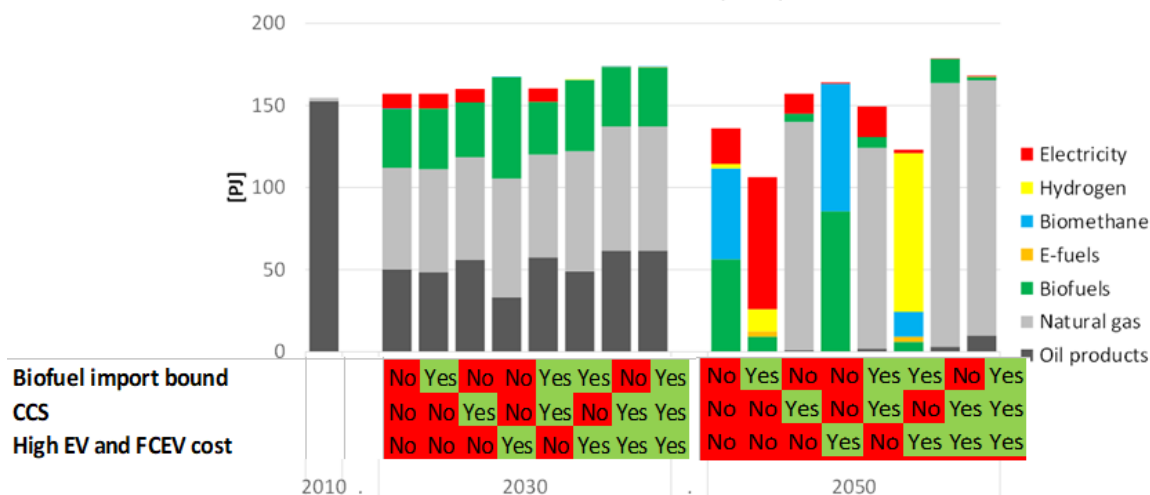
Vätgas som flygbränsle verkar inte vara kostnadseffektivt i något av de bedömda fallen. Men liksom i fallet med sjöfarten måste detta studeras ytterligare och kostnadsdata uppdateras innan några säkra slutsatser kan dras om vätgasens potentiella roll som flygbränsle i Norden. Som nämnts i avsnitt 2.2 finns tyvärr inte el med som en lösning för flygsektorn i denna studie men skulle kunna användas för att täcka en mindre del av efterfrågan.



Figur 4. Bränsleanvändning i den skandinaviska flygsektorn 2030 och 2050 för åtta olika scenariefall (i PJ per år), vilka motsvarar scenario 1-8 i Figur 1. Bränsleanvändningen 2010 ingår för jämförelse. E-fuels representerar elektrobränslen, biomethane: gasformiga biodrivmedel, biofuels: flytande biodrivmedel, Biofuel import bound: biomassabegränsning Ja/Nej, CCS: CO₂-avskiljning och lagring Ja/Nej, High EV and FCEV cost: Hög el- och bränslecellsfordonskostnad Ja/NEJ.

2.3.4 Kostnadseffektiva bränsleval inom tunga vägtransporter

För tunga vägtransporter visar sig biodrivmedel och i mindre utsträckning i vissa fall även el vara kostnadseffektiva alternativa drivmedel år 2030 (Figur 5). År 2050 skiljer sig de kostnadseffektiva bränslevalen avsevärt mellan scenariefallen. Flytande och gasformiga biodrivmedel, el och vätgas visar sig alla vara kostnadseffektiva bränsleval i vissa scenarier medan elektrobränslen inte anses vara kostnadseffektiva i några fall. Därmed är de olika bränslealternativens roll för tunga vägtransporter mer osäker på lång sikt. Detta beror också på utvecklingen inom andra sektorer (till exempel vad gäller efterfrågan av biomassa och expansionen av förnybar el) och på de relativt små kostnadsskillnaderna mellan alternativen. Liksom för sjöfart och flyg finns det inte samma behov av att införa alternativa bränslen för tunga vägtransporter för att minska utsläppen när CCS och framför allt bio-CCS tillåts i stor skala. Detta tyder på att det är relativt kostsamt att minska CO₂-utsläppen inom flyg, sjöfart och tunga vägtransporter jämförelse med övriga energisystemet.



Figur 5. Bränsleanvändning i den skandinaviska tunga vägtransportsektorn 2030 och 2050 för åtta olika scenarior (i PJ per år), vilka motsvarar scenario 1-8 i Figur 1. Bränsleanvändningen 2010 ingår för jämförelse. E-fuels representerar elektrobränslen, biomethane: gasformiga biodrivmedel, biofuels: flytande biodrivmedel, Biofuel import bound: biomassabegränsning Ja/Nej, CCS: CO₂-avskiljning och lagring Ja/Nej, High EV and FCEV cost: Hög el- och bränslecellsfordonskostnad Ja/NEJ.

2.4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Analysen visar att det är möjligt att drastiskt reducera CO₂-utsläppen från den nordiska transportsektorn till 2050, detta genom att modellen når en optimal lösning med kraftigt reducerade utsläpp (Hansson et al., 2021). En förutsättning för det är att spridningen av tekniker och bränslen med låga CO₂-utsläpp snabbas på. Modellen visar i stort att det är en kombination av åtgärder som minskar transportefterfrågan, byte av bränsle samt ökad energieffektivitet som bildar det mest kostnadseffektiva alternativet för att minska växthusgasutsläppen från transportsektorn (Hansson et al., 2021). För person- och godstrafik på väg är en omfattande elektrifiering kostnadseffektivt. Biodrivmedel behövs dock också, inte minst inom sjö- och luftfart.

För sjöfart och flyg visar analysen att biojetbränslen och biodrivmedel för den marina sektorn är kostnadseffektiva bränslen i Norden i viss utsträckning både 2030 och 2050 i alla de studerade scenariorfallerna och kan minska utsläppen från dessa sektorer betydligt. Elektrobränslen för sjöfart och flyg verkar till viss del kunna vara kostnadseffektiva, men bara i de fall där tillgången till biomassa är begränsad och där omfattande utbredning av CCS inte inträffar. Elektrobränslen ser alltså ut att i många fall framför allt kunna utgöra ett komplement till andra alternativ i transportsektorn och kan inte alltid motiveras enbart från ett kostnadsperspektiv (givet den prestanda som använts för att representera dem i modellen) men dess förutsättningar behöver utredas vidare. För en uppdaterad djupare analys av kostnaderna och förutsättningarna för elektrobränslen som drivmedel hänvisas läsaren till Grahn et al. (2022) och Brynolf et al. (2022).

Kostnadseffektiviteten för vätgas inom sjöfart och flyg måste utvärderas ytterligare med uppdaterade uppskattningar av kostnader och teknikprestanda. För de nordiska länderna och med den nuvarande modellen används vätgas i en ganska låg utsträckning i de undersökta fallen. Fler studier behövs för att kunna dra slutsatser om vätgasens potentiella roll i den nordiska och globala transportsektorn och för vilka transportslag. Globalt sett kan utfallet för vätgas (och elektrobränslen) också bli annorlunda på grund av den begränsade globala tillgångspotentialen för biomassa.

Alternativa bränslen inom sjö- och luftfart kommer att spela en avgörande roll för utfasningen av fossila bränslen ur den skandinaviska transportsektorn. En kostnadseffektiv sammansättning av bränslen och tekniker beror av flera nyckelfaktorer: tillgången till hållbara biobränslen, utvecklingen av framdrivningssystem till luft- och sjöfart samt deras säkerhetsaspekter och kostnadsutveckling (till exempel vätgasbaserade koncept, hel-elektriska och hybridkoncept), utbyggnaden av CO₂-snål elproduktion, kostnadsutvecklingen för elektrifierade och vätgasbaserade alternativ inom andra sektorer, samt utvecklingen och implementeringen av bio-CCS för att möjliggöra negativa utsläpp. Framtida kostnadseffektiva bränsleval påverkas därmed i allra högsta grad av utvecklingen inom andra sektorer i samhället. Som ett exempel kommer beslut om hur de potentiellt negativa utsläppen från bio-CCS får tillgodoräknas att ha stor betydelse för transportsektorns omställning och inte minst för flyget och sjöfarten. Men även specifika styrmedel för transportsektorn påverkar detta. Med till exempel specifika mål för att helt fasa ut fossila bränslen i transportsektorn finns inte samma möjligheter att tillgodoräkna sig negativa utsläpp och fortsätta använda fossila bränslen för transporter. Den här studien belyser därför vikten av att beslutsfattare hanterar denna fråga. Det är dock viktigt att alla sektorer strävar efter att minska sina växthusgasutsläpp betydligt.

Generellt är det intressant att fortsätta studera kostnadseffektiviteten för olika bränslen ur ett energisystemperspektiv eftersom uppdaterade scenarier för transportefterfrågan och kostnadsuppskattningar för olika bränslen och framdrivningssystem kommer att förbättra bedömningen ytterligare och klargöra den potentiella rollen för olika alternativa alternativ för flyg och marina bränslen.

Slutligen kommer i praktiken implementering och utformning av styrmedel och mål kopplade till alternativa flyg- och marina bränslen i de nordiska länderna att ha ett starkt inflytande på utvecklingen för olika alternativ.

3 TEKNO-EKONOMISK JÄMFÖRELSE AV ALTERNATIVA BRÄNSLEN OCH FRAMDRIVNINGSTEKNIKER FÖR FLYGSEKTORN

3.1 INLEDNING

Luftfarten är en viktig del av transportsektorn både inrikes och utrikes, men genererar idag stora utsläpp av växthusgaser och andra föroreningar. De direkta emissionerna styrs primärt av vilken typ av bränsle som används, typ av motor och motorbelastning. Luftfarten stod för cirka 2,4 % av de globala CO₂-utsläppen kopplade till bränsleförbrukning under 2018 men detta förväntas vara tredubbelt större år 2050 om inga åtgärder genomförs och detta trots att bränsleförbrukningen per passagerarkilometer minskat betydligt (Kousoulidou & Lonza, 2016; Cherie, 2018; Schäfer et al., 2015; The International Air Transport Association, 2019). Utvecklingen av olika alternativa flygbränslen pågår och vissa flygbolag blandar in biojetbränslen för vissa av sina reguljära flygningar.

Studien (Dahal et al., 2021, som föregås av Dahal et al., 2020) som sammanfattas kort i detta avsnitt granskar en mängd alternativa flygbränslen och möjliga framdrivningssystem, med fokus på kostnader och teknisk mognad och bränslestatus. Mer specifikt inkluderar denna studie en genomgång och analys av kostnaderna för att producera alternativa flygbränslen och modellerar flygplanskonstruktioner för några alternativa flygbränslen för att kunna uppskatta de direkta driftskostnaderna för dessa flygplan. Studien bidrar till ökad förståelse för de potentiella teknikvägar som kan nyttjas till att uppnå bränslen med låga eller obefintliga CO₂-utsläpp och tillhörande kostnader.

3.2 METOD OCH LITTERATUR

Dahal et al (2021) innehåller en genomgång av vetenskaplig litteratur om alternativa flygbränslen och framdrivningssystem, med fokus på kostnader, som kombineras med en uppskattning av direkta driftskostnader för två flygplanstyper som använder utvalda bränslen och framdrivningssystem. I studien avser termen ”alternativa jetbränslen” olika typer av raffinerade bränslen med liknande egenskaper som Jet A/Jet A-1 och andra konventionella fotogenbaserade bränslen. Den bredare termen ”alternativa flygbränslen” representerar alla typer av luftfartsbränsle med låga till inga (noll) CO₂-utsläpp.

3.2.1 Litteraturgenomgången

De utvalda publikationerna har granskats med avseende på följande:

- a) inkluderade alternativa flygbränslen och produktionsprocesser
- b) inkluderade framdrivningstekniker (inklusive bränsleceller och batterier)
- c) inkluderade kostnader, det vill säga lägsta försäljningspriser för flygbränsle (MJFSPs), kostnader för flygplan, framdrivningssystem samt driftskostnader för alternativa flygbränslen
- d) kostnader för olika komponenter kopplat till framdrivningsteknik.

Totalt har försäljningspriser (uttryckta som lägsta försäljningspriser för flygbränsle på engelska förkortat MJFSPs) för nio olika alternativa flygbränslen för tolv olika alternativa flygbränslevägar baserade på 26 olika källor granskats.

3.2.2 Utformning av luftfartskoncept med alternativa drivmedel

För att förstå karakteristiken hos alternativa flygplansbränslen har åtta designer och koncept baserade på existerande flygplansdesigner modellerats, fyra flygplanskoncept var för medellånga och långa marknadssegment. Standardmodellen för flygplanen är A321-neo för medeldistanssegmentet och A350-900 för långdistanssegmentet. Båda modellerna drivs med konventionellt jetbränsle (Jet-A). Ytterligare sex flygplansmodeller har utformats för att drivas med andra typer av flygbränslen: biojetbränslen, flytande metan (LCH₄) och flytande väte (LH₂). Se Dahal et al. (2021) för detaljer kring flygplanskoncepten och för en jämförelse av teknisk mognadsgrad för bränsleproduktion och bränslekedja för olika alternativa flygbränslen.

Driftskostnaden för alternativa flygbränslen betecknas DOC, vilket står för *direct operating cost*. Att känna till driftkostnaden är viktigt dels för den potentiella kunden, dels för utformningen av nya flygplanssystem. En uppskattning av de direkta driftkostnaderna behövs för att skapa förståelse för den ekonomiska genomförbarheten för alternativa bränslen i nya och befintliga flygplan. I den här studien har direkt driftkostnad beräknats som en summering av den totala finansiella kostnaden, den totala besättningskostnaden, totala avgifter, underhållskostnader, motorkostnader och bränslekostnader. DOC för ett flygplan är till stor del beroende av förhållandet mellan priset på alternativt flygbränsle och jetbränsle, tillverkningskostnader och totala investeringskostnader. Kostnader för besättning och totala avgifter är konstanta för respektive flygplansstorlek och angiven flygväg. Finansiella kostnader (avskrivningar, försäkringar och räntekostnader) är också fasta kostnader och är beroende av flygplanets tillverkningskostnad och investeringskostnadskomponenter.

Kostnaden som används för ny flygplansteknik i denna studie representerar kostnadsberäkningar för när de nya teknologierna är relativt mogna, och inte kostnaden för att bygga det första flygplanet av denna typ. Två olika typer av känslighetsanalyser görs i Dahal et al. (2021): 1) för att analysera effekterna på DOC av höga och låga kostnader för jetbränslet (representerat av MJFSP) och för framdrivningssystemet och 2) för att undersöka påverkan av en lägre bränsleproduktionskostnad för alternativa flygbränslen (LH₂ och elektrojet) kontra en ökande CO₂-skatt på det konventionella Jet A-1-bränslet.

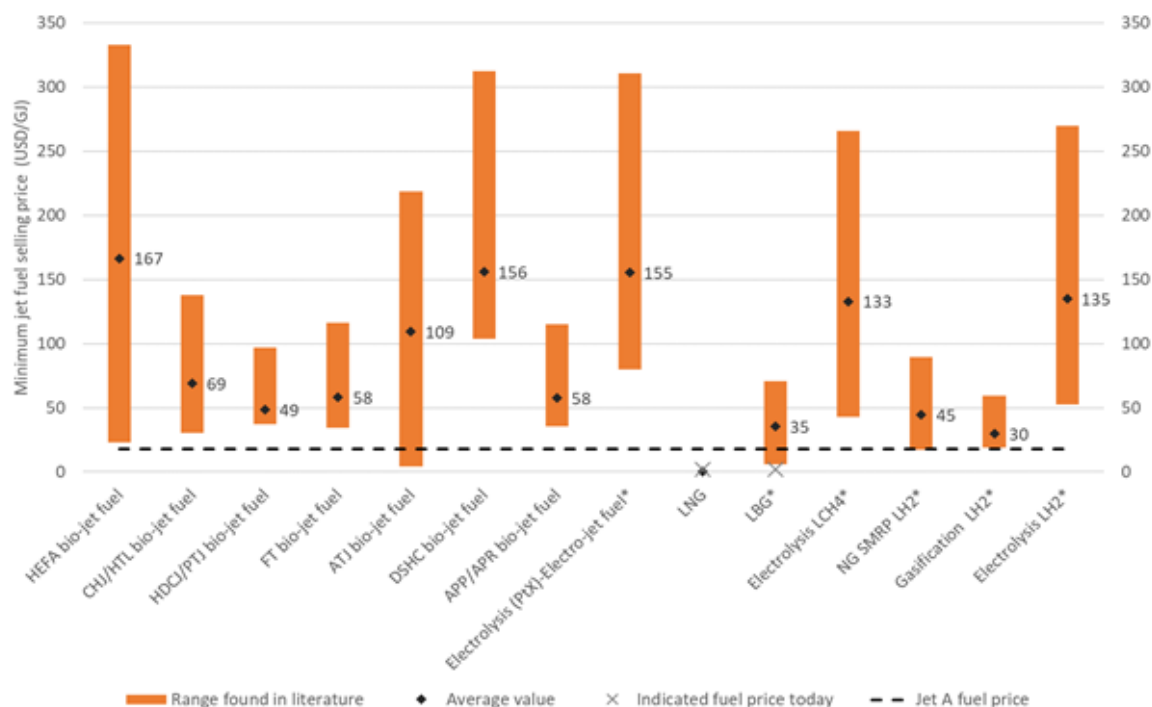
3.3 RESULTAT: KOSTNADER FÖR ALTERNATIVA FLYGBRÄNSLEN

3.3.1 Lägsta försäljningspriser för flygbränsle

I litteraturen finns framför allt kostnadsuppskattningar för biojetbränslen och de är ofta uttryckta som lägsta försäljningspriser för flygbränsle (MJFSPs). Figur 6 illustrerar intervallen för uppskattningarna för lägsta försäljningspriser för olika alternativa flygbränslen baserat på litteraturgenomgången. Värdena som visas för LNG, LBG, LCH₄ och LH₂, ingår för jämförelse och utgör bränsleproduktionskostnader från litteraturen men är inte specifikt framtagna för flygsektorn. För LNG redovisas ett relativt lågt värde i den underliggande artikeln och ett bredare spann hade bättre fångat dess prisbild som också varierar över tiden.

Som syns i Figur 6 är intervallet för det lägsta försäljningspriset relativt brett för alla bränslealternativ vilket främst beror på varierande råmaterial och råvaruproduktionskostnader, som alltså varierar stort mellan olika studier. Lignocellulosa-baserade råvaror är i allmänhet dyrare, investe-

ringskostnaderna är högre, fler konverteringssteg krävs och bränsleutbytet är lägre än för andra råvaror. För till exempel hydrerade estrar och fettsyror (HEFA) består det högre priset i intervallet av bränsle producerat från mikroalger vilket ha en klart högre råvarukostnad än andra råvaror. Men kostnadsspannet beror även på andra faktorer som olika metoder, tidpunkt för vilken uppskattningen gäller och för vilken volym av bränslet, om intäkter från biprodukter ingår, etc. För många av bränslena, som till exempel vätgas från elektrolys, är dessa faktorer väldigt viktiga vid uppskattningen av priset. De redovisade intervallen är dock fortfarande intressanta för det möjliga kostnadsläget för de olika flygbränslena ur ett övergripande perspektiv. Vi har i viss utsträckning försökt att harmonisera de olika studiernas resultat genom att räkna om samtliga till samma enhet och uttryckt som lägsta försäljningspriser för flygbränsle (MJFSPs), samt genom att ta bort de uppskattningar som gäller för produktion från den allra första anläggningen. I övrigt har metoderna inte kunnat harmoniseras eftersom det inte alltid möjliggörs av beskrivningarna i de underliggande studierna. Det har heller inte rymts inom ramen för denna studie.



Figur 6. Lägsta försäljningspris för flygbränsle (MJFSP) eller bränsleproduktionskostnad (markerad * för LBG, LCH4 och LH2) för alternativa flygbränslevägar baserat på litteraturgenomgången i Dahal et al. (2021), presenterad i USD/GJ. Intervall och medelvärde. För vissa alternativ har dagens bränslepriser lagts till. HEFA = hydrerade estrar och fettsyror, CHJ/HTL = katalytisk hydrotermolys (dekarboxylering/hydrobehandling)/hydrotermisk förvätskning, HDCJ = vätebehandlad depolymeriserad cellulosa-jetbränsle, DSHC = direkt socker till kolväten, ATJ = alkohol till jetbränsle, FT= Fischer-Tropsch, APP/APR = vattenfasbearbetning/reformering, SMRP = ångmetanreformeringsprocess, LNG = flytande naturgas, LBG = flytande biogas, LCH4 = flytande metangas, LH2 = flytande vätgas.

Som visas i figur 6 framstår det möjligt att producera biojetbränslen via vissa produktionsvägar till relativt låga kostnader, till exempel via processvägen ATJ, alkohol till flygbränsle. Produktionskostnaden för elektrojetbränslen är högre än för de flesta biojetbränsleproduktionsvägar och är beroende av antaganden som görs för kostnaden för CO₂-infångning, elektrolys och elkostnader som alla är osäkra (Dahal et al., 2021). Även vilket elektrobränsle som produceras påverkar produktionskostnaden i viss mån. Till exempel är elektro-metanolvägen billigare än elektro-FT-vägen (Dahal et al., 2021). Beroende på den framtida kostnadsminskningen för till exempel elektrolysörer kan produktionskostnaden för elektrojetbränsle reduceras ytterligare.

3.3.2 Total driftkostnad (DOC) för flyget

Litteraturen visar varierande resultat för driftkostnaderna för biojetbränslen. Enligt våra uppskattningar motsvarar den totala driftkostnaden (DOC) för de olika alternativen följande:

- Biojetbränsle: 5,0–9,2 US cent/passagerare/km
- LNG: 4,2–5,5 US cent/passagerare/km
- Elektrometan: 5,6–16,7 US cent/passagerare/km
- Elektrojetbränsle: 9,2–23,7 US cent/passagerare/km
- Förnybar och fossilbaserad flytande vätgas: 8,1–23,9 respektive 5,9–10,1 US cent/passagerare/km. Det kan jämföras med motsvarande kostnad för konventionellt jetbränsle som är 3,9–4,8 US cent/passagerare/km.
- Flytande naturgas: 4,2–5,2 US cent/passagerare/km.

Våra DOC-uppskattningar för förnybara flygbränslebaserade flygplanskoncept motsvarar sålunda ungefär 1.5 (biojetbränsle medellånga flyg-fallet) till 4 gånger (elektrojetbränsle långa flyg-fallet) motsvarande kostnad för konventionellt jetbränsle i basfallet.

Även här finns förstås stora osäkerheter, främst gällande kostnaden för bränslet. Om det lägre intervallet för de granskade bränslekostnaderna för biojetbränslen beaktas (se Dahal et al., 2021), minskas DOC men är fortfarande högre än för konventionellt Jet A-1-bränsle (15 %). För alla alternativa flygbränslen med undantag för LNG, påverkar bränslekostnaden i hög grad den totala driftkostnaden för flygplanet.

3.4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Biojetbränslen, syntetiska jetbränslen, elektrojetbränslen, LH₂ och LCH₄ är alla möjliga framtida alternativ till dagens flygbränslen, men de senare två kräver i de flesta fall betydande modifieringar av motorer, bränsletankar och aerodynamiska system. Elektriska och hybridelektriska framdrivningssystem kan också användas i framtida flygplan, där olika hybridvarianter verkar mer genomförbara på kort sikt. Liksom för andra transportsätt kan flera parallella bränslealternativ användas för flyg i framtiden, det vill säga en blandning av biojetbränslen, vätgas och andra elektrojetbränslen, kompletterat med elektriska lösningar för de avstånd där det är lämpligt.

På kort sikt tycks biojetbränslen vara det mest konkurrenskraftiga alternativa bränslet för flygsektorn när det gäller bränsleproduktionsteknikens mognad, kompatibilitet för blandning av biot drivmedel i befintliga jetmotorer och för vissa biojetbränslealternativ, det relativt låga möjliga försäljningspriset. Biojetbränsle i form av HEFA är det enda biojetbränslealternativet som är kommersiellt i dagsläget. HEFA, ATJ och CHJ/HTL biojetbränslen är mer mogna och energieffektiva, och deras kostnader lägre än för andra biojetbränslen. Vätgas och elektrobränslen är intressanta i ett längre tidsperspektiv.

Beroende på vilka antaganden som görs, är den uppskattade totala driftskostnaden för de förnybara flygbränslen som undersöks i studien – biojetbränsle, elektrojetbränsle, elektrometan och förnybart flytande vätgas – ungefär 15–500 % högre än kostnaden för konventionellt jetbränsle. Bränslekostnaden är den huvudsakliga kostnadsfaktorn för alla framtida förnybara flygplanstyper. Bränsleproduktionskostnaderna för samtliga alternativa flygbränslen kan minska när produktionstekniken mognar. Dessutom kan lokalisering och processintegration förbättra lönsamheten för produktionen av biojetbränsle, genom att till exempel placera råvaruproduktion och biojetbränsleproduktionen nära varandra.

För biojetbränslen i allmänhet utgör tillgången på hållbar råvara och produktionskostnaden viktiga utmaningar. Generellt sett är de största utmaningarna för att skala upp produktionen av elektrojetbränsle tillgången på hållbar CO₂, förnybar el och vätgas till konkurrenskraftiga kostnader. De stora utmaningarna för att skala upp de förvätskade alternativen LH₂, LCH₄ inkluderar höga kostnader för infrastruktur, lagring och förvätskning.

Införandet av en CO₂-skatt på konventionella jetbränslen kan göra alternativa flygbränslen mer konkurrenskraftiga. Hur hög denna CO₂-skatt behöver vara beror bland annat på det framtida priset på konventionella jetbränslen och den framtida produktionskostnaden för förnybara flygbränslen.

4 KRITERIER FÖR VAL AV FÖRNYBARA BRÄNSLEN I SJÖFARTEN

4.1 INLEDNING OCH METOD

I undersökningar av vad rederier anser vara viktiga kriterier vid val av fartygsbränslen pekas olika ekonomiska faktorer ut som de viktigaste (Hansson et al., 2019; Stopford, 2009). Att utgå från dagens pris på bränslen är dock ett otillräckligt beslutsunderlag, till och med för väletablerade bränslen, eftersom bränslepriser uppvisar stora variationer över tid (EIA, 2019; EIA, n.d.). Frågan är då hur bästa möjliga beslutsunderlag kan tas fram för alternativa bränslen som i många fall inte ens finns på marknaden idag.

Syftet med studien (Andersson et al., 2020) som sammanfattas i detta avsnitt är att kartlägga vilka kriterier som förekommer i utvärderingar av möjliga framtida fartygsbränslen, att utvärdera dessa kriterier och att peka ut de kriterier som är viktigast att beakta i utvärderingar av bränsleval för sjöfarten.

Studien består inledningsvis av en granskning av publicerad litteratur om fartygsbränslen och av en genomgång av rapporter och artiklar som har publicerats av klassificeringssällskap och andra organisationer. De kriterier som förekommer utvärderas och förslag på ytterligare kriterier ges för att kunna uppnå en mer fullständig utvärdering av framtida bränslen och deras ekonomiska, sociala och miljömässiga hållbarhet.

Utöver en variation av möjliga bränslen är det viktigt att komma ihåg att det även finns olika framdrivningstekniker, det vill säga tekniker som bränslenas energi frigörs med. Bland dessa finns förbränningsmotorer, bränsleceller och elmotorer. Förbränningsmotorer innefattar så kallade dual-fuel-motorer som kan drivas eller drivas med mer än ett bränsle, dieselmotorer, ottomotorer och gasturbiner. I förbränningsmotorer och bränsleceller kan flera sorters bränslen och energibärare användas, medan elmotorer endast omvandlar elektrisk energi. Kategorierna kan underlätta utvärderingen av vilken teknik som passar bäst vid tillverkningen av ett nytt fartyg eller vid retro-fit (ombyggnation av ett befintligt fartyg), men ett lämpligt bränsle behöver också väljas.

4.2 RESULTAT OCH DISKUSSION: VIKTIGA KRITERIER ATT BEAKTA VID BEDÖMNING AV MARINA BRÄNSLEN

I kartläggningen av utvärderingskriterier som förekommer i publicerade artiklar och rapporter under 2017–2019, och som beskrivs i sin helhet i Andersson et al. (2020), framkommer att alternativa bränslen utvärderas mot många olika kriterier som varierar stort mellan utvärderingarna. Stora variationer förekommer även i vilka bränslen som utvärderas och vad dessa bränslen kallas.

I de olika utvärderingarna tas oftast tekniska förutsättningar för givet, trots att mindre beprövade bränslen kan kräva stora anpassningar av befintliga bränslesystem och innebära tekniska svårigheter jämfört med dagens system. Ett exempel på ett sådant bränsle är etanol, som förvisso kan användas i befintliga förbränningssystem, men som kräver andra insprutningssystem och har korrosiva egenskaper.

Vid ekonomiska bedömningar av olika bränslen står bränslepriset i fokus om bränslet redan finns på marknaden, medan produktionskostnaden är huvudaspekten för bränslen som ännu inte förekommer på marknaden. Det innebär att den ekonomiska bedömningen ofta görs med utgångspunkt i dagens situation och bortser från vad alternativa bränslen kan tänkas få för prisutveckling i framtiden, i takt med att produktionen får skalfördelar och infrastrukturen förbättras.

När miljömässiga aspekter utvärderas är växthusgasutsläpp den mest förekommande parametern. Var systemgränserna dras i dessa utvärderingar varierar dock. Många av studierna fokuserar på utsläppen vid energiomvandlingen och inkluderar inte utsläpp som genereras uppströms. Med ett sådant fokus framstår flytande naturgas (LNG) som ett mycket lovande bränsle eftersom det ger upphov till uppskattningsvis 20 % mindre växthusgasutsläpp vid förbränning, samtidigt som denna miljömässiga fördel kan försvinna helt om metanläckage i tidigare processteg tas med (Andersson et al., 2020).

Övriga kriterier, som bland andra geopolitiska aspekter, frågor om acceptans för ett bränsle, etiska aspekter, säkerhetsaspekter och politiska aspekter förekommer endast i ett fåtal av de studerade artiklarna och rapporterna (Andersson et al., 2020).

Ovan resultat indikerar en risk för att alternativa bränslen utvärderas på ett icke-strukturerat sätt eller endast utvärderas med utgångspunkt i dagens situation, trots att syftet är att uppnå en långsiktig och hållbar lösning. Därför rekommenderar vi ett mer strukturerat tillvägagångssätt och delvis en komplettering till de kriterier som redan förekommer i publicerad litteratur. Detta tillvägagångssätt tar hänsyn till att olika typer av kriterier kan behöva beaktas beroende på om bränslena kan användas i befintliga eller nya typer av framdrivningssystem (för sjöfarten).

För bedömning av ett alternativt bränsle kan ett ”beslutsträd” med kriterier av relevans för de olika fallen behövas. Till exempel är kriterierna mycket färre för en övergång från fossil diesel till biodiesel än för bytet till ett bränsle med andra fysikaliska och kemiska egenskaper som alkoholer eller gaser. I tabell 1 presenteras vårt förslag till kriterier för utvärdering av marina bränslen (vilka också kan användas som grund för att utvärdera drivmedel för andra sektorer). Vi rekommenderar som ett minimum att använda de i fetstil markerade underkriterierna vid utvärdering av framtida marina bränslen för olika aktörer.

Tabell 1. Förslag på minsta antal kriterier som kan ligga till grund för utvärdering av bränslen och framdrivningssystem. De i fetstil markerade underkriterierna bör alltid ingå i utvärderingen.

| Bedömningskriterier för bränslen som kan användas i <u>befintliga fartyg</u> . | |
|---|---|
| Miljömässiga kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Växthusgasutsläpp under livscykeln, med ett tids-perspektiv på 20 och 100 års sikt • Utsläpp som omfattas av styrmedel och regelverk • Utsläpp av skadliga ämnen som kan komma att regleras i framtiden |
| Tekniska kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Anpassning av framdrivningssystemet som behöver utföras • Underhållsbehov |
| Ekonomiska kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Kostnad för retro-fit • Bränslepris • Produktionskostnad för bränslet |
| Övriga kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Säkerhet • Tillgänglig infrastruktur • Tillgång till bränsle på sikt |
| Bedömningskriterier för bränslen som kan användas i för sjöfarten <u>nya typer av framdrivningssystem</u> . | |
| Miljömässiga kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Växthusgasutsläpp under livscykeln, med ett tidsperspektiv på 20 och 100 års sikt • Utsläpp som omfattas av styrmedel och regelverk • Utsläpp av skadliga ämnen som kan komma att regleras i framtiden |
| Tekniska kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Teknisk mognad • Teknisk komplexitet • Förväntat underhållsbehov |
| Ekonomiska kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Total kostnaden för ägande av fartyget ur livscykelperspektiv • Uppskattad produktions-kostnad för bränslet |
| Övriga kriterier | <ul style="list-style-type: none"> • Säkerhet • Tillgänglig infrastruktur • Tillgång till bränsle på sikt |

För att börja gå över till bränslen som bidrar stort till minskade växthusgasutsläpp behöver utsläpp av fossilt kol i ett livscykelperspektiv vara den högst prioriterade aspekten vid val av bränsle. Bränslen som uppfyller detta kriterium i behöver utvärderas ur ett multikriterieperspektiv. Eftersom utvärderingar av marina intressenters preferenser har visat på betydelsen av ekonomiska faktorer behövs mer transparenta multikriteriebedömningar. I utvärderingar av marina bränslen rekommenderar vi att de primära energikällor som används och de produktionsvägar som beaktas ska anges tydligt i bedömningen. Det är även viktigt att hela livscykeln för ett bränsle eller för nya typer av framdrivningssystem tas i beaktning även för kostnader och annan påverkan än växthusgasutsläpp. För att uppnå minskade växthusgasutsläpp måste utsläppen av växthusgaser omfattas av kraftiga regleringar. Frivilliga initiativ bidrar och driver marknaden för alternativa bränslen tillsammans med nuvarande styrmedel som påverkar bränslen, men kostnadskonkurrensen skapar ändå ett behov av regleringar. Därför är det glädjande att se de initiativ från EU och IMO som annonserats under tiden som projektet pågått.

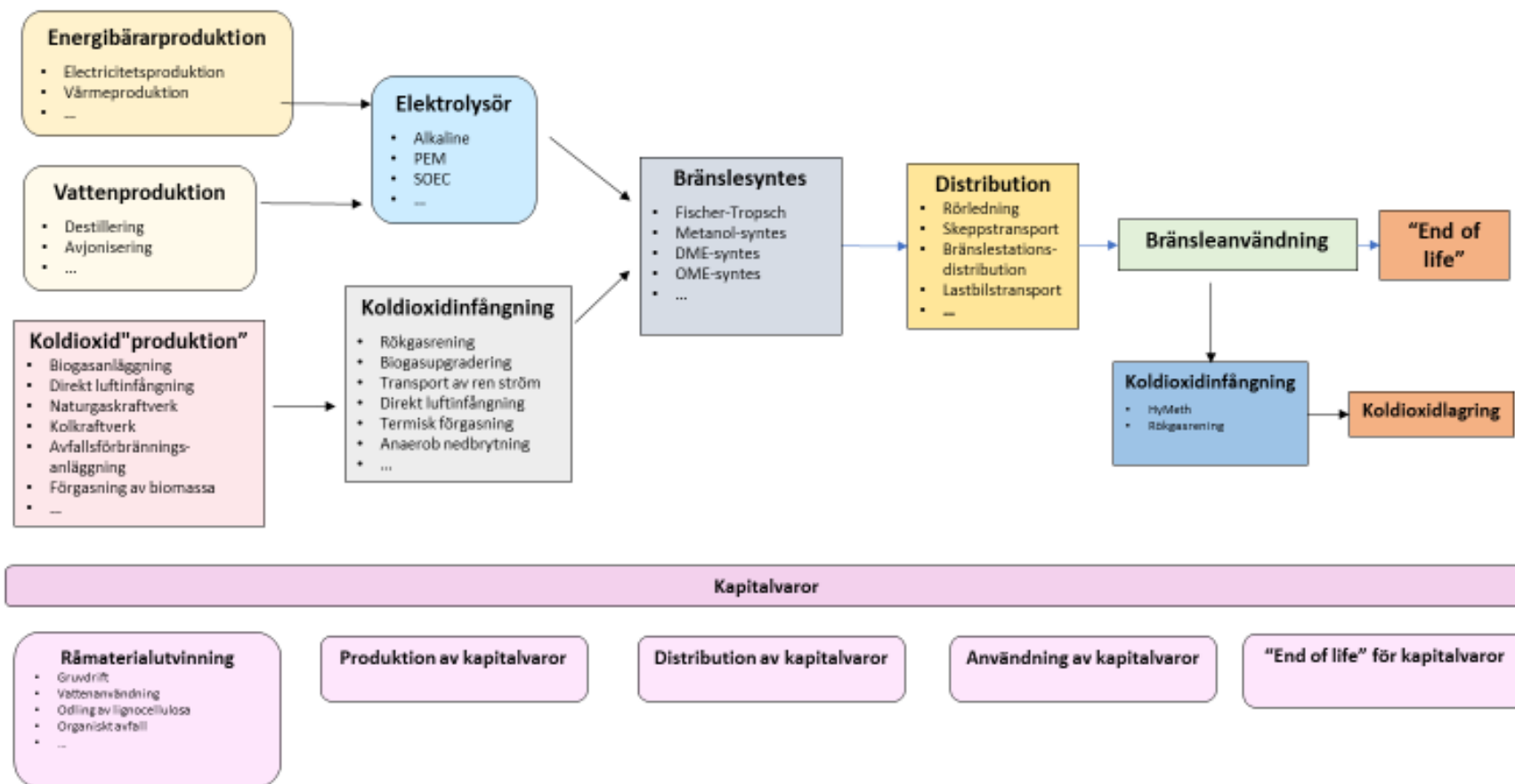
5 GRANSKNING OCH ANALYS AV ELEKTROBRÄNSLENS MILJÖPÅVERKAN

5.1 INLEDNING

Materialkrav, energibehov och utsläpp till miljön varierar beroende på vilka tekniker och bränslen som används. Dessa aspekter påverkar i gengäld resultaten av miljöbedömningar av till exempel olika produktionsvägar för elektrobränsle. Olika material har olika miljöpåverkan, såsom olika utsläppsnivåer av växthusgasutsläpp, och så kallade "uppströmsutsläpp" från elektricitet som används, eller metallbrytning, varierar mellan olika val. Drivmedel påverkar inte bara den omgivande miljön när fartyg och flyg används, utan även de mänskliga aktiviteterna kopplade till att producera bränslet och framdrivningsutrustningen har utsläpp.

I denna del av rapporten sammanfattas kort våra analyser av elektrobränslets miljöpåverkan som specifikt fokuserat på den möjliga miljöpåverkan från användningen av elektrobränslen på fartyg. Detta har undersökts genom en kartläggning och granskning av existerande livscykelanalyser (LCA) av elektrobränslen (redovisas i detalj i Grahn et al., 2022, kommande publicering) och genom en översiktlig LCA av utvalda elektrobränslekedjor för användning på ett fartyg, med diskussion av de faktorer som påverkar utfallet (redovisas i Malmgren, 2021 och Malmgren et al., 2021). Elektrobränslets potential för olika transportslag analyseras vidare i Brynolf et al (2022, kommande publicering).

Några av de största utmaningarna med att bedöma miljöprestanda för elektrobränslen är relaterade till vad som ingår i livscykeln (Malmgren, 2021). För att kunna bedöma miljöpåverkan av elektrobränslen behövs kunskap om den framtida produktionsvägen, användningsegenskaper, utsläpp till miljön och effektivitetsvinster. En inventering av utseendet av livscykeln för elektrobränslen är därför viktig, och i Figur 7 visas en summering av identifierade möjliga utseenden.



Figur 7. Bild av möjliga livscykelvarianter för elektrobränslen inom sjöfarten. Översatt och anpassad från Malmgren (2021).

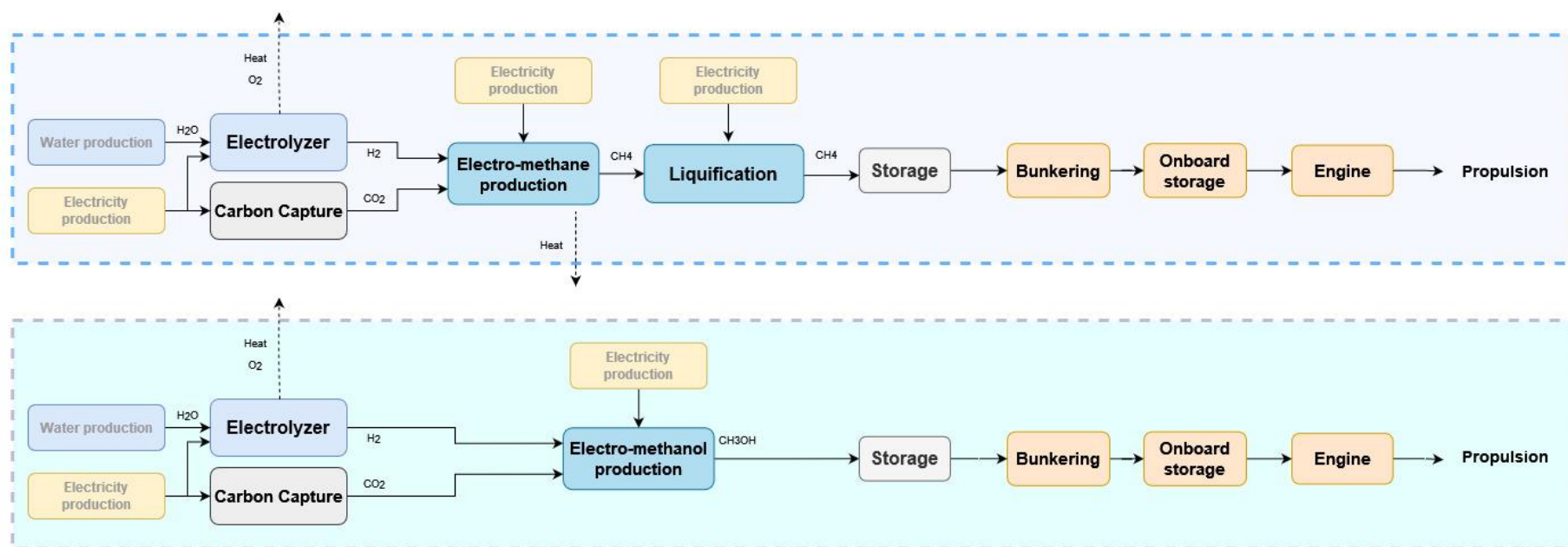
5.2 EXISTERANDE LCA PÅ ELEKTROBRÄNSLEN

Sjutton livscykelanalysstudier av elektrobränslen har identifierats, liksom ytterligare 24 vetenskapliga artiklar som behandlar elektrobränslets miljöprestanda i stort (Grahm et al., 2022). Resultat och analyser från dessa artiklar har jämförts för att kunna fastslå om det går att dra några generella slutsatser kring miljöpåverkan av elektrobränslen. Systemgränsen och ingående teknologier varierar mellan bedömningarna i de identifierade artiklarna. Detta beror på att de undersöker olika forskningsfrågor och system, eller har gjorts för att förenkla bedömningsmodellen. Vissa generella slutsatser har ändå identifierats.

Genom jämförelsen och tillhörande analyser har det visat sig hur tillgång till förnybar el är ett krav för att elektrobränslen ska bidra till lägre klimatpåverkan. En minskad klimatpåverkan kanske dock kan uppnås med en blandning av el från förnybara och andra energikällor motsvarande de elproduktionsblandningar som finns i Europa idag. Andra huvudsakliga påverkande faktorer inkluderar hållbarheten hos kolkällan, marina motoregenskaper, råvaruutvinning och energikrav för stödsystem vid bränsleproduktion. Grahm et al. (2022, kommande publicering) sammanfattar och går igenom den nuvarande kunskapen om miljöpåverkan från elektrobränslen och presenterar mer i detalj de huvudsakliga påverkande faktorerna i de redan publicerade resultaten.

5.3 RESULTAT: MILJÖPÅVERKAN FRÅN ELEKTROBRÄNSEN

Två separata livscykelanalysstudier har genomförts kopplat till projektet, en med fokus på elektrometanol (publicerad i Malmgren et al., 2021) och en med fokus på elektrometan. Den senare har presenterats på vetenskapliga konferenser men i dagsläget finns ännu ingen skriftlig publikation. Elektrometanstudien har utförts tillsammans med systerprojektet *Är LBG en del av lösningen på sjöfartens utsläpp av växthusgaser?* som också finansierats inom samma forskningsprogram som projektet bakom denna rapport. Fokuset på sjöfart för både elektrometanol och elektrometan valdes för att kunna jämföra dessa två alternativ med andra alternativa bränslen för sjöfarten. LCA utfördes enligt ISO14044-standard (2006) och baseras på rekommendationerna för kolavskiljning och användningsrelaterade LCA-studier från van der Assen et al. (2013) och Müller et al. (2020). En översiktlig beskrivning av den LCA-modell som används för analysen av elektrometan och elektrometanol finns i Figur 8.



Figur 8. Generell modellbeskrivning av LCA för elektrometanol (nedre delen av figuren) och elektrometan (övre delen av figuren). De gråskuggade boxarna visar processer som är modellerade via data från databaser, så kallade "bakgrundsprocesser". Icke-skuggade boxar är modellerade i detalj i livscykelanalysmodellerna.

5.3.1 Elektrometanol

I Malmgren et al. (2021) presenteras en livscykelmodell för två olika framdrivningssystem som använder sig av elektrometanol: en rak elektrometanolanvändning i en så kallad RoPax färja, och en där elektrometanol används i kombination med ett CO₂-infångningssystem ombord. Resultaten visar att det är möjligt att genomföra en livscykelanalys på användning av dessa framdrivningsalternativ i sjöfarten, och pekar på vilken potentiell miljöpåverkan som användningen av elektrometanol kan komma att ha om det implementeras i sjöfarten. Jämfört med marin gasolja visar båda fallen en markant reduktion av klimatpåverkan, partikelutsläpp, övergödningseffekter och försurning. Miljöpåverkan liknar den vid användningen av biogen metanol. Det finns en risk att elektrobränslen som elektrometanol kan leda till högre påverkan på människors hälsa än dagens konventionella bränslen. Det verkar bero på behovet av el, men i vilken utsträckning är osäkert och det påverkas av begränsningar i metoden för livscykelbedömning av marina bränslen. Genom känslighetsanalys konstateras att dessa resultat är osäkra. De behöver studeras mer ingående i framtida bedömningar av elektrobränslen.

Detaljerade jämförelser mellan biogena bränslen och elektrobränslen kan vara intressant för att titta vidare på exempelvis markanvändningen vid olika bränslealternativ. LCA-resultaten är i allmänhet väldigt känsliga för valet av källa för produktion av el som används vid produktionen av elektrometanol, för försurning och partikelutsläpp likväl som klimatavtrycket.

5.3.1 Elektrometan

De inledande resultaten i den andra LCA-studien visar att elektrometan kan bli ett intressant alternativ till flytande naturgas (LNG) i sjöfarten om förnybar el används i produktionen av elektrobränslet. Implementering av elektrometanol kan potentiellt leda till minskat markbehov jämfört med om till exempel endast förvätskad biogas används i den framtida flottan. Eftersom markanvändning är en viktig faktor i biobränslediskussionen bör detta utredas vidare.

Flera värdekedjor har undersökts för att producera elektrometan, inklusive en hybridprocess där biometan och elektrometan produceras i symbios. Initiala resultat visar att användning av elektrometan producerad från CO₂ från biogasuppträdning verkar kunna ha den bästa klimatpåverkanprofilen, men för alla metanbaserade framdriftsalternativ finns det risk för ökade växthusgasutsläpp på grund av läckage av metan i försörjningskedjan. Läckage av metan i motorn har en betydande effekt på LCA-resultaten, motsvarande cirka 10–30 % av den totala klimatpåverkan, uttryckt som GWP100-påverkan, beroende på motorteknik och bränsleproduktionsväg. Två olika typer av metanbaserade motorer har använts i bedömningen: Högtrycks 2-taktsmotorer och lågtrycks 4-taktsmotorer. Högtrycksmotorerna har vanligtvis högre NO_x-utsläpp och lägre metanslip, medan lågtrycksmotorerna har högre metanslip och lägre NO_x-utsläpp. En potentiell trade-off identifierades mellan LNG och flytande elektrometan: Användningen av elektrometan kan leda till en ökad påverkan på giftighet i naturen och hos människor på grund av högre elbehov. Samma resultat återfinns i litteraturen behandlad i Grahn et al. (2022, kommande publicering) som undersöker giftighet, och i Malmgren et al. (2021), men arbete pågår för att identifiera storleksordningen på denna påverkan. De relevanta utsläppen som ingår i en klassisk LCA av bränslen är begränsade och detta resultat behöver utredas ytterligare.

5.4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Två LCA-modeller har arbetats fram för elektrobränslesutvärdering. Dessa är i linje med publicerad vetenskaplig litteratur, men nya metodfrågor dyker upp kontinuerligt när mer detaljerade studier utförs. De största identifierade utmaningarna när en modell av LCA över en elektrobränslekedja ska byggas är att bestämma funktionen för systemet, identifiera alternativa tekniker, undersöka alternativa källor för CO₂ och el, göra en utförlig känslighetsanalys över relevanta parametrar, säkra tillgänglighet till relevant data, och inkludera tillräckligt många olika typer av miljöpåverkan för att få en helhetsbild av bränslets miljöpåverkan (Malmgren, 2021).

Ett tillvägagångssätt som föreslås för att göra tidiga jämförelser mellan olika elektrobränslekedjor och andra flytande bränslen är att använda direkt infångning av CO₂ från luft som ett basfall för att kunna visa på fall där ursprunget för CO₂ är tydligt. Infångning från rökgas kan vara en blandning mellan fossil och biogent ursprung, och även i frågan om biogena material är den långsiktiga hållbarheten och tillgången oklar för tidiga tekniklägen. Ytterligare diskussion kring vilka forskningsfrågor som än är olösta kring användande av LCA för att utvärdera elektrobränslen går att finna i Malmgren (2021).

LCA kan användas för att ta itu med frågor relaterade till marina bränslens livscykelmiljöprestanda, men som fristående stöd till beslutsfattare är möjligheterna med den begränsade (Malmgren, 2021). Metoden är mindre lämplig för att ta itu med icke-linjära och icke-miljömässiga aspekter av bränsleval. Intressenternas involvering och medvetenhet om de begränsningar som är förknippade med metodval är centralt för bedömningens validitet. LCA bör därför kompletteras med andra verktyg för övergripande bedömningar. Det är också möjligt att resultaten från en LCA inte kommer att påverka det slutliga bränslevalsbeslutet, men de kan ändå användas för att stödja ett sådant beslut eller påverka utformningen av produktionsprocesser.

6 EFFEKTER AV STYRMEDEL PÅ KOSTNADSEFFEKTIVITETEN FÖR FÖRNYBARA FLYGBRÄNSLEN I SVERIGE

6.1 INLEDNING OCH TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

Eftersom luftfarten än så länge är beroende av konventionella flygbränslen (jetbränslen) är hållbara bränslen med låga växthusgasutsläpp en viktig del av hur den förväntade tillväxten inom sektorn (se avsnitt 3.1) ska ske på ett CO₂-neutralt sätt. Ett exempel på sådana bränslen är drop-in-bränslen som framställs från biomassa eller andra förnybara energikällor.

Syftet med studien som sammanfattas i detta avsnitt (Trinh 2021) är att besvara frågan om hur olika politiska styrmedel för luftfarten kan främja produktionen av förnybart jetbränsle och uppnå minskade utsläpp av växthusgaser i Sverige på ett kostnadseffektivt sätt. För att uppfylla syftet utformades en modell med Sverige som utgångspunkt, där effekterna på produktionen av förnybart jetbränsle av olika möjliga politiska initiativ studerades: CO₂-pris, reduktionsplikt, och en straffavgift om reduktionsplikten inte uppfylls. För analysen utformades en optimeringsmodell som presenterar kostnadseffektiva lösningar för introduktion av förnybara flygbränslen i Sverige och som inkluderar rumsliga, tidsmässiga, miljömässiga och teknoekonomiska aspekter. Som alternativa jetbränslen inkluderar biomassaförgasningsbaserade Fischer-Tropsch (FT) jetbränsle, Power-to-Liquid (PTL) jetbränsle (det vill säga elektrobränsle-jetbränsle) genom FT-rutten och HTL-baserat (hydrotermisk förvätskning) flygbränsle. Hydrobehandlade estrar och fettsyror (HEFA) finns också med som alternativ men modelleras mer förenklat.

Analysen utfördes genom ett examensarbete som utformades tillsammans med ett annat projekt och där forskare i detta projekt bidrog som handledare (Trinh, 2021). Arbetet resulterade även i en gemensam vetenskaplig artikel (Trinh et al., 2021).

Denna del av arbetet kopplar till projektets forskningsområde men har inte specifikt utformats som huvudleverans för något av projektets forskningsmål.

6.2 RESULTAT, DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Sverige har rikligt med inhemska resurser (till exempel skogsrester, jordbruksrester, biogen CO₂ och förnybar energi) för att producera hållbara flygbränslen, förutsatt att effektiva styrmedel finns på plats. Resultaten från denna studie visar på vikten av att införa styrmedel som kan stödja en produktion av biojetbränsle i Sverige.

En reduktionsplikt är ett effektivt styrmedel som både främjar produktionen av bränsle och minskade CO₂-utsläpp. Den nuvarande nivån på straffavgiften (6 SEK/kg CO₂-ekvivalent) som åläggs leverantörer som inte uppfyller reduktionsplikten är dock för låg för att kunna främja en övergång till biojetbränsle i form av FT, PTL eller HTL-jetbränslen. Att sätta ett högre krav på inbladning och att prissätta CO₂ skulle accelerera omställningen till förnybara och hållbara bränslen inom luftfarten.

Att PTL-processen kan generera ytterligare intäkter från att sälja biprodukter av diesel och bensin, gör till exempel att det kan bli ekonomiskt genomförbart att möta efterfrågan på flygbränsle via

reduktionsplikten med PTL, givet ett strängare krav på reduktionsplikten än dagens. I PTL-processen kan intäkterna också genereras från ytterligare biprodukter såsom värme och syre, men det har inte ingått i denna studie. PTL-jetbränsle är elkrävande. Den optimala platsen för produktion av PTL visade sig därför vara vid biomassabaserade kraftvärmeverk med närhet till flygplatser eller som ligger i den del av norra Sverige som har de lägsta elpriserna. Fortsatta analyser av styrmedel och produktionsvägar för förnybara flygbränslen behövs när utvecklingen fortskrider för att ge kompletterande beslutsunderlag.

7 REFERENSER

- Andersson, K., Brynolf, S., Hansson, J., & Grahn, M. (2020). Criteria and decision support for a sustainable choice of alternative marine fuels. *Sustainability*, *12*(9), 3623.
- ben Brahim, T., Wiese, F., & Munster, M. (2019). Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study. *Energy*, *188*, 116009.
- Brynolf, S., Hansson, J., Anderson, J., Ridjan Skov, I., Wallington, T., Grahn, M., Korberg, A., Malmgren, E., Taljegård, M. (2022). Review of electrofuel feasibility - Prospects for road, ocean, and air transport. Submitted for publication in Special issue of Progress in Energy (PRGE).
- Cherie, L. (2018). When will biofuels be economically feasible for commercial flights? Considering the difference between environmental benefits and fuel purchase costs. *J Clean Prod*, *181*, 365-373.
- Chryssakis, C., Brinks, H., Brunelli, A., Fuglseth, T., Lande, M., & Laugen, L. (2017). *Low carbon shipping towards 2050*. Høvik: DNV GL.
- Dahal, K., Brynolf, S., Xisto, C., Hansson, J., Grahn, M., Grönstedt, T., & Lehtveer, M. (2021). Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *151*, 111564.
- Dahal, K., Brynolf, S., Xisto, C., Hansson, J., Grahn, M., Grönstedt, T., & Lehtveer, M. (2020) Reviewing the Development of Alternative Aviation Fuels and Aircraft Propulsion Systems. Book of abstracts, Vol 1, 3rd ECATS Conference, Making Aviation Environmentally Sustainable.
- DNV GL. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels, 2019-0567*. DNV GL, Rev, 3.
- Eide, M., Longva, T., Hoffmann, P., Endresen, Ø., & Dalsøren, S. (2011). Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions. *Maritime Policy Management*, *38* (1), 11-37.
- Energy Information Administration (EIA). (2019). *Natural Gas—Henry Hub Natural Gas Spot Prices 2019*. Hämtat från U.S. Department of Energy: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdW.htm> [2019-11-28]
- Energy Information Administration (EIA). (n.d.). *Petroleum and other liquids*. Hämtat från U.S. Department of Energy: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdW.htm> [2019-11-28]
- ETSAP. (2018). *Energy Technology Systems Analysis Program*. Hämtat från International Energy Agency: <https://iea-etsap.org/>
- Gilbert, P., Bows-Larkin, A., Mander, S., & Walsh, C. (2014). Technologies for the high seas: meeting the climate challenge. *Carbon Management*, *5*(4).
- Grahn, M., Malmgren, E., Korberg, A., Taljegård, M., Anderson, J., Brynolf, S., Hansson, J., Ridjan Skov, I., Wallington, T. (2022). Review of electrofuel feasibility - Cost and environmental impact. Submitted for publication in Special issue of Progress in Energy (PRGE).

- Halim, R., Kirstein, L., Merk, O., & Martinez, L. (2018). Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment. *Sustainability*, 10, 2243.
- Hansson, J., Brynolf, S., Grahn, M., Hagberg, M., Karlsson, K. (2021). Fuel choices for different transport modes when decarbonizing the Scandinavian energy system. Proceedings of the European Biomass Conference & Exhibition (EUBCE) 2021, 26-29 April 2021.
- Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E., & Lehtveer, M. (2020). The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel – Based on Energy Systems Modelling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability*, 12(8), 3265.
- Hansson, J., Brynolf, S., Grahn, M., Hagberg, M., Karlsson, K. (2020b). Decarbonizing Nordic Transports – The Role of Alternative Aviation Fuels. Book of abstracts, Vol 1, 3rd ECATS Conference, Making Aviation Environmentally Sustainable.
- Hansson, J., Hagberg, M., Hennlock, M., & Karlsson, K. (2019). *Sustainable Horizons in Future Transport - with a Nordic focus*. Hämtat från Nordic Energy: <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2019/10/Summary-and-briefs.pdf>
- Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative Marine Fuels: Prospects Based on Multi-Criteria Decision Analysis Involving Swedish Stakeholders. *Biomass Bioenergy*, 126, 159-173.
- IEA, 2020. World Energy Outlook 2020. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IMO. (2018). *Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector*. International Maritime Organization (IMO).
- International Civil Aviation Organisation (ICAO). (2019). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Hämtat från <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>.
- International Energy Agency (IEA) & Nordic Energy Research (NER). (2013). *Nordic Energy Technology Perspectives. Pathways to a Carbon Neutral Energy Future*. Hämtat från International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/nordic-energy-technology-perspectives>
- International Energy Agency (IEA) & Nordic Energy Research (NER). 2016. Nordic Energy Technology Perspectives 2016. Available at: <https://www.nordicenergy.org/project/nordic-energy-technology-perspectives/>.
- Irena. (2017). *Biofuels for aviation: technology brief*. Hämtat från <https://www.irena.org/publications/2017/Feb/Biofuels-for-aviation-Technology-brief>
- ISO. (2006). *Life cycle assessment—requirements and guidelines*.

- Kousoulidou, M., & Lonza, L. (2016). Biofuels in aviation: fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030. *Transport Res Transport Environ*, 46, 166-81.
- Malmgren. (2021). *Towards sustainable shipping: Evaluating the environmental impact of electrofuels*. Göteborg: Chalmers university of technology. Thesis for the degree of licentiate of philosophy.
- Malmgren, M., Brynolf, S., Borgh, M., Ellis, J., Grahn, M., & Wermuth, N. (2020). The HyMethShip concept: an investigation of system design choices and vessel operation characteristics influence on life cycle performance. *Proceedings of 8th Transport Research Arena*.
- Malmgren, M., Brynolf, S., Fridell, E., Grahn, M., & Andersson, K. (2021). The environmental performance of a fossil-free ship propulsion system with onboard carbon capture – a life cycle assessment of the HyMethShip concept. *Sustainable Energy Fuels*, 5, 2753-2770.
- Müller, J., Kätelhön, A., Bachmann, M., Zimmermann, A., Sternberg, A., & Bardow, A. (2020). Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. *Frontiers in Energy Research*, 8.
- Salvucci, R., Gargiulo, M., & Karlsson, K. (2019). The role of modal shift in decarbonising the Scandinavian transport sector: Applying substitution elasticities in TIMES-Nordic. *Applied Energy*, 253, 113593.
- Salvucci, R., Petrovic, S., Karlsson, K., Wråke, M., Priya Uteng, T., & Balyk, O. (2019). Energy scenario analysis for the Nordic transport sector: A critical review. *Energies*, 12(11), 2232.
- Schäfer, A., Evans, A. D., Reynolds, T. G., & Dray, L. (2015). Costs of mitigating CO2 emissions from passenger aircraft. *Nat Clim Change*, 6, 412.
- Skytte, K., & Bramstoft Pedersen, R. (2018). Decarbonising the Finnish Transport Sector by 2050—Electricity or Biofuels? i D. Leal Filho W. & Surroop, *The Nexus: Energy, Environment and Climate Change. Green Energy and Technolog*. Springer.
- Stopford, M. (2009). i *Maritime Economics*. London: Routledge.
- Taljegård, M., Brynolf, S., Grahn, M., Andersson, K., & Jonsson, H. (2014). Cost-effective choices of marine fuels in a carbon-constrained world: Results from a global energy model. *Environmental Science and Technology*, 48(21).
- The International Air Transport Association. (2019). *IATA. Now for something completely different*. Hämtat från <https://www.airlines.iata.org/analysis/now-for-something-completely-different> [2020-03-01]
- Trinh, J. (2021). Techno-economic assessment for optimised renewable jet fuel production in Sweden. Master of Science Thesis, Department of Energy Technology, KTH School of Industrial Engineering and Management – TRITA-ITM-EX 2021:295.
- Trinh, J., Harahap, F., Fagerström, A., Hansson, J. (2021). What Are the Policy Impacts on Renewable Jet Fuel in Sweden? *Energies* 2021, 14, 7194.

UNCTAD. (2011). *Review of Maritime Transport 2011*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD).

van der Assen, N., Jung, J., & Bardow, A. (2013). Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls. *Energy & Environmental Science*, 6(9), 2721-2734.

Wang, W.-C., & Tao, L. (2016). Bio-jet fuel conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 801-822.

Wormslev, E., & Broberg, M. (2020). *Sustainable Jet Fuel for Aviation Nordic perspectives on the use of advanced sustainable jet fuel for aviation - Update 2019*. Nordic Energy Research (NER). Hämtat från <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2020/01/Sustainable-Jet-Fuel-Update-FinalNER.pdf>

Wormslev, E., Pedersen, J., & Eriksen, C. (2016). *Sustainable jet fuel for aviation – Nordic perspectives on the use of advanced sustainable jet fuel for aviation (TemaNord 2016:538)*.



CHALMERS



www.energimyndigheten.se



www.f3centre.se