



Baggrundsrapport

Teknologier til at reducere klimapåvirkning fra luftfart

Baggrundsrapport til analysen *Luftfartens klimapåvirkning – en analyse af teknologier og EU's reguleringsgreb*.

Indhold

1	Sammenfatning	2
2	Drivhusgasaftryk	10
3	Non-CO ₂ -effekter	22
4	Bioessourceforbrug	26
5	Energiforbrug	30
6	Barrierer for opskalering uden for sektoren	41
7	Teknologisk modenhed	55
8	Sektor- og samfundstilpasning	60
9	Omkostninger i dag	67
10	Forventet fremtidig omkostning	77
11	Bilag 1: Effekt på klimaet af biomasseforbrug til BECCS	87
	Referencer	89

1 Sammenfatning

Denne baggrundsrapport præsenterer en række teknologier til reduktion og kompensation af luftfartens udledninger og en række udvalgte parametre til sammenligning af teknologierne. En parameter kan fx være energiforbrug eller drivhusgasaftryk af teknologierne. Alle teknologier analyseres med udgangspunkt i hver parameter, hvilket gør det muligt at opstille et systematisk overblik.

1.1 Præsentation af teknologier til reduktion og kompensation af luftfartens udledninger

Klimarådet har udvalgt en række teknologier til nærmere analyse på baggrund af en kortlægning af teknologier, der ifølge litteraturen har potentiale for at reducere udledningerne i sektoren. Her vurderes, at de udvalgte teknologier er repræsentative for de løsninger, der med stor sandsynlighed vil spille en central rolle i luftfartens omstilling frem mod 2050.

Klimarådet vurderer at der er tre overordnede måder at mindske klimapåvirkningen på: ved teknologier til at reducere udledningen, teknologier til at kompensere for udledningen ved hjælp af permanente negative udledninger og ved tværgående omstillingsselementer.

Teknologier til at reducere udledninger

Lavaromatiske fossile brændstoffer

Hvad går teknologien ud på?

Lavaromatisk fossile brændstoffer produceres ved at tilsætte brint til konventionelt fossilt flybrændstof. Brint kan produceres ved elektrolyse med vand og el fra fx vedvarende energikilder.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Der flyves fortsat på fossilt brændstof, men en 'renere' variant, der ikke i samme grad fører til kondensstribe- og cirrus skydannelse ved afbrænding. Det medfører derfor ikke i lige så høj grad non-CO₂-effekter som konventionelt fossilt brændstof.

Elektrobrændstoffer

Hvad går teknologien ud på?

Elektrobrændstoffer, også ofte refereret til som power-to-jet (PtJ), produceres ved først at producere brint, og derefter kombinere brinten med indfanget CO₂ for at danne et flydende syntetisk flybrændstof. Den indfangede CO₂ kan komme fra forskellige kilder. Denne analyse vil fokusere på fangst fra biomasseanlæg (BEC) samt direkte fangst fra luften (DAC). Brinten kan produceres ved elektrolyse med vand og el fra fx ikke-fossile energikilder. Man kan producere flybrændstoffet ved forskellige teknologier. Vi vil i denne rapport fokusere på de to elektrobrændstoffer beskrevet i Tabel 1.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Elektrobrændstoffer erstatter helt eller delvist fossilt brændstof i eksisterende fly og reducerer dermed CO₂-udledningen. Brændstoffet har et lavere aromatindhold sammenlignet med fossilt flybrændstof og reducerer derfor også non-CO₂-effekter.

Tabel 1: Beskrivelse af undersøgte elektrobrændstoffer

Flybrændstof	Teknologivej	ASTM godkendt	CO ₂ -kilde
Power-to-jet (Fischer Tropsch) PtJ(FT)	Producers ved at kombinere brint og CO ₂ til syntesegas som konverteres til flybrændstof blandt andet via Fischer Tropsch syntese.	ASTM D7566 Annex A1	DAC/BEC
Power-to-jet (Methanol-to-jet) PtJ(MtJ)	Producers ved at kombinere brint og CO ₂ til metanol via metanol syntese som derefter omdannes til flybrændstof.	Under evaluering	DAC/BEC

Anm. 1 Andre CO₂ kilder end BEC og DAC kan benyttes, men denne analyse kigger kun på disse to.

Kilder: ICAO ¹, Energistyrelsen² og Klimarådet.

Biobrændstoffer

Hvad går teknologien ud på?

Biobrændstoffer produceres ved at omdanne bioressourcer til brændstoffer. Det kan gøres med mange forskellige typer af bioressource som input og ved hjælp af flere forskellige tekniske processer. Det resulterer derfor i mange typer af biobrændstof. Denne rapport vil fokusere på fire centrale biobrændstoffer, som er beskrevet i Tabel 2.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Biobrændstoffer erstatter helt eller delvist fossilt brændstof i eksisterende fly og reducerer dermed CO₂-udledningen. Iblandingskravene i *ReFuelEU Aviation* tilsiger blandt andet, at biobrændstoffer ikke skal være baserede på fødevarer- eller foderafgrøder. Biobrændstoffet kan i stedet baseres på fx brugt fritureolie, animalsk fedt, alger, gylle, halm, træaffald, men fx ikke majs, palmeolie, sojaolie eller rapsolie i primær form. Biobrændstoffet har færre non-CO₂-effekter end afbrænding af fossilt brændstof grundet lavere aromatindhold.

Tabel 2: Beskrivelse af undersøgte biobrændstoffer

Flybrændstof	Teknologivej	ASTM godkendt	CO ₂ -kilde
Bio-Fischer Tropsch (Bio-FT)	Producers ved gasificering af bioressourcer efterfulgt af en Fischer Tropsch syntese.	ASTM D7566 Annex A1	Husholdningsaffald, skov- og landbrugsrester samt energiafgrøder
Bio-methanol-to-jet (Bio-MtJ)	Producers ved først at fremstille alkoholen metanol via gasificering af bioressourcer efterfulgt af metanol syntese. Dernæst omdannes metanolen til flybrændstof.	Under evaluering	Husholdningsaffald, skov- og landbrugsrester samt energiafgrøder
Bio-Alcohol-to-jet (Bio-AtJ)	Producers ved først at producere alkohol fra bioressourcer via fermentering som derefter omdannes til flybrændstof. Vi vil i denne rapport fokusere på alkoholen ethanol.	ASTM D7566 Annex A5	Lignocelluløs biomasse
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)	Producers ved at hydroprocessere olier og fedtstoffer fx madolie eller animalsk fedt.	ASTM D7566 Annex A2	Affaldsfedt og -olier

Kilder: ICAO ³, Energistyrelsen ⁴ og Klimarådet.

El og brintfly

Hvad går teknologien ud på?

El- og brintfly benytter henholdsvis batterilagret strøm og brint som energikilde. Batterilagret strøm driver en elektrisk motor og kan fx komme fra vedvarende energikilder. Brint kan produceres ved elektrolyse med vand og el fra fx vedvarende energikilder. Brint kan enten drive en elektrisk motor ved brug af brændselsceller eller bruges direkte som brændstof.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

El- eller brintfly erstatter rejser med fossilt drevne fly og reducerer dermed CO₂-udledningen samt non-CO₂-effekter.

Teknologier til at kompensere for udledninger

Kompensation (BECCS)

Hvad går teknologien ud på?

BECCS er en forkortelse for Bioenergy with Carbon Capture and Storage. Teknologien er baseret på fangst og lagring af biogent CO₂ fra afbrænding af biomasse på kraftvarme- og affaldsanlæg, typisk træflis, træpiller, halm, organisk affald. Der kan også etableres fangstanlæg på andre biogene punktkilder som fx biogasopgraderingsanlæg eller industrielle procesanlæg. Men i denne analyse anvendes BECCS, altså fangst fra energianlæg, som eksempel på eller repræsentant for fangst af biogent CO₂ fra punktkilder.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Der flyves fortsat på fossilt brændstof, mens CO₂-udledninger herfra kompenseres ved, at flysektoren finansierer projekter uden for sektoren, fx ved køb af klimakreditter. Udledningen betragtes som kompenseret, når den negative udledning, som kreditterne repræsenterer, svarer til CO₂-udledningen fra afbrændingen af det fossile brændstof. Fossile merudledninger ved fangst og lagring fratrækkes i opgørelsen af kreditterne. Derved er der ikke nødvendigvis taget højde for alle klimapåvirkninger. Der vil fortsat være non-CO₂-effekter forbundet med brug af fossilt flybrændstof, medmindre disse også kompenseres for eller at denne løsning kombineres med andre løsninger som fx lavaromatiske fossile brændstoffer. Der kan være effekter på klimaet fra den biogene CO₂-udledninger forbundet med brug af biomasse til fangst og lagring. Hvis der er tale om en arealkrævende bioressource, kan der desuden potentielt være indirekte udledninger fra ændringer i arealanvendelsen. Disse effekter indregnes ikke i kreditopgørelsen og håndteres derfor ikke, medmindre der kræves en ekstra kompenseret mængde.

Kompensation (DACCS)

Hvad går teknologien ud på?

DACCS er en forkortelse for Direct Air Carbon Capture and Storage. DACCS fungerer ved, at atmosfærisk luft suges gennem store ventilatorer, hvor CO₂ bindes til enten et fast (solid DAC) eller flydende (liquid DAC) fangstmateriale. Ved opvarmning frigives CO₂ i koncentreret form og kan herefter lagres permanent i undergrunden.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Der flyves fortsat på fossilt brændstof, mens CO₂-udledninger herfra kompenseres ved, at flysektoren finansierer projekter uden for sektoren, fx ved køb af klimakreditter. Derved fås en negativ udledning, der svarer til udledningen fra afbrænding af fossilt brændstof, mens der fortsat vil være non-CO₂-effekter forbundet hermed. Non-CO₂-effekter håndteres derfor umiddelbart ikke, medmindre der kræves en ekstra kompenseret mængde eller at denne løsning kombineres med andre løsninger som fx lavaromatiske fossile brændstoffer.

Tværgående omstillingselementer

Klimarådet har identificeret 3 tværgående omstillingselementer, som alle er relevante for luftfarten i dag og fremadrettet, uanset hvilke teknologier og drivmidler der vinder indpas: Energieffektivisering, ændret ruteplanlægning og mindre rejseaktivitet. De tre omstillingselementer er ikke i konkurrence med hinanden eller de andre teknologier, men kan komplementere hinanden. De bygger i høj grad på allerede eksisterende løsninger og kan implementeres uden væsentlig ny teknologiudvikling eller etablering af nye værdikæder. Dog kan disse løsninger ikke stå alene i omstillingen af luftfarten. De kan derfor fungere som et supplement til de mere teknologitunge løsninger i omstillingen af sektoren.

Energieffektivisering

Hvad går teknologien ud på?

Energieffektivisering dækker blandt andet over energieffektivitetsforbedringer af flyene eksempelvis flystel og motordesign, i drift og infrastruktur, herunder lufttrafikstyring, lufthavnene og operation af flyene.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Ved øget effektivitet reduceres behovet for brændstof, hvilket reducerer CO₂e-udledninger. Renere forbrænding kan også reducere non- CO₂-effekterne.

Ruteplanlægning for at mindske non-CO₂-effekter

Hvad går teknologien ud på?

Teknologien går ud på at ændre ruteplanlægningen, så man undgår de områder og tidspunkter hvor risikoen for længerevarende kondensstribe- og cirruskydannelse er høj.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Ændret ruteplanlægning kan være en måde at reducere non-CO₂-effekter på, herunder kondensstribe- og cirruskydannelse. En tilpasset ruteplanlægning kan potentielt reducere en stor del af klimapåvirkningen, ved systematisk at identificere og undgå de områder og tidspunkter hvor risikoen for længerevarende kondensstriber er høj. Dette kan eksempelvis ske ved at justere flyvehøjde eller rutevalg. Derudover kan visse flyvninger omlægges væk fra nattetimerne, da kondensstribernes klimapåvirkning er større om natten end i dagtimerne.⁵

Baggrunden er, at en væsentlig del af luftfartens klimapåvirkning fra non- CO₂-effekter stammer fra dannelsen af kondensstriber og cirruskyer, som har en opvarmende effekt på klimaet.⁶ Disse kondensstriber kan blive i atmosfæren i minutter til timer alt afhængig af de atmosfæriske forhold. Ved bestemte kombinationer af temperatur og luftfugtighed i de relevante flyvehøjder, kan længerevarende kondensstriber dannes som har en høj negativ effekt på klimaet. Disse atmosfæriske lag findes ikke alle steder, hvilket betyder, at non- CO₂-effekterne er skævt fordelt geografisk. Dette resulterer i, at en relativt lille andel af flyvningerne står for en stor del af den samlede klimapåvirkning fra kondensstriber.⁷ Disse flyvninger forekommer typisk i bestemte geografiske områder, herunder over Europa, USA og Nordatlanten.⁸

Mindsket rejseaktivitet med fly

Hvad går teknologien ud på?

Mindske efterspørgslen af flyrejser.

Hvordan mindsker teknologien klimapåvirkningen?

Ved at flyve mindre, reduceres udledningerne fra luftfarten. Kan enten opnås gennem afgifter eller andre direkte virkemidler, eller indirekte som følge af stigende billetpriser på baggrund af indfasning af nye og dyrere teknologier.

1.2 Præsentation af analyseparametre

De forskellige teknologier analyseres ud fra en række udvalgte parametre. Denne tilgang muliggør en systematisk sammenligning. Klimarådet vurderer teknologierne på fire overordnede emner: klima, ressourcer, modenhed og økonomi. De specifikke parametre inden for hvert af disse emner er uddybet i boks 1.

Teknologiers effekt på klimaet undersøges først...

Selvom der findes teknologier, der kan mindske klimapåvirkningen, kan de stadig være forbundet med en vis drivhusgasudledning. Det er derfor relevant at analysere hvor godt, teknologierne reducerer udledningen sammenlignet med at flyve på fossil energi. Derudover er det relevant at analysere teknologierne i forhold til deres klimapåvirkning gennem non- CO₂-effekter, som i dag ikke indgår i de officielle opgørelser. Samtidig kan bioessourcebaserede løsninger lægge pres på begrænsede bioressourcer, som er ønsket til mange andre formål. Endelig kan den bagvedliggende infrastruktur og ressource tilgængelighed også udgøre barrierer for opskalering af teknologierne. For at belyse effekter på klima og ressourcer vurderes teknologierne ud fra følgende parametre: "Drivhusgasaftryk", "Non-CO₂-effekter", "Bioessourceforbrug", "Energiforbrug" og "Barrierer for opskalering uden for sektoren".

... og derefter undersøges teknologiers tekniske egenskaber...

De forskellige teknologier adskiller sig markant i, hvordan de bedst kan fremmes og implementeres. Nogle kræver fx grundlæggende ændringer i flysektoren og adfærd samt længere indfasningsperioder, mens andre kan anvendes direkte med eksisterende materiel og derfor kan implementeres hurtigere. Derudover varierer modenheden: visse teknologier er allerede kommercielt tilgængelige, mens andre kræver yderligere udvikling og understøttelse. For at belyse denne bredde vurderes teknologierne ud fra følgende parametre: "Teknologisk modenhed" og "Sektor- og samfundstilpasning".

... og endelig undersøges teknologiers omkostninger

Prisen er afgørende for, hvilke teknologier der vinder frem. Samtidig påvirkes prisudviklingen af en række faktorer, herunder teknologiske forhold og politiske rammer, hvilket skaber betydelig usikkerhed om, hvordan priserne vil udvikle sig fremover. Produktionsomkostningerne for grønne løsninger afhænger blandt andet af energipriser, råvareinput og teknologisk udvikling. For at håndtere denne usikkerhed vurderes priserne ud fra: "Omkostninger i dag" og "Forventet fremtidig omkostning".

Sammenligningen tydeliggør styrker og svagheder frem for et samlet skøn

Analysen af teknologier foretages med forskellige opgørelsesmetoder. Nogle parametre analyseres med kvantitative data og modeller, mens der for andre foretages en kvalitativ analyse, især inden for områder med begrænset data eller stor kompleksitet. De forskellige opgørelsesmetoder betyder, at parametrene opgøres i forskellige enheder, og at tilgangen dermed ikke fører til ét samlet samfundsøkonomisk skøn eller én værdi for 'bedste' løsning på tværs af alle parametre. Sammenligningen skal i stedet ses som et beslutningsgrundlag, der tydeliggør de centrale styrker, svagheder og afvejninger mellem teknologierne.

Analysen afgrænser sig fra at se på luftforurening og kritiske metaller, som også kunne være relevante parametre. Parameteren "Bioressourcer" anvendes som en indikator for negative påvirkninger af økosystemer og biodiversitet, som et træk på denne begrænsede ressource kan medføre.

Boks 1. Analyseparametre

Klimarådet analyserer teknologierne ud fra fire overordnede kategorier: klima, ressourcer, modenhed og økonomi.

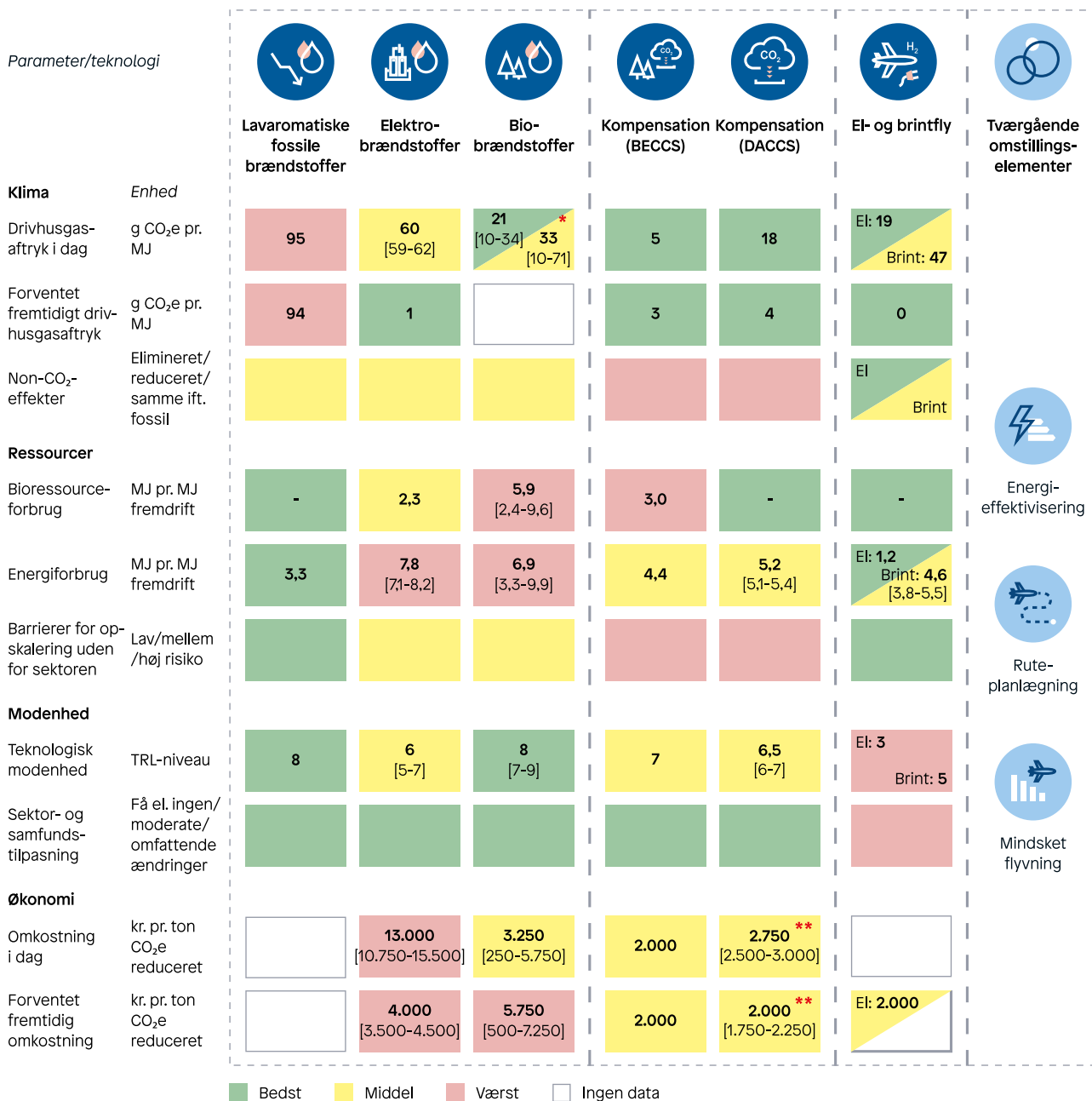
- **Klima:** Klimaparametrene belyser teknologienes effekter på klimaet ved hjælp af livscyklusmetoder og viden om non-CO₂-effekter.
 - **Drivhusgasaftryk:** Teknologienes udledning af drivhusgasser i et livscyklusperspektiv givet i g CO₂e pr. MJ flybrændstof til anvendelse eller kompenseret.
 - **Non-CO₂-effekter:** Kvalitativ vurdering af teknologienes påvirkning på klimaet gennem udledning af andre stoffer end drivhusgasser. Effekterne vurderes som værende på niveau med, reducerede eller eliminerede i forhold til fossilt flybrændstof.
- **Ressourcer:** Ressourceparametrene belyser, i hvilket omfang teknologierne trækker på ressourcer, som kan være knappe, eller om teknologierne forudsætter etablering af en infrastruktur, som involverer væsentlige risici og som kan udgøre en barriere for opskalering.
 - **Bioressourceforbrug:** Teknologienes bioenergiforbrug fra råinput til fremdrift og eventuelt kompensation, opgjort i MJ pr. MJ flybrændstof til fremdrift. Fremdriftsteknologien er inkluderet for at kunne sammenligne teknologier med forskellige motoreffektiviteter.
 - **Energiforbrug:** Teknologienes energiinput fra råinput til fremdrift og eventuelt kompensation, opgjort i MJ pr. MJ fremdrift. Fremdriftsteknologien er inkluderet for at kunne sammenligne teknologier med forskellige motoreffektiviteter.
 - **Barrierer for opskalering uden for sektoren:** Kvalitativ vurdering af væsentlige risici i den understøttende værdikæde uden for luftfartssektoren, herunder om der er dele af etableringen af værdikæden, som kan udgøre væsentlige barrierer for, at omstillingselementet kan opskaleres. Risikoen vurderes som lav, middel eller høj.
- **Modenhed:** Modenhedsparametrene belyser, i hvilket omfang yderligere teknologisk udvikling samt luftfartssektor- og samfundsmæssige tilpasninger er nødvendige for, at de enkelte løsninger kan realiseres i praksis.
 - **Teknologisk modenhed:** Vurdering af teknologienes udviklingsniveau i forhold til en kommerciel anvendelse. Vurderingen er baseret på en såkaldt TRL-skala (*Technology Readiness Level*).
 - **Sektor- og samfundstilpasning:** Kvalitativ analyse af hvor store ændringer infrastrukturen i luftfartssektoren og forbrugeroplevelsen skal gennemgå for, at en teknologi kan tages i brug. Der skelnes mellem få eller ingen ændringer, moderate ændringer og omfattende ændringer.
- **Økonomi:** De økonomiske parametre belyser omkostningerne forbundet med at reducere luftfartens klimapåvirkning gennem de enkelte teknologier.
 - **Omkostning i dag:** Estimat for teknologienes nuværende produktionsomkostning, opgjort som omkostning pr. reduceret eller kompenseret ton CO₂e-udledning.
 - **Forventet fremtidig omkostning:** Vurdering af, hvordan teknologienes produktionsomkostning forventes at udvikle sig i fremtiden (2040-2050), opgjort som omkostning pr. reduceret eller undgået ton CO₂e-udledning.

Analyseparametrene er som udgangspunkt vurderet med afsæt i teknologierne som de klarer sig i dag, svarende til et 2025-niveau. Vurderingen af fremtidige omkostninger og drivhusgasaftryk tager dog udgangspunkt i et forventet niveau i 2040-2050.

1.3 Sammenfatning af analyseresultater

Resultaterne af sammenligningen af de forskellige teknologier fremgår af Figur 1. Oversigten kan læses både på langs og på tværs. En læsning på kolonneniveau (lodret) giver et overblik over, hvordan den enkelte teknologi samlet set vurderes på de analyserede parametre. En læsning på rækkenniveau (vandret) muliggør en direkte sammenligning af de enkelte teknologier inden for hvert parameter.

Analyseparametrene er som udgangspunkt vurderet med afsæt i teknologiernes nuværende modenhed, svarende til et 2025-niveau. Vurderingen af fremtidige drivhusgasaftryk og omkostninger tager dog udgangspunkt i et forventet 2040-2050 niveau. De efterfølgende kapitler uddyber tilgange, analyser og resultater for hver parameter på tværs af teknologierne. Her redegøres også for grundlaget for de enkelte farvescorer.



Figur 1: Analyseresultater for teknologier

- Anm. 1: Farverne og tallene er baseret på gennemsnit af delteknologier inden for de forskellige teknologier. Spændet angiver hvor bredt delteknologierne varierer.
- Anm. 2: Analyseparametrene er som udgangspunkt vurderet med afsæt i teknologierne, som de klarer sig i dag svarende til et 2025-niveau. Vurderingen af fremtidige omkostninger og drivhusgasaftryk tager udgangspunkt i et forventet niveau i 2040-2050.
- Anm. 3: Drivhusgasaftryk for bio- og elektrobrændstoffer er angivet ved brug af to farver, afhængigt af forudsætninger om emissionsfaktor og ressourceinput. Dette uddybes senere i kapitlet.
* Rød stjerne skal fremhæve, at når konsekvensen af substitutionseffekter inddrages, så er drivhusgasaftrykket for biobrændstoffet HEFA i litteraturen opgjort til 135 g CO₂e pr. MJ, baseret på brugt fritureolie.⁹ Den grønne og gule farvescoring repræsenterer gennemsnittet af biobrændstoffer henholdsvis uden og med fødevareafgrøder.
- Anm. 4: For BECCS indgår tidsfaktorer for forbrug af træbiomasse ikke, som ellers påvirker klimaet. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt.
- Anm. 5: Enheden MJ pr. MJ fremdrift inkluderer effektiviteten for transport-, konverterings- og fremdriftsteknologi i flyene. Fremdriftsteknologien er inkluderet for at kunne sammenligne teknologier med forskellig motoreffektivitet.
- Anm. 6: Elektrobrændstoffer scorer gul for bioressourceforbrug, fordi der er regnet på brug af biogent CO₂ fra BECCS som input til elektrobrændstoffer. Ved anvendelse af DAC som CO₂-kilde, vil farven ændres til grøn.
- Anm. 7: Parameteren "Barrierer for opskalering uden for sektoren" analyserer, om den bagvedliggende infrastruktur og ressourcetilgængelighed udgør en risiko for barrierer for opskalering af teknologierne.
- Anm. 8: Parameteren "Sektor- og samfundstilpasning" analyserer, i hvilket omfang de enkelte teknologier forudsætter ændringer i den eksisterende luftfartssektor, og hvor omfattende disse ændringer er for forbrugeren.
- Anm. 9: Omkostningerne afspejler produktion af brændstof, CO₂-fangst og -lagring samt ny teknologi, der er nødvendig for at erstatte flybrændstof. Ved kompensation med BECCS og DACCS indgår forbrug af fossilt flybrændstof i beregningen.
- Anm. 10: Omkostninger for lavaromatiske brændstoffer i dag og i fremtiden kan ikke opgøres i samme enhed som de øvrige teknologier, og derfor er den hvid. Omkostninger for el- og brintfly i dag er angivet med hvid, da teknologien vurderes til at være på et tidligt udviklingsstadium. Omkostningen for brintfly indgår ikke kvantitativt i analysen, da der ikke foreligger et tilstrækkeligt teknoøkonomisk datagrundlag og forudsætninger for brintfly. Brintfly vurderes dog som minimum at have samme omkostningsniveau som elfly.
- Anm. 11: ** To røde stjerner fremhæver den betydelige usikkerhed, der knytter sig til omkostningerne ved DACCS, herunder både anlægs- og lagringsomkostninger. Derudover er en eventuel begrænset CO₂-lagringskapacitet ikke afspejlet i omkostningerne.
- Kilder: Fremgår af Klimarådets analyser inden for hvert parameter.

2 Drivhusgasaftryk

Klimaløsninger til luftfarten kan være forbundet med udledning af drivhusgasser set i et livscyklusperspektiv. Udledningerne i et livscyklusperspektiv kan opgøres med mange forskellige metoder, og det gør sammenligningen vanskelig, men på trods heraf kan der ved hjælp af livscyklusmetoder uddrages en forståelse af, hvor der kan være faldgruber, og om de er betydelige.

2.1 Begrundelse og tilgang

Et drivhusgasaftryk bidrager til forståelse af effekten på klimaet

Når man vil omstille luftfarten til nye teknologier, er det vigtigt at have styr på teknologiernes drivhusgasaftryk set i et livscyklusperspektiv. Det er vigtigt for at forstå, om teknologierne reelt har et lavere aftryk end fossile flybrændstoffer og om nogle teknologier har et lavere aftryk end andre. Med 'drivhusgasaftryk' menes her udledningen af drivhusgasser i et livscyklusperspektiv (fx fra energiforbrug i produktionen af et brændstof), se Figur 2.



Figur 2: Livscyklusstader for teknologiernes drivhusgasaftryk i denne analyse

Kilde: Klimarådet.

Det er forbundet med stor kompleksitet at opgøre drivhusgasaftryk

Målet med at opgøre et drivhusgasaftryk er at samle klimapåvirkningen i ét tal på en sammenlignelig måde. I praksis er det vanskeligt at sammenligne resultater fra forskellige studier. Nogle af de væsentligste årsager er forskellighed i:

- Afgrænsning af, hvad der indgår i opgørelsen
- Metoder
- Data

Det er dertil en generel udfordring, at forudsætningerne ikke er beskrevet til fulde, når et studie af drivhusgasaftryk præsenteres. For at overkomme udfordringen med de mange forskellige valgmuligheder, har forskellige organisationer defineret standarder for opgørelserne. Følger man en specifik standard, er der altså enten defineret en række valg eller sat krav til formidlingen af valgene. Der findes dog ikke én global bredt anerkendt og anvendt standard, og selv inden for én standard kan der være forskellige valgmuligheder.

Studier af brændstoffer vurderes at have den samme overordnede afgrænsning

På trods af de mange forskellige forudsætninger et drivhusgasaftryk kan baseres på, og på trods af, at ikke alle studier beskriver deres valg til fulde, er det vurderet, at de fleste af studierne, der indgår i dette review, anvender den samme overordnede afgrænsning, hvor følgende indgår:

- Udledning og optag fra **dyrkning** af bioressourceinput og CO₂-input til produktion
- Udledning fra fossilt **energiforbrug** til produktion og eventuelt lagring
- Udledning fra fossilt baseret **transport** af input til produktion og eventuelt lagring
- Udledning fra **afbrænding** af fossilt flybrændstof

Det er dertil vurderet, at de fleste studier **udelukker** følgende forhold:

- Udledninger, som er indlejrede, såkaldte *capital goods emissions*, såsom udledning fra opførelse og produktion af:
 - maskiner
 - bygninger
 - veje
 - batterier
 - køretøjs-, skibs- og flystel
 - materialer anvendt til rørledninger og materialer til energi- og CO₂-lagre
- Udledning fra biprodukter. Ved produktion af flybrændstof bliver der ofte også produceret biprodukter som nafta og diesel. Biprodukter er i denne analyse skilt ud, så analysen omhandler kun hovedproduktets drivhusgasaftryk mv. (Selvom disse udledninger er udeladt, kan metoden til at udelade dem dog variere)

Det vurderes, at der i det anvendte grundlag til denne analyse er **variation** i metoderne, og at de væsentligste forskelle vedrører:

- Afgrænsning
 - Hvorvidt der inkluderes såkaldte opstrømsmissioner fra udvinding af energi og råstoffer
 - Hvorvidt der inkluderes udledning fra ændring i arealanvendelse, når bioressourcer benyttes som input til produktionen
- Metode
 - Allokeringsmetoder til at fordele klimapåvirkning mellem hoved-, bi- og affaldsprodukter, herunder fx mellem rest- og hovedafgrøder
 - Systemudvidelsesmetoder til at inkludere substitutionseffekter, fx inkludering af klimapåvirkning af primære afgrøder, der træder i stedet for restprodukter efterspurgt til produktionen, hvis disse restprodukter er begrænsede
 - Metoder til at opgøre udledning fra arealanvendelse og ændring heraf
 - Emissionsfaktorer
- Data
 - Datakvalitet
 - Datadetaljeringsniveau
 - Årstal for data

Klimarådets analyse baseres på et review af studier og på egne estimater

Klimarådets analyse af drivhusgasaftryk er baseret på et review af videnskabelige artikler. Der er dertil suppleret med egne estimater, hvis der i litteratursøgningen ikke er fundet kilder, eller hvis det er vurderet mere sammenligneligt at basere et estimat på analysen af teknologiers energiforbrug, som fremgår senere i denne rapport.

Reviewet af studier af teknologiers drivhusgasaftryk er baseret på 12 studier med 53 resultater for drivhusgasaftryk af forskellige teknologier (herefter kaldet datapunkter). I de anvendte studier er der enighed om, at den funktionelle enhed, som det er relevant at opgøre flybrændstofs aftryk i, er g CO₂e pr. MJ flybrændstof til anvendelse eller kompenseret. Denne enhed er derfor også anvendt i denne analyse. Samme enhed anvendes desuden i EU's og ICAO's regelsæt, om end der i regelsættene er forskel på fx afgrænsningen af, hvad der skal tælles med, og hvor meget lavere klimaaftrykket skal være sammenlignet med fossilt flybrændstof.

Tabel 3 viser et overblik over hvad der indgår i de analyserede teknologiers aftryk, og hvad de er baserede på.

Tabel 3: Oversigt over hvad teknologiernes drivhusgasaftryk i denne analyse er baseret på

Teknologi	Drivhusgasaftryk er baseret på	Beregning indeholder udledning fra	Bemærkninger til opgørelsen
Lavaromatiske fossile brændstoffer	Egne estimater på baggrund af analysen af energiforbrug	• Produktion af fossilt flybrændstof • Elforbrug til produktion af brint og til hydroprocessering	Resultaterne i denne analyse er fra egne estimater for bedre at kunne sammenligne med de andre teknologier. Andre studier viser estimater i samme størrelsesorden. ¹⁰
Elektrobrændstoffer (PtJ)	Egne estimater på baggrund af analysen af energiforbrug	• Elforbrug til produktion af PtJ • Varmeforbrug til CO₂-fangst som input til PtJ • Transport af CO₂ med skib og elforbrug til rørføring • Transport af PtJ med skib	Da opgørelsen er mere simpel end for biobrændstoffer, er der foretaget egne beregninger på baggrund af analysen af energiforbrug. Det gør det også muligt at variere på el-emissionsfaktoren for at repræsentere forskellige elmix. I eget-estimatet er der regnet på PtJ(FT)-teknologien og på PtJ(MtJ)-teknologien. Der benyttes et varmeinput til CO₂-fangst som input til PtJ(FT) og PtJ(MtJ). Der er antaget en emissionsfaktor for varmekorbrug, der svarer til et gennemsnit af forbruget bag energiproduktion med potentiel CO₂-fangst i Klimastatus og -fremskrivning 2025. Der indgår ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for indfanget biogent CO₂-input fra BECCS til brug for produktion af elektrobrændstof. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt ved afbrænding. Antagelser vedrørende elforbrug og transport er som for analysen af energiforbrug. Resultaterne i denne analyse er fra egne estimater for bedre at kunne sammenligne med de andre teknologier. Andre studier viser estimater i samme størrelsesorden.¹¹
Biobrændstoffer	Review af 7 studier med 36 datapunkter	• Dyrkning af bioressource • El og evt. varmekorbrug • Transport • Evt. iLUC	Datapunkterne er fordelt på "HEFA: fødevarer", "HEFA: ikke-fødevarer", "bio-AtJ" og "bio-FT". Studierne anvender forskellige metodevalg, og giver derfor forskellige datapunkter, som der tages et gennemsnit af i denne analyse. Spredning i datapunkterne kan både skyldes forskel i metoder mv. og reelle forskelle i udledning for de enkelte biobrændstoffer afhængig af geografisk placering, input, anlæg mv. Der anvendes i denne analyse mange datapunkter for at undersøge, om der er et mønster i udledningen for de forskellige typer biobrændstoffer. Data muliggør ikke en sammenligning af emissionsfaktorer for elforbrug eller manuel korrektion heraf. Af de 36 datapunkter er der for 33 af dem principielt inkluderet udledninger fra arealanvendelse i opgørelsen (som dog aktivt kan være vurderet irrelevante og være tillagt nul emission).
Kompensation (BECCS)	1 studie af BECCS samt supplerende information om udledning fra fossilt flybrændstof samt variation af el-emissionsfaktor	• Produktion af fossilt flybrændstof • Energiforbrug til fangst og lagring af CO₂ • Transport af CO₂ med skib • Transport og behandling af bioressource mv.	Studiet af BECCS indeholder en analyse af tidseffekter for afbrænding af restbiomasse med fangst og lagring. Studiet muliggør dog ikke enhedsberegninger af tidseffekter. Der indgår derfor ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for BECCS. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt. Studiet gør det muligt at skalere el-emissionsfaktoren for sammenligning med øvrige teknologier.

Kompensation (DACCS)	Egne estimater på baggrund af analysen af energiforbrug mv.	• Elforbrug til fangst og lagring af CO₂ • Varmeforbrug til fangst af CO₂ • Transport af CO₂ med skib	Der regnes både på fangst via solid DAC og liquid DAC. Udledning fra transport og lagring sættes lig den for BECCS. Solid DAC behøver i Teknologikataloget for 2025 både el og procesvarme. For procesvarme sættes emissionsfaktoren til gennemsnittet af energiforbrug til procesvarme i fremstillingserhverv fra Klimastatus og -fremskrivning 2025. Der er ikke indregnet udledning fra produktion af fangstmediet. Udledningen er udeladt for at opnå samme scope som for BECCS, hvor det ikke indgår. Udledningen fra produktion af fangstmediet oplyses dog særskilt.
Elfly	Egne estimater på baggrund af analysen af energiforbrug	• Elforbrug til batteri inklusive transmissionstab	For de flydende brændstoffer er der ikke taget højde for motoreffektivitet i klimaaftrykket. Det giver en udfordring, når der skal sammenlignes med elfly, som har en bedre motoreffektivitet end de flydende brændstoffer. For elfly tages der højde for dette ved at indregne en fordel for elflyene. Det gøres ved, at der for udledning fra elforbrug indregnes en skaleringsfaktor. Faktoren udtrykker den relative forskel i motorenes effektivitet. Udledning fra elforbruget formindskes med faktoren. Der tages ikke højde for passagereffektivitet og distancebegrænsninger. Disse forhold afspejles i parameteren Sektor- og samfundstilpasning.
Brintfly	Egne estimater på baggrund af analysen af energiforbrug	• Elforbrug til produktion af brint	I elforbruget til brint indgår både produktion af brint og transport af brint via rør, herunder også elforbrug til tryktab i rør.

Anm.: Opgørelserne er som vist i tabellen baseret på litteraturstudier og egne estimater på baggrund af energiregnskaber. Opgørelserne tager ikke nødvendigvis højde for EU's regneregler for fx bio- og elektrobrændstoffers drivhusgasaftryk, som skal overholde en vis grænse for at kunne indgå i opfyldelse af iblandingskravet i *ReFuelEU Aviation*. Klimarådet har valgt at foretage analysen ud fra litteraturen og egne estimater for at danne sig sit eget indtryk af teknologiernes drivhusgasaftryk først, for på den baggrund at kunne rådgive omkring de valg, EU har foretaget i sine regneregler.

Kilde: Klimarådet.

Med store metodeforskelle kan det være en fordel med mange datapunkter

De store forskelle i måden at opgøre teknologiernes drivhusgasaftryk på er et vilkår i datagrundlaget, hvis Klimarådet ikke selv skal foretage livscyklusvurderinger for alle teknologierne, og det ville være uden for rammerne af dette projekt. Det er derfor valgt at håndtere udfordringen med forskelle ved at inkludere mange datapunkter i analysen fra forskellige studier og foretage egne estimater og foretage tjek med resultater fra studier.

Biobrændstoffers drivhusgasaftryk kan i særlig grad opgøres med forskellige metoder, og der er derfor anvendt mange datapunkter fra i litteraturen her for at styrke datagrundlagets robusthed.

For øvrige teknologier end biobrændstoffer er analysen som nævnt baseret fortrinsvist på egne estimater. Det vurderes, at der i mindre grad end for biobrændstoffer er forskelle i måden at opgøre aftrykket på. Det indebærer dog også usikkerheder.

Der opmærksomhed på, at konklusioner på baggrund af analysen af drivhusgasaftryk skal afspejle mønstre og tendenser snarere end specifikke udledningsværdier. Med disse overvejelser vurderes datagrundlaget som tilstrækkeligt robust til at være anvendeligt for denne analyse.

Resultater vises med en trafiklysmode

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit. Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabel 4 angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Drivhusgasaftrykket opgøres i gram CO₂e pr. MJ flybrændstof, som skal erstatte fossilt flybrændstof (eller kompensere for fossilt flybrændstof, når der er tale om BECCS og DACCS).

Tabel 4: Definition af skala til scoring af parameter

Drivhusgasaftryk pr. energienhed flybrændstof reduceret eller kompenseret (gCO ₂ e pr. MJ)				
Score	Grøn: < 28	Gul: 28 - 94	Rød: > 94	Hvid: Ingen data
Anm.:	Grænse mellem grøn og gul er sat på baggrund af EU's krav til elektrobrændstoffers reduktion i livscyklusudledning på 70 pct. sammenlignet med konventionelle fossile flybrændstoffer, hvilket svarer til en udledning på 28 g CO ₂ e pr. MJ. ¹² Grænse mellem gul og rød er sat ved konventionelt fossilt flybrændstof, som i EU's krav er sat til 94 g CO ₂ e pr. MJ. ¹³			
Kilde:	Klimarådet.			

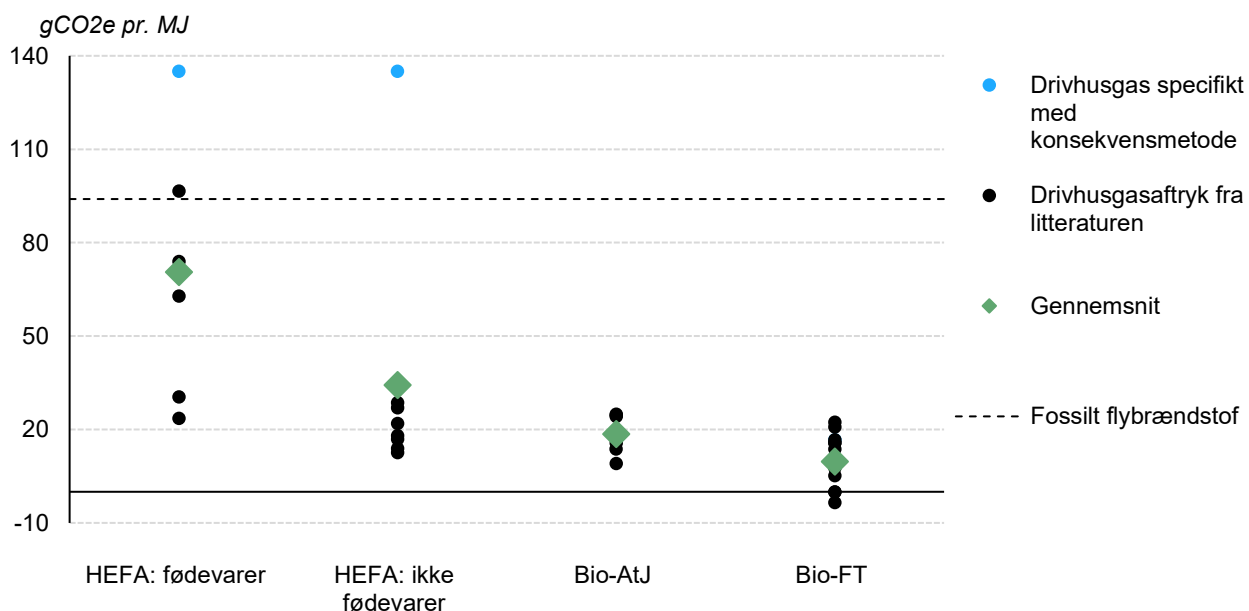
2.2 Analyse

Analyse viser biobrændstoffers drivhusgasaftryk på delteknologier

Værdier for biobrændstoffers drivhusgasaftryk findes i litteraturen. Det er relevant at finde ud af, om værdierne ligger nogenlunde tæt på hinanden for at kunne vurdere, om data kan vise et mønster i delteknologiernes aftryk trods metodeforskelle.

Figur 3 viser aftrykket fra biobrændstoffer fordelt på tre delteknologier:

- Oliebaserede og fedtsyreholdige brændstoffer (HEFA), opdelt i
 - afgrøder, som også er fødevarer
 - afgrøder, som ikke også er fødevarer
- Alkoholbaserede (bio-AtJ)
- Baseret på teknologien Fischer-Tropsch (bio-FT)



Figur 3: Biobrændstoffers drivhusgasaftryk

Anm. 1: HEFA: Hydroprocessed esters and fatty acids, AtJ: Alcohol-to-jet, FT: Fischer Tropsch, PtJ: Power-to-jet.

Anm. 2: Værdier markeret med blå prik er fra et studie, der er udført med en konsekvenstilgang til livscyklusvurderinger, altså en opgørelse af konsekvensen af udledninger på forskellige markeder ved ændret efterspørgsel. Klimarådet vurderer, at de øvrige værdier, her angivet med sorte prikker, er udført med en attributiv tilgang til livscyklusvurderinger, altså en opgørelse af de udledninger, der kan tildeles til produktionen af en enhed.

Kilder: Abayo, A. et al.¹⁴, Bell, A. et al.¹⁵, de Jong, S. et al.¹⁶, Europa-Parlamentet og Ministerrådet¹⁷, ICAO¹⁸, NREL¹⁹, Roux, M. et al.²⁰, Schmidt, J. et al.²¹ og Klimarådet.

På figuren repræsenterer hver sort eller blå prik et resultat for en teknologi eller delteknologis drivhusgasaftryk. De grønne markeringer viser gennemsnittet af datapunkterne. Den sorte stiplede linje viser udledningen fra konventionelt fossilt flybrændstof som reference.

Resultaterne for biobrændstoffer samler sig, trods metodeforskelle

Af figuren ses det, at datapunkterne for biobrændstoffer rimeligvis samler sig, når det angår brændstoffer produceret ved bio-AtJ og bio-FT. Det kan indikere, at forskellige metodevalg og data ikke har så stor en betydning for disse brændstoffer.

For biobrændstoffer produceret ved HEFA er datapunkterne mere spredte, særligt hvad angår de biobrændstoffer, der er produceret af fødevarer. Det kan have flere årsager. Det kan skyldes en reel spredning, fx fordi de stammer fra forskellige steder i verden eller fordi de er produceret med forskellige bioressourceinput. Det kan også skyldes betydningen af metodevalg og data.

Biobrændstoffer baseret på fødevarer har et højere aftryk

Selv om resultaterne for HEFA baseret på fødevarer som ressourceinput er mere spredte end for de andre biobrændstoffer, er der en klar tendens til, at biobrændstofferne produceret med fødevarer som input, har et højere drivhusgasaftryk.

Stor forskel bunder i, om der indregnes substitutionseffekter

På Figur 3 ses det, at to aftryk ligger langt over den fossile reference. Studiet, som giver et markant højere drivhusgasaftryk for biobrændstof end de øvrige, er et studie af udledningen fra brændstof produceret med HEFA-teknologien, og hvor brugt fritureolie er ressourceinput.²²

Studiet anvender en konsekvenstilgang i metodevalget. Med den tilgang lægges der i metoden vægt på, at brugt fritureolie kun findes i en bestemt mængde, og allerede er i anvendelse til andre formål end til produktion af flybrændstof. Når man tager ressourcen væk fra et formål, kommer der en ny ressource ind i markedet, som også medfører en udledning.

I studiet vurderes det, at ny palmeolie erstatter brugt fritureolie, da det er den billigste substitut og den, som er i størst vækst. Med den anvendte metode, vil aftrykket af brugt fritureolie skulle opgøres som aftrykket fra palmeolie. Det resulterer i det nævnte studie et aftryk på 135 g CO₂e pr. MJ.²³ Hertil kan yderligere opgradering til flybrændstof tilføre et mindre ekstra energiforbrug, der alt efter kilden hertil, kan være udledningsfri eller tilføje et mindre yderligere antal gram CO₂e pr. MJ.

Til sammenligning viser de øvrige studier af aftryk fra HEFA, som ikke er fødevarer, et aftryk på 20 g CO₂e pr. MJ i gennemsnit. Selvom det kan være vanskeligt at dechifrere præcist hvad der indgår i disse studiers resultater, vurderer Klimarådet, at de tillægger inputressourcen brugt fritureolie en lavere eller slet ingen udledning.

Udledning fra elforbrug betyder mindre for biobrændstoffers aftryk end for elektrobrændstoffers

Det er desværre ikke muligt at variere på el-emissionsfaktoren for biobrændstofferne. Her er opgørelserne komplekse, og i de anvendte studier er det ikke muligt manuelt at variere på elmixet.

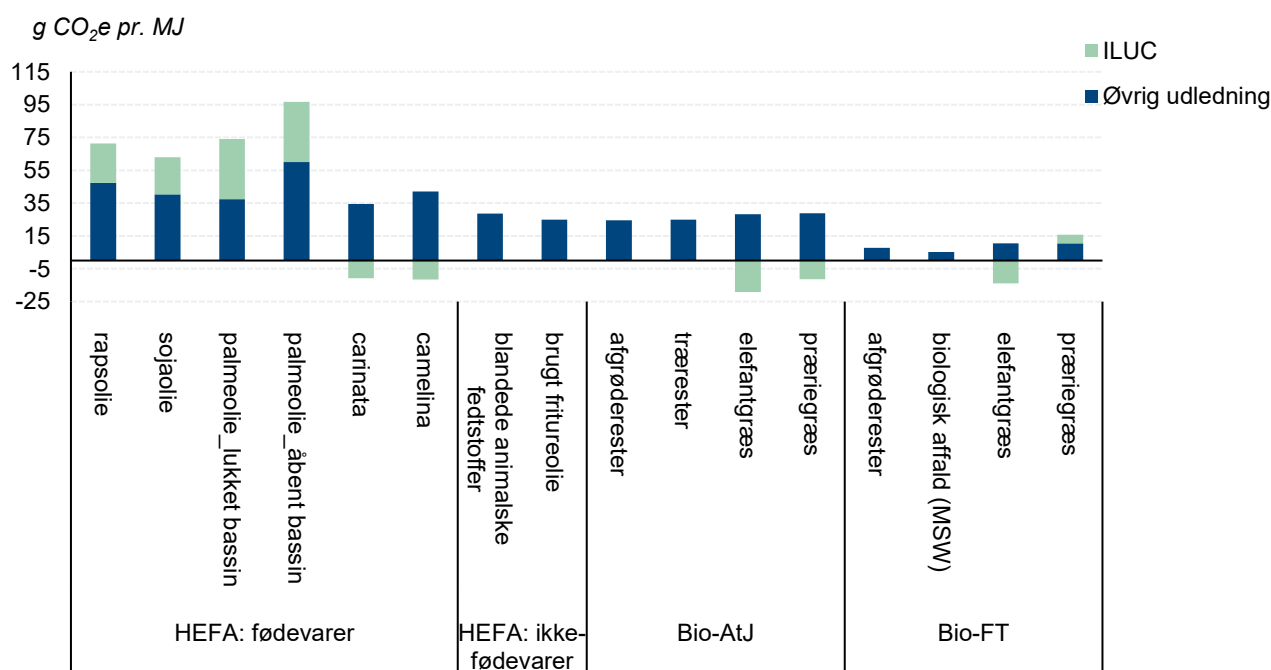
En gennemgang af studierne, der ligger til grund for analysen af drivhusgasaftryk viser, at udledning fra elforbruget for tre datapunkter udgør i gennemsnit 6 pct. af de samlede udledninger fra produktion af biobrændstoffer. Ligeledes viser en gennemgang af analysen af energiforbrug, at elforbrug her udgør mellem 0 og 16 pct. af det samlede energiforbrug til produktion af biobrændstoffer. Det er markant mindre end til produktion af elektrobrændstoffer. Her udgør elforbrug mellem 90 og 91 pct. af det samlede energiforbrug. Se Figur 9 i afsnittet Energiforbrug.

Udledning fra elforbruget betyder altså mindre for biobrændstoffers aftryk end for elektrobrændstoffers i de data, der udgør analysens grundlag.

Biobrændstoffers udledning fra indirekte ændret arealanvendelse kan være betydelig

Udledning fra indirekte ændret arealanvendelse (ILUC) opstår som følge af, at bioressourcer øger efterspørgslen på areal. Dermed udvides produktion ind i skov- eller kulstofrige områder, og det medfører, at kulstoflagrene mindskes.

ICAO's opgørelse af drivhusgasaftryk viser, at størrelsen af udledningen fra ændret arealanvendelse kan være betydelig.²⁴ Det ses af Figur 4.



Figur 4: Udvalgte drivhusgasaftryk for biobrændstoffer

Kilder: ICAO²⁵ og Klimarådet.

Andre kilder finder også betydelige udledninger fra indirekte ændret arealanvendelse. For eksempel er der i Schmidt, J. et al. angivet en udledning fra palmeolie på 13 g CO₂e pr. MJ fra ILUC ud af en samlet udledning på 135 gram.²⁶ EU's standardfaktor for ILUC 55 g CO₂e pr. MJ for olieholdige afgrøder.²⁷

Samlet set viser analysen, at udledning fra indirekte ændret arealanvendelse kan være betydelig.

Fødevarerbaserede biobrændstoffer har højere udledning fra ILUC

ICAO's opgørelse af drivhusgasaftryk er anvendelig til at få et indtryk af, hvor stor forskel, der er på de forskellige biobrændstoffers udledning fra ændret arealanvendelse.²⁸ Opgørelsen er anvendelig, fordi metoden er den samme. Det ses af Figur 4, at de fødevarer- og foderbaserede biobrændstoffer generelt har en højere udledning fra ændret arealanvendelse end de ikke-fødevarer- og foderbaserede.

Metoder viser vidt forskellig udledning fra ILUC for det samme biobrændstof

De foregående afsnit viste udledning fra biobrændstoffers ILUC opgjort med ICAO's metode. Hvis man vil forstå, hvordan forskellige metoder påvirker resultater for udledning fra ændret arealanvendelse, kan man opgøre udledningen for den samme type biobrændstof med forskellige metoder.

Roux, M. et al. viser hvordan forskellige standards metoder giver vidt forskellige værdier for ILUC. For bioethanol baseret på sukkerrør varierer udledningen fra ILUC mellem -4 og 17 gram, mens biodiesel baseret på raps varierer mellem 11 og 67 gram fra ILUC.²⁹ Metoden har altså stor betydning.

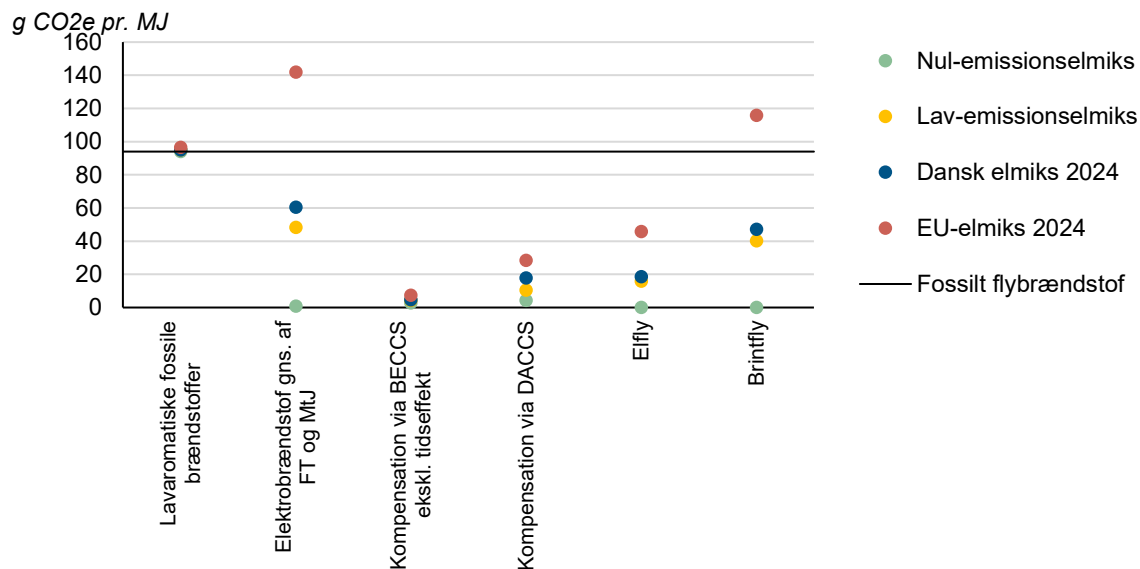
Analyse viser drivhusgasaftryk for de mest elintensive teknologier

For andre teknologier end biobrændstoffer, er det særligt elforbrug, der kan give anledning til udledninger. Værdier for teknologiernes drivhusgasaftryk er fra litteraturen og fra egne estimater baseret på analysen af energiforbrug.

Figur 5 viser aftrykket for følgende teknologier:

- Lavaromatiske fossile brændstoffer
- Elektrobrændstoffer
- Kompensation (BECCS)
- Kompensation (DACCS)
- Elfly
- Brintfly

CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse.



Figur 5: Drivhusgasaftryk fra andre teknologier end biobrændstoffer

- Anm. 1: Der indgår ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for BECCS. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt.
- Anm. 2: Udledning fra produktion af fangstmateriale til DACCS på i gennemsnit 2,6 g CO₂e per MJ³⁰ er udeladt, da den ikke indgår i studiet af drivhusgasaftryk for BECCS.
- Anm. 3: Se Tabel 3 for grundlag og metoder.
- Anm. 4: Der redegøres for energiforbruget til opgørelsen af drivhusgasaftryk senere i denne rapport under "Energiforbrug".
- Kilder: Energistyrelsen³¹, Europa-Parlamentet og Ministerrådet³², EU-Kommissionen³³, European Environment Agency³⁴, Weimann m.fl.³⁵, Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet³⁶ og Klimarådet.

På figuren repræsenterer hver prik et resultat for en teknologis drivhusgasaftryk. Den vandrette linje viser drivhusgasaftrykket fra konventionelt fossilt flybrændstof.

Forskellige elmiks giver stor spredning i resultaterne

Figur 5 viser en stor spredning i resultaterne, særligt for elektrobrændstoffer. Denne løsning er kendetegnet ved at være særligt elintensiv og el-inputtet er derfor af meget væsentlig betydning for resultatet.

Når strømmen ikke er grøn, kan løsningerne være værre end fossilt flybrændstof

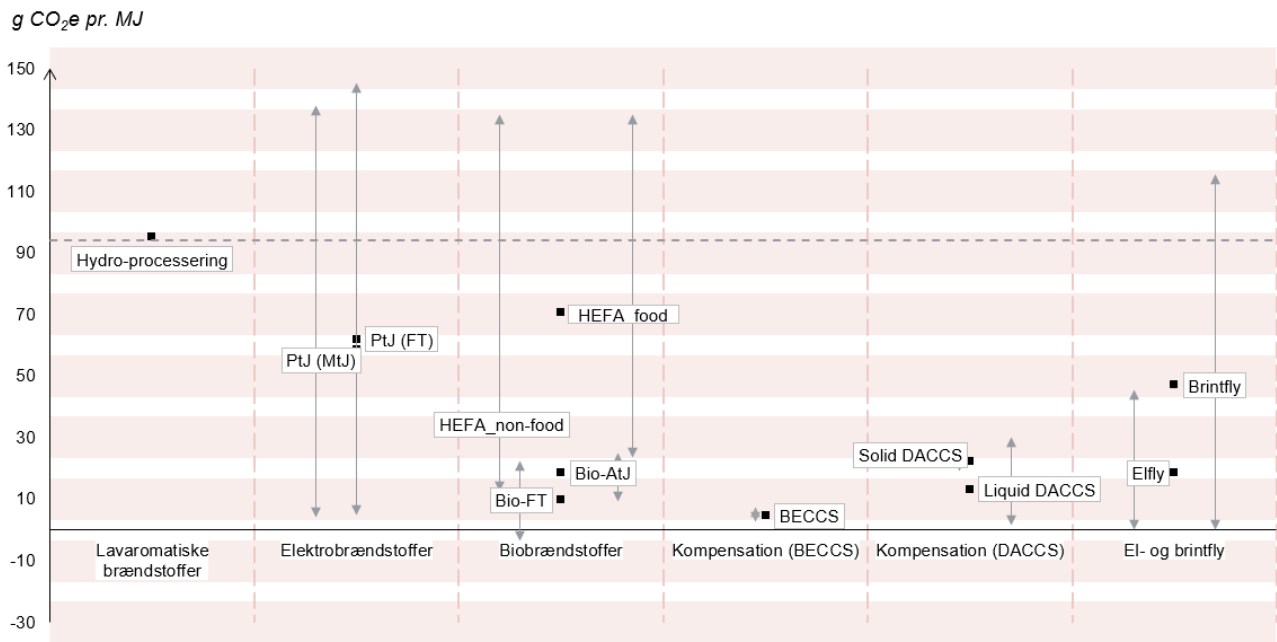
Figur 5 viser, at nogle teknologier har et højere drivhusgasaftryk end fossilt flybrændstof. På figuren er det de punkter, der ligger over den vandrette linje. Det ses af figuren, at det særligt kan være en risiko ved elektrobrændstoffer og brintfly.

Det er vanskeligt at opgøre effekten på klimaet af biomasseforbrug

BECCS baseres i høj grad på træbiomasse, hvor kulstoffet alternativt kunne have været lagret eller nedbrudt over en længere periode, og den ændrede opholdstid for CO₂ i atmosfæren påvirker opvarmningen. Effekten på klimaet af biomasseforbruget er ikke indregnet i denne analyse. Bilag 1 uddyber faktorer, der har virkning på klimaet i forbindelse med træbiomasseforbrug til BECCS. De biogene udledninger fra BECCS har større betydning end for bioressourcer med kortere levetid, fx til brug for biobrændstoffer.

2.3 Resultater

Resultaterne for teknologiernes klimaaftryk fremgår af Figur 6.



Figur 6: Resultater af teknologiers drivhusgasaftryk

- Anm. 1: Kasserne i figuren repræsenterer gennemsnit for drivhusgasaftryk, mens pile angiver spænd. For biobrændstoffer angiver pilespændet de datapunkter, der indgår i Klimarådets review. Der anvendes som udgangspunkt emissionsfaktor for dansk elmiks 2024, men pile angiver et spænd for el-emissionsfaktoren som vist i Figur 5.
- Anm. 2: Se Tabel 3 for grundlag og metoder.
- Anm. 3: Der indgår ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for BECCS. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt.
- Anm. 4: CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse
- Kilde: Klimarådet.

Resultater for drivhusgasaftryk farvescores

Teknologierne farvescores ud fra deres gennemsnitlige drivhusgasaftryk som angivet i starten af dette kapitel.

Tabel 5: Farvescoring af teknologiers drivhusgasaftryk (gCO₂e pr. MJ)

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Bio-brændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Drivhusgasaftryk i dag	95	60 [59-62]	15 33	5	18	El: 19 Brint: 47
Forventet fremtidigt drivhusgasaftryk	94	1 [1-1]		3	4	0

- Anm. 1: I beregning af gennemsnit til brug for scoring af elektrobrændstoffers aftryk indgår PtJ(FT) og PtJ(MtJ).
- Anm. 2: Grøn trekant er resultatet for ikke-fødevarer- og foderbaserede biobrændstoffer (spænd: 10-34 g). Gul trekant er resultatet, når fødevarerbaserede biobrændstoffer også indgår (spænd: 10-71 g). Rød stjerne(*) skal fremhæve resultat på 135 g for biobrændstof baseret på brugt fritureolie, når konsekvensen af substitutionseffekter inddrages.³⁷

Anm. 3: I beregning af gennemsnit til brug for scoring af DACCS' aftryk indgår Solid DACCS og Liquid DACCS.

Anm. 4: Der indgår ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for BECCS. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt.

Anm. 5: Der indgår emissionsfaktor for dansk elmiks 2024 for Drivhusgasaftryk i dag og nul-emissions-elmiks for Forventet fremtidigt drivhusgasaftryk.

Kilde: Klimarådet.

I oversigten er lavaromatiske fossile brændstoffer mærket med rød, da det gennemsnitlige aftryk er over den fossile reference på 94 g CO₂e pr. MJ. Er brændstofferne repræsenteret ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation, er aftrykket lig den fossile reference og scorer dermed stadig rød.

Elektrobrændstoffer er mærket med gul, når de repræsenteres ved et dansk elmiks for 2024, hvilket giver 60 g CO₂e pr. MJ. De scorer grøn, når de repræsenteres ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation, hvilket giver 1 g CO₂e pr. MJ.

Biobrændstoffer er mærket med gul, når de repræsenteres ved et gennemsnit, der inkluderer biobrændstoffer baseret på fødevarer, hvilket giver 33 g CO₂e pr. MJ. De scorer grøn, når de repræsenteres ved et gennemsnit, der ikke inkluderer fødevarer som input til produktionen, hvilket giver 15 g CO₂e pr. MJ. Der er ingen data for et fremtidigt aftryk.

Kompensation med BECCS scorer grøn. Det gælder både, når teknologien repræsenteres ved et dansk elmiks for 2024, hvilket giver 5 g CO₂e pr. MJ, og når de repræsenteres ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation, hvilket giver 3 g CO₂e pr. MJ. Det er når biomassen regnes CO₂-neutralt. Tidseffekter må forventes at øge aftrykket, hvis det blev regnet med.

Kompensation med DACCS scorer grøn. Det gælder både, når teknologien repræsenteres ved et dansk elmiks for 2024, hvilket giver 18 g CO₂e pr. MJ, og når den repræsenteres ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation, hvilket giver 4 g CO₂e pr. MJ.

Elfly scorer grøn. Det gælder både, når teknologien repræsenteres ved et dansk elmiks for 2024 med en udledning på 19 g CO₂e pr. MJ, og når den repræsenteres ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation uden udledning.

Brintfly er mærket med gul, når teknologien repræsenteres ved et dansk elmiks for 2024, hvilket giver 47 g CO₂e pr. MJ. Den scorer grøn, når den repræsenteres ved et nul-emissions-elmiks, som repræsenterer en fremtidig situation, hvilket giver 0 g CO₂e pr. MJ.

Opsummering af analyse

Analyserne af i de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Biobrændstoffer.** Biobrændstoffer baseret på fødevarer har i analysens data et højere aftryk i gennemsnit end dem, der er baseret på rest- og affaldsprodukter.
- **Biobrændstoffer.** Med en konsekvensbaseret tilgang til at opgøre drivhusgasaftryk inkluderes substitutionseffekter, og det kan give et langt højere drivhusgasaftryk for affaldsprodukter end der vises i øvrige analyser.
- **Biobrændstoffer.** Udledning fra elforbrug betyder mindre for biobrændstoffers aftryk end for elektrobrændstoffers.
- **Elektrobrændstoffer.** Det er for elektrobrændstoffer særligt vigtigt, at elektriciteten er baseret på en meget høj andel ikke-fossil energi i elnettet. Ikke-fossile energi er her en samlebetegnelse for energi fra ikke-fossile energikilder som fx vedvarende energi og atomkraft. Elektrobrændstoffer kan have et lige så lavt aftryk som DACCS, hvis der er nul-emission i elnettet, men ellers bliver drivhusgasaftrykket hurtigt langt højere end for DACCS.
- **Elintensive teknologier.** Det er generelt vigtigt for teknologiers drivhusgasaftryk, at elektriciteten er baseret på en meget høj andel ikke-fossil energi i elnettet. Derfor bør regulering sikre de samme principper for

- opgørelse af drivhusgasaftryk som elektrobrændstoffer, hvis de gives incitament som alternativer til elektrobrændstoffer.
- **BECCS.** Der indgår ikke tidsfaktorer, som påvirker klimaet, for BECCS. Biomasseforbruget er altså her regnet som CO₂-neutralt. Drivhusgasaftrykket kan forventes at være større, hvis enhedsberegning af effekterne var mulige at opgøre, hvilket ikke har været tilfældet i denne analyse med den tilgængelige litteratur.

3 Non-CO₂-effekter

Der er stor videnskabelig usikkerhed omkring størrelsesordenen på effekter fra non-CO₂-udledning. Det taler for en kvalitativ analyse, når teknologier skal sammenlignes. Analysen af non-CO₂-effekter skal ses i sammenhæng med analysen af teknologiernes drivhusgasaftryk for at få det fulde billede af klimapåvirkningen.

3.1 Begrundelse og tilgang

Non-CO₂-effekter indgår ikke i drivhusgasaftrykket

Non-CO₂-udledninger er udledning af andre stoffer end drivhusgasser, som alligevel indvirker på den globale opvarmning. Det er fx NO_x, SO_x, sodpartikler og vanddamp, der kan danne kondensstriber og cirrusskyer. Disse effekter virker både opvarmende og kølende, men samlet set anslås de med stor usikkerhed at have en opvarmende effekt på den globale opvarmning.

Non-CO₂-effekter skal ikke forveksles med drivhusgasser som metan og lattergas, som indgår i teknologiernes drivhusgasaftryk ved en omregning til CO₂-ækvivalenter.

I denne analyse ses der hver for sig på drivhusgasaftrykket og på non-CO₂-effekter for at få et samlet billede af teknologiens klimapåvirkning. I dette kapitel analyseres non-CO₂-effekter.

Analysen baseres på litteraturstudier og anvender en kvalitativ tilgang

Analysen af teknologiernes non-CO₂-effekter viser i hvilket omfang teknologien kan reducere påvirkningen på klimaet af andre udledninger end CO₂, herunder fx vanddamp, som medfører kondensstriber og kvælstofudledninger. I analysen sammenlignes teknologiernes potentiale for reduktion af non-CO₂-effekter. Analysen baseres på litteraturstudier.

Der er stor videnskabelig usikkerhed om teknologiernes non-CO₂-udledninger og disses effekt på klimaet. Usikkerheden gør, at der i analysen er valgt en kvalitativ tilgang til farvescoring af teknologiernes effekter.

Resultater vises med en trafiklysmode

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit. Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen neden for angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 6: Definition af skala til scoring af parameter

Non-CO ₂ -effekter i forhold til fossilt flybrændstof				
Score	Grøn: Elimineret	Gul: Reduceret	Rød: Samme	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

3.2 Analyse

Der er ikke fundet mange studier, der sætter størrelsesordenen på teknologiernes non-CO₂-effekter på en sammenlignelig måde. Tabel 7 præsenterer dog, under stor usikkerhed, et udvalg af effekter på et udvalg af teknologier.

Tabel 7: Gennemsnitlig effekt af non-CO₂ på den globale opvarmning relativt til CO₂-udledning fra fossilt flybrændstof

pct. af GWP	Brintfly - brændselscelle	Brintfly - afbrænding	Elektrobrændstoffer	Fossilt brændstof
CO ₂	0	0	0	100
NO _x	0	35	100	100
Vanddamp	25	25	10	10
Kondensstriber	30	60	75	100
Total	55	120	185	310

Kilde: CleanSky2, 2020.³⁸

Værdierne i tabellen oversættes i denne analyse til i hvilken grad, de har en effekt på klimaet, og i hvilken grad, effekten er den samme som for fossilt flybrændstof. For eksempel ses det af tabellen, at brintfly med afbrænding har en effekt fra vanddamp på 25, som altså er mindre end effekten af CO₂ fra fossilt flybrændstof, som er 100, men samtidig større end effekten af vanddamp fra fossilt flybrændstof, som er 10.

I det følgende analyseres tabellens effekter og hvad der ligger bag, og der suppleres med andre kilder.

Elfly eliminerer non-CO₂-effekter, men for brintfly varierer effekten med typen

Flyvning med batteri medfører ikke non-CO₂-effekter.³⁹ Det skyldes, at der ikke afbrændes brændstoffer i flyvehøjden, men kun eventuelt på kraftværket, der står på jorden, og leverer strøm til elflyets batteri. Eventuelle non-CO₂-udledninger har derfor ikke effekt på opvarmningen.

Som det fremgår af Tabel 7 er der forskel på brintfly med brændselscelle og brintfly med afbrænding af brint i en motor. Med en brændselscelle udledes der kun vanddamp, og værdierne viser derfor en effekt af vanddamp og kondensstriber.

Med brintfly med motor er der tilligemed en udledning af NO_x, og værdierne viser en effekt af NO_x og kondensstriber, der er større end for brændselsceller.

Der er formentlig forskel på biobrændstoffers non-CO₂-effekt

I en sammenligning af non-CO₂-effekter foretaget af Energistyrelsen, får biobrændstoffer den samme vurdering som elektrobrændstoffer, nemlig "medium" bekymring.⁴⁰

Rapporten bag Tabel 7 angiver ligeledes "begrænset reduktion af non-CO₂-effekt" for både bio- og elektrobrændstoffer.⁴¹ Af tabellen fremgår det, at elektrobrændstoffer har væsentligt lavere non-CO₂-effekter end fossilt flybrændstof. Det tyder dermed på, at biobrændstoffer også har det.

Biobrændstoffer produceret ved HEFA har formentlig de laveste non-CO₂-effekter af biobrændstofferne. Det skyldes, at de produceres ved teknologien hydrogenering, som fjerner aromater og svovl, ligesom ved de lavaromatiske fossile brændstoffer, som netop har den fordel, at de reducerer non-CO₂-effekter.

Kompensation ved BECCS og DACCS løser som udgangspunkt ikke non-CO₂-problematikken

Ved løsninger med kompensation via BECCS eller DACCS flyves der fortsat på konventionelt fossilt brændstof. Som udgangspunkt er der derfor de samme non-CO₂-effekter. Disse effekter vil der kunne kompenseres for ved at øge CO₂-lagringen til både at dække CO₂-udledning og non-CO₂-udledning. I denne analyse er der set på kompensation alene for CO₂-udledningen.

Lavaromatiske fossile brændstoffers non-CO₂-effekt er ikke velbeskrevet

Der er ikke fundet studier med værdier for effekten af lavaromatiske fossile brændstoffer, men en dansk potentiel producent angiver, at de kan reducere non-CO₂-effekter med op til 20 pct.⁴²

3.3 Resultater

Resultatet af analysen fremgår af Tabel 8.

Tabel 8: Resultater for teknologiers non-CO₂-effekter

	Elfly	Brintfly - brændselscelle	Brintfly - afbrænding	Elektrobrænd- stoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	Lav- aromatiske brændstoffer
NO _x -effekt	Ingen effekt	Ingen effekt	Nogen effekt på klimaet - væsentligt bedre end fossil	Væsentlig effekt på klimaet - samme som fossil	Formentlig effekter som elektrobrændstoffer, dog bedre for HEFA	Væsentlig effekt på klimaet - samme som fossil	Væsentlig effekt på klimaet - samme som fossil	
Vanddamp- effekt	Ingen effekt	Nogen effekt på klimaet - lidt værre end fossil	Nogen effekt på klimaet - lidt værre end fossil	Mindre effekt på klimaet - samme som fossil		Mindre effekt på klimaet - samme som fossil	Mindre effekt på klimaet - samme som fossil	
Kondensstribe- effekt	Ingen effekt	Nogen effekt på klimaet - væsentligt bedre end fossil	Væsentlig effekt på klimaet - lidt bedre end fossil	Væsentlig effekt på klimaet - lidt bedre end fossil		Væsentlig effekt på klimaet - samme som fossil	Væsentlig effekt på klimaet - samme som fossil	
Resultat - samlet effekt ift. fossil	Elimineret effekt	Reduceret effekt ift. fossil	Reduceret effekt ift. fossil	Reduceret effekt ift. fossil		Samme effekt som fossil	Samme effekt som fossil	Reduceret effekt ift. fossil

Kilde: Klimarådet.

Tabellens nederste række viser den samlede effekt i forhold til fossilt flybrændstof. Teknologierne effekter er altså analyseret til at være elimineret, reduceret eller den samme som for fossilt flybrændstof. Det giver grundlag for farvescoring af teknologierne.

Teknologier farvescores i forhold til konventionelt fossilt brændstof

Den samlede scoring af teknologier ses af Tabel 9.

Tabel 9: Farvescoring af teknologierne non-CO₂-effekter i forhold til fossilt flybrændstof

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro- brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Non-CO ₂ -effekter	Reduceret	Reduceret	Reduceret	Samme	Samme	El: Elimineret Brint: Reduceret

Kilde: Klimarådet.

Farvescoringen er direkte foretaget på baggrund af Tabel 8. Brintfly er markeret med gult, når brintfly repræsenteres ved brintfly med afbrænding. Repræsenteres brintfly med brændselsceller, er klimapåvirkningen mindre, men scorer stadig gult, da effekterne ikke er eliminerede. Den samlede vurdering er altså en gul score.

Farvescoring er også indikator for luftforurening

Selvom luftforurening ikke er en parameter i denne analyse, kan scoringen alligevel anvendes som indikator for luftforurening med NO_x og SO_x.

Brintfly med brændselscelle vil også her være bedre end brintfly med motor, da der ikke udledes NO_x ved brændselscelleløsningen.

Opsummering af analyse

Analyserne af i de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Alternative brændstoffer.** Lavaromatiske fossile brændstoffer, elektro- og biobrændstoffer har mindre klimapåvirkning fra non-CO₂ end fossilt flybrændstof.
- **Kompensation med BECCS og DACCS.** Teknologierne til at kompensere for udledninger løser ikke udfordringen med non-CO₂-effekter, da der fortsat flyves på fossilt brændstof. Skal problematikken mindskes, skal reguleringen derfor tage højde for det, fx ved at kompensere endnu mere, hvilket vil give udslag på teknologiernes drivhusgasaftryk, eventuelle bioressourceforbrug, energiforbrug og økonomi.
- **Elfly.** Non-CO₂-effekter elimineres med elfly som den eneste teknologi.
- **Brintfly.** Brintfly med brændselscelle har mindre klimapåvirkning fra non-CO₂ end brintfly med afbrænding.
- **Alternative brændstoffer og el- og brintfly.** Alle teknologier undtagen kompensation med BECCS og DACCS mindsker også luftforureningen.

4 Bioressourceforbrug

Der anvendes bioressourcer til nogle teknologier og ikke til andre. Da bioressourcer er knappe, er det relevant at sammenligne hvor meget, de trækker på.

4.1 Begrundelse og tilgang

Bioressourcer er begrænsede

Bioressourcer er begrænsede, og det er derfor relevant at sammenligne teknologiernes forbrug heraf. Samtidig fungerer analyseparameteren "Bioressourceforbrug" som en indikator for negative påvirkninger af økosystemer og biodiversitet, som et træk på denne begrænsede ressource kan medføre. Tre af teknologierne anvender bioressourcer som input. Det er biobrændstoffer, elektrobrændstoffer med biogent CO₂-input og kompensation med BECCS. Forbruget af bioressourcer opgøres for disse tre teknologier.

Analysen er baseret på Klimarådets beregninger

Analysen er baseret på Klimarådets beregninger med data fra Energistyrelsens Teknologikatalog og studiet af drivhusgasaftrykket fra BECCS som også anvendt i analysen af drivhusgasaftryk.⁴³

Tabel 10 viser metoderne til at opgøre bioressourceforbruget for de tre relevante teknologier.

Tabel 10: Oversigt over hvad teknologiernes bioressourceforbrug er baseret på

Teknologi	Bioressourceforbrug forbundet med	Bemærkninger til opgørelsen
Biobrændstoffer	Produktion af 1 MJ biobrændstof (motoroutput)	Forbruget er fra Energistyrelsens teknologikatalog er og lig med energiforbruget anvendt i analysen af teknologiernes energiforbrug. Der tages et gennemsnit af HEFA, bio-AtJ, bio-FT og bio-MtJ
Elektrobrændstoffer med biogent CO ₂ -input	Indfangning af CO ₂ (via BECCS) svarende til mængden, der skal anvendes til produktion af 1 MJ elektrobrændstof (motoroutput)	Der tages udgangspunkt i PtJ(FT)-teknologien. Mængden af CO ₂ , der skal anvendes i produktionen er fra analysen af teknologiernes energiforbrug og mængden af bioenergi, der skal bruges for at frembringe den nødvendige mængde CO ₂ , er fra studiet af drivhusgasaftrykket for BECCS. ⁴⁴
Kompensation via BECCS	Indfangning og lagring CO ₂ (via BECCS) til at kompensere for 1 MJ fossilt flybrændstof (motoroutput)	Mængden af mængden af bioenergi, der skal bruges til kompensation, er fra studiet af drivhusgasaftrykket for BECCS. ⁴⁵

Kilde: Klimarådet.

Biomasseforbrug tages med for både kraftvarmeværk og fangstanlæg

For denne analyseparameter angående bioenergiforbruget for BECCS, tillægges hele flisforbruget fra kraftvarmeværket samt CO₂-fangstanlægget til BECCS. Det gøres for at følge den fysiske logik, at man skal bruge ét ton kulstof fra flisen for rent fysisk at kunne lagre ét ton kulstof under jorden.

Metodevalget afviger fra metoden til at opgøre drivhusgasaftryk, energiforbrug og økonomi. Her opgøres effekterne ved BECCS for den andel, der kan tilskrives fangstenheden. til BECCS. Det gøres for at følge den fysiske logik, at man skal bruge ét ton kulstof fra flisen for rent fysisk at kunne lagre ét ton kulstof under jorden. Derfor foretages der her en følsomhedsberegning, hvor biomasseforbruget opgøres for den andel, der kan tilskrives fangstenheden.

Bioressourceforbruget for biprodukter indgår ikke i analysen

Ved produktion af flybrændstof bliver der også produceret biprodukter som nafta og diesel. Biprodukter er i denne analyse skilt ud, så analysen omhandler kun hovedproduktets bioressourceforbrug.

Resultater vises med en trafiklysmode

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit. Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen neden for angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 11: Definition af skala til scoring af parameter

Bioressourceinput til produktion af 1 MJ motoroutput reduceret eller kompenseret (MJ)				
Score	Grøn: 0	Gul: >0-2,5	Rød: >2,5	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

4.2 Analyse

Biobrændstoffers bioressourceinput varierer i særlig grad

Da biobrændstoffer kan produceres med forskellige delteknologier, vises bioressourceforbruget for fire typer biobrændstoffer i Tabel 12.

Tabel 12: Bioenergiinput i MJ pr. MJ til fremdrift

	HEFA	Bio-AtJ	Bio-FT	Bio-MtJ
Bioressourceinput, MJ	2,4	9,6	6,3	5,1
Eksempler på bioressourceinput	talg fra dyr	afgrøderester	afgrøderester	afgrøderester
	brugt fritureolie	trærester	trærester	trærester
	energiafgrøder	elefantgræs	affald	affald
	alger	præriegræs	energiafgrøder, fx pil	biogas
		energiafgrøder		

Anm. 1: HEFA: hydroprocessed esters and fatty acids, AtJ: alcohol-to-jet, FT: Fischer Tropsch, MtJ: methanol-to-jet.

Anm. 2: Bioressourceinput til 1 MJ fremdrift. Gennemsnit for forskellige typer af biobrændstof.

Anm. 3: Enheden MJ for 1 MJ fremdrift betyder, at der søges en værdi for bioenergiinputtet forbundet med at producere 1 MJ fremdrift indregnet motoreffektivitet.

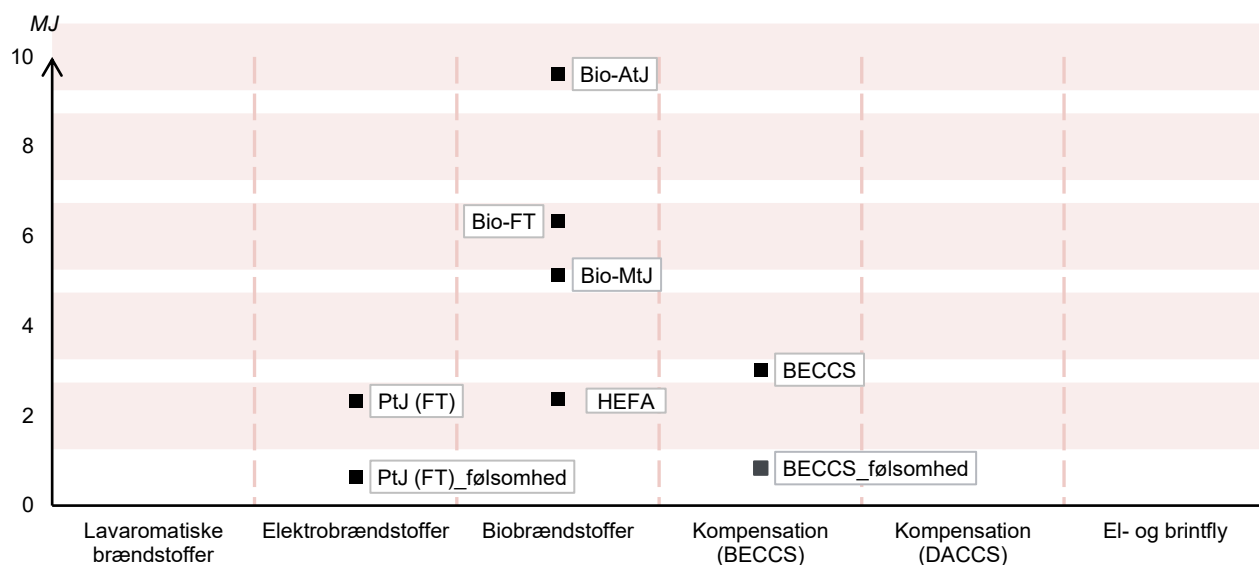
Anm. 4: Opgørelsen af biobrændstofferne energiinput er beskrevet senere i denne rapport under Energiforbrug.

Kilde: Klimarådet.

Tabellen viser, at med de anvendte datakilder, har biobrændstoffet bio-AtJ det største forbrug for bioressourcer, mens inputtet til at producere HEFA ligger markant lavere.

4.3 Resultater

Resultatet af analysen fremgår af Figur 7.



Figur 7: Resultater for teknologiers bioenergiforbrug i MJ for 1 MJ fremdrift

Anm. 1: Enheden MJ for 1 MJ fremdrift betyder, at der søges en værdi for bioenergiindholdet forbundet med at producere eller kompensere for 1 MJ fremdrift indregnet motoreffektivitet.

Anm. 2: Hovedberegningen for elektrobrændstoffer og BECCS inkluderer hele kraftvarmeværkets flisforbrug, mens følsomhedsberegningerne inkluderer andelen, der kan tilskrives fangstanlægget.

Anm. 3: CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse. CO₂-inputtet kan også komme fra DACCS. Her vil bioressourceforbruget være 0, hvis ikke der bruges bioressourcer til el eller varme forbruget til fangst.

Kilde: Klimarådet.

Teknologier farvescores i forhold til deres bioressourceforbrug

Den samlede scoring af teknologier ses af Tabel 13.

Tabel 13: Farvescoring af teknologiernes bioressourceforbrug (MJ pr. MJ fremdrift)

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektrobrændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Bioressourceforbrug	-	2,3	5,9 [2,4-9,6]	3,0	-	-

Anm. 1: Elektrobrændstoffer er beregnet for PtJ-FT.

Anm. 2: Enheden MJ pr. MJ fremdrift betyder, at der søges en værdi for bioenergiindholdet forbundet med at producere eller kompensere for 1 MJ fremdrift indregnet motoreffektivitet.

Anm. 3: CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse. Farven vil være grøn hvis DACCS bruges som fangstteknologi.

Kilde: Klimarådet.

I tabellen scorer teknologierne uden bioressourceforbrug grønt.

Elektrobrændstoffer scorer gul, når den repræsenteres ved biogent CO₂ til at producere elektrobrændstof via FT-teknologien og ved CO₂ indfanget via BECCS. I denne beregning er bioressourceforbruget til fangst af CO₂ omfattet af hele kraftvarmeværkets flisforbrug. Bioressourceforbruget bliver da 2,3 MJ pr. MJ fremdrift indregnet motoreffektivitet. I en følsomhedsanalyse tillægges alene det ekstra bioressourceforbrug som følger efter etablering af fangstanlægget. Det resulterer i et bioressourceforbrug på 0,6 MJ pr. MJ fremdrift. I følsomhedsanalysen scorer den altså grønt.

Hvis elektrobrændstoffer produceres med et CO₂-input, der ikke er biogent, ville der ikke være et bioressourceforbrug, og den scorer i det tilfælde grønt.

Biobrændstoffer har et højere forbrug af bioressourcer, som for de fire undersøgte teknologier ligger i et interval på 2,4-9,6 MJ biomasse pr. MJ fremdrift.

For BECCS er forbruget på 3 MJ biomasse for den mængde CO₂, der skal lagres for at kompensere for 1 MJ fremdrift i hovedberegningen hvor hele kraftvarmeværkets flisforbrug tillægges fangsten af CO₂. I en følsomhedsanalyse, hvor kun det ekstra energiforbrug til at drive fangstanlægget tillægges BECCS, resulterer det i et bioressourceforbrug på 0,8 MJ pr. MJ fremdrift. Det ville lede til, at BECCS ville score grønt.

Opsummering af analyse

Analyserne af i de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Biobrændstoffer.** Der bruges flest bioressourcer til biobrændstoffer i de sammenlignede teknologier, når der tages et gennemsnit af biobrændstofferne. Bioressourcer til BECCS ligger dog inden for biobrændstofferens spænd og elektrobrændstoffers CO₂-input ligger næsten hvor spændet for biobrændstoffer begynder.
- **Elektrobrændstoffer.** Elektrobrændstoffer kan produceres med CO₂, der ikke er af biologisk oprindelse. I analysen er der regnet på, at CO₂-inputtet til produktion af elektrobrændstoffer er biogent. Havde CO₂'en været fossil eller atmosfærisk, ville bioressourceforbruget være nul. Det biogene CO₂ er interessant at lægge til grund for at kunne sætte bioressourceforbruget i relation til biobrændstoffer og BECCS. Det ses, at forbruget er væsentligt, og på niveau med de biobrændstoffer med lavest bioressourceforbrug.
- **BECCS.** Bioressourceforbruget for BECCS afhænger af, om hele flisforbruget henføres til fangst af, som denne analyses hovedberegning gør – eller om man alene tillægger det ekstra bioressourceforbrug, som følger efter etablering af fangstanlægget, som følsomhedsberegningen gør.

5 Energiforbrug

En effektiv udnyttelse af energi er afgørende for at minimere ressourceforbrug og dermed reducere klima- og miljøpåvirkninger, især hvis ressourcen er begrænset. En energiforbrugsanalyse er derfor essentiel for at identificere hvor energitab opstår, i hvilket omfang, og hvor energien udnyttes mest effektivt.

5.1 Begrundelse og tilgang

Analysen skal tydeliggøre hvilke teknologier der er mest energieffektive

Formålet med denne analyse er at tydeliggøre hvilke teknologier der er mest energieffektive og vurdere dem på et sammenligneligt grundlag. Energiforbruget forstås her som det samlede energiinput, der både omfatter energiforbruget i konverteringsprocesserne og energiindholdet i det anvendte drivmiddel.

Energiinputtet er bestemt kvantitativt ud fra data fra teknologikataloget med supplerende litteratur hvor nødvendigt

Energiinputtet er kvantitative beregninger af Klimarådet. Beregningerne for de enkelte teknologier er primært baseret på data fra Energistyrelsens teknologikataloget. For de teknologier, der enten ikke er beskrevet i teknologikataloget, eller hvor det eksisterende data ikke er direkte anvendelige for luftfartssektoren, er effektiviteterne fastlagt på baggrund af supplerende litteratur og egne antagelser.

Energiinputtet baseres på 2025 værdier hvor det er muligt

Energiinputtet er så vidt muligt baseret på effektiviteter for 2025, som repræsenterer et teknologisk niveau i dag. Hvor 2025-værdier ikke er beskrevet i Energistyrelsens teknologikataloget, er lineær interpolation mellem tilgængelige datapunkter anvendt.

Resultater vises med en trafiklysmode

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit. Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen neden for angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 14: Definition af skala til scoring af energiforbrug

Energiforbrug i MJ pr. MJ fremdrift				
Score	Grøn: 2 - 4	Gul: 4 - 6	Rød: 6 - 8	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

Energiforbruget er angivet som energiinputtet til 1 MJ fremdrift

Energiforbruget opgøres som den samlede mængde energi, der er nødvendig for at levere 1 MJ fremdrift, herunder både energiforbrug i de enkelte procestrin og energiindholdet i det anvendte drivmiddel.

Den overordnede systemafgrænsning er illustreret på Figur 8

Figur 8 illustrerer den overordnede systemafgrænsning der anvendes til analysen af energiinputtet for de enkelte teknologier. Den repræsenterer en forenklet fremstilling af systemafgrænsningen med henblik på at give et overblik over de væsentligste antagelser og afgrænsninger. Som det fremgår af Figur 8, omfatter systemafgrænsningen hele værdikæden

fra råinput, transport til produktionsanlæg, produktion af flybrændstof, transport til lufthavne samt konvertering til fremdrift ved at inkludere flyenes motoreffektivitet.

Motoreffektiviteten er inkluderet for at kunne sammenligne på tværs af teknologier

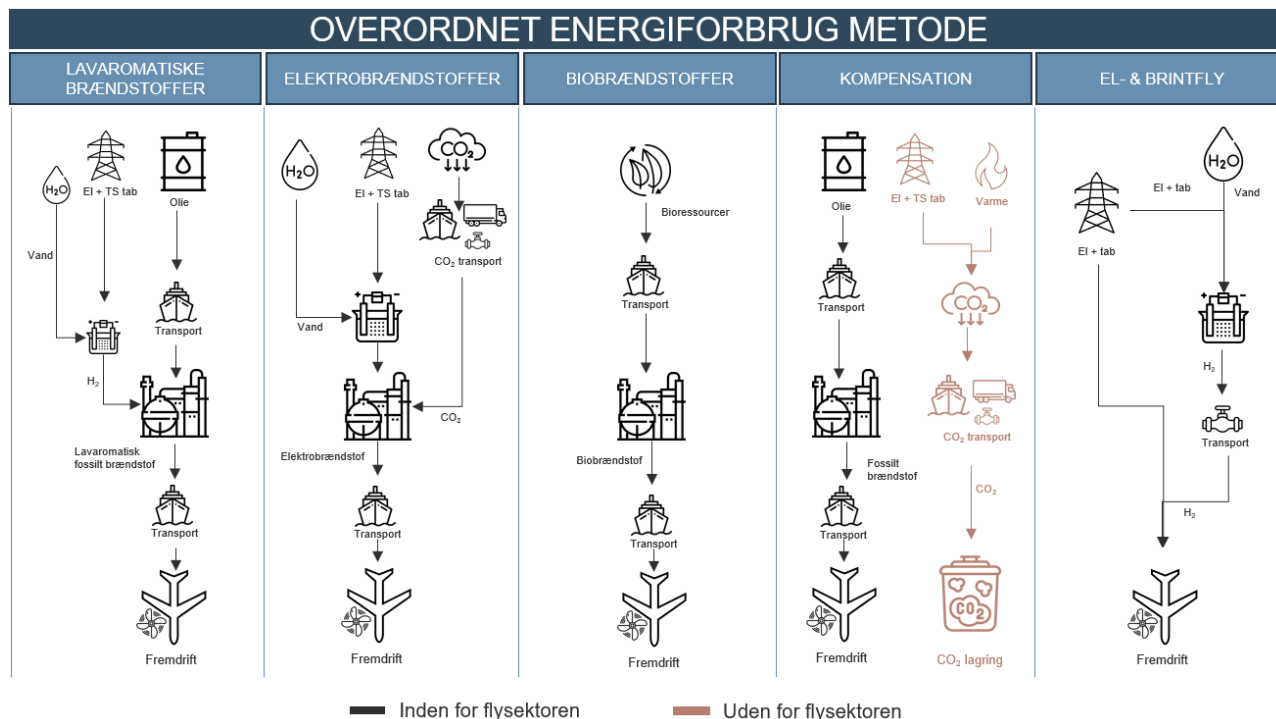
Som det fremgår af Figur 8, er motoreffektiviteten inkluderet. Motoreffektiviteten er særlig relevant for elfly, da elektriske motorer generelt har en højere effektivitet end konventionelle forbrændingsmotorer. For at sikre et sammenligneligt grundlag på tværs af teknologier, er dette led derfor inkluderet i energiforbrugsanalysen.

Følgende virkningsgrader er antaget:⁴⁶

- 40 pct. for konventionelle brændstofmotorer,
- 90 pct. for elektriske motorer,
- 40 pct. for direkte afbrænding af hydrogen
- 65 pct. for brændselscelle⁴⁷

Energieffektivitet per passagerkilometer er ikke afspejlet i energiforbruget

Elfly adskiller sig fra de øvrige teknologier ved formentligt ikke at kunne komme til at transportere samme antal passagerer eller operere med samme rækkevidde. Disse forskelle indgår ikke direkte i energiforbrugsanalysen hvilket betyder, at sammenligningen ikke afspejler energieffektivitet per passagerkilometer. Disse aspekter behandles i stedet under parameteren for sektor- og samfundstilpasning, hvor konsekvenserne for kapacitet og rækkevidde analyseres.



Figur 8: Overordnet metode for energiforbrug

Kilde: Klimarådet.

Biprodukter tæller ikke med i det samlede energiinput

Analysen er afgrænset til udelukkende at omfatte den del af energiinputtet der relaterer sig til produktion og anvendelse af flybrændstof. Energiinput til produktion af biprodukter i brændstofproduktionen, såsom diesel eller nafta, indgår således ikke i beregningen af energiinputtet. Det endelige energiinput bestemmes derfor på følgende måde:

$$\text{Energiforbrug} = \text{Total energiinput} * \text{flybrændstof fraktion}$$

Flybrændstoffractionen er angivet nedenfor under antagelser for hver teknologi.

Transport af rå input til brændstofproduktionsfaciliteterne er inkluderet

Transport af rå input, såsom olie og bioressourcer, til brændstofproduktionsanlæggene er inkluderet i energiforbrugsanalysen for at sikre et sammenligneligt grundlag mellem teknologierne. Estimering af transportafstande for bioressourcer er forbundet med betydelig usikkerhed som følge af variation i ressourceoprindelse, tilgængelighed af restprodukter og komplekse forsyningskæder. På grund af denne usikkerhed, som hurtigt kan blive casespecifik, antages det i analysen, at transportafstanden til produktionsanlæg er ens for olie og bioressourcer. Der antages en transportafstand på 500 km hvor olie transporteres ved tankskib og bioressourcer transporteres med fragtskib. Energiforbruget for transporten er baseret på data fra Miljøstyrelsen.⁴⁸

Transport af drivmidler til lufthavne er inkluderet i energiinputtet

Da systemafgrænsningen går fra rå input til fremdrift, er energien til transport af de forskellige drivmidler fra produktionsanlæg til lufthavne inkluderet.

For alle flybrændstoffer antages transport med tankskib over en gennemsnitlig distance på 500 km, hvilket er en grov antagelse som skal repræsentere transporten af flybrændstof rundt i Europa. Energiforbruget hertil er baseret på data fra Miljøstyrelsen.⁴⁹

For hydrogen til brintfly antages transport via rør på 100 km, hvilket dækker både transportafstande fra henholdsvis Sydsjælland til Københavns Lufthavn samt fra Vestjylland til Billund Lufthavn. Data er baseret på Energistyrelsens teknologikatalog for energitransport.

For elfly er der antaget et tab på transmissionsnettet på 1,7 pct.⁵⁰ Dette tab er inkluderet for alle processer hvor elektricitet anvendes.

Transporten af vand til elektrolyseenhederne er ikke medtaget i beregningerne

Det er ikke antaget noget energiforbrug til transport af vand til elektrolyseanlæggene.

CO₂ transport er medtaget i energiinputberegningerne

For de teknologier, hvor CO₂ enten skal anvendes eller lagres, er transporten af CO₂ inkluderet i energiinputtet. Det antages, at CO₂ transporteres 100 km via rørføring samt med skib med en maksimal daglig kapacitet på 10.000 ton CO₂. Energiforbrug til terminaldrift og fordråbning af CO₂ er ligeledes medtaget. Transporten varierer ikke på baggrund af fangstteknologi. For teknologier, hvor lagring er nødvendig, antages 50 pct. onshore og 50 pct. offshore lagring med et energiforbrug på 50 MJ pr. ton CO₂. Alt data for transport og lagring af CO₂ er baseret på Energistyrelsens teknologikatalog for kulstoffangst, -transport og -lagring.⁵¹

Tørring af våde bioressourcer indgår i energiberegningerne

For visse biobrændstoffer der benytter forgasning, skal de fleste bioressourcer tørres. Tørringsprocessen medfører et yderligere energiforbrug, som derfor er inkluderet i energiberegningerne.

For biobrændstofferne Bio-FT og Bio-MtJ antages det, i overensstemmelse med teknologikataloget, at input til forgasning er træflis. Den leverede biomasse antages derfor at skulle tørres til et fugtindhold svarende til træflis. Ifølge leveret materiale fra Stiesdal kræver tørring fra 55 vægtprocent vand til 10 vægtprocent vand et energiforbrug på 0,23 MWh varme pr. MWh våd biomasse.⁵² Dette energiforbrug er tillagt energiberegningerne for Bio-FT og Bio-MtJ.

For HEFA antages inputtet til produktionsprocessen at være olie og restfedt, hvilket ikke kræver tørring.

Konverteringsprocessen af biomasse til ethanol for biobrændstoffet bio-AtJ er forskellig for bio-FT og bio-MtJ. I stedet for at benytte sig af teknologien forgasningen benyttes fermentering. Ved fermentering tilføjes vand alt efter hvor våd/tør biomassen er. Hvis biomassen er meget tør, skal der tilføjes mere vand og omvendt. Det er derfor ikke antaget et energiforbrug til tørring for dette biobrændstof.

Der er antaget samplacering af konverteringsteknologier

En simplificering af samplacering er antaget for de forskellige konverteringsteknologier. Dette vil sige, at alle delteknologier, så som elektrolyseanlæg og de forskellige brændstofproduktionsenheder, står samme sted. Dette betyder, at energiforbrug til intern transport mellem disse delteknologier ikke medregnes.

Der er antaget grøn brintproduktion til elektrolyse

Energiforbruget til hydrogenproduktion er baseret på storskala teknologier fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer.⁵³ Her varieres der imellem elektrolyseteknologierne AEC og PEM med 2025 effektiviteterne:

- 58,7 pct for AEC
- 55,0 pct PEM

Da SOEC elektrolysen ikke er udbredt på storskala endnu og energiforbruget er bestemt for teknologier i dag, er der ikke lavet sensitivitetsanalyse på denne teknologi.

Antagelser for lavaromatiske fossile brændstoffer

For lavaromatiske fossile brændstoffer er energiinputtet baseret på energien til produktion af konventionelt fossilt flybrændstof samt det ekstra hydrogenforbrug, der kræves for at reducere aromatindholdet.

Energiforbruget til ekstraktion af olie fra undergrunden er inkluderet for at kunne sammenligne teknologierne på tværs. Data er baseret på en rapport fra Christoph Meili, m.fl. (2021) som vurderer, at den totale fossile energi der skal bruges til at udvinde 1 kg råolie i Europa er 1,32 MJ/kg udvundet råolie.⁵⁴

Energiforbruget til produktion af fossilt flybrændstof er baseret på B. W. Kolosz m.fl. (2020), som kun angiver energiforbruget uden biprodukter. Her konkluderes, at 79,5 pct. af energiinputtet uden biprodukter kan konverteres til fossilt flybrændstof. Hertil antages derfor en flybrændstoffraktion på 100 pct.⁵⁵

Reduktion af aromatindholdet sker via hydroprocessering. Ifølge Gunnar Quante m.fl. (2024) kræver mild hydroprocessering 4-4,2 kg H₂ pr. ton kerosene, mens hård hydroprocessering kræver 8-8,2 kg H₂ pr. ton kerosene.⁵⁶ For at opnå et konservativt estimat anvendes værdierne for hård hydroprocessering. Valget har dog kun begrænset betydning for det samlede energiinput, idet en overgang til mild hydroprocessering kun ville reducere energiinputtet med cirka 1,2 pct.

Antagelser for elektrobrændstoffer

PtJ(FT)

Energiforbruget til produktion af PtJ(FT) brændstoffet er baseret på teknologien "Jet Fuel from hydrogen and carbon dioxide" fra Energistyrelsens teknologikatalog for fornybare brændstoffer. Ifølge Energistyrelsen konverteres 1 MWh elektricitet, inklusiv energiforbrug til hydrogenproduktion, til 0,39 MWh Fischer Tropsch-væske (FT-væske). Derudover

skal der bruges 0,35 t CO₂ pr. MWh FT-væske.⁵⁷ Flybrændstoffractionen af de samlede FT-væsker er antaget til 60 pct baseret på teknologikataloget.

PtJ(MtJ)

PtJ(MtJ) produktionen opdeles i to hovedtrin:

- 1) Produktion af metanol fra hydrogen og CO₂
- 2) Konvertering af metanol til flybrændstof.

Energiberegningen for metanolproduktionen er baseret på teknologien "Methanol from hydrogen and carbon dioxide" fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer. Her kræves 6,4 MWh H₂ pr. ton metanol, 0,1 MWh elektricitet pr. ton metanol samt 1,4 ton CO₂ pr. t metanol for at producere 0,78 MWh metanol i 2025.⁵⁸

Efterfølgende konverteres metanolen til flybrændstof. Guilloteau m.fl. (2025) angiver, at 36,8 pct. af metanolens energiindhold kan konverteres til flybrændstof, med en flybrændstoffraction på cirka 40 pct.⁵⁹ Et andet studie af Rob Terwel m.fl. (2024) angiver en flybrændstoffraction på 90 pct. og refererer derudover til, at Topsoe forventer at kunne opnå et produktudbytte på op til 100 pct. i kerosenintervallet.⁶⁰

I denne analyse anvendes data fra Guilloteau m.fl. (2025), men korrigeret med en flybrændstoffraction på 90 pct. Dette resulterer i en samlet metanol-til-jet-fraktion på 73 pct.

Antagelser for biobrændstoffer

Bio-FT

Bio-FT-processen er baseret på teknologien "Jet Fuel from Biomass Gasification" fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer. Her konverteres 1 MWh bioressourcer til 0,15 MWh flybrændstof samt 0,24 MWh biprodukter. Dette svarer til en flybrændstoffraction på 38 pct. Da PtJ(FT)-processen kan opnå en flybrændstoffraction på 60 pct, antages det, at en tilsvarende fraktion også kan realiseres for Bio-FT. Flybrændstoffractionen justeres derfor til 60 pct, hvilket betyder, at 1 MWh biomasse kan konverteres til 0,24 MWh flybrændstof. De resterende biprodukter er nedjusteret proportionelt.

Bio-MtJ

Bio-MtJ processen opdeles ligeledes i to trin som PtJ(MtJ), hvor første trin er produktion af metanol fra bioressourcer. Energiberegningen er baseret på teknologien "Methanol from Biomass Gasification" fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer, hvor 1 MWh biomasseinput konverteres til 0,595 MWh metanol.

Det antages herefter, at metanol produceret via biomasseforgasning har samme egenskaber som metanol produceret fra hydrogen og CO₂. Derfor anvendes samme antagelser for metanol-til-jet-konvertering, hvilket indebærer en flybrændstoffraction på 90 pct og en samlet metanol-til-jet-fraktion på 73 pct. Her henvises til afsnittet "Antagelser for elektrobrændstoffer" under PtJ(MtJ) for uddybning og kilder.

Bio-AtJ

Bio-AtJ-processen opdeles i to hovedtrin, hvor første trin er produktion af ethanol fra biomasse. Energiberegningen for dette trin er baseret på teknologien "Cellulosic ethanol" fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer. Her konverteres 1 MWh celluløsisk biomasse til 0,33 MWh ethanol i 2025.

Det næste trin indebærer konverteringen af ethanol til flybrændstof. Her skriver Energistyrelsen at 55 pct af ethanol kan konverteres til flybrændstof.⁶¹ Dette tal anvendes i analysen. Den samlede flybrændstoffraction antages til 70 pct, baseret på Scott Geleynse m.fl. (2018), som også angiver et hydrogenforbrug på 1,1 ton pr. dag, hvilket også er inkluderet i energiberegningen.⁶²

HEFA

HEFA-processen er baseret på teknologien "HVO Jet Fuel" fra teknologikataloget for fornybare brændstoffer. Her konverteres 0,78 MWh olie og fedt, 0,09 MWh hydrogen, 0,003 MWh elektricitet samt 0,119 MWh naturgas til 0,66 MWh HVO-flybrændstof. Flybrændstoffractionen antages at være 81 pct baseret på teknologikataloget.

Antagelser for kompensation via BECCS og DACCS

Energiinputtet for kompensation via BECCS og DACCS inkluderer energiinputtet til produktion af fossilt brændstof, samt energien der skal bruges til at fange, transportere og lagre den mængde CO₂, der udledes ved udvinding af olien, produktion og afbrænding af det fossile brændstof.

Ved produktionen af fossilt flybrændstof produceres der også biprodukter som diesel og nafta. Dette er fossile produkter, som kan bruges til andre formål end flytransport. Man kan argumentere for, at udledningen forbundet med disse fossile produkter også skal kompenseres for. Energiforbruget til at kompensere for disse udledninger er dog ikke medregnet i det samlede energiforbrug.

De samme energiberegninger for lavaromatiske fossile brændstoffer vedrørende fossil flybrændstofproduktion er antaget for BECCS og DACCS. Se afsnittet "Antagelser for lavaromatiske fossile brændstoffer" for uddybning og kilder.

BECCS

Energiforbruget til BECCS er baseret på teknologien "Post combustion of biomass fired boiler" i storskala fra teknologikataloget for kulstoffangst, -transport og -lagring. Her kræves 0,83 MWh varme pr. ton CO₂ samt 0,03 MWh elektricitet pr. ton CO₂.

Solid DACCS

For solid DACCS er energiforbruget baseret på teknologien "Solid Adsorption Direct Air Capture Plant" fra teknologikataloget for kulstoffangst, -transport og -lagring. Her kræves 1,5 MWh varme pr. ton CO₂ samt 0,25 MWh elektricitet pr. ton CO₂.

Liquid DACCS

For liquid DACCS anvendes teknologien "Liquid Absorption Direct Air Capture Plant", hvor energiforbruget udgør 1,5 MWh elektricitet pr. ton CO₂. Det antages, at hele fangstprocessen kan elektrificeres baseret på teknologikataloget.

Antagelser for el- og brintfly

Elfly

Det antages, at elfly benytter lithium-ion-batterier, som beskrevet i teknologikataloget for energilagring. Batteriernes round-trip-effektivitet antages til 95 pct, og energitab ved lagring antages til 0,1 pct. Derudover medregnes et invertertab på 2,5 pct.⁶³

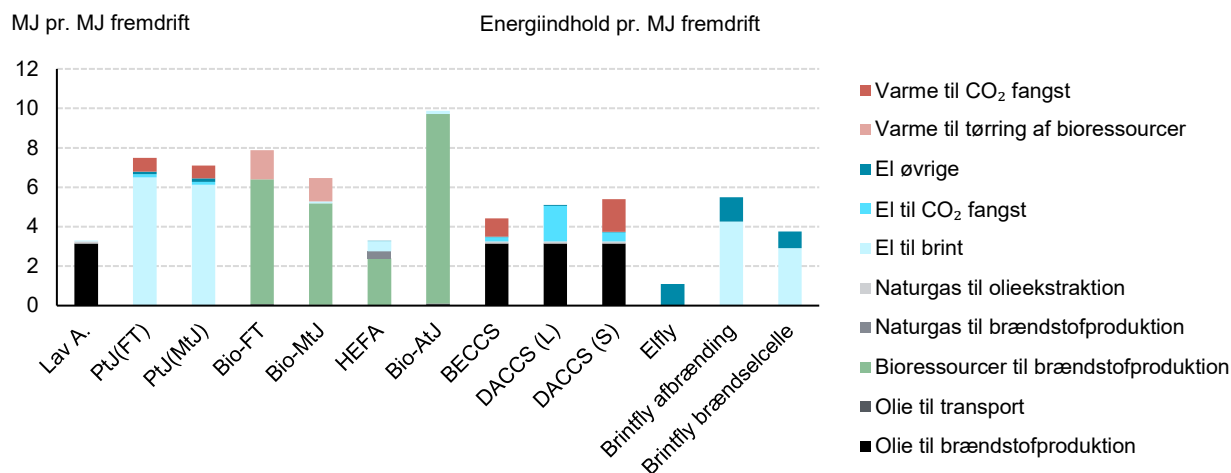
Brintfly

Ved direkte afbrænding af hydrogen er hydrogenproduktionen baseret på elektrolyseteknologierne AEC og PEM fra teknologikataloget. Transport af hydrogen er baseret på rørføring, hvor det antages, at rørene er nye og opererer ved et tryk på 140 bar samt en kapacitet på 800 MW. Det antages desuden, at hydrogen skal omdannes til flydende form ved lufthavnen for at kunne lagres i flyene. Dette indebærer et energiforbrug på 13,8 kWh/kg LH₂, baseret på Tongtong Zhang m.fl. (2023).⁶⁴ Ved anvendelse af brændselsceller er mange af de samme antagelser gældende som for direkte afbrænding. Dog inkluderes en brændselscelle med en effektivitet på 65 pct. baseret på CE Delft (2025).⁶⁵

5.2 Analyse

Energiinputtet for alle delteknologier kan sammenfattes i en figur

På Figur 9 fremgår det samlede energiinput pr. 1 MJ fremdrift for de forskellige delteknologier opdelt på kilde til brug. For de teknologier, hvor der indgår brint, er elektrolyseteknologien AEC anvendt. I de tilfælde, hvor der benyttes CO₂ er BECCS antaget som CO₂-kilde. En sensitivitet af disse antagelser fremgår af afsnittet "sensitivitetsanalyse". Derudover baseres gennemsnitsberegningen til farvescoringen på alle mulige teknologikombinationer.



Figur 9: Energiindhold for alle teknologierne

- Anm. 1: Energiinputtet er den samlede mængde energi, der er nødvendig for at levere 1 MJ fremdrift, herunder både energiforbrug i de enkelte processtrin samt energiindholdet i det anvendte drivmiddel
- Anm. 2: El øvrige repræsenterer elektricitet til direkte anvendelse, fordråbning af brint, transport af CO₂, kompensation for tryktab ved transport af brint i rør og elektricitet tab på transmissionsnettet.
- Anm. 3: Olie til transport repræsenterer transport af flybrændstof til lufthavne, transport af olie til fossil flybrændstofproduktion, transport af bioressourcer til biobrændstofproduktion.
- Anm. 4: Kilderne brugt til at estimere energiinputtet er beskrevet i teksten ovenfor under afsnittet begrundelse og tilgang.
- Kilde: Klimarådet

Elfly er den mest energieffektive teknologi

Figur 9 viser, at elfly er den mest energieffektive løsning med et samlet energiinput på 1,25 MJ pr. MJ fremdrift. Den høje effektivitet skyldes, at elektriciteten kan anvendes direkte til fremdrift, samt at elektriske motorer har en væsentligt højere effektivitet sammenlignet med forbrændingsmotorer. Det skal dog bemærkes, at elfly ikke forventes at kunne operere med samme rækkevidde eller passagerkapacitet som de øvrige teknologier. Hvis energieffektiviteten i stedet opgøres som energiforbrug pr. passagerkilometer, vil den relative sammenligning mellem teknologierne ændres, og elflyenes fordel fremstå mindre udtalt.

Brintfly har et højere energiinput end elfly

Inden for samme kategori som elfly er brintfly, som har en del højere energiinput. De største energitab opstår i forbindelse med brintproduktionen via elektrolyse samt i afbrændingsmotoren for direkte afbrænding og, for brændselcellefly, yderligere tab i selve brændselcellen. Derudover bidrager energiforbruget til at konvertere brint til flydende form til lagring også væsentligt til det samlede energiforbrug for brintfly.

Lavaromatiske fossile brændstoffer vurderes at give høj klimagevinst pr. ekstra energiinput.

Af Figur 9 fremgår det, at lavaromatiske fossile brændstoffer har et relativt lavt energiinput på 3,3 MJ pr. MJ fremdrift. Det ekstra energiforbrug, der er forbundet med reduktion af aromatindholdet, er relativt begrænset, hvilket indikerer, at der kan opnås en potentielt stor gevinst på non-CO₂ effekter i forhold til det nødvendige ekstra energiinput.

Energiinputtet til biobrændstoffer spænder bredt

Figuren viser derudover, at energiforbruget for biobrændstoffer varierer betydeligt mellem de forskellige teknologier. Den mest energieffektive biobrændstofvej er HEFA med et energiinput på 3,29 MJ pr. MJ fremdrift hvor den mest energiintensive er Bio-AtJ på 9,86 MJ pr. MJ fremdrift. For biobrændstofferne udgør det biogene input den største andel af det samlede energiinput.

Energiforbruget til transport af bioressourcer udgør en lille del af det samlede energiinput

Figur 9 viser, at energiforbruget til transport af bioressourcer udgør en meget lille del af det samlede energiinput. Bidraget fra olie anvendt til transport er næsten ikke synligt i figuren. Som beskrevet under antagelserne er transporten af bioressourcer til produktionsanlæggene opgjort på en forenklet måde. Særligt for HEFA, hvor forsyningskæden er mere kompleks og sandsynligvis kræver et højere energiforbrug til transport end for de øvrige løsninger. Her kan energiforbruget være undervurderet. Denne forenkling vurderes dog ikke at have væsentlig betydning for de samlede resultater, da transportens bidrag til det samlede energiforbrug er begrænset.

Tørring af biomasse udgør en relativ stor del af det samlede energiinput

Når tørring af våd biomasse indregnes i produktionen af biobrændstofferne Bio-FT og bio-MtJ, stiger det samlede energiinput betydeligt med henholdsvis 23 pct. og 22,6 pct. For bio-FT betyder det, at energiforbruget bliver højere end for begge de analyserede elektrobrændstoffer.

Elektrobrændstoffer er blandt de mest energikrævende teknologier

Energiinputtet for elektrobrændstoffer ligger blandt de højeste sammen med de fleste biobrændstoffer. Som det fremgår af Figur 9 er det især produktionen af brint via elektrolyse, der bidrager væsentligt til det samlede energiforbrug for disse teknologier.

Energiinputtet ved kompensation ligger på et mellemniveau

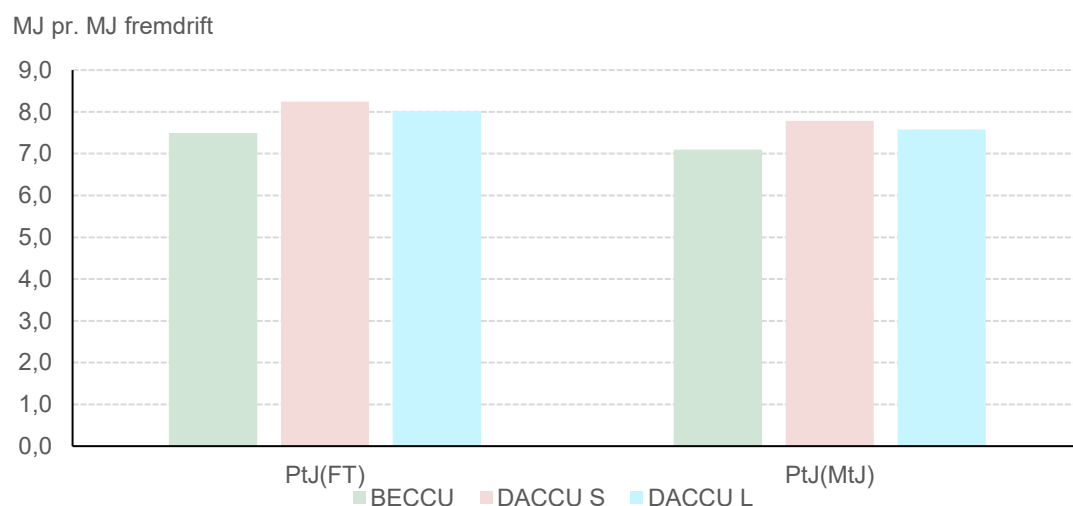
Figur 9 viser, at energiforbruget for kompensation via BECCS og DACCS ligger på et mellemniveau sammenlignet med de øvrige teknologier. Selve processen med at indfange, transportere og lagre CO₂ udgør under halvdelen af det samlede energiinput. Den største del af energiinputtet knytter sig i stedet til produktionen af det fossile brændstof samt til energiindholdet i det anvendte drivmiddel.

Opgørelsen omfatter dog ikke kompensation for eventuelle biprodukter. Det kan diskuteres, om sådanne biprodukter bør kompenseres for, særligt i et fremtidigt energisystem med en højere grad af elektrificering, hvor biprodukterne i mindre grad kan anvendes og i højere grad kan betragtes som overskuds- eller restprodukter. Dette er ikke indregnet i analysen og kan have betydning for det samlede energiforbrug.

Sensitivitetsanalyse

Valg af fangstteknologi påvirker energiforbruget for elektrobrændstoffer

Da elektrobrændstoffer kan produceres med forskellige CO₂-fangstteknologier, er der gennemført en følsomhedsanalyse for at belyse, hvordan valget af teknologi påvirker det samlede energiinput. Resultaterne fremgår af Figur 10.



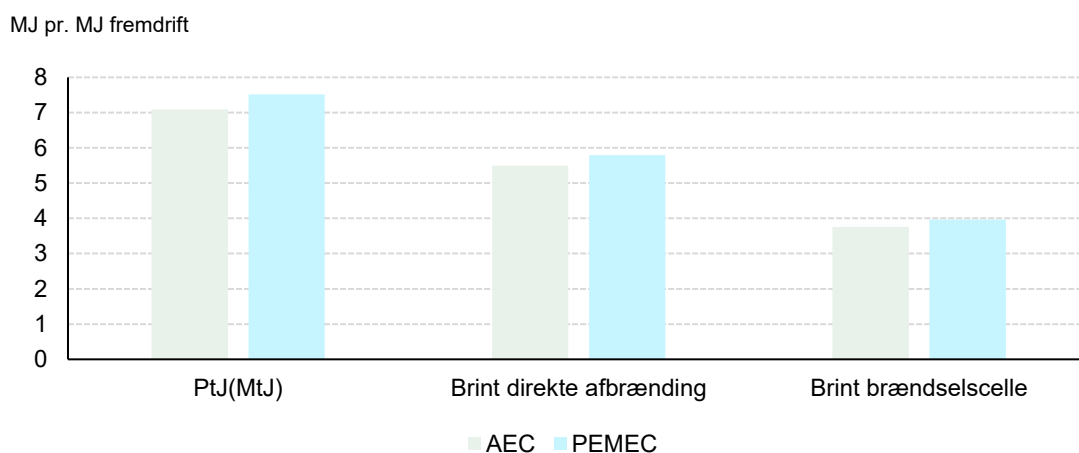
Figur 10: Energiinputtet for elektrobrændstoffer med varieret fangstteknologi

Kilde: Klimarådet

Figuren viser, at anvendelse af fangstteknologien BECCU giver det laveste energiinput for både PtJ(FT) og PtJ(MtJ). Energiinputtet udgør henholdsvis 7,5 og 7,1 MJ pr. MJ fremdrift. For begge elektrobrændstoffer stiger energiforbruget, når der anvendes DACCU-teknologier. Den mest energiintensive løsning er solid DACCU. Sammenlignet med BECCU medfører denne teknologi en stigning i energiinputtet på omkring 10,1 pct. for PtJ(FT) og 9,7 pct. for PtJ(MtJ).

Valg af elektrolyseteknologi påvirker energiforbruget for elektrobrændstoffer og brintfly

Da både elektrobrændstoffer og brintfly kræver betydelige mængder brint, og da brint kan produceres ved hjælp af forskellige elektrolyseteknologier, er der gennemført en følsomhedsanalyse for at belyse, hvordan teknologivalget påvirker det samlede energiinput. Resultaterne fremgår af Figur 11.



Figur 11: Energiinputtet for PtJ(MtJ) og brintfly med forskellige elektrolyseteknologi

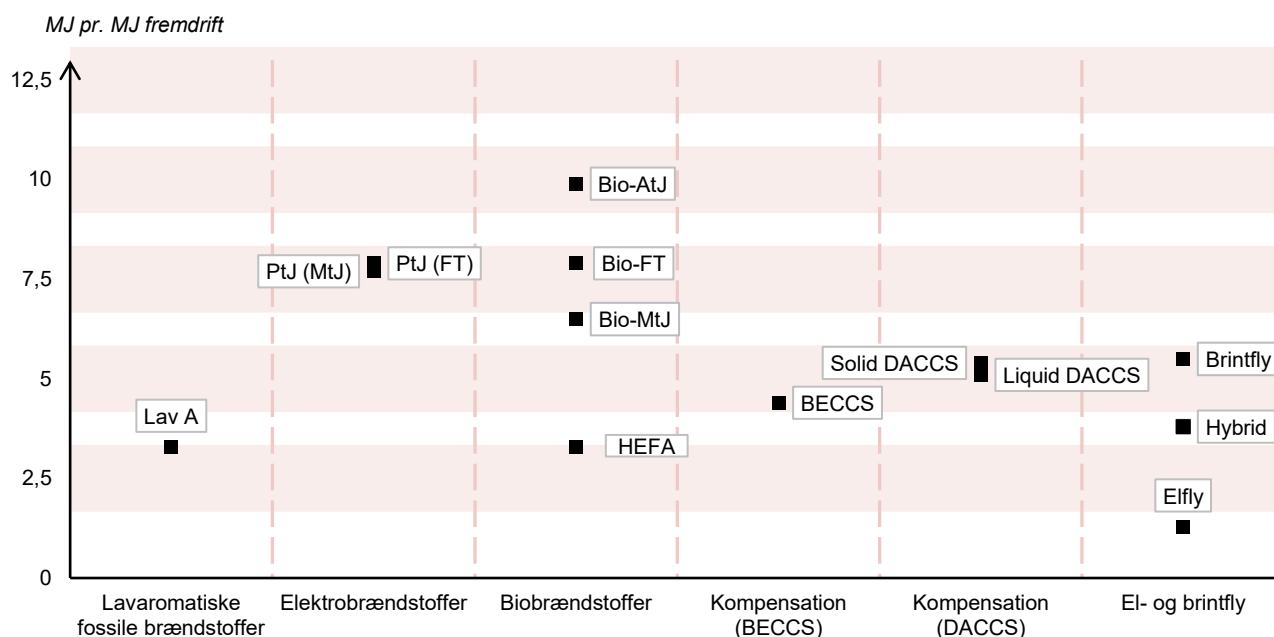
Kilde: Klimarådet.

Figuren viser, at anvendelse af elektrolyseteknologien AEC giver det laveste energiinput for både PtJ(MtJ) og for de to brintflyteknologier baseret på henholdsvis direkte afbrænding og brændselsceller. Energiinputtet udgør henholdsvis 7,1, 5,5 og 3,6 MJ pr. MJ fremdrift. For alle de analyserede teknologier stiger energiforbruget, når der anvendes PEMEC i stedet. Stigningen ligger i intervallet 5,5-5,9 pct.

Følsomhedsanalysen er ikke lavet for elektrobrændstoffet PtJ(FT), da elforbruget fra Energistyrelsen inkluderer effektiviteten fra elektrolysen.

5.3 Resultater

En samlet kortlægning af energiforbruget for de analyserede teknologier fremgår af Figur 12. I figuren repræsenterer hver prik det gennemsnitlige energiforbrug for den pågældende teknologi.



Figur 12: Sammenfatning af energiforbrug for de analyserede teknologier

Kilde: Klimarådet.

Figur 12 viser, at elektrobrændstoffer har et højt energiinput sammenlignet med de øvrige teknologier. Det samme gælder for størstedelen af biobrændstofferne. Energiinputtet for biobrændstoffer varierer dog betydeligt. HEFA skiller sig ud med et relativt lavt energiinput. Samlet set ligger elektro- og biobrændstoffer derfor højt i energiinputtet. Kompensation via BECCS og DACCS og brintfly placerer sig i midten af feltet. Til sidst er de mest energieffektive løsninger i analysen elfly og lavaromatiske fossile brændstoffer, som har det laveste energiinput.

Beregning af gennemsnitligt energiforbrug

For at muliggøre en sammenlignende vurdering af de enkelte teknologier er der beregnet et gennemsnitligt energiforbrug for hver løsning baseret på de inkluderede teknologier. Det gennemsnitlige energiforbrug for hver teknologi fremgår af Tabel 15 og er visualiseret ved hjælp af trafiklysfarver, jf. metodeafsnittet.

Tabel 15: Farvescoring af teknologiernes gennemsnitlige energiforbrug

Parameter	Lavaromatisk fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Energiforbrug (MJ pr. MJ fremdrift)	3,3	7,8 [7,1-8,2]	6,9 [3,3-9,9]	4,4	5,2 [5,1-5,4]	El: 1,2 Brint: 4,6 [3,8-5,5]

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Elfly.** Er den mest energieffektive løsning, da elektricitet kan anvendes direkte til fremdrift, og elektriske motorer har en væsentligt højere virkningsgrad end forbrændingsmotorer. Dog afspejler analysen ikke energiforbrug pr. passager kilometer, som ville kunne påvirke den relative sammenligning mellem teknologierne og gøre elfly mindre fordelagtige grundet rækkevidde og passagerkapacitets begrænsninger
- **Lavaromatisk fossilt brændstof.** Har et relativt lavt energiinput og kan potentielt reducere non-CO₂-effekter uden et væsentligt øget energiforbrug
- **Bio- og elektrobrændstoffer.** Har det højeste energiinput. Energiforbruget for biobrændstoffer varierer dog betydeligt mellem teknologierne.
- **Biobrændstoffer.** Tørring af biomasse bidrager væsentligt til det samlede energiinput, som gør nogle biobrændstoffer lige så energiintensive som elektrobrændstoffer
- **Kompensation via BECCS og DACCS.** Energiinputtet ligger i den mellemste del af spændet blandt de analyserede teknologier.
- **Transport.** Udgør kun en lille del af det samlede energiforbrug, og antagelserne herom har derfor begrænset betydning for resultaterne.

6 Barrierer for opskalering uden for sektoren

Implementeringen af nye teknologier i luftfarten kan afhænge af ressourcer og infrastrukturen uden for selve flysektoren. En analyse af eksterne værdikæder er derfor vigtig for at belyse, i hvilket omfang forhold uden for sektoren kan udgøre barrierer for opskaleringen af de enkelte teknologier.

6.1 Begrundelse og tilgang

Ressourcer og infrastruktur kan begrænse opskalering

De forskellige teknologier er afhængige af forskellige typer ressourcer og bagvedliggende infrastruktur for at kunne udbredes i stor skala. Analysen fokuserer på en række forhold, som vurderes at kunne begrænse udbredelsen af teknologierne. Analysen er ikke udtømmende og andre forhold kan også påvirke udbredelsen af teknologierne. Klimarådet har valgt at fokusere på følgende fem elementer:

- Tilgængelighed af råolie
- Elnettets kapacitet
- Tilgængelighed af ikke-fossil elproduktion
- Tilgængelighed af bioressourcer
- CO₂-lagringskapacitet

Barrierens betydning og sandsynlighed danner grundlag for farvescoringen

Farvescoringen er baseret på en samlet kvalitativ vurdering af, hvor hård en begrænsning den pågældende ressource eller infrastruktur udgør for opskalering af teknologien, og hvor sandsynligt eller usikkert det er, at begrænsningen vil opstå.

Vurderingerne er baserede på den tilgængelige litteratur samt Klimarådets egne analyser.

Farvescoring er vurderet ud fra følgende kriterier:

- **En barriere vurderes som høj risiko (rød)**, når der er betydelig usikkerhed omkring barrieren eller høj sandsynlighed for, at begrænsningen opstår, eller hvis begrænsningen udgør en hård barriere for teknologiens opskalering.
- **En barriere vurderes som mellem risiko (gul)**, når der er tegn på udfordringer, men hvor begrænsningen vurderes at kunne håndteres gennem udbygning, import eller eksport.
- **En barriere vurderes som lav risiko (grøn)**, når ressourcen eller infrastrukturen vurderes at være tilgængelig i tilstrækkeligt omfang og/eller når risikoen for at begrænsninger opstår, vurderes at være lav.

Resultater vises med en trafiklysmodel

Teknologiernes performance vises med en trafiklysmodel, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen neden for angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 16: Definition af skala til scoring af barrierer for opskalering uden for sektoren

Barrierer for opskalering uden for sektoren				
Score	Grøn: Lav risiko	Gul: Mellem risiko	Rød: Høj risiko	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

6.2 Analyse

Eventuelle begrænsninger i værdikæden påvirker opskaleringen af teknologier forskelligt

Tilgængeligheden af ressourcer og infrastruktur påvirker mulighederne for opskalering af teknologierne i forskelligt omfang. Centrale barrierer for de analyserede teknologier omfatter:

- **Begrænset tilgængelighed af råolie.** Kan udgøre en barriere for produktionen af fossilt flybrændstof. Dette påvirker både produktionen af lavaromatisk fossilt flybrændstof og teknologier, hvor luftfarten fortsat er baseret på fossile brændstoffer.
- **Kapacitetsbegrænsninger af elnet og ikke-fossil elektricitet.** Flere teknologier til reduktion af luftfartens drivhusgasudledninger er forbundet med et højt elforbrug. Dette gælder særligt elektrobrændstoffer, DACCS samt el- og brintfly. Kapacitetsbegrænsninger i elnettet og utilstrækkelig udbygning af ikke-fossil elproduktion kan derfor udgøre væsentlige barrierer for opskaleringen af disse teknologier.
- **Begrænset tilgængelighed af bioressourcer.** Biobrændstoffer og BECCS er forbundet med betydelige mængder bioressourcer. Der ses her på tilgængeligheden af rest- og affaldsprodukter til biobrændstoffer og bæredygtig biomasse til BECCS. Disse ressourcer har stor betydning for mulighederne for opskalering af teknologierne.
- **Begrænset CO₂-lagringskapacitet.** BECCS og DACCS forudsætter permanent geologisk lagring af CO₂. Begrænset adgang til lagringskapacitet kan derfor udgøre en barriere for opskaleringen af disse teknologier.

Tilgængelighed af råolie

Teknologier, der fortsat er afhængige af fossilt flybrændstof, er indirekte afhængige af tilgængeligheden af råolie. Hvis adgangen til råolie bliver begrænset, kan det udgøre en barriere for opskaleringen af teknologier som lavaromatiske fossile brændstoffer samt løsninger, hvor luftfartens udledninger håndteres gennem compensation.

Råolie handles på et globalt marked

Råolie er en globalt handlet råvare med en veletableret international værdikæde. Produktion, raffinering, transport og distribution af råolie foregår allerede i stor skala, og den nødvendige infrastruktur til produktion af fossilt flybrændstof er derfor etableret.

I modsætning til flere af de øvrige teknologier i analysen, er der ikke behov for at opbygge nye forsyningskæder eller ny storskala infrastruktur for at kunne levere ressourcen til luftfarten.

Der vurderes ikke at være tegn på fysisk knaphed på råolie i den analyserede periode

Ifølge British Petroleum's opgørelser svarer de kendte globale råoliereserver til mere end 50 års produktion ved det nuværende forbrugsniveau.⁶⁶ Dette estimat er forbundet med usikkerhed og påvirkes løbende af nye reservefund, teknologisk udvikling og ændringer i efterspørgslen. Elektrificering og effektivisering forventes at reducere den globale efterspørgsel efter råolie over tid. Hvis råolieforbruget falder, vil de kendte reserver kunne række længere end ved et uændret forbrug.

På denne baggrund vurderes den fysiske tilgængelighed af råolie ikke at udgøre en væsentlig barriere for opskalering af fossilt baserede løsninger i flysektoren. På meget lang sigt kan tilgængeligheden dog blive en begrænsende faktor for videre brug af fossilt brændstof. Dette gælder særligt, hvis efterspørgslen efter råolie forbliver høj, eller hvis udviklingen i nye reserver og produktion ikke kan følge efterspørgslen.

Tilgængeligheden af råolie vurderes primært at være forbundet med markeds- og geopolitiske risici

Selvom råolie er en globalt handlet ressource, kan forsyningen påvirkes af geopolitiske forhold, handelsrestriktioner og udsving i verdensmarkedspriserne. Disse forhold kan påvirke både tilgængelighed og omkostninger ved fossilt flybrændstof, men vurderes i mindre grad at udgøre en fysisk begrænsning for den langsigtede adgang til ressourcen. Der kan dog være politiske ønsker om fossil uafhængighed samt stabil forsyningssikkerhed og priser der taler imod.

Selvom en høj selvforsyningsgrad kan være en fordel, indgår dette ikke direkte som et forhold i analysen. Analysen fokuserer på teknologiernes tekniske egenskaber og deres potentiale for opskalering. Når eventuelle barrierer for opskalering uden for sektoren evalueres, indgår forsyningssikkerhed, geopolitiske risici som eksterne rammevilkår. Forsyningssikkerhed vurderes derfor primært i forhold til påvirkningen af de samfundsøkonomiske forhold ved anvendelsen frem for i forhold til teknologiens mulighed for implementering. En eventuel begrænset adgang til ressourcen vil i højere grad påvirke aktivitetsniveauet end teknologiens tekniske anvendelighed.

Elnettets kapacitet

De elintensive teknologier medfører et behov for øget udbygning af elinfrastrukturen. Kapacitetsbegrænsninger i elnettet kan forsinke tilslutningen af ny forbrugs- og produktionskapacitet og dermed udgøre en barriere for opskaleringen af disse teknologier.

Kapacitetsbegrænsninger i elnettet er allerede en udfordring

Kapacitetsbegrænsninger i det danske transmissionsnet udgør allerede i dag en udfordring. Energinet indførte den 2. marts 2026 en midlertidig pause for nye tilslutningsaftaler til danske transmissionsnettet, hvilket skyldes en markant stigning i elforbrugere der vil tilsluttes elnettet, hvilket har skabt begrænset kapacitet til nye forbrugere. Energinet skriver i forbindelse med beslutningen, at analyser viser, ”at den ledige kapacitet i transmissionsnettet er meget begrænset allerede nu og i de kommende år, på trods af et investeringsniveau i transmissionsnettet der er markant højere end for få år siden.”⁶⁷

Pausen blev indført for at skabe overblik over kapacitetssituationen og udvikle en ny model for prioritering af sagsbehandlingen af større nettilslutninger. Energinet understreger samtidig, at pausen ikke i sig selv løser kapacitetsudfordringerne, men skal skabe et bedre grundlag for en mere kontrolleret håndtering af fremtidige større tilslutninger.

Den nye model behandler projekter ud fra blandt andet modenhed, fremdrift og netvenlighed.⁶⁸ Da Power-to-X-anlæg generelt har en relativt lav teknologisk modenhed sammenlignet med mange andre projekter, kan sådanne anlæg blive påvirket af prioriteringen blandt andet med potentielle forsinkelser i godkendelser. Dette kan i sidste ende påvirke produktionen af elektrobrændstoffer og derfor opskaleringen af denne teknologi.

Rigsrevisionen vurderer, at Energinets styring af elnetudbygningen er meget utilfredsstillende

Rigsrevisionen har i april 2025 selv taget stilling til at undersøge om udbygningen af elnettet i Danmark er tilfredsstillende. I *Beretning om Energinets udbygning af elnettet* fra april 2026 skriver rigsrevisionen blandt andet følgende:

*”Statsrevisorerne finder styringen af udbygningen af elnettet kritisabel, da ca. 70 % af de igangsatte udbygningsprojekter er forsinkede, og da Energinet kun delvist har et overblik over årsagerne til forsinkelserne. De projekter, som ikke er forsinkede, er generelt nystartede. De forsinkede projekter tager i gennemsnit ca. 80 % længere tid end forventet.”*⁶⁹

Forsinkelserne i udbygningen af transmissionsnettet kan bidrage til at forlænge perioden med begrænset netkapacitet og dermed forsinke opskaleringen af elintensive teknologier.

Flere lande i EU har lange nettilslutningskøer

Kapacitetsbegrænsninger i elnettet er ikke alene et dansk problem. I flere europæiske lande kan den eksisterende og planlagte netinfrastruktur ikke følge med udviklingen, hvilket resulterer i lange tilslutningskøer og forsinkelser i netudbygningen. Ifølge BCG svarede den samlede kapacitet i nettilslutningskøerne i 2025 til omkring 30 gange Finlands maksimale elbelastning i 2024, 12 gange Italiens og 6 gange Hollands.⁷⁰ Tallene omfatter både projekter inden for elforbrug, elproduktion og energilagring. Det skal understreges at køerne omfatter alt fra de tidligste forespørgsler til projekter tæt på realisering. Nogle projekter vil derfor aldrig blive gennemført. Tallene kan derfor kun bruges til at illustrere, at nettilslutningskøer er et udbredt problem i Europa. De kan ikke sige noget om direkte mål for, hvor meget faktisk nyt elforbrug eller ny produktion der tilsluttes elnettet.

Kapacitetsbegrænsninger i elnettet er en global udfordring

Ifølge IEA udgør utilstrækkelig netkapacitet en væsentlig flaskehals i mange regioner, som forsinker udbygningen af ny elproduktion, energilagring og forbrug. IEA peger på, at køerne til nettilslutning har nået rekordhøje niveauer. Mere end 2.500 GW vedvarende energiprojekter, lagringsprojekter og større elforbrugsprojekter er gået i stå grundet netkøer på global plan. En væsentlig årsag er, at investeringerne i elnettet ikke er fulgt med investeringerne i ny produktionskapacitet.⁷¹

Samtidig er tidsforløbet for etablering af ny netinfrastruktur væsentligt længere end for etablering af produktions- og forbrugsanlæg. Planlægning, tilladelser og opførelse af ny netinfrastruktur kan tage 5-15 år, mens etableringen af nye produktions- og forbrugsanlæg ofte kan gennemføres på 1-5 år. Denne forskel gør det vanskeligt at sikre en koordineret udbygning af elproduktion og elnettets kapacitet. Derudover er priserne på komponenter til elnetudbygning steget markant gennem de seneste år, hvilket kan bidrage yderligere til udfordringerne.⁷²

Samlet peger dette på, at kapacitetsbegrænsninger i elnettet allerede i dag udgør en barriere for opskaleringen af elintensive teknologier. Udfordringen vurderes særligt at være relevant på kort sigt. På længere sigt forventes udfordringen at mindskes i det omfang man får realiseret en fortsat udbygning af elnettet og samplacering af produktion og forbrug. Hvorvidt dette går hurtigt nok, er dog fortsat usikkert. De langtidssigtede barrierer for opskalering er derfor uvis.

Tilgængelighed af ikke-fossil elkapacitet

Det høje elforbrug for de elintensive teknologier skal være additionel ikke-fossilt for at opnå et lavt drivhusgasaftryk. Hvis ikke elektriciteten er additionel, kan elektriciteten til de alternative brændstoffer konkurrere med andre sektors elektrificering om den samme udbygning af ikke-fossil kapacitet, hvilket kan skabe udledninger i andre sektorer.

Analysens antagelser

Klimarådet har analyseret, hvor stor den årlige udbygning af ikke-fossil elproduktion i EU skal være for at imødekomme luftfartens og øvrige sektors efterspørgsel på elektricitet frem mod 2050.

Analysen tager udgangspunkt i TYNDP-scenarierne som estimat for udviklingen i den samlede ikke-fossile elproduktion i Europa. Da den samlede elproduktion er forholdsvis ens i scenarierne Distributed Energy (DE) og Global Ambition (GA), har valget af scenarie begrænset betydning for resultaterne.⁷³

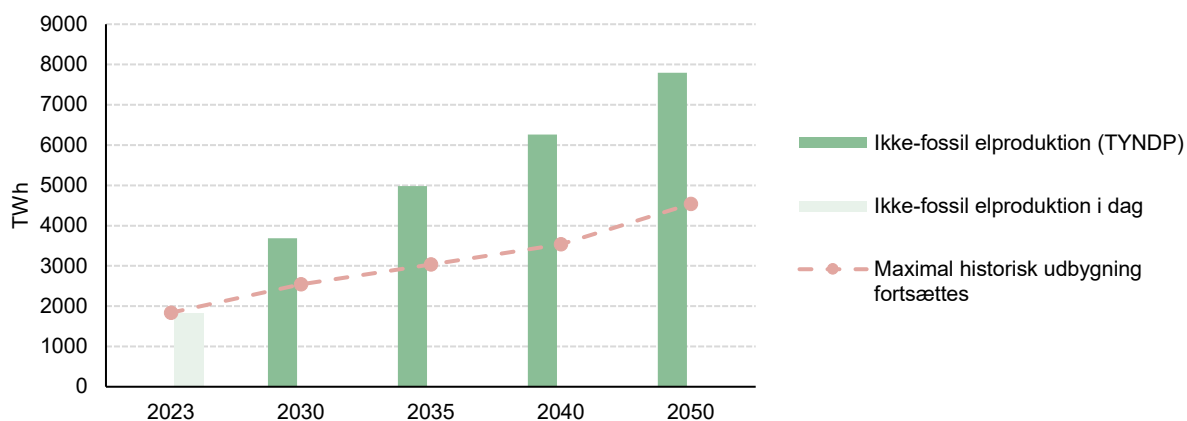
Den historiske udbygningsrate er beregnet på baggrund af Eurostats data for EU's elproduktion i perioden 2013-2023. Udbygningsraten er fastsat som den største observerede årlige stigning i produktionen fra vind- og solenergi. Den højeste historiske stigning fandt sted mellem 2022 og 2023, hvor produktionen steg med omkring 100 TWh.⁷⁴ Denne stigning anvendes som udbygningsrate for den fremadrettede udbygning i analysen.

Da elproduktionen fra atomkraft er altovervejende faldende i den analyserede periode (2013-2023), tager figuren ikke højde for den historiske udbygning af atomkraft og andre ikke-fossile energikilder end sol og vind.

Den historiske maksimale udbygningstakt er ikke tilstrækkelig

Figur 13 viser udviklingen i den ikke-fossile elproduktion i DE TYNDP-scenariet sammenholdt med et forløb, hvor den historisk højeste årlige udbygning af vind- og solproduktion videreføres frem mod 2050.

Figuren viser, at en fortsat årlig udbygning på omkring 100 TWh ikke er tilstrækkelig til at imødekomme den forventede udvikling i den ikke-fossile elproduktion. For at nå det produktionsniveau, der fremgår af TYNDP-scenarierne, skal den årlige udbygning være mere end dobbelt så høj som den hidtil største historisk observerede udbygning af vind- og solenergi.



Figur 13: Udbygningsbehov for ikke-fossil elproduktion frem mod 2050

Anm. 1: Ikke-fossil elproduktion i fremtiden tager udgangspunkt i et *Ten-Year Network Development Plan*-scenarie (TYNDP-scenarie).⁷⁵ Alle lande i EU samt Storbritannien, Schweiz og Norge er inkluderet.

Anm. 2: I figuren lægges den maksimale årlige historiske udbygning i perioden 2013-2023 til grund for den fremtidige fortsatte årlige udbygning af ikke-fossil elproduktion. Den historiske opgørelse er baseret på den største årlige stigning i elproduktion med sol- og vindenergi. Dette var fra 2022 til 2023 med en stigning på cirka 100 TWh.

Anm. 3: Beregningerne af den årlige udbygningsrate baserer sig på datakilder for perioden 2013-2023. Da elproduktionen fra atomkraft er altovervejende faldende i perioden, tager figuren ikke højde for den historiske udbygning af atomkraft og andre ikke-fossile energikilder end sol og vind.

Kilder: entso-e og entso-g⁷⁶, eurostat⁷⁷ og Klimarådet.

Tilgængeligheden af ikke-fossil elproduktion kan udgøre en barriere for opskaleringen af elintensive teknologier

Analysen indikerer således, at tilgængeligheden af ikke-fossil elproduktion kan udgøre en barriere for opskaleringen af elintensive teknologier med højt elforbrug. Udfordringen vurderes særligt at være relevant på kort sigt, men resultaterne peger samtidig på, at den også kan være betydende på længere sigt, hvis udbygningsraten af ikke-fossil elektricitet ikke øges væsentligt. Det skal dog fremhæves, at den historiske udbygningsrate ikke nødvendigvis er retningsgivende for de fremtidige udbygningsmuligheder. Barrieren er derfor ikke nødvendigvis hård, idet udbygningsraten i sidste ende er en politisk og investeringsmæssig beslutning snarere end en fysisk begrænsning.

Det er derudover værd at bemærke, at der for indeværende er en stor import af grønne energiteknologier som fx solceller og batterier, samt af kritiske metaller der vil være behov for i en opskalering. Dette kan betyde ustabile forsyningskæder og priser i tilfælde af geopolitiske kriser, hvilket kan forsinke og fordyre opskaleringen.

Tilgængelighed af bioressourcer

I det følgende afsnit ses der nærmere på tilgængeligheden af bioressourcer, opbygning af ny bioressourceinfrastruktur, og på hvorfor det er relevant at vurdere luftfartsteknologiernes træk på denne ressource.

Bioressourcer handles på et globalt marked

Bioressourcer handles på et globalt marked, og bioressourcer kan frit importeres for at leve op til iblandingskravene eller for at skaffe ressourcer til BECCS. Import sikrer et tilgængeligt udbud og giver forpligtede aktører mulighed for at omkostningsminimere.

Muligheden for import skal dog ses i lyset af, at bioressourcer er knappe, og de bliver stadig mere centrale for alle lande, efterhånden som verden går mod netto-nuludledning. Bioressourcer er nemlig det oplagte alternativ til fossile ressourcer,

både til energi, transport, plastik, kemikalier og andre materialer, og som leverandør af kulstof til negative udledninger, der skal kompensere for udledninger i alle sektorer. Klimarådet har i adskillige analyser peget på denne udfordring.⁷⁸

Klimarådet har desuden analyseret, hvordan der kan skabes en bedre kulstofbalance i forhold til udlandet blandt andet gennem ændringer i fødevareproduktion og foderimport. På den baggrund har rådet anbefalet, at opfyldelsen af danske klimamål ikke baseres på kulstoflagring af importeret biogent kulstof. Rådet har desuden anbefalet, at restudledninger og behovet for kulstof reduceres mest muligt i alle sektorer, og at de knappe bioressourcer prioriteres til anvendelser, som ikke kan undværes, og hvor udledningerne ikke elimineres på anden vis.⁷⁹ Disse betragtninger er også relevante for EU.

Derudover bliver en stor del af den brugte madolie (omkring 80 pct.) til blandt andet produktion af biobrændstoffet HEFA, importeret fra lande uden for EU. Der har i de senere år været et stigende antal sager, som indikerer risiko for fejlklassificering eller svindel i forbindelse med importeret brugt madolie, hvor ressourcen potentielt kan være jomfruelig palmeolie.⁸⁰ Tilgængeligheden af bioressourcer er derfor ikke alene et spørgsmål om fysiske mængder, men også om sporbarhed og dokumentation af ressourcernes oprindelse og bæredygtighed.

Det er derfor interessant at analysere, hvor mange rest- og affaldsressourcer, der er tilgængelige i EU, og som er relevante for produktion af biobrændstof til opfyldelse af iblandingskravene, og sætte mængden i relation til, hvad der kræves. Om tilgængeligheden passer med efterspørgslen er altså en indikator for, om omstillingen i EU kan være til inspiration for andre.

Opgørelser af bioressourcepotentialer er usikre og baseret på antagelser

Mange har undersøgt tilgængeligheden af bioressourcer til blandt andet energi og transport, såvel på globalt niveau som på EU-niveau. På globalt niveau har opgørelserne tidligere varieret meget, men de er over tid konvergeret henimod en lavere mængde af tilgængelige bioressourcer i fremtiden end i tidligere opgørelser. Nyere opgørelser forudsiger typisk, at det globale potentiale for bioressourcer til energi, transport og materialer ligger i intervallet 40 - 160 EJ pr. år i 2050.⁸¹ Opgørelserne er baseret på en lang række antagelser om blandt andet teknologisk udvikling, udbyttestigninger i landbruget og brug af landareal til at producere energiafgrøder. Opgørelser af denne type vil altid afhænge af de gjorte antagelser og være behæftet med betydelig usikkerhed.

De fleste opgørelser antager, at fødevareproduktionen opretholdes, idet der gøres antagelser om befolkningsudvikling og fødevarervalg, herunder landareal foder og dermed til produktion af kød. Det centrale spørgsmål om, hvor stor en del af dyrkningsarealet, der bruges til henholdsvis fødevarer og energiafgrøder, håndteres altså delvist i opgørelserne. Fødevarerproduktion og -priser kan dog stadig blive påvirket af en stor efterspørgsel efter energiafgrøder og areal hertil. Der er derfor fortsat en potentiel afvejning mellem hensynet til fødevarerproduktion og hensynet til at skaffe nok bioressourcer til energi, transport og negative udledninger.

En anden central afvejning går mellem øgning af bioressourceproduktionen og beskyttelsen af biodiversiteten. Denne afvejning håndteres typisk ved at inddrage et hensyn til allerede beskyttede områder. Der er dog ikke beskyttet areal nok, hverken i EU eller globalt, til at vende tabet af biodiversitet. FN vurderer, at 17,6 pct. af det globale landareal er omfattet af en beskyttelse, idet det dog for de fleste områder er uklart, om beskyttelsen er tilstrækkelig.⁸² Under alle omstændigheder er det beskyttede areal fortsat under den globale forpligtelse til at beskytte 30 pct. af landarealet.⁸³ Samtidig ekspanderer landbruget fortsat globalt på bekostning af blandt andet skov.⁸⁴

Afvejningen mellem biomasseproduktionen og biodiversiteten betyder, at den fremtidige bæredygtigt tilgængelige mængde af bioressourcer i høj grad afhænger af om *bæredygtigheden* også inkluderer, at tabet af biodiversitet skal stoppes.⁸⁵

Bioressourcernes dobbeltrolle som en løsning og som en kilde til nye udfordringer kunne håndteres gennem kvantitative begrænsninger for brugen af biomasse i EU's regulering. Sådanne begrænsninger findes dog endnu ikke – eller kun i meget begrænset omfang.⁸⁶

EU har undersøgt tilgængelige ressourcer til biobrændstofproduktion i EU i 2030 og i 2050

Europa-Kommissionen udgav i 2024 resultaterne fra et stort projekt, *Development of outlook for the necessary means to build capacity for drop-in advanced biofuels*, som indeholder forskellige scenarier for potentialet for bioressourcer i EU,

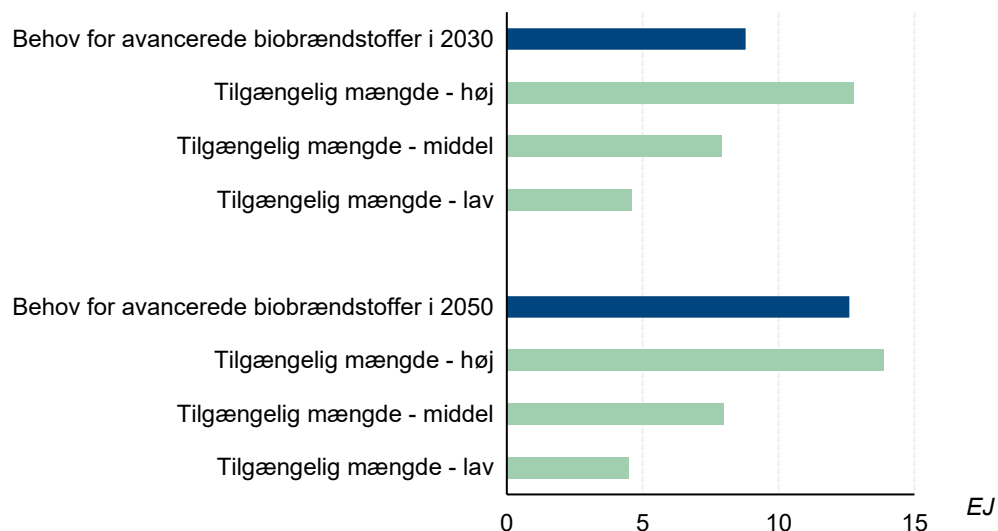
UK og associerede lande. Disse mængder holdes op imod, hvad der er behov for ud fra EU's iblandingskrav og andre politikker, der trækker på de samme typer af bioressourcer, baseret på forskellige scenarier for trafikudviklingen fremadrettet.

Scenarierne tager højde for, at der også er efterspørgsel efter bioressourcer til el- og varmeproduktion, og der antages en fremtidig efterspørgsel efter biomasse til biobaserede materialer. Derudover indgår der et træk på bioressourcer til transportsektoren som følge af VE-direktivets iblandingskrav for transportsektoren generelt, iblandingskravene for luftfart i *ReFuelEU Aviation* og CO₂e-fortrængningskravene for søfart i *FuelEU Maritime*.

Europa-Kommissionen opstiller tre scenarier for tilgængeligheden af bioressourcer til avancerede biobrændstoffer: et lavt, et middel og et højt scenarie. De tre scenarier er:

- **Lavt:** I dette scenarie antages et højt niveau af konkurrerende anvendelser, et klimabetinget fald i afgrødeudbyttet i Sydeuropa, og et begrænset areal til dedikerede *non-food*-energiagrøder.
- **Middel:** Dette er et *business-as-usual*-scenarie, hvor politiske incitamenter fremmer biomasseproduktionen. Der antages et middelniveau af konkurrerende anvendelser, et begrænset klimabetinget fald i udbyttet i Sydeuropa og at et større areal kan anvendes til produktion af energiagrøder.
- **Højt:** Dette scenarie har et lavt niveau af konkurrerende anvendelser og en højere efterspørgsel og højere priser på bioressourcer. Her antages intet klimabetinget fald i udbyttet og der anvendes det største landareal til energiagrøder.

De tre scenariers bioressourcepotentiale sammenlignet med det forventede behov fremgår af figur 14. Behovet er genereret med kørsler i PRIMES-modellen, en energisystem-model, der bruges af Europa-Kommissionen til at fremskrive efterspørgsel, udbud, og priser i EU's medlemsstater.



Figur 14: Tilgængelige relevante bioressourcer i forhold til mængder efterspurgt af marked og politik

Anm. 1: Studiet indeholder flere scenarier. Her er vist tre ressourcepotentialer og et midterscenarie for trafikudvikling mv.

Anm. 2: Værdierne på figuren udtrykker energiindholdet i bioressourcerne i exajoule før konvertering til brændstof og andre anvendelser.

Kilde: Europa-Kommissionen.⁸⁷

EU har formentlig ikke bæredygtige bioressourcer nok hverken i 2030 eller i 2050

Europa-Kommissionens opgørelse viser, at det forventede behov for bioressourcer til luftfart ikke kan dækkes af ressourcer fra EU i hverken det lave scenarie eller i medium-scenariet, se Figur 14. I det lave scenarie er behovet næsten dobbelt så højt som den tilgængelige mængde i EU. Medium-scenariet kan levere 90 pct. af behovet i 2030, men kun det høje scenarie kan dække behovet fuldt ud.

For 2050 kan behovet langt fra opfyldes, idet kun 63 pct. af behovet er forsynet i medium-scenariet. Kun det høje ressourcescenarie vil kunne dække behovet i 2050, og dette scenarie kræver, at betydelige arealer inddrages til dyrkning af energiafgrøder. Dette er ikke uproblematisk, hvilket uddybes nedenfor.

EU forudser, at energiafgrøder dyrket på nye arealer vil spille en væsentlig rolle i 2050

Alle de tre scenarier anvender energiafgrøder på nye dyrkningsarealer, da mængden af tilgængelige restprodukter ikke er nok. Det antages, at udbyttetigninger for afgrøder til foder og fødevarer medfører, at en stigende andel af landbrugsarealet bliver forladt (*abandoned/unused*). Desuden forventes det, at en stigende del af landbrugsarealet bliver degraderet (*degraded*). Det antages, at energiafgrøder vil kunne dyrkes på både forladte og degraderede arealer i fremtiden.

Størrelsen af det tilgængelige forladte og degraderede areal i EU er vurderet til 8,3 mio. hektar i 2030, svarende til cirka det dobbelte af Danmarks areal, og 40 mio. hektar i 2050, svarende til cirka 9 gange Danmarks areal.⁸⁸ I det høje scenarie udnyttes 30 pct. af det forladte areal og 20 pct. af det degraderede landbrugsareal til energiafgrøder. I de to andre scenarier udnyttes lavere andele af disse arealer. De arealer, der udnyttes til energiafgrøder, i de forskellige scenarier fremgår af Tabel 17.

Tabel 17: Europa-Kommissionens forventninger til forladt og degraderet landbrugsareal i EU

Hektar i EU	2030		2050	
	Forladt	Degraderet	Forladt	Degraderet
Teknisk potentiale	3.350.798	4.996.751	7.633.725	31.958.700
Lavt	816.717	100.024	3.586.324	1.599.210
Medium	823.891	250.059	3.256.127	3.198.420
Høj	1.159.915	500.118	4.405.475	6.396.840

Anm. 1 Tabellen viser arealet til energiafgrøder udover det energiafgrødeareal, som allerede ligger i CAPRI-modellens baseline.

Kilde: Europa-Kommissionen.⁸⁹

Det er problematisk at antage, at arealer frigøres til energiafgrøder

Antagelsen om, at landbrugsarealer bliver tilgængelige til at dyrke energiafgrøder, fordi de bliver degraderet eller forladt, er problematisk af følgende grunde:

- Den fremtidige udbyttetigning, som skal frigøre arealer fra fødevarerproduktion, er usikker. Udbyttetigningen har globalt været stærkt fluktuerende, og har i den senere tid været faldende.⁹⁰ Selv om det skulle lykkes at fastholde en løbende udbyttetigning i EU, vil den sandsynligvis ske på bekostning af miljøhensyn, idet det vil kræve et større forbrug af næringsstoffer og potentielt også pesticider.⁹¹
- Ledige eller degraderede arealer vil ikke nødvendigvis i praksis vil blive anvendt til energiafgrøder. FN's Fødevare- og Landbrugsorganisation (FAO) opfordrer fx til, at degraderede arealer anvendes til fødevarerproduktion for at sikre mad til den voksende verdensbefolkning.⁹² Det er omvendt ikke givet, at energiafgrøder, hvis prisen bliver høj nok, ikke også vil blive dyrket på almindeligt landbrugsareal, hvilket efterlader et mindre areal til fødevarerproduktion.
- Ledige og degraderede arealer har stor betydning for biodiversiteten. I EU var 26,4 pct. af EU's areal beskyttet i 2023 ifølge EEA.⁹³ Heraf er 18,6 pct. Natura 2000-områder, hvoraf en stor del fortsat drives som konventionelt landbrug eller skovbrug. Hvis EU skal nå målet om 30 pct. beskyttede naturområder, skal yderligere 3,6 pct. af EU's landareal beskyttes. Det svarer til et område, der er 3,5 gange Danmarks areal. Desuden skal forvaltningen af de nuværende beskyttede områder forbedres. På denne baggrund peger et antal artikler på, at brug af store

nye landarealer til produktion af energiafgrøder er uforeneligt med ønsket om undgå yderligere tab af biodiversitet.⁹⁴

- Der er stigende opmærksomhed om, at selvom brug af jord til biobrændstoffer eller BECCS kan give nettogevinster for klimaet, ville genopretning af skov- og naturlige levesteder på disse arealer ofte give større klimafordele til en lavere omkostning, samtidig med at de vil gavne biodiversiteten.⁹⁵

Europa-Kommissionens studie er foretaget med en sammenhængende økonomisk modellering og behovsfremskrivning af alle relevante sektorer. En af de anvendte modeller er CAPRI-modellen (*Common Agricultural Policy Regional Impact*), der er designet til at analysere konsekvenser af EU's landbrugs-, miljø- og handelspolitikker. CAPRI anvender en udbudskurve for landbrugsareal, hvor arealet udvides eller trækker sig sammen afhængigt af det økonomiske afkast af jorden. CAPRI har indbygget forventninger til udbyttetigning og antagelser om at landareal, der ikke længere anvendes til fødevarer og foder, kan anvendes til energiafgrøder. Europa-Kommissionens studie inddrager tilsyneladende ikke biodiversitetsmæssige begrænsninger på landbrugsarealet, udover hvad der lå i EU's landbrugspolitik fra 2014-20. For skove er der derimod indlagt en forventning om en 5 pct. øgning af det beskyttede skovareal i scenarierne.

Klimarådet har vurderet mængden af bioressourcer til luftfart i 2035

Klimarådet har kigget på, om der er nok bioressourcer til luftfart i 2035 ud fra en *bottom-up* tilgang. Vurderingen er baseret på en analyse fra NGO'en ICCT, som undersøger tilgængelige mængder af rest- og affaldsprodukter fra EU til luftfart på baggrund af litteraturstudier. Den tilgængelige mængde sammenlignes derpå med behovet for biobrændstoffer til luftfart på basis af en trafikfremskrivning fra IRENA.⁹⁶ Der er tale om en langt simplere analyse end Europa-Kommissionens, da Klimarådet ikke har et modelapparat til rådighed af den karakter, som Europa-Kommissionen har.

Klimarådet tager udgangspunkt i lav-risiko-scenariet fra ICCT. Det nedskriver det tekniske potentiale for at tage højde for ressourcer med høj risiko for indirekte udledninger og for udbygningstakten for produktionskapacitet til biobrændstoffer. Scenariet tager højde for ressourcer til el- og varmeproduktion, men ikke for ressourcer til biomaterialer.

Klimarådet sætter mængderne i ICCT's scenarie i relation til en situation, hvor iblandingskravene i *ReFuelEU Aviation* skal opfyldes i 2035, og VE-direktivets generelle iblandingskrav til transportsektoren for 2030 videreføres til 2035, og at medlemslandene udnytter direktivets mulighed for dobbelttælling. Baseret på trafikfremskrivningen fra IRENA, når Klimarådet frem til et mindre brændstofbehov i luftfarten end ICCT's egen trafikfremskrivning. Behovet for rest- og affaldsprodukter til avancerede biobrændstoffer er derfor også tilsvarende lavere.

Det resulterer i, at der akkurat er nok rest- og affaldsprodukter i EU i 2035 til at opfylde iblandingskravene i luftfarten og generelt transportsektorkrav, når det beregningsteknisk forlænges fra 2030 til 2035. *ReFuelEU Aviation* forventes i 2035 at medføre en iblanding af 15 pct. biobrændstoffer i det anvendte flybrændstof. Størstedelen af den tilgængelige biomasse består af restprodukter fra landbrug fx halm, som det er teknologisk udfordrende at omdanne til flybrændstof.

Der er ikke i beregningen taget højde for en eventuelt fremtidig anvendelse af bioressourcer til materialer og heller ikke til, at EU også stiller CO₂-reduktionskrav til søfarten i *FuelEU Maritime*. Reduktionskravene til søfarten kan opfyldes på flere måder end ved iblanding af biobrændstoffer, men anvendes de, skal de være produceret af de samme typer rest- og affaldsprodukter som til luftfart og transportsektoren generelt.

På basis af ovenstående vurderer Klimarådet, at hvis luftfartens behov for bioressourcer skal opfyldes, vil der ikke være flere rest- og affaldsprodukter tilbage i EU i 2035 til EU's andel af international skibsfart eller til produktion af biomaterialer.

EU-kravene skaber et højt forbrug set i forhold til de tilgængelige bioressourcer

Klimarådet finder, at der i scenarierne i de forudgående afsnit, ikke er relevante rest- og affaldsressourcer mv. nok i EU til at dække luftfartens behov, hvis konkurrerende behov fra andre sektorer også skal tages i betragtning. Klimarådet er desuden skeptisk over for antagelser om, at store nye landarealer vil kunne afsættes til dyrkning af energiafgrøder frem til 2050. Transportsektorens iblandingskrav kan dækkes via import af bioressourcer, men dette vil trække på en begrænset global mængde af bioressourcer og risikerer at medføre negative effekter på fødevarerikkerhed og biodiversitet andre steder på kloden.

Et alternativ til at importere bioressourcer er en grundlæggende arealomlægning. Klimarådet viste i analysen *Danmarks klimamål i 2050*, at kostomlægning og produktionsomlægning til plantebaserede fødevarer kan frigive areal til bioressourcer til fx brændstoffer og BECCS. Hvis en sådan omlægning gennemføres, vil det i højere grad være muligt at afsætte arealer til dyrkning af energiafgrøder. Det vil dog kræve, at befolkningen reducerer forbruget af kød markant, hvilket der ikke i øjeblikket er tegn på vil ske.

Etablering af forsyningskæder for bioressourcer kan være en barriere

Etableringen af effektive forsyningskæder til indsamling, transport og forbehandling af bioressourcer er nødvendig for at kunne opskalere biobrændstoffer. Forsyningskæden for indsamling af disse bioressourcer er dog udfordret af, at ressourcerne er geografisk ujævnt fordelt, og at potentialet for indsamling af store mængder bæredygtig biomasse derfor er begrænset.⁹⁷ Derudover skal biobrændstofproducenter kunne håndtere rest- og affaldsprodukter med varierende kvalitet, da ressourcerne kan stamme fra forskellige kilder, hvilket kan medføre behov for yderligere forbehandling.⁹⁸

En ny storskala forsyningskæde for bioressourcer er derfor nødvendig for at kunne opskalere biobrændstoffer. Dette kan udgøre en barriere for opskaleringen, hvis det ikke er økonomisk rentabelt at indsamle og forarbejde de nødvendige mængder rest- og affaldsprodukter.

CO₂-lagringskapacitet

Potentielle begrænsninger i CO₂-lagringskapaciteten udgør en risiko for anvendelsen af negative udledninger

Flere metoder til permanente negative udledninger involverer geologisk lagring af CO₂.⁹⁹ Det gælder fx for BECCS, DACCS og DOCCS (Direct Ocean Carbon Capture and Storage). En potentiel begrænsning i kapaciteten for CO₂-lagring udgør derfor en risiko for anvendelsen af disse metoder til håndtering af klimapåvirkningen fra luftfarten såvel som fra andre sektorer.

For at kunne kvalificere denne risiko er det relevant at vurdere især to aspekter. Det første aspekt vedrører *konsekvensen* af, at lagringskapaciteten er begrænset i et relevant omfang, mens det andet aspekt omhandler *sandsynligheden* for, at lagringskapaciteten viser sig at være begrænset.

Konsekvensen vil være afgørende, i og med det kan begrænse potentialet for permanente negative udledninger som en teknologisk løsning. Dertil vil et begrænset udbud af negative udledninger, der involverer geologisk lagring, kunne bidrage til højere priser og samlet set gøre compensation mindre attraktiv relativt til andre løsninger.

Sandsynligheden for, at CO₂-lagringskapaciteten bliver en begrænsning, er vanskelig at kvantificere på nuværende tidspunkt. Det skyldes især, at estimater for selve CO₂-lagringskapaciteten er behæftet med væsentlig usikkerhed i dag. Denne usikkerhed uddybes i de næste afsnit.

Der findes også metoder til negative udledninger, som ikke involverer geologisk lagring af CO₂. Det gælder fx produktion af biokul og øget forvitring af bjergarter, men andre metoder er også under udvikling. Hvis der kan sikres tilstrækkelig høj klimaintegritet og herunder høj permanens ved metoder til negative udledninger, som ikke involverer geologisk lagring af CO₂, kan disse metoder bidrage til at reducere betydningen af en potentielt begrænset CO₂-lagringskapacitet.

Risiko for begrænset CO₂-lagringskapacitet vedrører både det samlede potentiale og skaleringshastigheden

En begrænsning i CO₂-lagringskapaciteten kan overordnet set udgøres både af en begrænsning i den totale, tidsafhængige kapacitet for geologisk lagring af CO₂ og en begrænsning i skaleringshastigheden. Sidstnævnte kan fx skyldes, at selve injektionshastigheden i etablerede lagre begrænses af forskellige geologiske forhold.¹⁰⁰ Dernæst kan det også skyldes, at etableringen af lagringskapacitet med tilhørende infrastruktur til transport, håndtering og lagring af forskellige årsager sker langsommere end efterspørgslen for lagring af CO₂.¹⁰¹ I flere lande i Europa tegner adgangen til CO₂-lagre allerede til at udgøre en flaskehals i forhold til efterspørgslen for CO₂-lagring.¹⁰² Selvom storskala CO₂-lagring vil kræve etablering af et stort antal lagringsprojekter, overstiger udbygningsraten for antal brønde ikke den historiske udbygningsrate for brønde til råolieeftersforskning.¹⁰³ Dette er gældende for et antal af brønde til CO₂-lagring, der

estimeres nødvendige for at lagre tilstrækkelige mængder CO₂ i scenarier, hvor den globale gennemsnittemperaturstigningen ikke overstiger 2 grader.¹⁰⁴

Både begrænsninger i den samlede kapacitet og i skaleringshastigheden kan udgøre barrierer for, at kompensation kan udgøre et afgørende element i håndteringen af luftfartens klimapåvirkning over de kommende årtier. Ved begrænset lagringskapacitet, vil luftfarten skulle konkurrere om lagringskapaciteten med andre sektorer som industri- og affaldsanlæg. Usikkerhed i værdikæden relateret til CO₂-lagringspotentialer og -omkostninger indebærer en vis risiko for, at kompensation via fx DACCS og BECCS får svært ved at opskalere hurtigt nok og til tilstrækkeligt lave omkostninger.

Estimer for CO₂-lagringskapaciteter er i dag baseret primært på overordnede, teoretiske kortlægninger

Det er vanskeligt på nuværende tidspunkt at kvantificere sandsynligheden for, at CO₂-lagringskapaciteten kommer til at udgøre en begrænsning. Det skyldes især, at de eksisterende estimer for det geologiske CO₂-lagringspotentiale globalt såvel som i Europa i høj grad er baseret på overordnede estimer, der dels er behæftet med stor usikkerhed og dels er angivet som teoretiske volumener, der ikke alle forventes at kunne realiseres i praksis.¹⁰⁵

De overordnede, teoretiske estimer udgør ofte de mest optimistiske estimer. De baseres typisk på volumenestimer og kombineres ofte med antagelser om, hvor meget af denne volumen, der kan udnyttes til lagring af CO₂.¹⁰⁶ Estimerne inkluderer ikke beregninger af en lang række forhold, som kan begrænse kapaciteten yderligere, herunder tekniske, regulatoriske, sociale, geografiske, infrastrukturmæssige og økonomiske forhold. Begrænsninger på baggrund af trykforhold og væskebevægelser i de geologiske formationer er eksempler på tekniske begrænsninger, der kan reducere potentialet væsentligt i forhold til mere overordnede, statiske estimer.¹⁰⁷ Jo flere af disse forhold, der inkluderes i beregningen af lagringspotentialer, jo mindre bliver usikkerheden om det reelle potentiale, og jo mindre bliver estimatet typisk også. Konkrete potentialevurderinger viser for eksempel, at dynamiske estimer, der inkluderer beregning af begrænsende trykforhold over flere årtier, var op til en faktor 20 mindre end statiske estimer, der ikke inkluderer begrænsninger i forhold til trykforhold.¹⁰⁸ Omvendt kan der fremadrettet også findes nye potentialer i geologiske formationer, som kan vise sig egnet til CO₂-lagring, og som ikke er medtaget i de eksisterende teoretiske potentialevurderinger.

Det er vanskeligt på nuværende tidspunkt at estimere, i hvilket omfang de overordnede estimer for CO₂-lagringspotentialet globalt og i Europa vil blive nedjusteret i takt med, at yderligere og mere stedsspecifikke potentialevurderinger foretages, som det eksisterende datagrundlag udvides og erfaringer med storskala geologisk CO₂-lagring opnås.

EU-Kommissionens Joint Research Centre (JRC) konkluderer, at der er signifikante huller i vidensgrundlaget vedrørende CO₂-lagringspotentialer på tværs af Europa. JRC anbefaler, at der udvikles et europæisk atlas for CO₂-lagre, der kan bidrage med omfattende og præcise oplysninger om lagringspotentialet på tværs af kontinentet.¹⁰⁹

Overordnede estimer indikerer et stort CO₂-lagringspotentiale globalt og i Europa

Flere kilder peger på et substantielt CO₂-lagringspotentiale både globalt og i Europa.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) og det Internationale Energiagentur (IEA) angiver, at det globale CO₂-lagringspotentiale anslås at være større, end hvad der forventeligt bliver behov for fremadrettet. Begge vurderinger tager udgangspunkt i overordnede estimer for CO₂-lagringskapaciteten globalt og sammenholder disse behov for CO₂-lagring i forskellige scenarier, der sikrer, at de globale gennemsnitlige temperaturstigninger holdes under 2 grader.¹¹⁰ IPCC peger dog på, at den regionale tilgængelighed af geologisk lagring kan være en begrænsende faktor.

IEA, konsulentvirksomheden Element Energy og ngo'en Clean Air Task Force er blandt nyere kilder, der har udgivet estimer for lagringspotentialet i Europa. Kilderne estimerer lagringspotentialer i størrelsesordenen 250 til 1.500 Gt CO₂.¹¹¹ Til sammenligning er EU's årlige drivhusgasudledning omtrent 3 Gt CO₂e.¹¹²

Disse vurderinger og estimer for både det globale og europæiske CO₂-lagringspotentiale udgør overordnede, teoretiske estimer. Det reelle, praktisk tilgængelige potentiale for CO₂-lagring vil derfor forventeligt være mindre. Et studie fra 2024 anlægger et kritisk blik på globale teoretiske potentialevurderinger.¹¹³ I studiet tages udgangspunkt i et globalt, teoretisk potentiale på 11.800 Gt CO₂, som nedjusteres til 1.460 Gt CO₂ på baggrund af en række forhold. Det

nedjusterede estimat skal ifølge forfatterne afspejle en mere forsigtig potentialevurdering, der er mere robust over for adskillige begrænsninger, usikkerheder og risici. Dette nedjusterede potentiale er dog stadigvæk substantielt. Til sammenligning estimerer FN's *Environmental Programme* (UNEP), at de globale drivhusgasudledninger i 2024 udgjorde 57,7 Gt CO₂e.¹¹⁴

Som nævnt er det dog ikke kun den samlede, tidsafhængige lagringkapacitet, der er afgørende, men også injektionsraten. Et nyere studie fra 2024 anslår, at årlig lagring af 5-6 Gt CO₂ er realistisk i 2050 på globalt plan, mens op til 16 Gt CO₂ er teknisk muligt, hvis USA antages at bidrage i meget høj grad og udnytte det fulde tekniske potentiale i USA. Antages en årlig lagring på 16 Gt CO₂ i 2050, vil dette kunne dække det estimerede behov for CO₂-lagring i en stor andel af de scenarier, som angives i IPCC's *Sixth Assessment Report* (AR6) og som begrænser temperaturstigningen til 1,5 grader celsius med en sandsynlighed på både 50 og 67 pct. Antages en årlig injektionsrate på 5-6 Gt CO₂ i 2050, vil dette derimod ikke kunne dække det estimerede behov for CO₂-lagring i størstedelen af scenarier, der begrænser temperaturstigningen til 1,5 grader celsius. Tilsvarende vil en årlig lagring af 5-6 Gt CO₂ i 2050 kun kunne dække det estimerede behov for CO₂-lagring i lidt over halvdelen af scenarier, der begrænser temperaturstigningerne til 2 grader celsius med en sandsynlighed på 67 pct.¹¹⁵ Studiets resultater peger dermed på, at realistiske injektionsrater i 2050 risikerer ikke at stå mål med det behov, som kan vise sig nødvendig for at holde temperaturstigninger under 2 grader i flere scenarier.

6.3 Resultater

Lavaromatiske fossile brændstoffer

Lavaromatiske fossile brændstoffer er afhængige af tilgængeligheden af råolie. Råolie er en globalt handlet råvare med en veletableret forsyningskæde og infrastruktur, og de kendte reserver vurderes at være tilstrækkelige i den analyserede periode. Selvom geopolitiske forhold og prisudsving kan påvirke forsynings sikkerheden i perioder, vurderes disse risici ikke at udgøre en fysisk begrænsning for adgangen til ressourcen. På denne baggrund vurderes tilgængeligheden af råolie at udgøre en lav risiko for at være en barriere for opskalering af lavaromatiske fossile brændstoffer. På meget lang sigt kan tilgængeligheden dog blive en begrænsende faktor, men dette falder uden for den analyserede periode.

Elektrobrændstoffer

Produktion af elektrobrændstoffer kræver store mængder additional ikke-fossil elektricitet samt tilstrækkelig kapacitet i elnettet. Kapacitetsbegrænsninger i det danske og europæiske transmissionsnet udgør allerede i dag en udfordring, og udbygningen af ikke-fossil elproduktion skal ske væsentligt hurtigere end den hidtil højeste historisk observerede udbygningsrate for at imødekomme den forventede efterspørgsel på el. Disse begrænsninger vurderes dog ikke at udgøre absolutte barrierer for opskaleringen, idet de i princippet kan håndteres gennem fortsat udbygning af elnet og ikke-fossil elkapacitet. Usikkerheden knytter sig primært til, om denne udbygning kan ske hurtigt nok. Begge forhold vurderes derfor at udgøre en mellem risiko for at være en barriere for opskaleringen af elektrobrændstoffer.

Biobrændstoffer

Biobrændstoffer fra ressourcer, der tillades som flybrændstof af EU i luftfartens klimaforpligtelser, er afhængige af tilgængelighed af rest- og affaldsprodukter fra landbruget og industrien. Der er betydelig usikkerhed om, hvorvidt de tilgængelige mængder af relevante bioressourcer i EU vil være tilstrækkelige til at dække luftfartens behov, når konkurrerende efterspørgsel fra andre sektorer medregnes. Import kan supplere den europæiske ressourcebase, ligesom det er tilfældet for fossile brændstoffer, men import indebærer risici for fejlklassificering og svindel og trækker på en globalt begrænset ressource med samtidig risiko for arealrelaterede udledninger til følge. Derudover er etableringen af de nødvendige forsyningskæder til indsamling, transport og forbehandling af bioressourcer ikke fuldt ud på plads, og kan i sig selv udgøre en barriere. På denne baggrund vurderes tilgængelighed af bioressourcer at udgøre en mellem risiko for at være en barriere for opskaleringen af biobrændstoffer. Grunden til at scoringen ikke får en rød farve, er fordi, at man kan importere bioressourcer.

BECCS

BECCS er afhængig af både tilgængelighed af bioressourcer og adgang til CO₂-lagringskapacitet og vurderes derfor ud fra begge forhold.

For bioressourcer gælder de samme overvejelser som for biobrændstoffer. Der er usikkerhed om, hvorvidt de tilgængelige mængder i EU vil være tilstrækkelige ud fra et bæredygtighedsperspektiv, når det samlede træk fra marked og politik tages i betragtning, som i analysen.

For CO₂-lagring er der væsentlig usikkerhed om både den samlede globale og europæiske lagringskapacitet og om, hvor hurtigt denne kapacitet kan udbygges. Eftersom CO₂-lagring forventeligt bliver nødvendigt til flere formål, risikerer et begrænset udbud af lagringskapacitet at fordyre og udgøre en barriere for anvendelsen af kompensation via BECCS i luftfarten. Hvis denne begrænsning materialiserer sig, kan den udgøre en hård barriere for teknologiens opskalering.

Samlet set vurderes der derfor at være en høj risiko for barrierer for opskaleringen af BECCS.

DACCS

DACCS er afhængig af både tilgængelighed af additional ikke-fossil elektricitet og tilstrækkelig netkapacitet samt adgang til CO₂-lagringskapacitet og vurderes derfor ud fra begge forhold.

DACCS er en elintensiv teknologi, om end elforbruget ikke er af samme størrelsesorden som for elektrobrændstoffer. Kapacitetsbegrænsninger i elinfrastrukturen og utilstrækkelig udbygning af ikke-fossil elproduktion kan derfor udgøre en barriere, men vurderes at være af mindre omfang end for elektrobrændstoffer.

Derudover forudsætter DACCS adgang til CO₂-lagringskapacitet, og de samme usikkerheder, der gælder for BECCS, er gældende her. Eftersom CO₂-lagring forventeligt bliver nødvendigt til flere formål, risikerer kapacitetsbegrænsninger at udgøre en hård barriere for opskaleringen.

Kombinationen af et vist træk på elinfrastrukturen og den betydelige usikkerhed forbundet med CO₂-lagringskapaciteten indebærer samlet set en høj risiko for barrierer for opskaleringen af DACCS.

El- og brintfly

El- og brintfly er begge elintensive teknologier, men er mere energieffektive end elektrobrændstoffer og medfører derfor et lavere samlet træk på elinfrastrukturen og ikke-fossil elproduktion. Hertil kommer, at elfly forventes at have en begrænset rækkevidde og dermed kun kan erstatte en del af det samlede flytrafikvolumen. Begge teknologier befinder sig desuden på et meget lavt teknologisk modenhedsniveau, hvilket indebærer, at de først forventes at blive kommercielt tilgængelige på lang sigt. På det tidspunkt vurderes sandsynligheden for, at elinfrastrukturen og den ikke-fossile elproduktion er udbygget tilstrækkeligt, at være væsentligt større end i dag. Klimarådet vurderer derfor, at elinfrastrukturen og tilgængeligheden af ikke-fossil elproduktion udgør en lav risiko for barrierer for opskaleringen af el- og brintfly.

Beregning af gennemsnitlig sektor- og samfundstilpasning

Tabel 18: Farvescoring af teknologiernes barrierer for opskalering uden for sektoren

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Bio-brændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Barrierer for opskalering uden for sektoren	Lav	Mellem	Mellem	Høj	Høj	Lav

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Lavaromatiske fossile brændstoffer.** Vurderes at have lav risiko for barrierer for opskalering, da de bygger på en eksisterende global forsyningskæde for råolie. Risici knytter sig primært til geopolitiske forhold og langsigtet fossil afhængighed.
- **Elektrobrændstoffer.** Elektrobrændstoffer er afhængige af store mængder additional ikke-fossil elektricitet og tilstrækkelig netkapacitet. Begrænsninger i både elnet og udbygningen af vedvarende energi udgør væsentlige udfordringer, men vurderes ikke som absolutte barrierer, da de i princippet kan løses gennem investeringer og udbygning.
- **Biobrændstoffer.** Biobrændstoffer er afhængige af begrænsede bioressourcer, som også efterspørges af andre sektorer. Dette kan udgøre en hård barriere for opskaleringen, men vurderes at have en mellem risiko, da man i princippet kan importere bioressourcerne.
- **DACCS og BECCS.** Teknologierne er afhængige af tilstrækkelig CO₂-lagringskapacitet. Hvis det viser sig, at der ikke er tilstrækkelig lagringskapacitet, vil dette være en hård barriere for opskaleringen af teknologien. Det vurderes derfor, at der er en høj risiko for barrierer for opskalering.
- **El- og brintfly.** Teknologierne er afhængige af adgang til ikke-fossil elektricitet og netkapacitet, men har et lavere energiforbrug end elektrobrændstoffer. Da teknologierne forventes først at blive udbredt på lang sigt, vurderes energiinfrastruktur at udgøre en relativt begrænset barriere for opskalering.

7 Teknologisk modenhed

Teknologiernes modenhed har betydning for, hvornår de kan realiseres i luftfartssektoren.

Teknologimodenheden vurderes ved hjælp af TRL-skalaen (Technology Readiness Level), som belyser, hvor langt de enkelte teknologier er i udviklingsforløbet, og i hvilket omfang der fortsat er behov for yderligere teknologisk udvikling og eventuel regulering.

7.1 Begrundelse og tilgang

TRL-analysen skal afdække behovet for yderligere udvikling og regulering

For at vurdere modenheden og potentialet for implementering af hver løsningsvej på et sammenligneligt grundlag anvendes Technology Readiness Levels (TRL) i denne analyse. Analysen af TRL-niveauet skal tydeliggøre, i hvilket omfang yderligere teknologisk udvikling og eventuel regulering er nødvendig for at realisere de forskellige løsninger. TRL-skalaen er en ni-trins skala, der estimerer, hvor i udviklingsforløbet en teknologi befinder sig. Skalaen spænder fra initial ide (TRL 1) til teknisk moden til salg og licensering (TRL 9).¹¹⁶

Analysen baseres på et litteraturstudie samt egen analyse

Analysen baseres på et litteraturstudie, hvor TRL-niveauet kortlægges for de undersøgte teknologier. For størstedelen af teknologierne er niveauerne baseret på kilders estimater. Der tages primært udgangspunkt i IEA's ETP Clean Energy Technology Guide, suppleret med andre relevante studier.¹¹⁷ For de teknologier, hvor litteraturen ikke direkte angiver et TRL-niveau, er niveauet fastlagt på baggrund af egen analyse baseret på tilgængelig dokumentation.

Teknologierne, herunder især de forskellige brændstoffer samt BECCS og DACCS, består ofte af flere delteknologier med forskellige modenhedsniveauer. Når der ikke foreligger et samlet TRL-niveau for hele processen, er det delteknologien med det laveste TRL-niveau, der sætter den nedre grænse for løsningens samlede teknologiske modenhed. Det samlede TRL-niveau fastsættes derfor med udgangspunkt i den mindst modne del af værdikæden. Et eksempel er biobrændstoffet bio-AtJ, som produceres ved først at fremstille ethanol, der efterfølgende omdannes til flybrændstof. Produktionen af ethanol og selve omdannelsen til flybrændstof har forskellige TRL-niveauer, og det er den delteknologi med det laveste TRL-niveau, der anvendes som reference for den samlede løsning.

I visse tilfælde kan den samme løsning realiseres gennem forskellige delteknologiveje med forskellig modenhed. I disse tilfælde fokuserer analysen på den delteknologivej, der vurderes at have den højeste modenhed. Dette skyldes at modenheden for en teknologi skal afspejle det der kan lade sig gøre. Eksempelvis kan elektrobrændstoffet PtJ(FT) produceres via forskellige syntesegasveje med forskellig modenhed. Analysen vil her tage udgangspunkt i syntesegasvejen med højest modenhedsniveau.

Resultater vises med en trafiklysmode

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit. Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen nedenfor angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 19: Definition af skala til scoring af TRL

TRL-skala				
Score	Grøn: 8 - 9	Gul: >5 - <8	Rød: 1 - 5	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

7.2 Analyse

Lavaromatiske fossile brændstoffer

Lavaromatiske fossile flybrændstoffer kan produceres ved hydroprocessering, som allerede i dag anvendes til færdigbehandling af konventionelt fossilt flybrændstof i moderne raffinaderier.¹¹⁸ Den underliggende teknologi er således velafprøvet og teknisk moden, men produktion af lavaromatiske flybrændstoffer er endnu ikke udbredt i stor skala.

Et aktuelt eksempel er Kalundborg Refinery, som i samarbejde med Airbus arbejder på et projekt, der har til formål at blive blandt de første i verden til at levere lavaromatisk fossilt flybrændstof i industriel skala. Ifølge projektbeskrivelser råder Kalundborg Refinery allerede over de nødvendige faciliteter, teknologier, kompetencer, kapacitet og distributionskanaler til produktionen. Den primære barriere for realisering af storskala produktion er således ikke teknologisk, men relateret til manglende politisk opbakning, regulering og økonomiske incitamenter.¹¹⁹

På denne baggrund vurderes teknologien til at være teknisk fuldt moden og gennemførlig, men endnu ikke implementeret kommercielt i større omfang. TRL-niveauet vurderes derfor til 8, idet teknologien er fuldt udviklet og demonstreret, men endnu ikke udbredt på markedet som følge af manglende regulatoriske incitamenter.

Elektrobrændstoffer

Fælles for alle elektrobrændstoffer er, at produktionen forudsætter brint fremstillet via elektrolyse samt adgang til en CO₂-kilde. Der eksisterer flere elektrolyseteknologier med forskelligt modenhedsniveau. Alkaline elektrolyseceller (AEC) og polymer electrolyte membrane elektrolyseceller (PEMEC) er de mest udbredte teknologier og vurderes begge af IEA til at have det højeste TRL-niveau på 9, svarende til teknisk moden til salg og licensering.¹²⁰ Solid oxide elektrolyseceller (SOEC) har et lidt lavere modenhedsniveau og vurderes af IEA til TRL 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.¹²¹ På baggrund heraf vurderes valget af elektrolyseteknologi ikke at udgøre en begrænsende faktor for de analyserede elektrobrændstofruter.

Tilsvarende findes der i dag flere tilgængelige CO₂-kilder, hvorfor tilgængeligheden af CO₂ ikke anses som en direkte begrænsende TRL-faktor for elektrobrændstoffer og derfor ikke indgår eksplicit i denne analyse. En separat TRL-analyse for DACCS og BECCS kan ses under afsnittet "Kompensation via BECCS og DACCS".

PtJ (FT): Teknologien til produktion af elektrobrændstoffet PtJ(FT) vurderes ifølge IEA til at have et samlet TRL-niveau på 7 og er derfor valideret på prækommerciel skala.¹²² Fischer Tropsch-processen er allerede en moden teknologi i dag. Udfordringen ved anvendelse af Fischer Tropsch i elektrobrændstofsammenhæng er revers water gas shift reaktionen (RWGS) og derudover samspillet mellem RWGS-reaktionen og Fischer Tropsch-syntesen, da disse to processer kræver forskellige operationelle forhold.¹²³ En måde at undgå RWGS-reaktionen på er ved anvendelse af co-elektrolyse, hvor vanddamp og CO₂ omdannes direkte til syntesegas i en samlet proces. Herved undgår man et separat procestrin, og den overskudsvarme der genereres i Fischer Tropsch-processen kan desuden udnyttes i co-elektrolyseprocessen, hvilket øger den samlede energieffektivitet. Dog har denne teknologi andre begrænsninger. Ifølge IEA vurderes co-elektrolyseteknologien til et lavere TRL-niveau på omkring 6.¹²⁴ Da denne modenhed er lavere end for RWGS reaktion vejen, vil dette ikke inkluderes i gennemsnitberegningen. Det samlede TRL-niveau vurderes derfor til at være på 7, svarende til validering på prækommerciel skala.

PtJ (MtJ): Elektrobrændstoffet PtJ(MtJ) har et lavere modenhedsniveau sammenlignet med PtJ(FT). IEA vurderer et samlet TRL niveau på 5 for denne teknologi svarende til test af stor prototype.¹²⁵ Ved metanolsyntese er RWGS reaktionen optionel, hvilket reducerer nogle af de tekniske barrierer sammenlignet med PtJ(FT). Derudover kan metanolsyntesen driftes mere dynamisk sammenlignet med FT-syntesen, hvilket kan føre til mere fleksibel kobling mellem variabel, vedvarende elektricitet og produktion af flybrændstof. Derudover kan PtJ(MtJ) også levere højere udbytte af flybrændstoffraktion med lavere niveauer af biprodukter sammenlignet med PtJ(FT).¹²⁶

Biobrændstoffer

Bio-FT: Teknologien til produktion af biobrændstoffet bio-FT vurderes ifølge IEA til at have et samlet TRL-niveau på 7 svarende til validering på prækommerciel skala.¹²⁷ Dette modenhedsniveau forudsætter, at anlægget drives uden integration af CO₂ fangst. Såfremt CO₂-fangst inkluderes i processen, vurderer IEA, at det samlede TRL-niveau reduceres

til omkring 5.¹²⁸ Da teknologien kan realiseres uden CCS, vil dette ikke inkluderes i gennemsnitberegningen. For biogene input er den største tekniske udfordring dannelse og fjernelse af tjære under forgasningen.¹²⁹ Det samlede TRL niveau vurderes derfor til at være på 7, svarende til validering på prækommerciel skala.

Bio-MtJ: Biobrændstoffet bio-MtJ kan opdeles i to hovedprocesstrin: produktion af metanol fra bioressourcer og efterfølgende omdannelse af metanol til flybrændstof via alcohol-to-jet (AtJ)-processen. Ifølge IEA har AtJ-delen et TRL-niveau på 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.¹³⁰ Ifølge IRENA er der begrænset langtidsdriftserfaring med metanolproduktion via forgasning af biomasse, men flere demonstrations- og tidlige kommercielle anlæg er i drift. De vurderer, at metanolproduktion via forgasning har et TRL-niveau omkring 8-9.¹³¹ Denne delproces vurderes derfor ikke at være den begrænsende faktor for den samlede teknologiske modenhed. Ved forgasning af biogent input er den største tekniske udfordring dannelse og fjernelse af tjære under forgasningen. Det samlede TRL niveau vurderes derfor til at være på 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.

Bio-AtJ: Biobrændstoffet bio-AtJ kan opdeles i to hovedprocesstrin: produktion af ethanol fra bioressourcer og efterfølgende omdannelse af ethanol til flybrændstof via alcohol-to-jet (AtJ)-processen. Selve alkohol-til-jet (AtJ)-delen, hvor ethanol omdannes til flybrændstof, har ifølge IEA et TRL-niveau på 8.¹³² Fremstilling af ethanol via fermentering af lignocelluløs biomasse har ifølge IEA et endnu højere modenhedsniveau på 9, dog uden integration af CO₂-fangst.¹³³ Under fermenteringsprocessen frigives CO₂ til atmosfæren, som potentielt kan indfanges og enten udnyttes eller lagres. Hvis CO₂ fangst integreres i fermenteringsbaserede biofuel-processer, vurderer IEA, at det samlede TRL-niveau reduceres til omkring 5.¹³⁴ Da teknologien kan realiseres uden CCS, vil dette ikke inkluderes i gennemsnitberegningen. Det samlede TRL-niveau vurderes til at være på 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.

HEFA: HEFA/HVO bliver i dag produceret ved velkendte hydrotreatment processer som allerede benyttes i petroleum raffinaderier i dag. Denne proces har derfor et højt modenhedsniveau og IEA vurderer HEFA-teknologien til at have det højeste TRL-niveau på 9, svarende til teknisk moden til salg og licensering.¹³⁵

Kompensation via BECCS og DACCS

BECC: Et biomassefyret forbrændingsanlæg med integreret CO₂ fangst, hvor CO₂ fanges via kemisk absorption, vurderes ifølge IEA til et TRL-niveau på 7.¹³⁶ Dette betyder at teknologien er valideret på prækommerciel skala.

DACC: Der findes overordnet to hovedtyper af teknologier til direkte indfangning af CO₂ fra atmosfæren. Liquid DACC, baseret på flydende absorptionsmidler, vurderes ifølge IEA til et TRL-niveau omkring 6.¹³⁷ Solid DACC, som anvender faste sorbenter, vurderes til et lidt højere TRL-niveau på omkring 7.¹³⁸ Denne teknologi ligger altså mellem prototype testet under reelle forhold og valideret på prækommerciel skala.

Fælles for både BECCS og DACCS er, at den indfangede CO₂ efterfølgende skal transporteres og lagres.

Transport: CO₂ kan transporteres via flere forskellige teknologier med varierende modenhedsniveau. Rørledningstransport vurderes af IEA til et TRL-niveau på 9, hvilket ifølge IEA betyder at teknologien er teknisk moden til salg og licensering.¹³⁹ Transport af CO₂ via skib vurderes af IEA til at have et TRL-niveau på 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.¹⁴⁰ For at muliggøre skibstransport er der behov for dedikerede terminaler til håndtering og midlertidig lagring af CO₂. IEA vurderer disse terminalfaciliteter til et TRL-niveau 8.¹⁴¹ CO₂-transport via lastbil anvendes allerede i dag i mindre skala og vurderes derfor ikke at udgøre en begrænsende faktor for det samlede TRL-niveau.

Lagring: Permanent lagring af CO₂ kan ske gennem pumpning af CO₂ ned i underjordiske geologiske formationer. De primære lagringstyper er sedimentologiske formationer, inklusive udtømte olie- og gasreservoirer. Usikkerheden vedrørende CO₂-lagring behandles under analyseparameteret *Barrierer for opskalering uden for sektoren* og bliver derfor ikke behandlet yderligere i dette parameter.

El- og brintfly

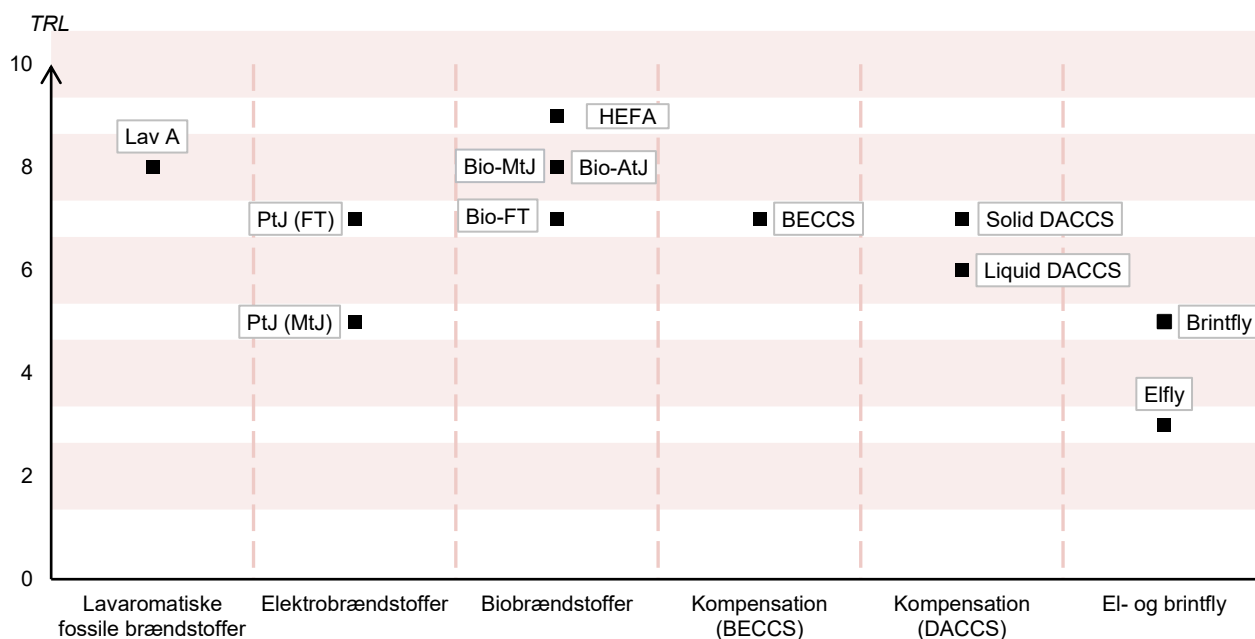
Elfly: Ifølge IEA befinder regionale elfly med mere end 20 sæder sig på et modenhedsniveau omkring 3, hvilket svarer til et tidligt udviklingsstadium, hvor centrale komponenter er testet.¹⁴² Mindre elfly til korte distancer, eksempelvis til taxa- og pendlertrafik, vurderes derimod at have et TRL-niveau omkring 8, svarende til første fuldskala kommercielle anlæg idriftsat.¹⁴³ Den væsentligste teknologiske begrænsning for elfly er den lave energidensitet i nuværende

batteriteknologier, som begrænser både rækkevidde og passagerkapacitet. På den baggrund vurderer IEA, at elfly frem mod 2050 primært vil kunne anvendes på korte ruter.¹⁴⁴ For at elfly kan opnå kommerciel relevans i luftfarten, er der således behov for markante fremskridt inden for batterikemi og energilagring. Da mængden af korte distance fly med passagerantal på under 10 er relativt lavt i EU, tages denne teknologi ikke med i gennemsnitsberegningerne for det samlede TRL-niveau. Det samlede TRL-niveau vurderes derfor at være på 3.

Brintfly: Brintfly til mere end 20 sæder, både baseret på direkte afbrænding af hydrogen og anvendelse af brændselsceller, vurderes ifølge IEA at have et TRL-niveau på 5, svarende til stor prototype testet.¹⁴⁵ Hydrogen har en væsentligt højere gravimetrisk energidensitet end fossilt flybrændstof, næsten tre gange så høj pr. masseenhed. Til gengæld er den volumetriske energidensitet markant lavere, hvilket medfører betydelige udfordringer for lagring. Flydende hydrogen kræver op til fire gange så stort volumen som konventionelt flybrændstof, mens komprimeret hydrogen kan kræve op til syv gange så meget plads.¹⁴⁶ Disse lagringskrav nødvendiggør fundamentalt nye flydesigns, idet hydrogen ikke kan lagres i vingerne som i dagens fly, men i stedet langs flykroppen. Dette kan reducere kapaciteten for passagerer og last.¹⁴⁷ Derudover stiller brintfly høje krav til avancerede materialer, isolering og kølesystemer, ligesom håndtering af hydrogens høje brandbarhed udgør en væsentlig sikkerhedsmæssig udfordring i tilfælde af lækage eller ulykker.¹⁴⁸

7.3 Resultater

En samlet kortlægning af TRL-niveauerne for de analyserede teknologier fremgår af Figur 15. I figuren repræsenterer hver prik det gennemsnitlige TRL-niveau for den pågældende teknologi.



Figur 15: Sammenligningen af TRL-niveau for de forskellige analyserede teknologier

Kilde: Klimarådet.

Beregning af gennemsnitligt TRL-niveau

For at muliggøre en sammenlignende vurdering af de enkelte klimaløsninger er der beregnet et gennemsnitligt TRL-niveau for hver klimaløsning baseret på de inkluderede teknologier. Det gennemsnitlige TRL-niveau for hver klimaløsning fremgår af tabellen nedenfor og er visualiseret ved hjælp af trafiklysfarver, jf. metodeafsnittet.

Tabel 20: Farvescoring af teknologiernes gennemsnitlige TRL-niveau

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Teknologisk modenhed	8	6 [5-7]	8 [7-9]	7	6,5 [6-7]	El: 3 Brint: 5

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **El- og brintfly.** Elfly har det laveste modenhedsniveau blandt de analyserede klimaløsninger. Dette indikerer, at der fortsat er behov for betydelig teknologisk udvikling før denne løsninger kan opnå et modenhedsniveau på linje med de øvrige alternativer.
- **Lavaromatiske fossile brændstoffer.** Lavaromatiske flybrændstoffer fremstår derimod som en teknologisk moden løsning med et højt TRL-niveau. Dette indikerer, at teknologien i princippet kan implementeres allerede i dag.
- **Alternative brændstoffer og kompensation.** Elektrobrændstoffer, biobrændstoffer samt kompensation via BECCS og DACCS befinder sig i et mellemliggende modenhedsniveau. Disse teknologier kræver fortsat teknologisk modning og opskalering. Dog ses der allerede betydelige udviklingsprojekter. Det vurderes derfor, at disse teknologier har potentiale til at opnå højere modenhedsniveauer indenfor den nærmeste fremtid.
- **Biobrændstoffer.** Biobrændstoffet HEFA har det højeste modenhedsniveau på skalaen, men denne teknologi er begrænset ift. ressource tilgængelighed.

8 Sektor- og samfundstilpasning

Implementering af nye teknologier i luftfarten kan kræve ændringer i flydesign, infrastruktur og drift samt påvirke passagerernes oplevelse og accept. En analyse af sektor- og samfundstilpasning er derfor vigtig for at belyse, i hvilket omfang de enkelte teknologier forudsætter ændringer i den eksisterende luftfartssektor, og hvor omfattende disse ændringer er.

8.1 Begrundelse og tilgang

En væsentlig forudsætning for udbredelsen af ny teknologi er, at både systemer, infrastruktur og brugere er kompatible med teknologien. For at en passager vælger at gå ombord på en flyver, kræver det en grundlæggende tillid til, at teknologien er grundigt testet og afprøvet. Dette belyses delvist i teknologiens modenhed, som behandles under en særskilt analyseparameter. Derudover er det afgørende, at anvendelsen af teknologien er gennemskuelig og troværdig. Endelig forudsætter teknologiens udbredelse, at de nødvendige systemer og den understøttende infrastruktur er etableret, både hvad angår flyenes tekniske kompatibilitet og kompatibiliteten med de tilhørende systemer på landjorden.

Gennem en kvalitativ vurdering skal analysen kortlægge og sammenligne muligheden for at udbrede teknologierne under eksisterende forhold. Dette er afgrænset til flysektoren og medtager ikke nødvendige systemændringer udenfor sektoren. Dette aspekt er afspejlet i parameteret ”Barrierer for opskalering uden for sektoren”.

Den kvalitative vurdering vil belyse teknologiernes infrastruktur- og samfundstilpasning ud fra tre underparametre:

1. Teknologiens kompatibilitet med eksisterende design, herunder flydesign og eksisterende motorer.
2. Teknologiens kompatibilitet med eksisterende flyinfrastruktur, herunder tankning/ladning, landingsbaner, terminaler osv.
3. Teknologiens kompatibilitet med eksisterende forbrugerperspektiv.

Teknologien skal være kompatibelt med flydesign

Hvorvidt teknologien kan anvendes i de eksisterende flydesigns, kan have stor betydning for udbredelsen. Særligt er graden af nødvendige designændringer central, da omfattende modifikationer kan medføre øgede omkostninger og længere implementeringstid. Understøttende elementer, der ikke belyses gennem analysens øvrige parametre. Analysen skal derfor både belyse hvordan de eksisterende flydesign og de eksisterende flymotorer fungerer med den pågældende teknologi. Den kvalitative vurdering begrundes ud fra litteraturen, herunder gennem en kortlægning af begrænsninger og muligheder for de enkelte teknologier i de konkrete flydesigns.

Teknologien skal være kompatibelt med flyinfrastrukturen

Ligesom kompatibiliteten med eksisterende designs kan kompatibiliteten med eksisterende flyinfrastruktur være afgørende for teknologiens konkurrenceevne. Graden af en given teknologis kompatibilitet med den eksisterende flyinfrastruktur er ikke blot afgørende for teknologiens implementering, men også for den rolle, teknologien kan forventes at spille. Hvis der ikke er behov for omfattende ændringer af den eksisterende flyinfrastruktur, er teknologien i mindre grad begrænset på kort sigt. Den kvalitative vurdering baseres på litteraturen og omfatter en kortlægning af begrænsninger og muligheder for de enkelte teknologier inden for den eksisterende flyinfrastruktur.

Teknologien skal være kompatibelt med forbrugeren

Det sidste delelement af analysen af infrastruktur- og samfundstilpasning vedrører samfundets opfattelse af en given teknologi, herunder forbrugerperspektivet og eventuelle afledte adfærdsændringer. Ud over de tekniske og systemiske integrationskrav er teknologiens integrationen i samfundet og den tilhørende forbrugeraccept afgørende for udbredelsen, særligt når teknologien indebærer ændringer i den måde, luftfart anvendes på. Da en væsentlig fordel ved luftfart

sammenlignet med alternative transportformer som tog er den kortere rejsetid, kan ændringer i forbrugerens oplevelse af rejseformen have betydelig indflydelse på samfundets villighed til at tage den pågældende teknologi i anvendelse.

Den kvalitative vurdering af samfundets tilpasningsbehov tager afsæt i litteraturen og anvender inspiration fra en produktmodningsskala. Her vurderes graden af behov for samfundstilpasning og adfærd ændringer forbundet med den pågældende teknologi, herunder forhold som behov for mellemlandinger, rejsetid og den generelle anskuelse af teknologien.

Vurderingen baseres på inspiration fra skalaen *Societal Readiness Level* (SRL), som er udviklet af Innovationsfonden til at belyse graden af samfundets efterspørgsel og adoption af fx et produkt eller en teknologi samt dennes evne til at konkurrere på et specifikt marked. I analysen ses der bort fra SRL-niveau 1-6, da de i praksis handler om efterspørgslen og validiteten af en teknologi. I Klimarådets analyse lægges det til grund, at det analyserede produkt er bæredygtig luftfart som samlet løsning, hvor efterspørgslen defineres gennem både de nationale og EU's reduktionsmål, mens teknologiens validiteten belyses gennem analysen af teknologiens modenhed. Vurderingen af samfundets opfattelse af de enkelte teknologier baseres derfor på inspiration fra SRL-niveau 7-9, som i højere grad relaterer sig til forbrugeranvendelse og produktets konkurrenceevne.¹⁴⁹

Resultater vises med en trafiklysmode

Teknologiernes performance vises med en trafiklysmode, rangerende fra grøn over gul til rød, hvor grøn er bedst inden for hver parameter. Tabellen nedenfor angiver hvad der skal til for at score grøn, gul eller rød.

Tabel 21: Definition af skala til scoring af sektor- og samfundstilpasning

Sektor- og samfundstilpasning				
Score	Grøn: Få/ingen ændringer	Gul: Moderate ændringer	Rød: Omfattende ændringer	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

8.2 Analyse

I dette afsnit gennemføres analysen af sektor- og samfundstilpasnings parameteret for de undersøgte teknologier. Analysen vil besvare de tre underspørgsmål for hver teknologi. Alle brændstofferne vil være grupperet under én kategori samt kompensation via BECCS og DACCS.

El- og brintfly

Elfly

1) Kompatibel med eksisterende flydesign

Elektriske fly er i begrænset omfang compatible med eksisterende flydesign og fremdriftssystemer. Integration af batterier medfører markante designmæssige ændringer, idet batterier både har betydelig vægt og kræver stort volumen. Placeringen af energilagringen har derfor væsentlig betydning for flyets strukturelle opbygning, herunder flyskrog og stel. I modsætning til konventionelle fly, hvor flybrændstof typisk lagres i vingerne, forventes batterier i elfly i højere grad at skulle integreres i flykroppen, f.eks. langs den nederste del af skroget, hvor pladsforholdene er mere fleksible.¹⁵⁰

Den relativt lave energidensitet i nuværende batteriteknologier begrænser desuden flyets størrelse og last. Som følge heraf er elfly i dag primært begrænset til mindre flytyper med lav passagerkapacitet og kort rækkevidde, hvilket kræver et fundamentalt anderledes design end eksisterende mellem- og langdistancefly.¹⁵¹

Derudover adskiller vægtforholdene sig væsentligt fra konventionelle fly. I fossildrevne fly reduceres vægten gradvist under flyvningen, efterhånden som brændstoffet forbruges, hvilket indgår i designet af landingsprocedurer og strukturel

belastning. For elfly forbliver vægten derimod konstant gennem hele flyvningen, hvilket stiller nye krav til dimensionering af landingsstel, bremses og flyramme.¹⁵²

Ud over energilagring kræver elfly også integration af nye eldrevne fremdriftssystemer som erstatning for konventionelle forbrændingsmotorer. Eldrevne motorer er velkendte fra andre sektorer, men fortsat ny for flysektoren. Dette skal også integreres i designet af de nye fly.¹⁵³

Endelig medfører batterier særlige sikkerhedsmæssige udfordringer, herunder risiko for termisk runaway, degradering af kapacitet over tid osv..¹⁵⁴ Dette nødvendiggør integration af avancerede overvågnings- og sikkerhedssystemer, som løbende kan monitorere batteriernes tilstand og sikre sikker drift.¹⁵⁵

2) Kompatibel med eksisterende flyinfrastruktur

For at elfly teknologien skal realiseres kræver det betydeligere ændringer i den eksisterende lufthavnsinfrastruktur. Særligt er der behov for etablering af højkapacitetsopladningsløsninger i lufthavne, så fly kan oplades hurtigt og dermed minimere opholdstid på jorden. Dette stiller krav til både ladeinfrastruktur og det lokale elnet. Lufthavne vil skulle tilpasse deres drift og logistik, herunder blandt andet gate-allokering og planlægning af flytrafik, så de nye ladetider kan indpasses i den eksisterende operationelle struktur.¹⁵⁶

Et alternativ til direkte opladning er batteriskift (battery swapping), hvor opladte batterier opbevares i lufthavne og udskiftes mellem flyvninger. Denne løsning kan reducere den tid, flyene tilbringer på jorden, men vil til gengæld kræve omfattende ny infrastruktur til opbevaring, opladning, transport og håndtering af store batterier samt standardisering på tværs af flytyper.¹⁵⁷

Da elfly er begrænset i rækkevidde, kan der desuden opstå behov for etablering af mellemlandingsstationer på længere ruter, hvor flyene kan lande, oplade og fortsætte flyvningen. Dette vil i givet fald kræve yderligere infrastrukturinvesteringer og udvidelse af det eksisterende lufthavnsnetværk.

Derudover skal det understreges at infrastrukturen skal udbygges parallelt med introduktionen af elfly, da elflyene vil være afhængig af denne infrastruktur.¹⁵⁸

3) Forbruger-og adfærdsperspektiv

Fra et forbrugerperspektiv kan elfly medføre ændringer i rejseoplevelsen. Den begrænsede energidensitet i batterier indebærer færre passagerpladser og potentielt reduceret bagagekapacitet sammenlignet med konventionelle fly. Dette kan påvirke brugeroplevelsen, særligt på ruter med høj efterspørgsel eller for passagerer med behov for større bagagemængder.

Derudover forventes elfly generelt at flyve med lavere hastighed end konventionelle jetfly, hvilket kan resultere i længere rejsetider. Hvis elflyvninger desuden forudsætter mellemlandinger for opladning, kan dette yderligere forlænge den samlede rejsetid og reducere komforten for passagererne.

Brintfly

1) Kompatibel med eksisterende flydesign

Da brint ikke er et såkaldt drop-in fuel, kræver anvendelsen af brint som energibærer omfattende ændringer i flydesign. De nødvendige designændringer hænger i høj grad sammen med brints fysiske egenskaber. Selvom brint har en høj energidensitet pr. masse, er energidensiteten pr. volumen lav, hvilket medfører et betydeligt behov for lagringsplads. I modsætning til konventionelt jetbrændstof kan brint derfor ikke lagres i vingerne, men må i stedet placeres i tanke integreret i flykroppen, hvilket fundamentalt ændrer flyets design samt vægtfordeling.¹⁵⁹

Ved anvendelse af flydende brint skal brændstoffet opbevares ved meget lave temperaturer (under $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$).¹⁶⁰ Dette stiller store krav til udviklingen af avancerede og letvægts lagringstanke, som både skal kunne modstå betydelige temperaturvariationer og mekanisk belastning fra flyvningens forskellige faser, herunder start, cruise, landing og eventuelle nødlandinger. Effektiv isolering er afgørende for at begrænse fordampning og trykophbygning. Her skal

tankene være udstyret med tryksensorer og sikkerhedsventiler for at undgå overtryk, som i værste fald kan føre til alvorlige sikkerhedshændelser.¹⁶¹

Den høje energidensitet pr. masse giver dog også en potentiel designmæssig fordel, idet den samlede brændstofmasse kan reduceres betydeligt sammenlignet med konventionelt flybrændstof. Dette kan muliggøre lettere flystrukturer, mindre og lettere vinger samt mindre motorer.¹⁶² På den anden side medfører placeringen af brinttanke uden for vingerne et behov for forstærkninger af vingestrukturen, som øger vægten.¹⁶³

Derudover er sikkerhed et centralt designhensyn for brintfly. Brintmolekylets lille størrelse øger risikoen for lækage, og da brint både er farveløs, lugtfri og yderst brandfarlig, er hurtig detektion afgørende. Flydesign skal derfor integrere avancerede sensorer og lækagedetekteringsystemer for at sikre sikker drift og håndtering af eventuelle hændelser.^{164 165}

Flydesignets konsekvenser for passager- og bagagekapacitet afhænger desuden af, om brint anvendes i en brændselscelle med elektrisk fremdrift eller ved direkte afbrænding i modificerede jetmotorer. Brændselscellebaserede brintfly deler flere designmæssige udfordringer med elfly, og vurderes primært egnede til korte og regionale ruter. Dog skal de ikke bruge lige så tunge batterier da energien er lagret som hydrogen.¹⁶⁶

Ved direkte afbrænding af brint kan fly designes som turboprop- eller turbofan-fly, der i højere grad minder om konventionelle fly med hensyn til rækkevidde, hastighed og kapacitet. Denne løsning kræver dog udvikling af helt nye motorer, hvilket udgør en betydelig teknologisk udfordring.¹⁶⁷

Flere studier peger på, at eventuelle reduktioner i passager- og bagagekapacitet primært vil være relevante ved retrofit af eksisterende fly, særligt regionale turboprop-fly. Ved fly, der designes fra bunden til brintdrift, vurderes det muligt at imødekomme lagringsbehovet gennem ændret flydesign med fx længere flykrop, uden væsentlige reduktioner af passager og bagage kapacitet.^{168 169}

2) Kompatibel med eksisterende flyinfrastruktur

Implementeringen af brintfly vil kræve omfattende tilpasninger af lufthavnsinfrastrukturen. Dette omfatter etablering af systemer til transport af brint til og på lufthavne, eksempelvis via lastbiler eller rørledninger, samt installation af lagertanke til flydende brint. Derudover vil der være behov for nye sikkerhedsstandarder, procedurer og specialuddannet personale til håndtering af brint, herunder særligt udstyr til sikker lagring og tankning.¹⁷⁰ Derudover skal man også tage højde for om hydrogenen skal ankomme på gasform og man gør det flydende ved lufthavne eller om man transporterer flydende hydrogen. Dette vil også kræve en ændring i infrastruktur.¹⁷¹

3) Forbruger-og adfærdsperspektiv

Ændret brugeroplevelse afhænger af, om hastigheden samt passager og bagagekapaciteten bliver påvirket. Da brintfly fortsat befinder sig på et tidligt udviklingsstadium, er der endnu ikke fastlagt et standardiseret og optimeret design, som entydigt kan fastslå konsekvenserne for dette.

Derudover kan forbrugeraccept udgøre en barriere. Brint forbindes ofte med høj brand- og eksplosionsrisiko i den offentlige opfattelse, hvilket kan skabe usikkerhed eller modvilje mod at flyve med brintfly, uanset at teknologien designes med høje sikkerhedskrav. Denne psykologiske barriere kan påvirke efterspørgslen og bør derfor indgå som et relevant aspekt i vurderingen af brintflys samfundsmæssige implementering.

Elektro-, bio- og lavaromatiske fossile brændstoffer

1) Kompatibel med eksisterende flydesign

Elektrobrændstoffer, biobrændstoffer og lavaromatiske fossile brændstoffer skal designes så de kan fungere som såkaldte drop-in fuels, hvilket betyder, at brændstofferne kan anvendes direkte i eksisterende fly og motorer uden behov for væsentlige ændringer i flydesign eller fremdriftssystemer.

En forudsætning for at kunne anvende disse brændstoffer som drop-in fuels er, at de opfylder krav til aromatindhold. Aromater spiller en rolle for smøring og tætning af pakninger, særligt i ældre flytyper, og et for lavt aromatindhold kan derfor medføre driftsmæssige udfordringer. Dette håndteres gennem certificeringskrav (ASTM), hvor elektro- og

biobrændstoffer i dag typisk anvendes som iblandinger med fossilt jetbrændstof, samt gennem fastsatte minimumsgrænser for aromatindhold. Disse krav sikrer, at brændstofferne kan anvendes sikkert i både nyere og ældre fly.¹⁷²

Anvendelse af 100 pct. elektrobrændstoffer eller biobrændstoffer vil på sigt kunne kræve nye eller tilpassede flydesigns, som er kompatible med lavere aromatindhold uden at kompromittere sikkerhed og drift. Dette er i dag ikke tilladt, men kan ændre sig i takt med teknologisk udvikling og opdaterede certificeringsstandarder.

2) Kompatibel med eksisterende flyinfrastruktur

Forudsat at elektro-, bio- og lavaromatiske fossile brændstoffer anvendes som drop-in fuels, håndteres de på samme måde som konventionelt jetbrændstof, og er i høj grad kompatible med den eksisterende lufthavnsinfrastruktur. Lufthavne, lagring, distributionssystemer og tankningsudstyr kan anvendes uden væsentlige tekniske ændringer.

Overgangen til disse brændstoffer kræver primært tilpasninger i forsyningskæden og brændstofproduktionen snarere end i selve lufthavnsinfrastrukturen, som ligger udenfor analysens scope. Dette gør implementeringen relativt enkel sammenlignet med alternative teknologier som el og brintfly.

3) Forbruger-og adfærdsperspektiv

Fra et forbrugerperspektiv vil anvendelsen af elektrobrændstoffer, biobrændstoffer og lavaromatiske fossile brændstoffer være stort set uændret. Flyene vil have samme design, rækkevidde, hastighed og komfortniveau som ved brug af konventionelt jetbrændstof, og passagererne vil derfor ikke opleve ændringer i flyveoplevelsen eller rejsetiden.

Kompensation via BECCS og DACCS

Da kompensation via BECCS og DACCS finder sted uden for luftfartssektoren, medfører disse løsninger ingen direkte ændringer i flydesign, fremdriftssystemer eller lufthavnsinfrastruktur. Teknologierne påvirker således ikke den operationelle del af luftfarten og kræver heller ingen adfældsændringer fra et passagerperspektiv, da flyvningen foregår uændret sammenlignet med konventionel drift.

8.3 Resultater

En sammenligning af de vigtigste pointer fra sektor og samfundstilpasning analysen for de analyserede teknologier fremgår af tabellen nedenfor.

Tabel 22: Sammenligningen af sektor- og samfundstilpasning for de forskellige analyserede teknologier

	Lav-aromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Bio-brændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Kompatibelt med eksisterende flydesign	Drop-in fuels kan benyttes i eksisterende flydesign	Drop-in fuels kan benyttes i eksisterende flydesign	Drop-in fuels kan benyttes i eksisterende flydesign	Ingen ændringer	Ingen ændringer	Markante ændring af flydesign for begge teknologier <u>Elfly</u> : Integrere batteri samt elmotor, begrænset i størrelse <u>Brintfly</u> : Integrere brændselscelle/H ₂ afbrændingsmotor, plads til lagring, fokus på sikkerhed
Kompatibelt med eksisterende flyinfrastruktur	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Ingen ændringer	Ingen ændringer	Ny infrastruktur i lufthavne inklusiv ny drift og logistik <u>Elfly</u> : Hurtigladere/battery swapping, mellemlandsstationer <u>Brintfly</u> : Brintlagre, transport af flydende brint, fokus på sikker håndtering
Forbruger-perspektiv/ -adfærd	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Ingen ændringer	Ingen ændringer	Kan opstå længere rejsetider grundet nedsat flyhastighed eller nødvendige mellemlandinger. Batterivægt og flydesign kan betyde passager og bagage begrænsninger

Kilde: Klimarådet.

Som det fremgår af tabellen, kræver el- og brintfly omfattende ændringer på tværs af alle de vurderede kategorier. Det omfatter både udvikling af nye flydesign, etablering af ny infrastruktur i lufthavne, herunder ladestandere eller håndtering af flydende brint, samt tilpasninger af drift og logistik i lufthavnene. Derudover kan teknologierne medføre ændringer, som også vil kunne mærkes af passagererne, da der er tale om nye flytyper, som forbrugerne skal opbygge tillid til. Disse systemiske ændringer er ikke afspejlet i de øvrige vurderingsparametre, såsom klimaaftryk, energiforbrug og økonomi. De øvrige teknologier indebærer enten løsninger, der implementeres uden for selve luftfartssektoren, eller løsninger, som i vid udstrækning kan anvendes inden for den eksisterende flysektor med få eller ingen ændringer.

Beregning af gennemsnitlig sektor- og samfundstilpasning

For at muliggøre en sammenlignende vurdering af de enkelte teknologier er farvekategorierne sammenfattet til én samlet farve for hver teknologi. Den samlede vurdering af sektor- og samfundstilpasning fremgår af Tabel 23 og er visualiseret ved hjælp af trafiklysfarver.

Tabel 23: Farvescoring af teknologiernes sektor- og samfundstilpasning

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Sektor- og samfundstilpasning	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Få/ingen ændringer	Omfattende ændringer

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af i de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Elfly.** Kræver væsentlige ændringer i både flydesign og infrastruktur. Flyene skal udvikles med integrerede batterier og elmotorer, og flystørrelsen vil være begrænset grundet batteriernes fysiske egenskaber. Samtidig kræver teknologien ny infrastruktur i lufthavne, herunder hurtigladestandere eller batteriskift, samt tilpasninger af drift og logistik. Passagerer kan også opleve ændringer, eksempelvis nye flytyper, længere rejsetider ved behov for mellemlandinger og mulige bagagebegrænsninger som følge af vægtrestriktioner.
- **Brintfly.** kræver ligeledes omfattende ændringer i flydesign og infrastruktur. Flyene skal enten ombygges eller designes fra bunden til håndtering af brintlagring, brændselsceller og batterier eller brintaftbrændingsmotorer. Derudover er der behov for ny lufthavnsinfrastruktur, herunder brintlagring, mulig konvertering fra gasformig til flydende brint samt særlige sikkerhedsforanstaltninger. Teknologien befinder sig fortsat på et tidligt udviklingsstadium, og konsekvenser for rækkevidde og passagerkapacitet er derfor usikre. Social accept af brint som drivmiddel kan desuden påvirke efterspørgslen.
- **Brændstoffer.** Lavaromatiske fossile brændstoffer, elektrobrændstoffer og biobrændstoffer er såkaldte drop-in-løsninger, der kan anvendes i den eksisterende flyflåde. Ved en fremtidig anvendelse af høje iblandingsniveauer eller 100 pct. alternative brændstoffer kan der dog opstå behov for tilpasninger af flydesign, blandt andet som følge af lavere aromatindhold. Infrastruktur, drift og passageroplevelse forventes ellers i vid udstrækning at forblive uændret.
- **Kompensation.** Indebærer fortsat anvendelse af fossilt flybrændstof, mens reduktionerne sker uden for luftfartssektoren. Der forventes derfor ikke ændringer i fly, infrastruktur eller passageroplevelse inden for selve sektoren.

9 Omkostninger i dag

Teknologiernes omkostninger i dag beskriver teknologiens mulighed for at kunne levere på markedsvilkår. Omkostninger i dag beskriver bl.a. teknologiernes konkurrenceevne i forhold til det fossile alternativ og teknologiernes konkurrenceevne i forhold til hinanden. Energipriser er centrale i produktionen af brændstoffer og høje energipriser kan betyde, at teknologierne kan blive meget omkostningstunge.

9.1 Begrundelse og tilgang

Prisen er afgørende ved valg af teknologi

Teknologiernes udvikling, udbredelse og anvendelse afhænger i høj grad af produktionsomkostningerne, anlægsinvesteringer og prisen på energiinput.

Teknologierne analyseres først og fremmest for deres omkostninger i dag.

For at sammenligne produktionsomkostningerne ved de enkelte teknologier, udregnes teknologiernes mindste mulige salgspris opgjort ved deres pris pr. reduceret eller undgået CO₂-udledning. Prisen opgøres således ud fra den mængde brændstof eller kompensation der skal til for at undgå ét ton CO₂ fra afbrænding af fossilt flybrændstof.

I udregningen af den mindste mulige salgspris indgår investeringsomkostninger, løbende driftsomkostninger, udgifter til energiinput samt eventuelle indtægter fra salg af biprodukter.

Teknologierne sammenlignes ved den mindste mulige salgspris

Teknologierne analyseres for deres produktionsomkostninger i dag.

For at sammenligne produktionsomkostningerne ved de enkelte teknologier, udregnes teknologiernes *Minimum Selling Price* (MSEP) opgjort ved deres pris pr. reduceret eller undgået CO₂-udledning. Prisen opgøres således ud fra den mængde brændstof eller kompensation der skal til for at undgå ét ton CO₂ fra afbrænding af fossilt flybrændstof.

I udregningen af MSEP indgår investeringsomkostninger, løbende driftsomkostninger, udgifter til energiinput samt eventuelle indtægter fra salg af biprodukter:

$$MSEP = C_{investering} + C_{drift} + C_{energiinput} - P_{biprodukter}$$

Investeringsomkostningerne dækker over omkostninger til etablering af produktionsanlæggene, produktionsudstyr samt driftskapital. Driftsomkostningerne omfatter både faste og variable driftsomkostninger. Omkostninger til energiinput dækker over omkostninger til de energiinput, der anvendes i produktionen. Ved flere teknologier produceres desuden et eller flere biprodukter, der kan generere en indtægt. I MSEP indgår således ikke transportomkostningen for det endelige produkt, brændstofleverandørenes avance ved salg eller afgifter.

I denne analyse omfatter driftsomkostninger således ikke de variable omkostninger til energiinput, hvilke opgøres særskilt.

Investeringsomkostningen pr. enhed bestemmes ud fra break-even af anlægsinvesteringen

Teknologierne analyseres ved at sammenligne MSEP, hvorfor den samlede omkostning beskriver den mindste pris, producenten kan afsætte produktet for. Investeringsomkostningen skal således afspejle den minimale pris pr. enhed p , der vil sikre break-even ift. anlægsinvesteringen over hele anlæggets levetid. Break-even forudsætter, at anlæggets nettonutidsværdi er nul.

Nettonutidsværdien bestemmer hvorvidt en investering er rentabel over hele investeringens løbetid T , ved at tage højde for investeringens fordele B , og ulemper I , for hvert år t , opgjort i nutidsværdi ved at tage højde for den samfundsøkonomiske diskonteringsrente r .

$$NNV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - I_t}{(1+r)^t}$$

Break-even er dermed bestemt ved:

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = I_0$$

Et givent års fordele i break-even er derfor bestemt ved den minimale enhedspris ganget med anlæggets produktionskapacitet.

$$B_t = p * Q$$

Dermed kan den minimale enhedspris i break-even bestemmes ved anlægsinvesteringen ganget med annuitetsfaktoren delt med anlæggets årlige produktionskapacitet:

$$p * Q \sum_{t=0}^n \frac{1}{(1+r)^t} = I_0$$

$$C_{investering} = p = \frac{I_0}{Q} * \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Anlægsinvesteringen varierer på tværs af teknologierne ligesom anlæggenes årlige produktionskapacitet og levetid også varierer.

Finansministeriet fastsætter den anbefalede diskonteringsrente ud fra et hensyn til at sikre konsistens mellem henholdsvis den makroøkonomiske planlægning på den ene side og samfundsøkonomiske vurderinger af konkrete tiltag på den anden side. Diskonteringsrenten er fastsat til 3,5 pct. for år 0-35.¹⁷³

De tekniske forudsætninger og investeringsomkostninger baseres hovedsageligt på Energistyrelsens teknologikataloger for fornybare brændstoffer¹⁷⁴ og kulstoffangst, -transport og -lagring¹⁷⁵. Dog anvendes øvrig litteratur til enkelte biobrændstoffer og lavaromatisk fossilt brændstof.

Det kræver langsigtede investeringer at satse på teknologi

Når teknologiudviklere og brændstofproducenter træffer en beslutning om investeringer i nye produktionsanlæg, sker det ud fra en afvejning af de omkostninger og indtægter i hele anlæggets levetid. Investeringens nettonutidsværdi afgør således hvorvidt det giver mening at investere i anlægget økonomisk. Brændstofproduktionsanlæggene behandlet i denne analyse har typisk en levetid på 25-30 år.

For at aktørerne i branchen tør satse på projekter med meget store anlægs- og investeringsomkostninger kræver det, at aktørerne har sikkerhed om anlæggets rentabilitet og med meget teknologispecifik regulering kan omkostningerne være afgørende for hvorvidt omstillingen af luftfartssektoren er mulig i de eksisterende regulatoriske rammer. Analysen behandler derfor produktionsomkostningerne for bl.a. at belyse, hvorvidt de enkelte teknologier enten kræver økonomisk støtte eller kan fungere på almindelige markedsvilkår. Analysen skal også kortlægge hvordan teknologierne prissættes i forhold til hinanden og indgå i en helhedsvurdering af teknologiers potentialer samt de regulatoriske rammer, der eksisterer i dag.

Omkostninger for teknologierne opgøres ud fra omkostningen ved at skulle reducere et ton CO₂e med den pågældende teknologi. Teknologierne sammenlignes dermed på baggrund af deres omkostning ved at erstatte en udledning på et ton CO₂e fra anvendelsen af fossilt flybrændstof.

Prisen på energiinput er afgørende

Prisen på energiinput udgør en central faktor i analysen, da energiinput ofte repræsenterer en betydelig og løbende omkostning. På samme måde som prisen på råolie er styrende for produktionsomkostningerne ved fossile brændstoffer, kan prisen på energiinput være styrende for produktionsomkostningerne i andre teknologier. Variationer i priserne på de enkelte energiinput, herunder el, CO₂ og biomasse, kan derfor have væsentlig indflydelse på de samlede produktionsomkostninger ved en given teknologi. Da forskellige teknologier er kendetegnet ved forskellig energieffektivitet og afhængighed af specifikke energikilder, kan ændringer i de relative energipriser være afgørende for, hvilken teknologi der fremstår som den mest omkostningseffektive. Prisen på energiinput er således ikke blot væsentlig for de samlede omkostninger ved den enkelte teknologi, men kan i praksis også være afgørende for teknologivalg og skaleringsmuligheder.

Elpris

El indgår som energiinput i flere processer og skal anvendes i stor skala. Derfor er prisen på el et vigtigt element i omkostningsberegningen. Til beregningen af omkostninger i dag anvendes spotprisen fra 2025 opgjort på timebasis opgjort af Energistyrelsen.¹⁷⁶

Efterfølgende tillægges nettarif og systemtarif for forbrugere i transmissionsnettet. Tarifferne følger af opgjorte tariffer fra Energinet.¹⁷⁷

Omkostninger ved brint

Brint er et væsentligt input i flere teknologier, herunder særligt elektrobrændstoffer og brintfly. Omkostningerne ved brint bestemmes ud fra Energistyrelsens teknologikatalog for fornybare brændstoffer, med afsæt i storskala elektrolyseanlæg.¹⁷⁸

Til analysen antages det, at elektrolyseanlæggene er i drift i de 65 pct. af året, hvor elprisen er billigst. Det svarer til cirka 5.700 fuldlasttimer og er bestemt ud fra en optimering af omkostningerne til el samt diskonteringen af anlægsomkostningerne.

Visse elektrolyseanlæg kræver adgang til et brintlager som følge af anlæggenes niveau for fuldlasttimer og dermed udsving i produktionen. Her lægges det til grund, at halvdelen af anlæggene skal investere i geologiske lagringsfaciliteter i form af saltkaverner. Det forudsættes også, at den anden halvdel har adgang til et brintrør og dermed ikke har omkostninger til lagring. Omkostningerne til brintlagring bestemmes ud fra Energistyrelsens teknologikatalog for energilagring.¹⁷⁹

I produktionen af brint skal der blandt andet anvendes større mængder vand. Der er i analysen ikke taget højde for omkostningen hertil. På samme måde tages der ikke højde for eventuelle indtægter fra en eventuel afsætning af ilt som biprodukt fra elektrolysen.

Omkostninger ved CO₂

CO₂ er en væsentlig ressource i forhold til flere af de analyserede teknologier. Omkostningerne ved CO₂ omfatter både fangst, transport og lagring og bestemmes med afsæt i Energistyrelsens teknologikatalog for kulstoffangst, -transport og -lagring. Der beregnes både omkostninger for fangst via BEC, Liquid DAC og Solid DAC.¹⁸⁰

Transporten af CO₂ antages, som beskrevet i forbindelse med parameteret om teknologiernes energiforbrug, både at ske ved skib, rørledning og gennem tilhørende terminaler. For transporten af CO₂ antages det, at drivmidlet for skibe er diesel. Omkostningen til diesel baseres på prisfremskrivningen i Klimastatus og -fremskrivning 2025.¹⁸¹

Omkostninger ved biomasse

Udgifter til biomasseinput udgør en central andel af biobrændstoffernes produktionsomkostninger og kan variere betydeligt på tværs af biomassekilden. Markedsprisen kan variere på tværs af lande og handles aktuelt i større grad bilateralt, hvorfor der ikke foreligger hverken en global eller regional børspris. Den gennemsnitlige, aktuelle danske markedspris på træflis og træpiller opgøres i forbindelse med Klimastatus og -fremskrivning 2025 ud fra en markedsanalyse fra analyseinstituttet Argus.¹⁸²

Til produktionen af biobrændstoffet HEFA anvendes brugt madolie (Used Cooking Oil, UCO). Denne ressource er dog kun tilgængelig i begrænset omfang, da der oftest anvendes brugt fritureolie som ressourceinput. Denne teknologi vurderes derfor kun at kunne dække omkring 10 pct. af efterspørgslen i 2050.¹⁸³ Manglende skalerbarhed afspejles derved i det samlede resultat for fremtidig forventet omkostninger. UCO handles ligeledes gennem bilaterale kontrakter. Analyseinstituttet Fastmarkets indsamler løbende handelsdata på flere handelsvarer, herunder landbrugsprodukter og UCO.¹⁸⁴ Til omkostningsberegningerne anvendes markedsprisen på UCO handlet i Europa.

Omkostninger ved råolie

Både lavaromatiske fossile brændstoffer og den fortsatte anvendelse af fossilt flybrændstof ved kompensations løsningen forudsætter at prisen på råolie indgår i beregningerne.

Biprodukter kan reducere produktionsomkostningen

Produktionen af flybrændstof medfører en række biprodukter, da raffineringsprocesserne ofte er teknisk komplekse processer, hvor det ikke altid er muligt at opnå 100 pct. flybrændstof. Dette gælder ligeledes for produktionen af bio- og elektrobrændstoffer, hvorfor der i estimeringen af produktionsomkostningerne også tages hensyn til producenternes mulighed for at afsætte biprodukterne til andre formål. Derudover resulterer flere af delprocesserne i en større mængde overskudsvarme, der under visse betingelser kan udnyttes til fx fjernvarme.

Det antages desuden, at biproduktet må forventes at opfylde samme krav til henholdsvis bio- og elektrobrændstoffer som det producerede bio- eller elektroflybrændstof og derfor lever op til eventuelle brændstofkrav til den konkrete anvendelse.

Prissætning af brændstof biprodukter

I tilfælde hvor produktionen af et specifikt bio- eller elektroflybrændstof resulterer i overskydende øvrige brændstoffer antages det, at brændstoffet kan afsættes til samme pris som det ækvivalente biobrændstof uagtet om det stammer fra produktionen af bio- eller elektrobrændstof. Prisen på det respektive ækvivalente biobrændstof bestemmes ud fra en produktionsomkostningsberegning med afsæt i Energistyrelsens teknologikatalog for fornybare brændstoffer.¹⁸⁵

For så vidt angår nafta lægges det til grund, at omkostningerne følger omkostningerne til råolie. Dette baseres på en antagelse om, at produktionen af nafta som biprodukt er begrænset og at efterspørgslen også vil være begrænset i fremtiden.

Prissætning af eloutput

I tilfælde hvor produktionen af et specifikt bio- eller elektroflybrændstof resulterer i overskydende el antages det, at strømmen kan afsættes til markedspris, som beskrevet for prisen på elinputtet.

Prissætning af overskudsvarme

Ved de analyserede teknologier dannes der i flere processer overskudsvarme, der kan indfanges og anvendes i lokale fjernvarmenet. Det gælder både fra elektrolyse, kulstoffangst og fra flere typer raffineringsprocesser.¹⁸⁶ Den potentielle overskudsvarme kan afsættes til fjernvarmeselskaber ud fra en aftalt pris. En analyse af mulighederne for atomkraft i Danmark fra analyseinstituttet EA Energianalyse indeholder et estimat for varmeprisen for overskudsvarme til fjernvarme. I EA Energianalyses analyse antages en varmepris på 70 kr./GJ (2025-priser).¹⁸⁷ Overskudsvarmen fra atomkraft kan sammenlignes med overskudsvarmen fra brændstofproduktionen, og estimatet anvendes i Klimarådets analyse. Prisen fastholdes for alle år i analysen.

Til sammenligning har tænketanken Grøn Energi og brancheforeningen Dansk Fjernvarme tilbage i 2023 estimeret prisen fjernvarmeanlæggene betaler for overskudsvarmen til henholdsvis 175 kr./MWh eller cirka 50 kr./GJ (2022-priser) i gennemsnit for overskudsvarme ved temperaturer på 70 grader celsius.¹⁸⁸

Afsætningsmuligheden for overskudsvarme til fjernvarme er forudsat en tilgængelig fjernvarmeinfrastruktur lokalt ved produktionsanlægget. Den geografiske placering af det enkelte anlæg afhænger dog af flere faktorer, hvor fx både brintinfrastruktur, adgang til sø- og lufthavne samt kulstoflagringsfaciliteter også er afgørende for økonomien og derfor indgår i de strategiske overvejelser om blandt andet anlægsplacering. Analysen fra Dansk Fjernvarme og Grøn Energi vurderer, at potentialet for udnyttelse er mellem 10 og 25 pct., men understreger, at udnyttelsesgraden afhænger af fx

teknologivalg, og mulighed for integration i fjernvarmesystemet.¹⁸⁹ Estimatet er baseret på en dansk kontekst, hvorfor der i nærværende analyse antages et konservativt estimat på 10 pct.

Teknologier til at kompensere for luftfartens udledninger kræver fortsat fossilt brændstof

Analysen belyser omkostninger til at indfange og lagre kulstof og dermed omkostninger til at kompensere for udledningerne. Flyselskaberne skal dog fortsat afholde udgifter til fossilt brændstof. Produktionsomkostningen på fossilt brændstof handles i stor skala både globalt og regionalt, hvorfor den bedste repræsentant for flyselskabets omkostning antages at være markedsprisen på flybrændstof. I analysen anvendes fremskrivningen i Klimastatus og -fremskrivning 2025, der fremskriver prisen på råolie og det tilhørende pristillæg for flybrændstof med afsæt i de aktuelle forwardpriser.¹⁹⁰

Lavaromatiske fossile brændstoffer reducerer ikke CO₂-udledninger

Resultatet af beregningen af omkostningerne til produktionen af lavaromatiske fossile brændstoffer kan ikke præsenteres sammen med resultatet af omkostningsberegningen for de øvrige teknologier. Det skyldes, at hovedresultaterne opgøres ved kr. pr. ton CO₂e reduceret. Som beskrevet i teknologibeskrivelserne i kapitel 1 er formålet med lavaromatiske fossile brændstoffer at reducere non-CO₂-effekter. Omkostningen ved lavaromatiske fossile brændstoffer kan derfor kun sammenlignes med de øvrige brændstoffer ud fra deres omkostning pr. energiindhold.

Produktionsomkostningsberegningen for lavaromatiske fossile brændstoffer følger samme metode som for de øvrige teknologier og det primære energiinput er råolie. I beregningerne anvendes samme råoliepris som den fossile referencepris, og kan derfor sammenlignes direkte.

Klimarådets analyse baseres på teknologikataloger

Omkostningerne for teknologierne analyseres på baggrund af Klimarådets egne beregninger, hvor der hovedsageligt tages afsæt i Energistyrelsens Teknologikatalog for fornybare brændstoffer.¹⁹¹ Ud fra analysen af teknologiernes energiforbrug, estimeres omkostningerne ved de enkelte energiinput som listet i teknologikatalogerne.

Teknologikatalogerne indeholder desuden generaliserede investerings- og anlægsomkostninger (CAPEX) for de enkelte anlægstyper og størrelser, samt de tilsvarende faste og variable løbende driftsomkostninger (OPEX).

I det omfang hvor Energistyrelsens teknologikataloger ikke har tilstrækkeligt konkretiseret CAPEX, OPEX samt selve produktionsprocessen, er teknologibeskrivelserne justeret ud fra tilgængelig litteratur.

Produktionsprocesserne beskrevet i teknologikatalogerne er i enkelte tilfælde justeret ud fra opdaterede skøn, hvilket sker ud fra en betragtning af, at det primære formål med den pågældende teknologi kan variere, da processerne i flere tilfælde resulterer i flere produkter end bare flybrændstof. Afsætningsmulighederne af disse alternative slutprodukter indgår desuden i omkostningsestimerne og kan reducere omkostningerne i det omfang de kan afsættes til alternative markeder.

Teknologiernes omkostninger skal både ses i forhold til hinanden og fossilt brændstof

Når flyselskaberne tager alternative teknologier i anvendelse, vil det i de fleste tilfælde komme med en øget omkostning ud fra en antagelse om, at flyselskaberne altid vil tilstræbe at minimere deres omkostninger. Der kan dog være andre barrierer for at tage nye teknologier i anvendelse, hvilket søges afdækket gennem teknologianalysens øvrige analyseparametre. Derfor er det relevant at sammenligne omkostningsestimerne for teknologierne med omkostningerne til fossilt flybrændstof.

Under den gældende regulering i dag stilles der krav til anvendelse af bio- eller elektrobrændstoffer. Med afsæt i teknologianalysen søges det belyst, hvordan teknologierne prissættes i forhold til hinanden inden for forskellige regulatoriske scenarier udover det gældende med *ReFuelEU Aviation*. Sammenligningen af teknologiernes produktionsomkostninger er derfor relevant både på tværs af alle analyserede teknologier, men også i særskilte sammenligninger.

Nogle teknologier kan godt være dyre i dag men billigere i fremtiden

Analysen af teknologiernes produktionsomkostning i dag skal ses i sammenhæng med analysen af teknologiernes forventede produktionsomkostning i fremtiden. Teknologisk udvikling og reducerede energipriser kan føre til, at nogle teknologier kan blive mere attraktive i fremtiden også selvom de ikke er økonomisk rentable i dag. Resultaterne af omkostningsestimaterne i dag skal derfor både ses i relation til hinanden og i relation til de forventede fremtidige omkostninger. Resultaterne kan på den måde både belyse hvilke teknologier, hvor det allerede i dag kan svare sig økonomisk at tage dem i anvendelse, men også hvilke teknologier der har potentiale til at drive omstillingen på længere sigt ud fra en økonomisk vurdering.

Resultater vises med en trafiklysmode

Analysen søger derfor konkret at belyse tre ting:

1. Teknologiernes produktionsomkostninger i forhold til prisen på fossilt brændstof.
2. Teknologiernes produktionsomkostninger i dag.
3. Teknologiernes udvikling i produktionsomkostningerne i sammenhæng med de fremtidige produktionsomkostninger.

Resultater er beregnet som et simpelt gennemsnit og vises med en trafiklysmode sammen med de øvrige analyserede parametre i teknologianalysen.

Resultaterne tildeles en farve ud fra en skala baseret på deres relative prisniveau. For at sikre sammenlignelighed på tværs af tid er intervallerne, som bestemmer teknologiernes farvescore, ens for både omkostninger i dag og forventede fremtidige omkostninger. Intervallerne er fastlagt ud fra percentiler beregnet på tværs af alle estimer, så farvekodningen afspejler teknologiernes relative placering, også i forhold til den fossile referencepris. Skalaen fremgår desuden af Tabel 24.

Alle priser er opgjort i 2025-priser.

Tabel 24: Definition af skala til scoring af parameter

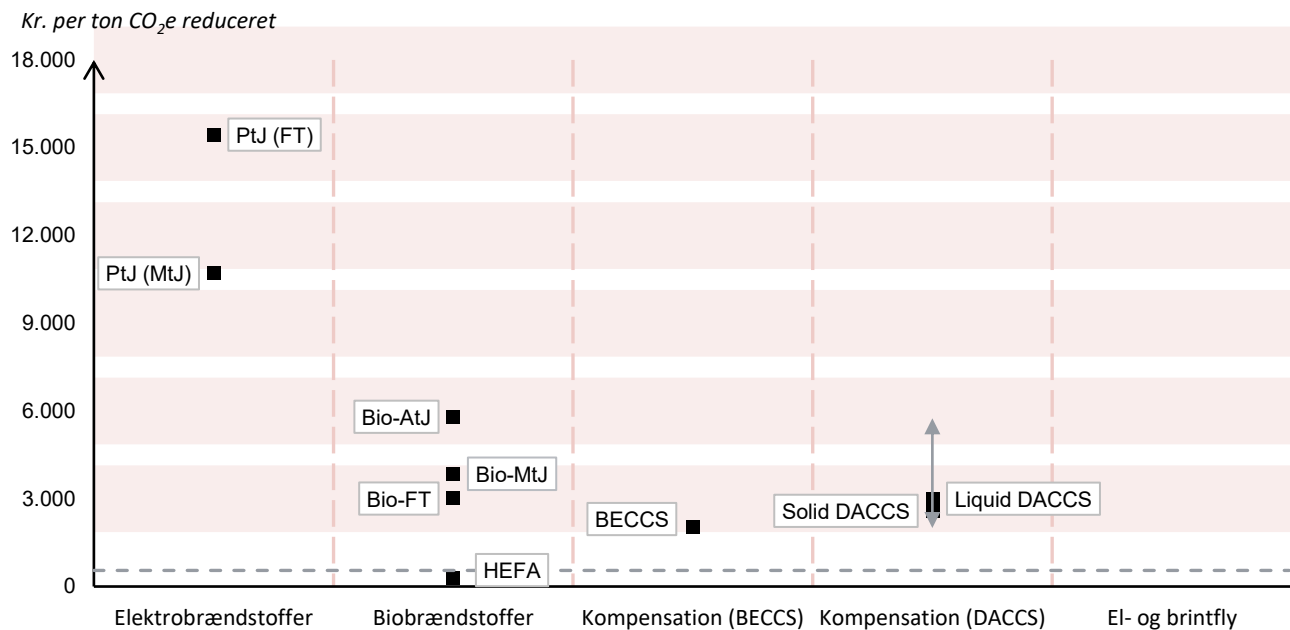
Omkostninger i dag [kr. pr. ton CO ₂ e reduceret]				
Score	Grøn: <1.700	Gul: 1.700 – 3.500	Rød: >3.500	Hvid: Ingen data

Kilde: Klimarådet.

9.2 Analyse

Resultaterne for teknologiernes omkostninger i dag fremgår af Figur 16. Figuren viser, at omkostningen ved at reducere eller undgå et ton CO₂ i dag, for alle teknologier kommer med en betydelig omkostning. Særligt er omkostningen til elektrobrændstoffer i dag i gennemsnit cirka 13.000 kr. pr. ton CO₂ reduceret. Reduktionsomkostningen med biobrændstoffer er i gennemsnit ca. 3.250 kr. pr. ton CO₂. Til sammenligning kan omkostningsestimaterne ses i forhold til CO₂-kvoteprisen (ETS₁) lagt sammen med omkostningerne til fossilt brændstof, da kvoteprisen svarer til betalingen for udledningen af ét ton CO₂. I 2025 var kvoteprisen i gennemsnit ca. 550 kr. pr. ton CO₂.¹⁹² Dermed forventes det ikke at kunne svare sig i dag, at iblande bio- eller elektrobrændstoffer uden regulatoriske incitamenter.

Figuren viser også, at omkostningerne til CCS, enten ved DAC eller gennem biogene kilder, ligeledes kommer med en betydelig omkostning i dag, set i forhold til den fossile reference. Omkostningen pr. ton CO₂ indfanget og lagret er i gennemsnit ca. 2.500 kr. og dermed også betydeligt over udgifterne til fossilt brændstof og CO₂-kvoter.



Figur 16: Teknologiernes omkostninger i dag opgjort i kr. pr ton CO₂e reduceret

Anm. 1: Spændet for DACCS fremhæver den betydelige usikkerhed, der knytter sig til omkostningerne ved DACCS, herunder både anlægs- og lagringsomkostninger.

Anm. 2: CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse.

Kilde: Klimarådet

El- og brintfly eksisterer ikke i dag

Med analyseparameteren for teknologisk modenhed illustrerer analysen, at teknologierne el- og brintfly fortsat er i et udviklingsstadium og ikke eksisterer som skalerbar teknologi i dag. Udsigterne til kommerciel drift af teknologier indikerer, at teknologierne tidligst ville kunne implementeres på den anden side af 2030, hvorfor analysen ikke skønner over omkostninger i dag ved el- og brintfly.¹⁹³

Særligt udgifter til CO₂ og strøm er høje i dag

De høje omkostninger for elektrobrændstoffer er i høj grad drevet af udgifterne til el og CO₂. Omkostningsestimaterne for teknologierne fordelt på omkostningskategori fremgår af Figur 17. For både PtJ (FT) og PtJ (MtJ) gælder det, at ca. 60 pct. af omkostningerne udgøres af udgifterne til el, hvilket først og fremmest skyldes det høje energiforbrug i elektrolyseprocessen kombineret med høje elpriser. I analysen antages elektrolyseanlægget kun at være i drift i de 65 pct. timer hvor elprisen er billigst, ud fra en optimering af driftstimer og relative omkostninger. En øget drift ville dermed øge omkostningerne.

Knap 25 pct. af omkostningerne udgøres af udgifter til CO₂. I analysen antages CO₂ at komme fra enten BEC eller DAC alt efter den billigste teknologi. CO₂-fangst fra luften er fortsat en omkostningsfuld teknologi og også her forventes der store udgifter til elforbruget, der reelt dækker op mod 20 pct. af udgiften til CO₂. Den resterende omkostning dækker generelt investerings- og anlægsomkostninger samt drifts- og vedligehold for både selve de tekniske omkostninger ved fangstanlægget og infrastrukturen.

For så vidt angår PtJ (MtJ) er omkostningerne ca. 30 pct. lavere end for PtJ (FT). Teknologien kræver et mindre energiinput, og prisforskellen er hovedsageligt drevet af ekstra udgifter til el, både direkte og gennem CO₂-fangst.

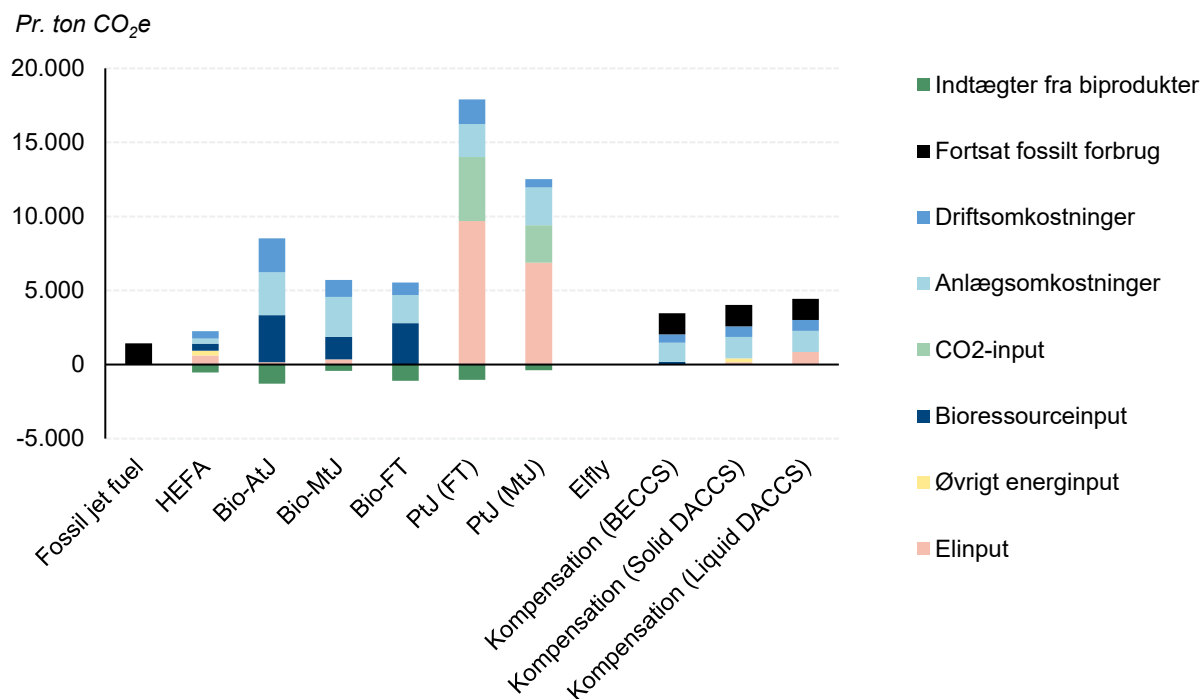
Omkostningerne til biomasse er afgørende for biobrændstoffers rentabilitet

For biobrændstofferne er det særligt omkostningerne til bioressourcer, der er drivende for omkostningsestimatet. Mens el udgør ca. 60 pct. af omkostningerne til elektrobrændstoffer, udgør omkostningen til bioressourcer knap 40 pct. af omkostningerne. Adgangen om prisen på bioressourcer er derfor afgørende for biobrændstoffers rentabilitet. Dertil har biobrændstoffer høje anlægsomkostninger, og både Bio-AtJ, Bio-MtJ og Bio-FT har en samlet anlægsomkostning på ca. 2.500 kr., hvilket udgør ca. 45 pct. af de samlede omkostninger. Det fremgår af Figur 17.

HEFA er den teknologi med lavest produktionsomkostning og er betydeligt billigere end de andre biobrændstoffer. HEFA estimeres desuden til at have lavere produktionsomkostninger sammenlignet med fossilt flybrændstof. Adgangen til brugt fritureolie, som er biomasseinputtet i HEFA, er som tidligere beskrevet begrænset, og prisen hertil kan dermed variere betydeligt. Markedsprisen på HEFA er derfor ikke nødvendigvis den samme som produktionsomkostningen, og må forventes at stige i takt med stigende efterspørgsel.

Fossilt flybrændstof er knap halvdelen af omkostningen ved kompensation

Figur 17 viser også, at for teknologierne til at kompensere for udledninger udgør det fortsatte forbrug af fossilt flybrændstof knap halvdelen af omkostningen, hvilket betyder at omkostningerne til fangst, transport og lagring af CO₂ udgør ca. 2.500 kr. for DACCS og ca. 2.000 kr. for BECCS, hvoraf anlægsomkostningerne er den primære omkostning.

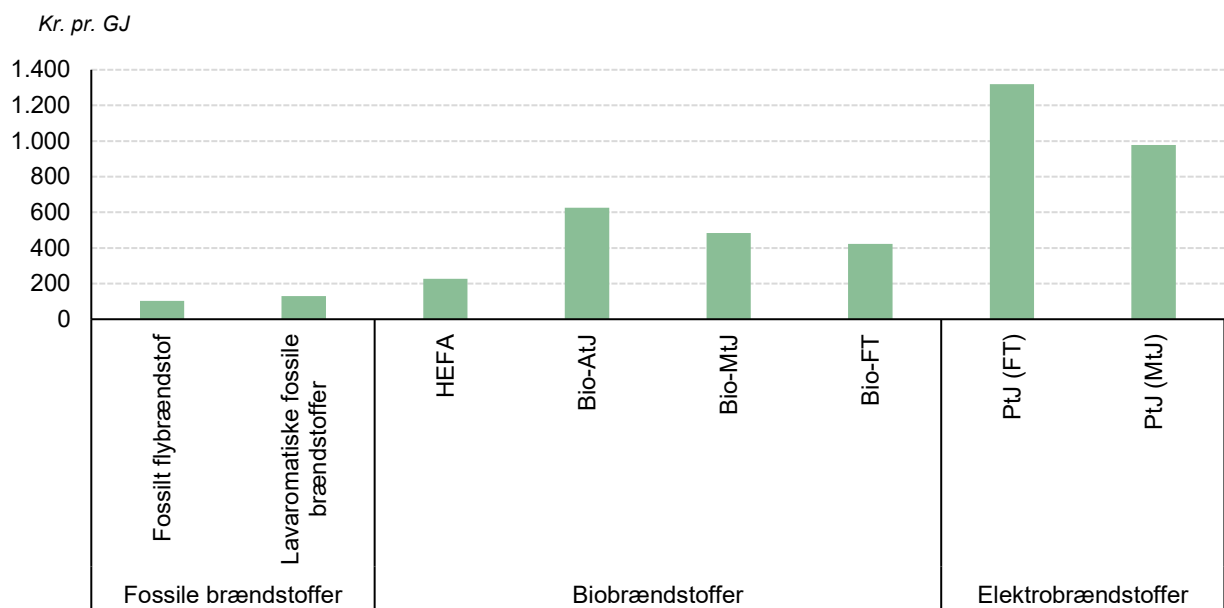


Figur 17: Teknologiernes omkostninger i dag opgjort i kr. pr. ton CO₂e reduceret

Kilde: Klimarådet.

Lavaromatiske fossile brændstoffer er billigere end bio- og elektrobrændstoffer

Lavaromatiske fossile brændstoffer har en mindre præmie i forhold til fossilt flybrændstof og omkostningerne hertil er knap 130 kr. pr. GJ. Til sammenligning er omkostningen til fossilt flybrændstof ca. 103 kr. pr. GJ i dag, hvilket fremgår af Figur 18. Den øgede omkostning kan primært tilskrives de ekstra anlægsomkostninger samt et lille forbrug af brint i produktionen. Lavaromatiske fossile brændstoffer er dermed knap 25 pct. mere omkostningstunge end fossilt flybrændstof, men ca. 70 pct. lavere end for biobrændstoffer og ca. 80 pct. lavere end for elektrobrændstoffer.



Figur 18: Omkostninger til flydende brændstoffer i dag

Kilde: Klimarådet.

Robusthed

Robustheden af resultaterne behandles sammen med de forventede fremtidige omkostninger i det følgende kapitel.

9.3 Resultater

Der eksisterer ingen teknologier i dag, der kan levere på markedsvilkår

De samlede resultater for omkostninger i dag fremgår af Tabel 25, der er et uddrag af den samlede resultatoversigt. Tabellen viser, at elektrobrændstoffer har meget høje omkostninger i dag, både i forhold til den fossile reference med flybrændstof og CO₂-kvoter, men også i forhold til de øvrige teknologier i analysen.

Tabellen viser også, at biobrændstoffer og kompensation med både BECCS- og DACCS-kreditter er lavere end elektrobrændstoffer, men fortsat ikke på niveau, hvor det kan konkluderes, at teknologierne vil kunne levere på markedsvilkår.

Lavaromatiske fossile brændstoffer og el- og brintfly fremgår ikke af tabellen.

Tabel 25: Udsnit af den samlede resultatfigur med parameteren omkostninger i dag.

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Omkostninger i dag	n.a.	13.000 [10.700-15.400]	3.250 [200-5.800]	2.000	2.750 [2.500-3.000]	n.a.

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Elfly.** Er ikke tilgængelig i dag, hvorfor der ikke eksisterer omkostningsestimater for teknologien.
- **Lavaromatisk fossilt brændstof.** Fremgår ikke af tabellen, da den ikke reducerer CO₂. Sammenlignet med de øvrige brændstofteknologier er lav-aromatiske fossile brændstoffer betydeligt billigere pr. GJ og er kun lidt dyrere end fossilt brændstof.
- **Elektrobrændstoffer.** Elektrobrændstoffer er den absolut dyreste teknologi i dag. Det skyldes primært høje elpriser og anlægsomkostninger.
- **Biobrændstoffer.** Biobrændstoffer varierer betydeligt i omkostningsestimaterne fra at være billigere end fossilt brændstof med HEFA til at være dyrere end de øvrige teknologier på nær elektrobrændstoffer. Biobrændstofferne er særligt følsomme over for omkostninger til bioressourcer.
- **Kompensation via BECCS og DACCS.** Kompensation via BECCS og DACCS har de laveste gennemsnitsomkostninger i dag blandt de analyserede teknologier. Dog er der betydelig usikkerhed om særligt anlægsomkostningerne til DACCS.

10 Forventet fremtidig omkostning

Dette kapitel anvender samme tilgang som for omkostninger i dag, men søger at estimere omkostninger i 2040-2050.

10.1 Begrundelse og tilgang

De fremtidige omkostningerne er afgørende for den langsigtede teknologiplanlægning

Hvorvidt en teknologi bliver attraktiv på længere sigte, afhænger af flere ting afdækket i denne analyse, og særligt rentabiliteten på lang sigt har stor betydning for den langsigtede planlægning, både for lovgivere og markedsaktører. Den teknologiske udvikling kan potentielt reducere produktionsomkostningerne for teknologierne på samme måde som de fremtidige energipriser også er afgørende for sektorens udvikling.

Teknologierne analyseres derfor også for deres forventede fremtidige omkostninger. Analysen følger samme tilgang som analysen af teknologiernes aktuelle produktionsomkostninger. De fremtidige produktionsomkostninger ved de enkelte teknologier kan således sammenlignes ud fra teknologiernes mindste mulige salgspris opgjort ved deres pris pr. reduceret eller undgået CO₂-udledning. Prisen opgøres således ud fra den mængde brændstof eller kompensation der skal til for at undgå ét ton CO₂ fra afbrænding af fossilt flybrændstof.

I udregningen af den mindste mulige salgspris indgår investeringsomkostninger, løbende driftsomkostninger, udgifter til energiinput samt eventuelle indtægter fra salg af biprodukter.

Teknologierne sammenlignes ved den forventede fremtidige mindste mulige salgspris

På samme måde som for teknologiernes omkostninger i dag, sammenlignes teknologiernes forventede fremtidige omkostning ved teknologiernes mindste mulige salgspris. Prisen udgøres ligeledes ud af de forventede fremtidige investeringsomkostninger, løbende driftsomkostninger, omkostninger ved energiinput samt afsætningsmuligheder af biprodukter.

For de forventede fremtidige omkostninger dækker investeringsomkostningerne over de forventede fremtidige omkostninger til etablering af produktionsanlæggene, produktionsudstyr samt driftskapital, mens driftsomkostningerne omfatter både faste og variable driftsomkostninger. De forventede fremtidige omkostninger baseres på Energistyrelsens fremskrevne værdier ud fra forskellige effektiviseringsantagelser.

Udviklingen i energiinput kan have stor betydning

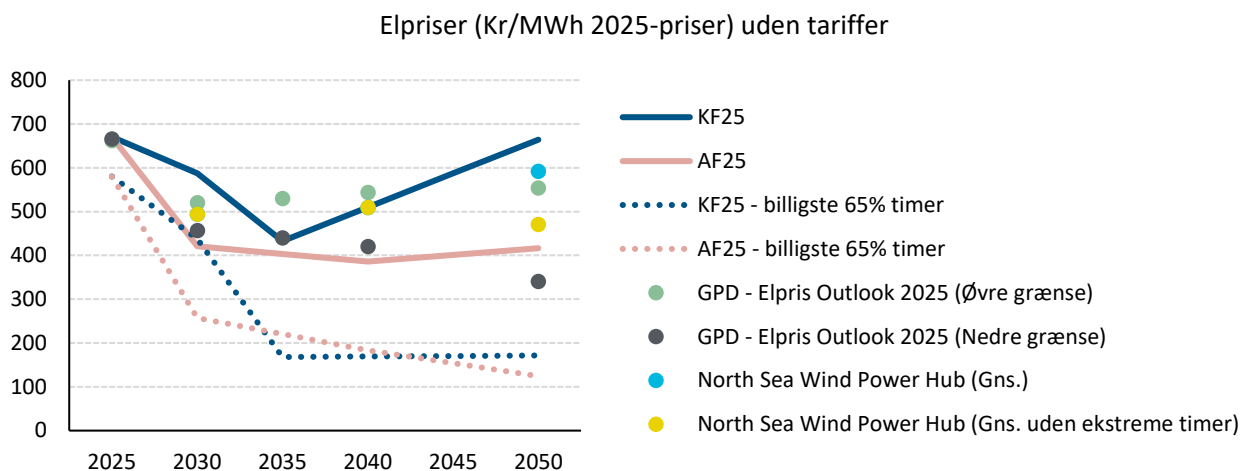
Elpris

Elprisen afspejler balancen mellem elproduktion og elefterspørgsel. Når analysen vurderer produktionsomkostningen i fremtiden, baseres det ud fra en fremskrivning af elprisen, hvorfra der implicit indregnes forventninger til udviklingen i både elproduktionen og elforbruget. Klimarådet har ikke selv foretaget en fremskrivning af elsystemet og baserer i stedet elprisen på tilgængelige fremskrivninger. Flere teknologier forventes at producere effektivt i forhold til elprisen, og produktionen vil derfor optimeres økonomisk ud fra de timer med den billigste elpris. Denne antagelse forudsætter derved, at elprisfremskrivningen er tilgængelig på timebasis.

Både Energistyrelsens Analyseforudsætninger til Energinet 2025 (AF25) og Klimafremskrivning og – status 2025 (KF25) opgør de fremskrevne elpriser på timebasis. AF25 balancerer elproduktion og -forbrug endogent i en optimeringsmodel, hvor KF25 bestemmer elproduktionen og -forbruget eksogent, hvilket kan give store udsving i den fremskrevne elpris. På den baggrund anvendes fremskrivningen fra AF25 i analysen. Analysen baserer sig derfor på en elpris ud fra en fremskrivning af det danske system.

Figur 19 viser den uvægtede gennemsnitspris fra både KF25 og AF25 for perioden 2025-2050 sammen med den uvægtede gennemsnitspris fra brancheforeningen Green Power Denmarks Elpris Outlook 2025 og Konsortiet for havvind i Nordsøen, North Sea Wind Power Hubs Pathway 2.0 (NSWPH). Forløbet i Green Power Denmarks Elpris Outlook 2025 har henholdsvis et øvre og et nedre spænd mens NSWPH opgør deres fremskrivning med og uden ekstreme timer.

Elprisen i KF25 skønnes at falde frem mod 2035, men at stige frem mod 665 kr./MWh i 2050, omtrent samme niveau som i dag.



Figur 19: Årsgennemsnit for forskellige elprisfremskrivninger

Anm.: Udledningerne i figuren omfatter udledningerne fra flyafgange mellem EU-lufthavne samt ud af Europa fra EU-lufthavne.

Kilder: Klimastatus og -fremskrivning 2025¹⁹⁴, Analyseforudsætninger til Energinet 2025¹⁹⁵, Green Power Denmark Elpris Outlook 2025¹⁹⁶ og NSWPH Pathway 2.0¹⁹⁷.

Elpriserne tillægges efterfølgende eltarif og systemtarif for forbrugere på transmissionsnettet svarende til niveauet for 2026.

Omkostninger ved brint og CO₂

De fremtidige produktionsomkostninger for brint og kulstof følger samme metode som estimeringen af produktionsomkostningerne i dag. Energistyrelsens teknologikataloger fremskriver både anlægs- og driftsomkostninger for produktionsanlæggene på samme måde som der i flere processer er indarbejdet en øget effektivisering af processerne i takt med der sker teknologisk udvikling.

Omkostninger ved bioressource

Bioressourcepriserne i analysen er fastsat på baggrund af en markedsbaseret tilgang, hvor prisen bestemmes af balancen mellem udbud og efterspørgsel på bioressourcer fra energisektoren. De anvendte prisniveauer er hentet fra en energisystemsanalyse, hvor det europæiske bioressourcepotentialer kobles med en stigende efterspørgsel fra transportsektoren. I denne tilgang bestemmes prisen af den marginale ressource, der bringes i anvendelse for at imødekomme efterspørgslen, hvilket betyder, at priserne stiger i takt med, at mere begrænsede eller dyrere ressourcer tages i brug.¹⁹⁸ Rapporten tager afsæt i efterspørgslen og udbuddet af træflis ud fra Europa-Kommissionens Joint Research Centers bioressourcedatabase, ENSPRESO.¹⁹⁹

Til Klimarådets kendskab eksisterer der kun i et begrænset omfang litteratur, der estimerer effekten af øget konkurrence på bioressourcemarkedet på bioressourcepriserne. Det anvendte prisforløb er derfor behæftet med betydelig usikkerhed og skal primært illustrere effekten af stigende efterspørgsel på en begrænset ressource, hvor marginale og dyrere ressourcer gradvist bringes i anvendelse. Det anvendte prisforløb kan siges at afspejle, at eksisterende lovgivning med blandt andet det generelle iblandingskrav i *ReFuelEU Aviation*. For at belyse betydningen af denne usikkerhed anvendes der i analysen også et alternativt prisforløb estimeret af EA Energianalyse og opdateret i forbindelse med Klimastatus og -

fremskrivning 2025. Dette forløb baserer sig på de historiske markedspriser på det danske marked.²⁰⁰ Sammenligningen mellem de to prisforløb bidrager til at illustrere robustheden af analysens resultater over for forskellige antagelser.

Omkostninger ved råolie

Både lavaromatiske fossile brændstoffer og den fortsatte anvendelse af fossilt flybrændstof ved kompensations løsningen forudsætter at den fremtidige pris på råolie kendes. I analysen anvendes råolieprisfremskrivningen fra Klimastatus og -fremskrivning 2025.²⁰¹

Det lægges til grund, at biprodukter også kan afsættes i fremtiden

På baggrund af den stigende elektrificering af fx vejtransporten i Europa, kan man argumentere at efterspørgslen på biprodukterne reduceres og afsætningsmulighederne derfor forsvinder. Omvendt fremskriver IEA's *Stated Policy Scenario* i World Energy Outlook 2025²⁰² en fortsat markant global efterspørgsel efter brændstoffer i fx både vejtransporten og søfarten. I analysen antages det derfor, at brændstofbiprodukter altid kan afsættes til alternativ anvendelse, enten i industrien eller transportsektoren.

Estimeringen af indtægtsmulighederne ved afsætning af biprodukter i fremtiden følger samme metode som for omkostningsberegningen i dag.

El- og brintfly kræver en anden infrastruktur

Teknologierne elfly og brintfly er sværere at sammenligne med de øvrige teknologier, hvor der enten erstattes med et andet brændstof eller kompenseres for de medførte udledninger. For alligevel at kunne sammenligne ny teknologi med de øvrige teknologier opgøres produktions- og driftsomkostningerne ligeledes pr. ton CO₂e reduceret. For at kunne opgøre reduktionsomkostningen tages der udgangspunkt i, at elflyet erstatter en kompatibel rute, og dermed reducerer udledningerne fra den pågældende afstand, sammenlignelige flytype osv. I sammenligningen tages der således ikke højde begrænsninger i fx flyenes rækkevidde, hvilket belyses i analyseparameteren sektor- og samfundstilpasning.

Implementeringen af nye teknologier forudsætter en ny flytype. Derfor indgår investeringsomkostningen for anskaffelse af det pågældende fly i beregningen af produktionsomkostningen i det omfang, der kræves ekstra fly. Derudover indgår omkostninger til enten el, ud fra samme metode som for el til brændstoffer. Den tekniske passagerkapacitet for elfly forventes relativt lavere end for konventionelle fly. Derfor indgår ekstra omkostninger til drift og vedligehold af flyet ud fra forholdet mellem den tekniske passagerkapacitet for el- eller brintflyet og det erstattede flys passagerkapacitet.

De tekniske karakteristika for elfly tager afsæt i Energistyrelsens teknologikortlægning for luftfart samt en potentialekortlægning for elfly i Skandinavien fra Nordisk Ministerråd.²⁰³ Investeringsomkostninger for elfly estimeres med afsæt i forudsætninger fra en energifremskrivning fra EU-Kommissionen²⁰⁴ mens drifts- og vedligeholdelsesomkostninger skønnes ud fra en kortlægning af løbende omkostninger ved flydrift fra EASA.²⁰⁵

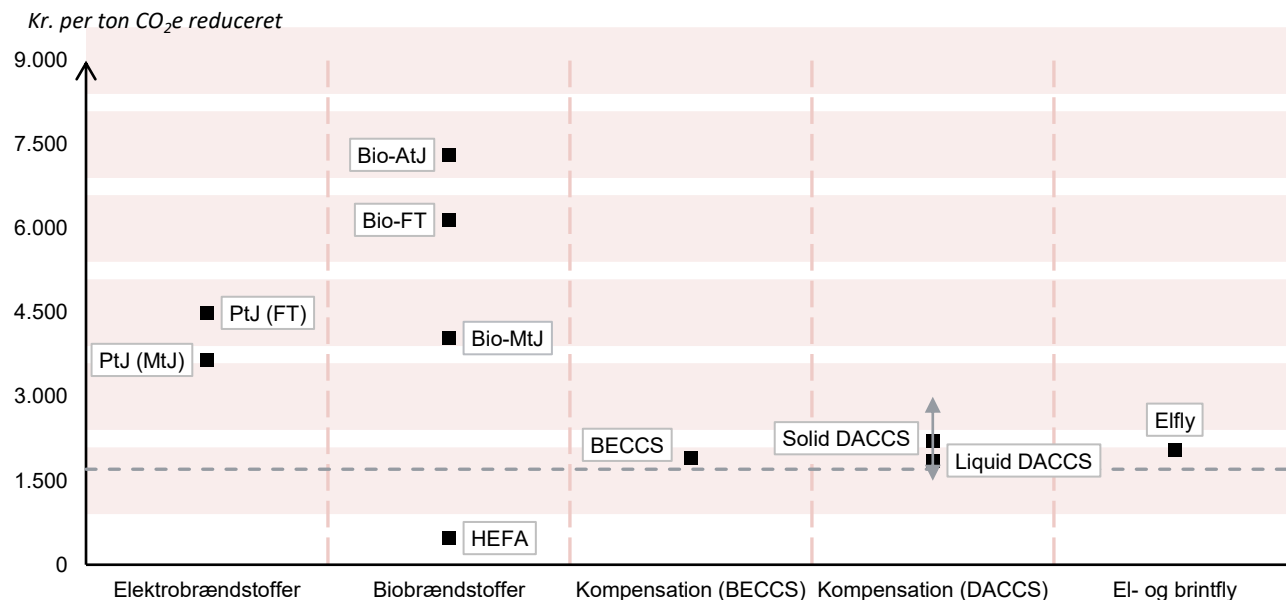
Til Klimarådets kendskab eksisterer der ikke litteratur, der i tilstrækkelig grad beskriver de teknoøkonomiske detaljer for brintfly, hverken som brændselscelle teknologi eller brintfly med direkte afbrænding. I Energistyrelsens teknologikortlægning for luftfart beskrives brintflyene potentiale til, at både investerings- og driftsomkostningerne forventes højere end konventionelle flytyper mens der for brændselscelle brintfly ligeledes er en begrænset rækkevidde. Selvom teknologien er forholdsvis ubeskrevet og i enten begrænset omfang eller slet ikke er under udvikling, indikerer Energistyrelsens kortlægning, at man må forvente at omkostningerne til brintfly er på niveau eller højere end til elfly.²⁰⁶

10.2 Analyse

Resultaterne for teknologiernes forventede fremtidige omkostninger fremgår af Figur 20. Figuren viser, at de forventede fremtidige omkostninger ved at reducere eller undgå et ton CO₂, for alle teknologier kommer med en markant omkostning. Særligt omkostningerne til bio og elektrobrændstoffer er betydeligt højere end for de øvrige teknologier. Resultaterne skal ses i forhold til hinanden samt den fossile reference udgjort af CO₂-kvoteprisen (ETS₁) lagt sammen med omkostningerne til fossilt brændstof, da kvoteprisen svarer til betalingen for udledningen af ét ton CO₂.

Den forventede fremtidige reduktionsomkostning med biobrændstoffer er i gennemsnit 5.700 kr., med en spredning på ca. 20 pct. Analysen viser, at reduktionsomkostningen for elektrobrændstoffer i gennemsnit er ca. 4.100 kr., med en mindre spredning. Tilsvarende er den forventede fremtidige reduktionsomkostning ved elfly ca. 2.000 kr. pr. ton CO₂. For teknologierne til at kompensere for udledningerne er den gennemsnitlige reduktionsomkostning ca. 2.000 kr.

På nær HEFA ligger ingen af teknologierne under den fossile referencepris i forhold til de forventede fremtidige omkostninger, dog ligger kompensation med både BECCS- og DACCS-kreditter blot 5-10 pct. højere.



Figur 20: Teknologiernes forventede fremtidige omkostninger opgjort i kr. pr ton CO₂e reduceret

Anm. 1: Spændet for DACCS fremhæver den betydelige usikkerhed, der knytter sig til omkostningerne ved DACCS, herunder både anlægs- og lagringsomkostninger.

Anm. 2: CO₂-input til elektrobrændstoffer er antaget at være indfanget biogent CO₂ fra afbrænding af træbiomasse.

Kilde: Klimarådet.

Omkostninger til elektrobrændstoffer er særligt udgifter til CO₂ og strøm

På samme måde som for omkostninger i dag, er de højere omkostninger for elektrobrændstoffer i høj grad drevet af udgifterne til el og CO₂. Omkostningsestimaterne for teknologierne fordelt på omkostningskategori fremgår af Figur 21. For henholdsvis PtJ (FT) og PtJ (MtJ) gælder det, at ca. 80 pct. af omkostningerne udgøres af udgifterne til både el og CO₂. Den resterende omkostning dækker generelt investerings- og anlægsomkostninger samt drifts- og vedligehold for både selve fangstanlægget og infrastrukturen.

Omkostningerne til PtJ (MtJ) er ca. 15 pct. lavere end for PtJ (FT). Teknologien har et betydeligt lavere energiforbrug, og prisforskellen er hovedsageligt drevet af ekstra udgifter til el, både direkte og gennem CO₂-fangst. Dog skal den fremtidige prisforskel ses i forhold til prisforskellen mellem teknologierne i dag, hvilket blev bestemt til ca. 30 pct.

Biobrændstoffer stiger betydeligt men varierer i bioressourceforbrug

Figur 21 viser, at de høje fremtidige omkostninger til biobrændstoffer primært er drevet af omkostninger til bioressourcer. De antagede, stigende priser på bioressourcer betyder, at omkostninger til bioressourcer i fremtiden vil udgøre ca. 80 pct. af omkostningen. Det gælder særligt for Bio-AtJ og Bio-FT, der har ca. 40 pct. højere omkostninger til

bioressourcer end Bio-MtJ. Bio-MtJ er det biobrændstof med laveste omkostninger, der fortsat kan skaleres. For bio-MtJ forventes bioressourceomkostningen fortsat at være af markant betydning, og prisforskellen til de øvrige biobrændstoffer reduceres med en betydelig lavere indtægt fra biprodukter.

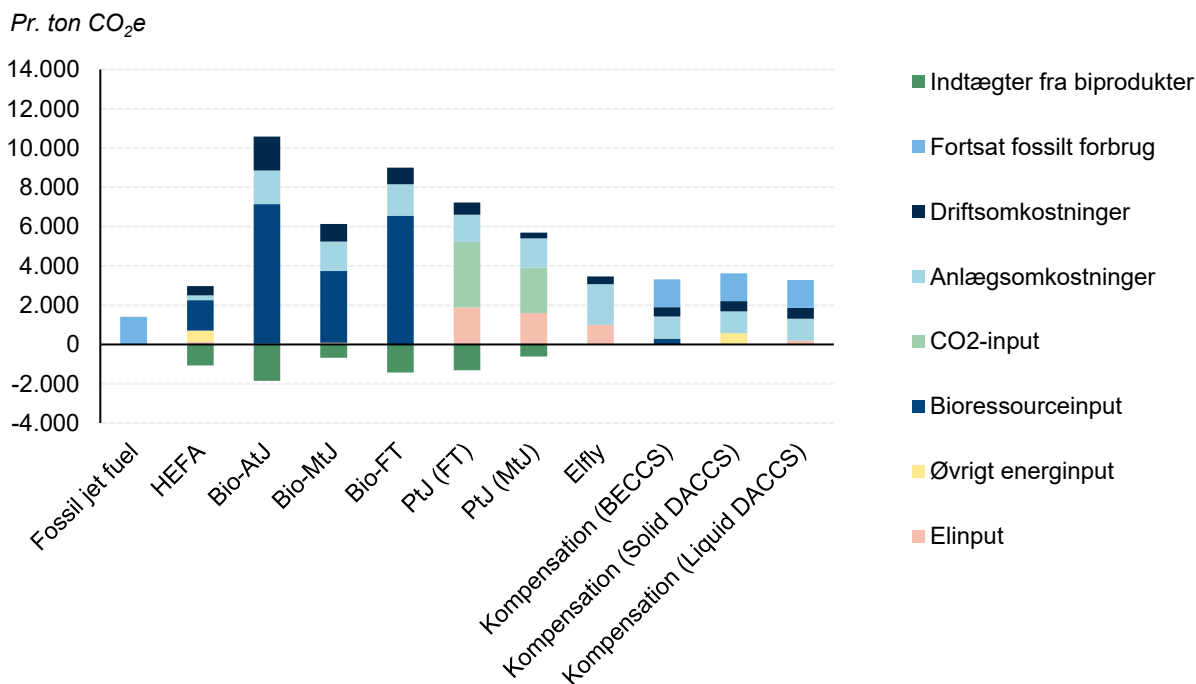
Estimaterne viser dog, at omkostningerne til bio-MtJ i fremtiden forventes på samme niveau som omkostningerne til PtJ(FT) elektrobrændstoffer, men ikke PtJ(MtJ).

Kompensation kan blive rentabelt i fremtiden

Omkostningsestimerne for de forventede fremtidige omkostninger viser, at både kompensation med BECCS og DACCS i fremtiden kan blive rentabelt. Særligt vil omkostningerne til Liquid DACCS blive reduceret, da omkostningerne til el udgør en væsentligt reduceret andel. For alle teknologier til at kompensere for udledningerne vil det fortsat være omkostningen til det fortsatte forbrug af fossilt brændstof, der udgør hovedparten af omkostningerne og fangstanlæggene vil i mindre grad være følsomme overfor udsving i energipriserne.

Elfly kan få en rolle på længere sigt

Omkostningsestimatet for elfly viser, at elfly i fremtiden kan blive en teknologi, der kan bidrage til omstillingen af luftfarten. Ca. 60 pct. af omkostningerne er forbundet med investeringen i fly og ca. 30 pct. er primært forbundet med elforbruget.



Figur 21: Teknologierne forventede fremtidige omkostninger opgjort i kr. pr. ton CO₂e reduceret

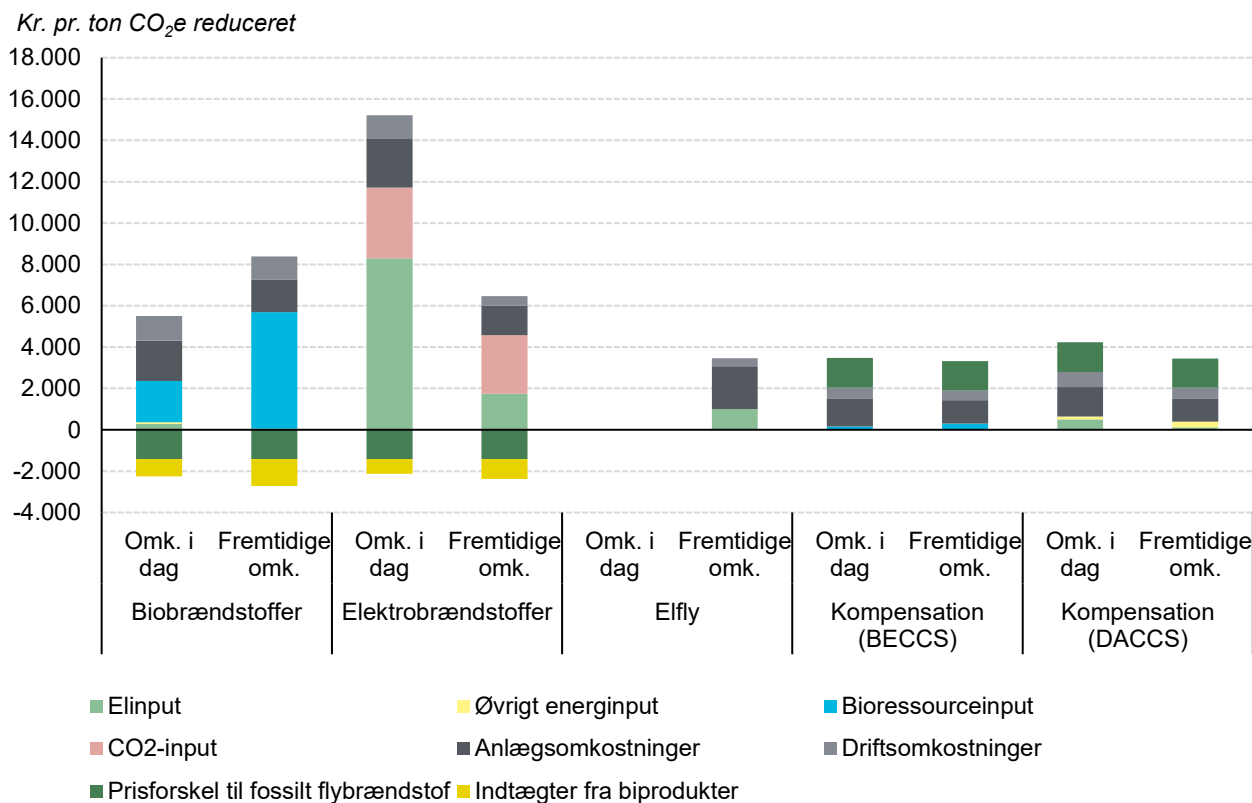
Kilde: Klimarådet.

Bioressourcer forventes at blive dyrere mens elpriserne falder

Udviklingen i de gennemsnitlige reduktionsomkostninger for de analyserede teknologier fremgår af Figur 22. Figuren viser først og fremmest, at omkostningerne til elektrobrændstoffer forventes reduceret med ca. 60 pct. i forhold til i dag. Reduktionen i omkostningerne kan primært tilskrives de reducerede omkostninger til elforbruget. Elpriserne forventes

ligeledes reduceret med ca. 70 pct. i perioden, hvilken i beregningerne overføres til omkostningsestimaterne både direkte i elforbruget og gennem CO₂-inputtet.

Figuren viser, at omkostningerne til biobrændstofferne forventes at stige med ca. 70 pct., hvor særligt omkostningerne til bioressourcer forventes at stige med op mod 65 pct. De stigende bioressourcepriser resulterer tilsvarende til en højere værdi af biprodukter. Samtidig modsvares prisstigningen i reducerede anlægsomkostninger, der bredt set forventes at falde med op mod 25 pct. på tværs af teknologierne.

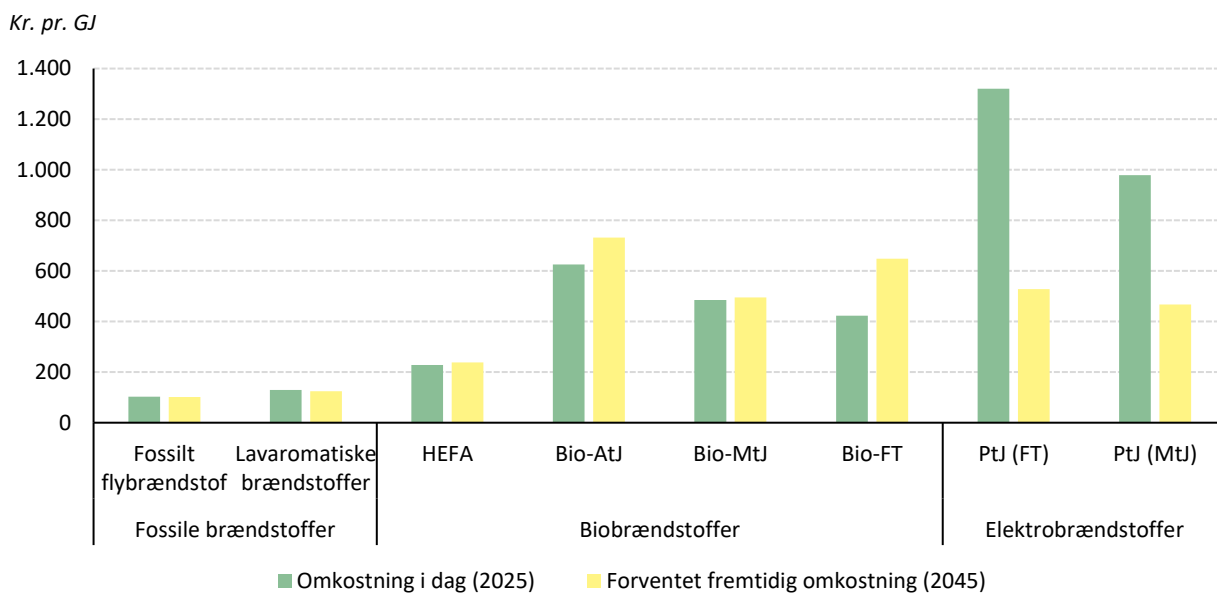


Figur 22: De gennemsnitlige omkostninger i dag og forventede fremtidige omkostninger.

Kilde: Klimarådet.

Lavaromatiske fossile brændstoffer er fortsat billigere end bio- og elektrobrændstoffer

De lavaromatiske fossile brændstoffer fremtidige forventede omkostninger indikerer, at lavaromatiske fossile brændstoffer i fremtiden fortsat forventes at være marginalt dyrere end konventionelt flybrændstof, dog er omkostningerne fortsat betydeligt lavere end for både bio- og elektrobrændstoffer, hvilket fremgår af Figur 23. Lavaromatiske fossile brændstoffer reducerer ikke CO₂e, hvorfor at lavaromatiske fossile brændstoffer er en mindre attraktiv teknologi på længere sigt. Alligevel vil de lave omkostninger betyde, at lavaromatiske fossile brændstoffer kan fungere som et overgangsbrændstof indtil at bio- eller elektrobrændstoffer har lavere reduktionsomkostninger end omkostningerne til lavaromatiske fossile brændstoffer plus kvoteprisen.



Figur 23: Omkostninger til flydende brændstoffer

Kilde: Klimarådet.

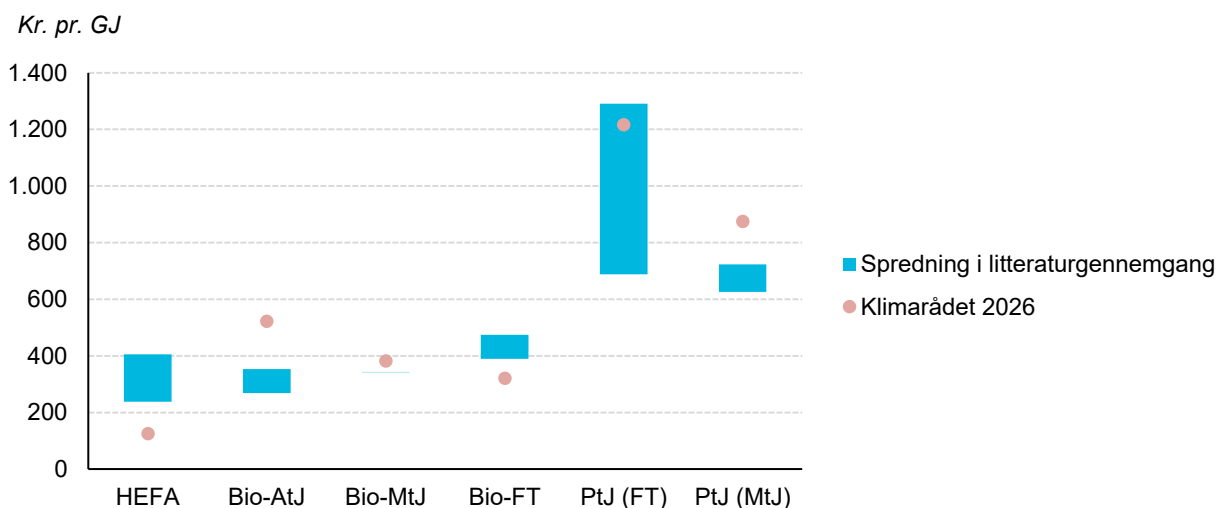
Estimater for bio- og elektrobrændstoffer afhænger i høj grad af ressourceinput

Der er betydelig usikkerhed forbundet med omkostningerne for de undersøgte teknologier. For både bio- og elektrobrændstoffer knytter usikkerheden sig både til anlægsomkostninger og de beskrevne usikkerheder i forhold til henholdsvis bioressourcer og ikke-fossil elektricitet.

Figur 24 viser en sammenligning af Klimarådets estimater med en litteraturgennemgang der illustreres ved et spænd fra henholdsvis det laveste omkostningsestimater i litteraturgennemgangen til den højeste. Kun elektrobrændstoffet PtJ(FT) ligger inden for intervallet fra litteraturgennemgangen, der dog udgør et markant spænd. Som tidligere vist, har elprisen stor betydning for elektrobrændstoffer hvorfor det netop er forventeligt, med store udsving i litteraturen. For de øvrige teknologier ligger estimaterne uden for litteraturens interval, men afvigelserne er relativt begrænsede sammenholdt med usikkerheden illustreret i forhold til elprisen og prisen på bioressourcer. Resultaterne indikerer således, at omkostningsestimaterne reproducerer størrelsesordenen af de omkostninger, der findes i litteraturen, samtidig med at den afspejler de variationer, der følger af alternative forudsætninger.

Fortolkningen af resultaterne skal ses i lyset af, at teknologierne fortsat er under udvikling, og at det tilgængelige datagrundlag derfor er begrænset. Litteraturgennemgangen bygger på et relativt lille antal studier, som ofte anvender forskellige metodiske tilgange og antagelser. Derudover er omkostningerne som nævnt i høj grad afhængige af de anvendte ressourceinput, der ligeledes kan variere i forhold kvalitet, lokale markedsforhold og geografisk placering. Sådanne forhold kan have betydelig indflydelse på de beregnede omkostninger og bidrager til de forskelle, der observeres mellem studier og mellem litteraturen og de estimerede værdier.

På denne baggrund vurderes afvigelserne mellem omkostningsestimaterne og litteraturens spænd ikke nødvendigvis som et tegn på manglende robusthed. Tværtimod viser sammenligningen, at omkostningsestimaterne generelt ligger på niveau med de værdier, der rapporteres i litteraturen, og at omkostningsestimaterne formår at indfange den størrelsesorden og variation, som kendetegner de tilgængelige studier. Samlet set understøtter dette robustheden af de beregnede omkostninger, samtidig med at det understreger den betydelige usikkerhed, der fortsat er forbundet med vurderinger af nye og umodne teknologier.



Figur 24: Omkostninger til flydende brændstoffer i dag sammenlignet med litteraturgennemgang.

Kilder: Klimarådet og Klimarådet på baggrund af kilder for omkostningsestimater ved bio- og elektrobrændstoffer²⁰⁷.

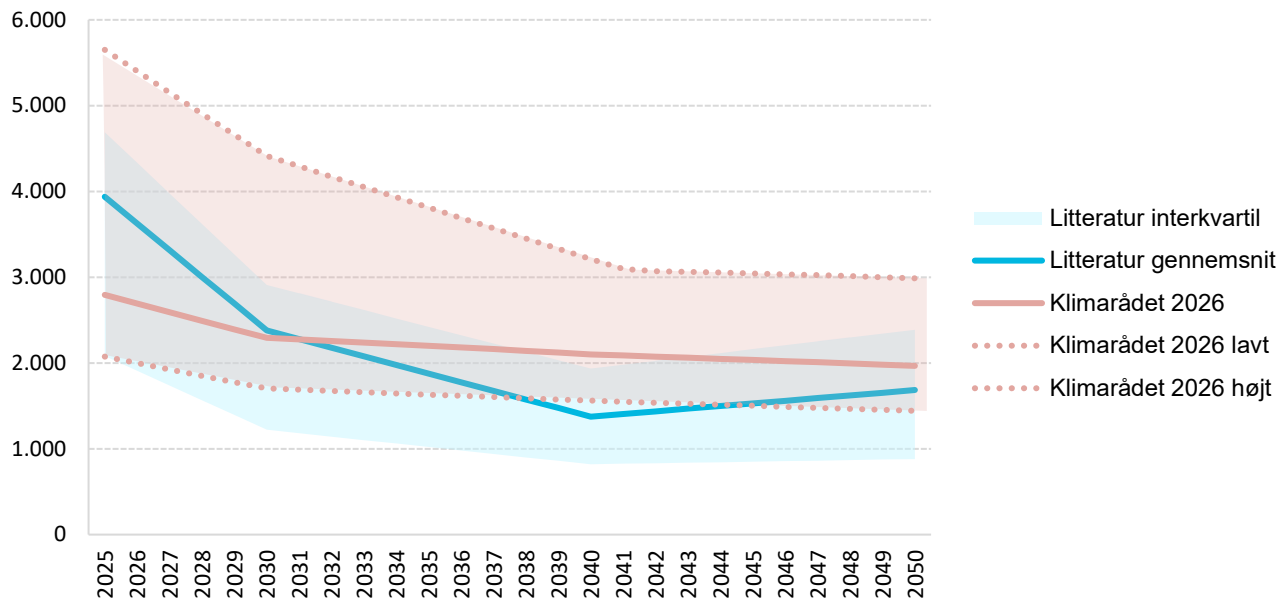
Prisen på DACCS er behæftet med betydelig usikkerhed

Der er stor usikkerhed forbundet med omkostningerne for DACCS. Usikkerheden knytter sig særligt til anlægs- og lagringsomkostninger. Hertil skal det bemærkes, at lagringsomkostningerne ikke afspejler effekten af en eventuelt begrænset tilgængelighed af CO₂-lagringskapacitet. Denne usikkerhed er også gældende for BECCS.

Figur 25 sammenholder Klimarådets estimat for omkostningerne til DACCS med resultaterne fra en litteraturgennemgang foretaget i forbindelse med *Statusrapport 2026*. Klimarådets estimat tager gennemsnittet for både L-DACCS og S-DACCS, men der er ikke stor forskel på teknologiernes omkostninger som vist i Figur 22. Den centrale røde kurve viser basisscenariet, mens det røde område repræsenterer henholdsvis et lavt og et højt forløb baseret på alternative antagelser. Den blå kurve viser gennemsnitsestimatet i litteraturen, og det blå bånd angiver interkvartilintervallet på tværs af de inkluderede studier.

Sammenligningen med litteraturgennemgangen understøtter robustheden af det Klimarådets estimat. Selvom basisscenariet afviger fra litteraturens gennemsnitsestimat, følger begge den samme overordnede tendens med faldende reduktionsomkostninger i hele perioden. Samtidig ligger litteraturens gennemsnitsestimat gennem størstedelen af perioden inden for spændet mellem det høje og lave scenarie. Dette indikerer, at de centrale variationer, der observeres i litteraturen, i vid udstrækning opfanges af Klimarådets følsomhedsanalyse. Basisscenariet fremstår dog relativt konservativt på lang sigt, da litteraturens median efter ca. 2035 ligger tættere på det lave scenarie end på basisscenariet.

Kr. pr. ton CO₂e reduceret



Figur 25: Omkostninger til DACCS

Kilder: Klimarådet og Klimarådet på baggrund af kilder for omkostningsestimater ved DACCS²⁰⁸.

10.3 Resultater

På lang sigt er kun kompensation med BECCS og DACCS konkurrencedygtigt

De samlede resultater for de forventede fremtidige omkostninger fremgår af Tabel 26, der er et uddrag af den samlede resultatoversigt. Tabellen viser, at bio- og elektrobrændstoffer fortsat forventes at have meget høje omkostninger i fremtiden, ligesom udsigterne til elfly kommer med en høj omkostning. I forhold til den fossile reference med flybrændstof og CO₂-kvoter, forventes teknologierne til at kompensere for udledningerne med både BECCS og DACCS at kunne konkurrere på markedsvilkår og som potentielle alternativer.

Lavaromatiske fossile brændstoffer fremgår ikke af tabellen.

Tabel 26: Udsnit af den samlede resultatfigur med parameteren forventede fremtidige omkostninger.

Parameter	Lavaromatiske fossile brændstoffer	Elektro-brændstoffer	Biobrændstoffer	Kompensation (BECCS)	Kompensation (DACCS)	El- og brintfly
Forventede fremtidige omkostninger	n.a.	4.000 [3.500-4.500]	5.750 [500-7.250]	2.000	2.000 [1.750-2.250]*	2.000

Anm.: I beregning af gennemsnit til brug for scoring af biobrændstoffer er HEFA vægtet med 10 pct. *Spændet for DACCS er forskelligt fra spændet i figuren i hovedrapporten. Spændet her viser spændet fra flere teknologiers omkostninger mens spændet i hovedrapporten viser et spænd baseret på henholdsvis et højt og et lavt forløb for antagelserne for både L-DACCS og S-DACCS.

Kilde: Klimarådet.

Opsummering af analyse

Analyserne af de forudgående afsnit kan opsummeres til følgende:

- **Elfly.** Teknologien kan blive tilgængeligt relativt billigt i forhold til de øvrige teknologier i analysen.
- **Lavaromatisk fossilt brændstof.** Fremgår ikke af tabellen, da den ikke reducerer CO₂. Sammenlignet med de øvrige brændstofteknologier er lav-aromatiske fossile brændstoffer betydeligt billigere pr. GJ og er kun lidt dyrere end fossilt brændstof.
- **Elektrobrændstoffer.** Elektrobrændstoffer kan i fremtiden blive billigere end biobrændstoffer. Det skyldes primært udviklingen i bioressourcepriserne, der gør biobrændstoffer dyrere, men omkostninger til elektrobrændstoffer forventes også reduceret gennem lavere elpriser og lavere anlægsmkostninger.
- **Biobrændstoffer.** Biobrændstoffer forventes at blive den dyreste teknologi i fremtiden og dyrere end det er i dag. Det skyldes den forventede udvikling i omkostninger til bioressourcer, som biobrændstofferne er særligt følsomme over for.
- **Kompensation via BECCS og DACCS.** Omkostninger til BECCS og DACCS reduceres ikke betydeligt i forhold til i dag, men gennemsnitsomkostningerne forventes fortsat blandt de laveste af de analyserede teknologier. Dog er der betydelig usikkerhed om særligt anlægsmkostningerne til DACCS.

11 Bilag 1: Effekt på klimaet af biomasseforbrug til BECCS

BECCS indebærer, at CO₂ fra afbrænding af biomasse lagres i underjordiske CO₂-lagre. Biomassen afbrændes til produktion af energi, fx el og varme på et kraftværk. Etablering af BECCS på værket medfører, at CO₂ fanges fra udledningsgasserne i skorstenen og lagres i undergrunden.

Inden afbrændingen var kulstoffet lagret midlertidigt i biomassen fx i form af træer eller trærester i en skov. BECCS fjerner derfor ikke CO₂ direkte fra atmosfæren. BECCS reducerer derimod udledningen af CO₂ til atmosfæren, hvilket over tid betyder, at CO₂ fjernes fra atmosfæren. Fjernelsen sker *indirekte*, idet den sker via planter fotosyntese under produktionen af biomassen, eller ved at alternative udledninger undgås.

Hvis man vil opgøre, hvor meget CO₂ BECCS fjerner fra atmosfæren, må man se på, hvordan BECCS påvirker udvekslingen af CO₂ mellem jorden, herunder skovene, og atmosfæren i en relevant tidsperiode. Det kræver, at man sammenligner to scenarier, ét med BECCS og ét uden BECCS. Scenariet uden BECCS kaldes *det alternative scenarie*. Den mængde CO₂, som BECCS fjerner fra atmosfæren, kan så beregnes. BECCS' bidrag kan opgøres som forskellen mellem fjernet CO₂ i scenariet med BECCS og fjernet CO₂ i det alternative scenarie uden BECCS.

Hvor meget CO₂, der er fjernet fra atmosfæren, afhænger af, hvilket år man ser på. Det skyldes, at brug af biomasse og dermed BECCS påvirker den årlige udveksling af CO₂ mellem jorden og atmosfæren i en lang periode. Hugstrestre kan fx i et alternativt scenarie blive efterladt i skoven, hvor de gradvist var blevet nedbrudt og have frigivet deres kulstof i form af CO₂. Når disse bruges til BECCS flyttes de fra skovens kulstoflager til undergrunden. Det fjerner ikke CO₂ fra atmosfæren i år ét, men først gradvist i løbet af 40-50 år efterhånden som udledningen fra restprodukternes nedbrydning undgås.

For at kunne opgøre, hvor meget CO₂ BECCS fjerner fra atmosfæren, skal det alternative scenarie defineres, og der foretages en række metodiske valg. De tre vigtigste valg handler om biomasseforbruget, analyseperspektivet og tidshorisonten.

- **Biomasseforbrug.** Klimaeffekten af BECCS afhænger af hvilket biomasseforbrug, der tilskrives BECCS, hvilken type biomasse, der anvendes, samt hvad der alternativt var sket med biomassen. Biomassen kan fx være bioaffald, halm eller træ. Den alternative anvendelse kan være afbrænding, nedmuldning eller at træet var forblevet i skoven. Hvis træbiomasse alternativt ville have været et naturligt kulstoflager, ville kulstoffet i en periode have indgået i skovens kulstoflager. Hvis dette ikke indgår i opgørelsen, overvurderes klimagevinsten ved BECCS.
- **Analyseperspektiv.** Klimaeffekten kan opgøres ud fra forbruget af én enhed biomasse til BECCS eller ud fra et løbende årligt forbrug. I første tilfælde beskrives en marginal effekt i form af udledningen fra brugen af én enhed. Hvis BECCS anvendes løbende, tilføjes nye udledningsforløb hvert år, før de tidligere forløb er afsluttet. Dermed akkumuleres de tidlige udledninger, og klimaeffekten pr. ton lagret CO₂ kan blive større end i en marginal opgørelse.
- **Tidshorisont.** Typisk vælger man en periode fx 20 eller 100 år og beregner den gennemsnitlige fjernede mængde pr. år set over den valgte periode. Valget af tidsperiode har stor betydning, fordi valget bestemmer vægtingen mellem tidlige og sene udledninger/optag. Tidsperioden afgør desuden hvilke udledninger, der medregnes, idet eventuelle udledninger efter periodens udløb ikke indgår i regnestykket. I BECCS-scenariet fjernes biomassen fra skoven, og kulstoflageret i LULUCF-sektoren reduceres derfor tidligt. I det alternative scenarie ville biomassen i stedet være blevet i skoven og først senere have frigivet CO₂ ved naturlig nedbrydning. En kort tidshorisont lægger derfor større vægt på det tidlige tab af kulstoflager i BECCS-scenariet, mens en lang tidshorisont lægger større vægt på, at biomassen også i det alternative scenarie gradvist ville være blevet nedbrudt. En 100-årig opgørelse vil vise en større langsigtet klimagevinst af BECCS, men siger ikke direkte noget om teknologiens bidrag til at reducere den globale opvarmning i 2030, 2040 eller 2050.

Opgørelsen af klimaeffekten af BECCS afhænger dermed af flere valg, som har stor betydning for resultatet. Valgene afgør både, hvilke udledninger der tilskrives BECCS, hvordan gentagen anvendelse af biomasse håndteres, og hvor meget vægt der lægges på tidlige udledninger i forhold til senere effekter.

Det betyder, at et resultat for BECCS ikke bør læses som én generel klimaeffekt. Resultatet bør i stedet fortolkes som en klimaeffekt under bestemte antagelser om biomasseforbrug, analyseperspektiv og tidshorisont. Hvis biogene udledninger fra biomasseforbruget udelades eller afgrænses snævert, kan klimagevinsten ved BECCS blive væsentligt overvurderet især på kortere sigt frem til 2050.

Referencer

- ¹ ICAO, SAF Conversion processes, 2026
- ² Energistyrelsen, Technology review on aviation, 2025
- ³ ICAO, SAF Conversion processes, 2026
- ⁴ Energistyrelsen, Technology review on aviation, 2025
- ⁵ International Air Transport Association, *Aviation contrails and their climate effect Tackling uncertainties and enabling solutions*, 2024.
- ⁶ Lee D.S, m.fl., *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, 2021
- ⁷ Teoh R., m.fl., *Global aviation contrail climate effects from 2019 to 2021*, 2024 og Transport & Environment, *Contrails and aviation's other hidden emissions*, 2025, ([Contrails and aviation's other hidden emissions | T&E](#)). og Contrails.org, *We can drastically cut aviation's climate impact.*, 2026
- ⁸ Teoh R., m.fl., *Global aviation contrail climate effects from 2019 to 2021*, 2024
- ⁹ Schmidt, J. m.fl., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- ¹⁰ Quante, G. et al., *Hydroprocessing of fossil fuel-based aviation kerosene – Technology options and climate impact mitigation potentials*, 2024 og Pourkashanian, M. m.fl., *Investigating the Impact of Reducing the Aromatic Content of Kerosene*, n.d.
- ¹¹ Roux, M. et al., *Which rules to follow? how differences in renewable fuel standards obscure the potential climate impact of transportation fuels*, 2024.
- ¹² EU-Kommissionen, *KOMMISSIONENS DELEGEREDE FORORDNING (EU) 2023/1185 af 10. februar 2023 om supplerende regler til Europa-Parlamentets og Rådets direktiv (EU) 2018/2001 gennem fastsættelse af en minimumstærskel for drivhusgasemissionsbesparelser fra genanvendt kulstofbrændsel og præcisering af en metode til vurdering af drivhusgasemissionsbesparelser fra vedvarende flydende og gasformige transportbrændstoffer, der ikke er af biologisk oprindelse, og fra genanvendte kulstofbrændsler*, 2023.
- ¹³ Europa-Parlamentet og Ministerrådet, *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 af 11. december 2018 om fremme af anvendelsen af energi fra vedvarende energikilder*, 2018.
- ¹⁴ Abayo, A. m.fl., *A Comparative Life-Cycle Assessment of Sustainable Aviation Fuel (SAF) Pathways*, 2024.
- ¹⁵ Bell, A. et al., *Life cycle COe intensity of commercial aviation with specific sustainable aviation fuels* 2025
- ¹⁶ de Jong, S. et al., *Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production*, 2017.
- ¹⁷ Europa-Parlamentet og Ministerrådet, *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 af 11. december 2018 om fremme af anvendelsen af energi fra vedvarende energikilder*, 2018.
- ¹⁸ ICAO, *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, 2025.
- ¹⁹ NREL, *Sustainable Aviation Fuel State-of-Industry Report: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Pathway*, 2024.
- ²⁰ Roux, M. et al., *Which rules to follow? how differences in renewable fuel standards obscure the potential climate impact of transportation fuels*, 2024.
- ²¹ Schmidt, J. et al., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- ²² Schmidt, J. m.fl., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- ²³ Schmidt, J. m.fl., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- ²⁴ ICAO, *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, 2025.
- ²⁵ ICAO, *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, 2025.
- ²⁶ Schmidt, J. et al., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- ²⁷ Europa-Parlamentet og Ministerrådet, *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 af 11. december 2018 om fremme af anvendelsen af energi fra vedvarende energikilder*, 2018.
- ²⁸ ICAO, *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, 2025.
- ²⁹ Roux, M. et al., *Which rules to follow? how differences in renewable fuel standards obscure the potential climate impact of transportation fuels*, 2024.
- ³⁰ Eke, V. m.fl., *A comprehensive review of life cycle assessments of direct air capture and carbon dioxide storage*, 2025.
- ³¹ Energistyrelsen, *Teknologikataloget for fornybare brændstoffer*, 2025 og Energistyrelsen, *Teknologikataloget for Energilagring*, 2025 og Energistyrelsen, *Teknologikataloget for kulstoffangst, -transport og -lagring*, 2025 og Energistyrelsen, *Teknologikataloget for transport af energi*, 2025
- ³² Europa-Parlamentet og Ministerrådet, *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 af 11. december 2018 om fremme af anvendelsen af energi fra vedvarende energikilder*, 2018.
- ³³ EU-Kommissionen, *KOMMISSIONENS DELEGEREDE FORORDNING (EU) 2023/1184 af 10. februar 2023 om supplerende regler til Europa-Parlamentets og Rådets direktiv (EU) 2018/2001 om fastlæggelse af en EU-metode med detaljerede regler for produktion af vedvarende flydende eller gasformige transportbrændstoffer, der ikke er af biologisk oprindelse*, 2023.
- ³⁴ European Environment Agency, *Greenhouse gas emissions intensity of electricity generation in Europe*, 2025, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>

- 35 Weimann, G. og Bentsen, N., *Potential for carbon dioxide removal of carbon capture and storage on biomass-fired combines heat and power production*, 2024.
- 36 Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -Fremskrivning 2025*, 2025.
- 37 Schmidt, J. m.fl., *Sustainability of fatty waste oils for biofuel production*, 2025.
- 38 CleanSky2, *Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, 2020.
- 39 Energistyrelsen, *Technology review on aviation*, 2025.
- 40 Energistyrelsen, *Technology review on aviation*, 2025.
- 41 CleanSky2, *Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, 2020.
- 42 Kalundborg Refinery, *Storskala produktion af lav-aromat flybrændstof*, 2026, <https://www.kalundborgrefinery.com/da/fremtidens-raffinaderi/>
- 43 Weimann, G. og Bentsen, N., *Potential for carbon dioxide removal of carbon capture and storage on biomass-fired combines heat and power production*, 2024.
- 44 Weimann, G. og Bentsen, N., *Potential for carbon dioxide removal of carbon capture and storage on biomass-fired combines heat and power production*, 2024.
- 45 Weimann, G. og Bentsen, N., *Potential for carbon dioxide removal of carbon capture and storage on biomass-fired combines heat and power production*, 2024.
- 46 de Vries, R. m.fl., *A New Perspective on Battery-Electric Aviation, Part II: Conceptual Design of a 90-Seater*, 2024
- 47 CE Delft, *Climate Change Impact Analysis of Electric Aviation*, 2025
- 48 Miljøstyrelsen, *Ranking of industrial products*, 2003
- 49 Miljøstyrelsen, *Ranking of industrial products*, 2003
- 50 ESO, *Transmission Losses*, 2024
- 51 Energistyrelsen, *Teknologikatalog for kulstoffangst, -transport og -lagring*, 2024
- 52 Stiesdal, *Udleveret data om pyrolyse*, 2023
- 53 Energistyrelsen, *Teknologikatalog for fornybare brændstoffer*, 2025
- 54 Christoph Meili, m.fl., *Life cycle inventories of crude oil and natural gas extraction*, 2021
- 55 B. W. Kolosz, m.fl., *Life cycle environmental analysis of 'drop in' alternative aviation fuels: a review*, 2020
- 56 Gunnar Quante, m.fl., *Hydroprocessing of fossil fuel-based aviation kerosene – Technology options and climate impact mitigation potentials*, 2024
- 57 Energistyrelsen, *Teknologikataloget for fornybare brændstoffer*, 2025
- 58 Energistyrelsen, *Teknologikataloget for fornybare brændstoffer*, 2025
- 59 Guilloteau, Pierre, m.fl., *Production of sustainable aviation fuel: Influence of feedstock and plant capacity on fuel price*, 2025
- 60 Terwel, Rob, m.fl., *The Carbon Transition Model (CTM) Version 4.0*, 2024
- 61 Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025
- 62 Scott Geleynse, m.fl., *The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation*, 2018
- 63 NASA, *Urban Air Mobility Network and Vehicle Type—Modeling and Assessment*, 2019
- 64 Tongtong Zhang, m.fl., *Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives*, 2023
- 65 CE Delft, *Climate Change Impact Analysis of Electric Aviation*, 2025
- 66 Bp, *Statistical Review of World Energy*, 2021
- 67 Energinet, *Energinet indfører ny model for større tilslutninger og vil først underskrive nye nettilslutningsaftaler til efteråret*, 2026. <https://energinet.dk/om-nyheder/nyheder/2026/05/27/energinet-indforer-ny-model-for-storre-tilslutninger-og-vil-forst-underskrive-nye-nettilslutningsaftaler-til-efteraret/>
- 68 Energinet, *Energinet indfører ny model for større tilslutninger og vil først underskrive nye nettilslutningsaftaler til efteråret*, 2026. <https://energinet.dk/om-nyheder/nyheder/2026/05/27/energinet-indforer-ny-model-for-storre-tilslutninger-og-vil-forst-underskrive-nye-nettilslutningsaftaler-til-efteraret/>
- 69 Rigsrevisionen, *Energinets udbygning af elnettet*, 2026
- 70 BCG, *Mind the Queue: Connection Reform for the Electricity Grid*, 2025
- 71 IEA, *Electricity 2026 - Grids*, 2026. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026/grids>
- 72 IEA, *Electricity 2026 - Grids*, 2026. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026/grids>
- 73 entsog og entsoe, *TYNDP 2024 Final Scenario Report*, 2025
- 74 eurostat, *Electricity and heat statistics*, 2026
- 75 Entso-g og entso-e, *TYNDP 2024 Final Scenario Report*, 2025.
- 76 Entso-g og entso-e, *TYNDP 2024 Final Scenario Report*, 2025.
- 77 EUROSTAT, *Electricity and heat statistics*, 2026.
- 78 Klimarådet, *Biomassens betydning for grøn omstilling*, 2018, *Statusrapport 2022, kapitel 3*, 2022, *Danmarks globale klimainsats*, 2023, samt *Danmarks Klimamål i 2050*, 2024.
- 79 Klimarådet, *Danmarks Klimamål i 2050*, 2024.
- 80 Transport & Environment, *Biofuels: From unsustainable crops to dubious waste?*, 2023

- ⁸¹ Theochari Katrivanou, Hossein Nami, Henrik Wenzel, *Analytical Review of Global Biomass Potential for Bioenergy and Materials*, SDU 2026.
- ⁸² UN-WCMC og IUCN, *Protected Planet Report*, 2024.
- ⁸³ Theochari Katrivanou, Hossein Nami, Henrik Wenzel, *Analytical Review of Global Biomass Potential for Bioenergy and Materials*, SDU 2026 og Convention on Biological Diversity, Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework, [Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework](#).
- ⁸⁴ FAO: *Global Forest Resources assessment*, 2020.
- ⁸⁵ Frank et al., *Land-based climate change mitigation potentials within the agenda for sustainable development*, *Environ. Res. Lett.* 16, 2021.
- ⁸⁶ Elena Zepharovich m. fl., *The role of biomass in the European Green Deal policies*, Elementa, Science of the Anthropocene, 2026.
- ⁸⁷ Europa-Kommissionen, *Development of outlook for the necessary means to build capacity for drop-in advanced biofuels*, 2024.
- ⁸⁸ Europa-Kommissionen, *Development of outlook for the necessary means to build capacity for drop-in advanced biofuels*, 2024.
- ⁸⁹ Europa-Kommissionen, *Development of outlook for the necessary means to build capacity for drop-in advanced biofuels*, 2024.
- ⁹⁰ Theochari Katrivanou, Hossein Nami, Henrik Wenzel, *Analytical Review of Global Biomass Potential for Bioenergy and Materials*, SDU 2026.
- ⁹¹ Klimarådet, *Danmarks klimamål i 2050*, 2024.
- ⁹² FAO, *The State of the Worlds Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)*, 2021.
- ⁹³ European Environment Agency, *Designated terrestrial protected areas in Europe*, Oktober 2025. [Designated terrestrial protected areas in Europe | Indicators | European Environment Agency \(EEA\)](#)
- ⁹⁴ Johanna Braun m. fl. *Multiple planetary boundaries preclude biomass crops for carbon capture and storage outside of agricultural areas*, *Communications Earth & Environment*, 2025.
- ⁹⁵ Cato Sandford, Chris Malins, Josie Phillips, *Diverted harvest Environmental Risk from Growth in International Biofuel Demand* November 2024
- ⁹⁶ ICCT, *Availability of biomass feedstocks in the European Union to meet the 2035 ReFuelEU Aviation SAF target*, 2024 og IRENA, *Regional Energy Transition Outlook (European Union)*, 2025.
- ⁹⁷ Energistyrelsen, *Technology review on aviation*, 2025
- ⁹⁸ IEA Bioenergy, *Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF)*, 2024
- ⁹⁹ Klimarådet, *Baggrundsnotat om integration af kulstoffjernelse i EU's kvotesystem*, 2026.
- ¹⁰⁰ Lane, J., Greig, C. og Garnett, A. *Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions*, 2021; Umweltbundesamt, *Carbon Capture and Storage in the global climate debate*, 2023.
- ¹⁰¹ Edelenbosch, O.Y., Hof, A.F., van den Berg, M. m.fl., *Reducing sectoral hard-to-abate emissions to limit reliance on carbon dioxide removal*, 2024.
- ¹⁰² Carbon Gap, *Europe's geological storage bottleneck – an overlooked barrier to scaling carbon removal?*, 2025. <https://carbongap.org/europes-geological-storage-bottleneck-an-overlooked-barrier-to-scaling-carbon-removal/>; Klimamonitor, *Derfor har de trukket sig én for én: CCS-udbud kritiseres for manglende lagringsfaciliteter*, 2026. <https://klimamonitor.dk/nyheder/ccsu/article18944820.ece>
- ¹⁰³ Ringrose, P.S., Meckel, T.A, *Maturing global CO2 storage resources on offshore continental margins to achieve 2DS emissions reductions*, 2019.
- ¹⁰⁴ Ringrose, P.S., Meckel, T.A, *Maturing global CO2 storage resources on offshore continental margins to achieve 2DS emissions reductions*, 2019.
- ¹⁰⁵ Lane, J., Greig, C. og Garnett, A. *Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions*, 2021.
- ¹⁰⁶ GEUS, *CO2-lagringspotentialet i Danmark opdateres løbende i takt med ny viden*, 2025 <https://www.geus.dk/om-geus/nyheder/nyhedsarkiv/2025/okt/co%E2%82%82-lagringspotentialet-i-danmark-opdateres-loebende-i-takt-med-ny-viden>; Sarhosis V., Hosking L. J., Thomas H. R., *Carbon sequestration potential of the South Wales Coalfield*, 2018; Lane, J., Greig, C. og Garnett, A. *Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions*, 2021; Element Energy og Clean Air Task Force, *Unlocking Europe's CO2 Storage Potential*, 2023.
- ¹⁰⁷ Ecteras, *Getting the numbers right*, u.d. <https://www.ecteras.com/ecteras-insights/getting-the-numbers-right> ; GEUS, *CO2-lagringspotentialet i Danmark opdateres løbende i takt med ny viden*, 2025 <https://www.geus.dk/om-geus/nyheder/nyhedsarkiv/2025/okt/co%E2%82%82-lagringspotentialet-i-danmark-opdateres-loebende-i-takt-med-ny-viden>.
- ¹⁰⁸ Lane, J., Greig, C. og Garnett, A. *Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions*, 2021.
- ¹⁰⁹ EU-Kommissionens Joint Research Centre, *Shaping the future CO2 transport network for Europe*, 2024.
- ¹¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change - Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report*, 2022; International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*, 2020.

- ¹¹¹ International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*, 2020; Element Energy (ERM) og Clean Air Task Force, *Unlocking Europe's CO₂ Storage Potential*, 2023.
- ¹¹² European Environment Agency, *Total net GHG emissions in the EU (1990-2050)*, 2025
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2025/total-net-ghg-emissions?activeTab=658e2886-cbf-4c2f-a603-061e1627a515>.
- ¹¹³ Gidden, M.J., Joshi, S., Armitage, J.J. m.fl., *A prudent planetary limit for geologic carbon storage*, 2024.
- ¹¹⁴ United Nations Environment Programme, *Emissions Gap Report 2025: Off target – Continued collective inaction puts global temperature goal at risk*, 2025.
- ¹¹⁵ Zhang, Y., Jackson, C. og Krevor, S., *The feasibility of reaching gigatonne scale CO₂ storage by mid-century*, 2024.
- ¹¹⁶ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide*, Februar 2026
- ¹¹⁷ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide*, Februar 2026
- ¹¹⁸ Gunnar Quante et al., *Hydroprocessing of fossil fuel-based aviation kerosene – Technology options and climate impact mitigation potentials*, 2024
- ¹¹⁹ Kalundborg Refinery, *World Premiere of Low Aromatic Jet Fuel in Kalundborg*, December 2025
- ¹²⁰ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Alkaline electrolyser og Polymer electrolyte membrane electrolyser*, Februar 2026
- ¹²¹ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Solid oxide electrolyser cell*, Februar 2026
- ¹²² International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂-to-liquids (integrated RWGS + fischer-tropsch process)*, Februar 2026
- ¹²³ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂ reduction*, April 2025
- ¹²⁴ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂ and H₂O co-electrolysis*, Februar 2026
- ¹²⁵ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Methanol-to-jet*, Februar 2026
- ¹²⁶ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Methanol-to-jet*, Februar 2026
- ¹²⁷ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Gasification and fischer-tropsch without integrated CO₂ capture (biodiesel, biokerosene)*, Februar 2026
- ¹²⁸ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Gasification and fischer-tropsch integrated with CO₂ capture (biodiesel, biokerosene)*, Februar 2026
- ¹²⁹ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Gasification and fischer-tropsch without integrated CO₂ capture (biodiesel, biokerosene)*, Februar 2026
- ¹³⁰ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Alcohol-to-jet (biokerosene)*, Februar 2026
- ¹³¹ IRENA, *INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL*, 2021
- ¹³² International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Alcohol-to-jet (biokerosene)*, Februar 2026
- ¹³³ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Enzymatic fermentation of lignocellulosic biomass without integrated CO₂ capture (bioethanol)*, Februar 2026
- ¹³⁴ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Enzymatic fermentation of lignocellulosic biomass with integrated CO₂ capture (bioethanol)*, Februar 2026
- ¹³⁵ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Hydrotreating of oil/fats to hydrogenated vegetable oil (HVO) or hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) (biodiesel, biokerosene)*, Februar 2026
- ¹³⁶ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Post-combustion: chemical absorption (biomass with CO₂ capture)*, Februar 2026
- ¹³⁷ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Liquid DAC (l-DAC)*, Februar 2026
- ¹³⁸ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Solid DAC (s-DAC)*, Februar 2026
- ¹³⁹ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂ transport pipeline*, Februar 2026
- ¹⁴⁰ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂ shipping*, Februar 2026
- ¹⁴¹ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - CO₂ terminal*, Februar 2026
- ¹⁴² International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Battery-electric aircraft: regional (20+ seats)*, Februar 2026
- ¹⁴³ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Battery-electric aircraft: taxi & commuter*, Februar 2026
- ¹⁴⁴ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Battery-electric aircraft: regional (20+ seats)*, Februar 2026
- ¹⁴⁵ International Energy Agency (IEA), *ETP Clean Energy Technology Guide - Hydrogen-powered aircraft: regional (20+ seats)*, Februar 2026
- ¹⁴⁶ Mukhopadhyaya, J. og Rutherford, D., *PERFORMANCE ANALYSIS OF EVOLUTIONARY HYDROGEN-POWERED AIRCRAFT*, ICCT, 2022
- ¹⁴⁷ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁴⁸ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁴⁹ Innovationsfonden, *Societal Readiness Levels (SRL) defined according to Innovation Fund Denmark*, 2019
- ¹⁵⁰ Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025
- ¹⁵¹ Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025

- ¹⁵² Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025
- ¹⁵³ Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025
- ¹⁵⁴ Sripad, S., m.fl., *A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion*, 2021
- ¹⁵⁵ Energistyrelsen, *Aviation Technology Review*, 2025
- ¹⁵⁶ Cox, J. m.fl., *Impacts of Regional Air Mobility and Electrified Aircraft on Airport Electricity Infrastructure and Demand*, 2023
- ¹⁵⁷ Cox, J. m.fl., *Impacts of Regional Air Mobility and Electrified Aircraft on Airport Electricity Infrastructure and Demand*, 2023
- ¹⁵⁸ Cox, J. m.fl., *Impacts of Regional Air Mobility and Electrified Aircraft on Airport Electricity Infrastructure and Demand*, 2023
- ¹⁵⁹ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁶⁰ International Air Transport Association (IATA), *Hydrogen for aviation - A future decarbonization solution for air travel?*, 2025
- ¹⁶¹ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁶² International Air Transport Association (IATA), *Hydrogen for aviation - A future decarbonization solution for air travel?*, 2025
- ¹⁶³ Yusaf, T., m.fl., *Sustainable hydrogen energy in aviation - A narrative review*, 2023
- ¹⁶⁴ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁶⁵ International Air Transport Association (IATA), *FACT SHEET 7: Liquid hydrogen as a potential lowcarbon fuel for aviation*, 2019
- ¹⁶⁶ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁶⁷ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁶⁸ International Air Transport Association (IATA), *Hydrogen for aviation - A future decarbonization solution for air travel?*, 2025
- ¹⁶⁹ World Economic Forum, *Target True Zero Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen-Powered Flight*, 2022
- ¹⁷⁰ Airport Compatibility of Alternative Aviation Fuels Task Force (ACAAF-TF) og International Industry Working Group (IIWG), *Concept of Operations of Battery and Hydrogen Powered Aircraft at Aerodromes*, 2025
- ¹⁷¹ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025
- ¹⁷² International Air Transport Association (IATA), *Fact Sheet 2 Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification*
- ¹⁷³ Finansministeriet (2023), *Vejledning i samfundsøkonomiske konsekvensvurderinger*.
- ¹⁷⁴ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁷⁵ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for kulstoffangst, -transport og -lagring*, 2024
- ¹⁷⁶ Energistyrelsen, *Energipriser og afgifter*, 2026
- ¹⁷⁷ Energinet, *Energinets Tarifikatalog 2026*, 2026
- ¹⁷⁸ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁷⁹ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for energilagring*, 2018
- ¹⁸⁰ Energistyrelsen, *Technology Data – Carbon capture, transport and storage*, 2024
- ¹⁸¹ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ¹⁸² Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ¹⁸³ World Economic Forum, *Clean Skies for Tomorrow, Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation*, 2020
- ¹⁸⁴ Fastmarkets, *Animal Fats, Distiller Corn Oil and Used Cooking Oil: Methodology and price specifications – November 2025*, 2025.
- ¹⁸⁵ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁸⁶ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁸⁷ EA Energianalyse, *Analyse af SMR-teknologiers indpasning og effekter i det danske energisystem*, 2. udgave 2026.
- ¹⁸⁸ Dansk Fjernvarme, Grøn Energi, COWI og TVIS, *Power-to-X og fjernvarme*, 2022.
- ¹⁸⁹ Dansk Fjernvarme, Grøn Energi, COWI og TVIS, *Power-to-X og fjernvarme*, 2022.
- ¹⁹⁰ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ¹⁹¹ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁹² European Energy Exchange, *EU ETS Auctions, History Emission Spot Primary Market Auction Report 2012 - 2025*
- ¹⁹³ Energistyrelsen, *Technology Data – Renewable fuels*, 2025
- ¹⁹⁴ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ¹⁹⁵ Energistyrelsen, *Analyseforudsætninger for Energinet 2025*, 2025
- ¹⁹⁶ Green Power Denmark, *Elpris Outlook 2025 – Veje mod et grønt og robust elsystem*, 2025
- ¹⁹⁷ North Sea Wind Power Hub, *Pathway 2.0*, 2024
- ¹⁹⁸ Millinger, M., Reichenberg, L., Hedenus, F., Berndes, G., Zeyen, E. & Brown, T. (2022), *Are biofuel mandates cost-effective? – An analysis of transport fuels and biomass usage to achieve emissions targets in the European energy system*, *Applied Energy* 326, 2022.
- ¹⁹⁹ Europa-Kommissionen, Joint Research Center (JRC), *ENSPRESO – Biomass dataset*, 2026
- ²⁰⁰ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ²⁰¹ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025
- ²⁰² International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2025*, November 2025.

²⁰³ Nordic Energy Research, *Electric Aviation Outlook 2023*, 2023.

²⁰⁴ Europa-Kommissionen, *EU Reference Scenario 2020*, 2020.

²⁰⁵ EASA, *Assessment of the environmental sustainability status in the Aviation Maintenance and Production Organisation (M&P) Domain*, 2022.

²⁰⁶ Energistyrelsen, *Teknologikatalog for tung transport – Technology review on aviation*, April 2025

²⁰⁷ International Council on Clean Transport (ICCT) 2026, *Reducing the cost gap for sustainable aviation fuel through policy intervention: A case study of the Netherlands*, Working paper, 2026; Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2025*, 2025; European Union Aviation Safety Agency (EASA) 2025, *EASA 2026 Briefing Note: 2025 Aviation Fuels Reference Prices for ReFuelEU Aviation*, Briefing Note, 2026; Nayan, N. F., *Technoeconomic assessment of bio-jet fuel production through alcohol-to-jet (ATJ) pathways from lignocellulosic biomass*, Energy Conversion and Management: X, Vol. 30, 2026; Teixeira, A. T., da Silva, A. C. M., Cavalcante, R. M., Young, A. F., *Process simulation and economic evaluation of the Alcohol-to-Jet production of sustainable aviation fuel in the Brazilian context*, Energy Conversion and Management, Vol 319, 2024; Ucheana, C., Rojas-Michaga, M. F., Hughes, K. J., Ingham, D., Pourkashanian, M., *Techno-Economic, Environmental and Social Life Cycle Assessments of Sustainable Aviation Fuel (SAF) Production via the Alcohol-to-Het Process: A UK Case Study*, Working paper, 2025; "Abid, H., Skov, I. R., Mathiesen, B. V., Østergaard, P. A., *Standalone and system-level perspectives on hydrogen-based sustainable aviation fuel pathways for Denmark*, Energy, Vol. 320, 2025; Guilloteau, P., Jensen, A. D., Sin, G., *Techno-Economic Assessment of Sustainable Aviation Fuel Production from Biogas through Bio-Methanol Production and Methanol-to-Jet Pathway*, Conference Paper, 2025 AIChE Annual Meeting, 2025; Eyberg, V., Dieterich, V., Bastek, S., Dossow, M., Spliethoff, H., Fendt, S., *Techno-economic assessment and comparison of Fischer–Tropsch and Methanol-to-Jet processes to produce sustainable aviation fuel via Power-to-Liquid*, Energy Conversion and Management, Vol. 315, 2024.

²⁰⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2022; McKinsey Sustainability, *Carbon removals: How to scale a new gigaton industry*, 2023; World Resources Institute, *6 Things to Know About Direct Air Capture*, 2025; IEAGHG, *Global Assessment of Direct Air Capture Costs*, 2021; Sievert, K., Schmidt, T.S., Steffen, B., *Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture*, 2024, 8, 979-999; Energinet, *Systemperspektivanalyse 2022: Udvikling mod fremtidens robuste energisystem*, 2022; Belfer Center for Science and International Affairs, *Prospects for Direct Air Carbon Capture and Storage: Costs, Scale, and Funding*, 2023; McQueen, N., Gomes, K.V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., Wilcox, J., *A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future*, Progress in Energy, 3, 2021; IEA, *Direct Air Capture: A key technology for net zero*, 2022; Young, J., McQueen, N., Charalambous, C., Foteinis, S., Hawrot, O., Ojeda, M., Pilorgé, H., Andresen, J., Psarras, P., Renforth, P., Garcia, S., van der Spek, M., *The cost of direct air capture and storage can be reduced via strategic deployment but is unlikely to fall below stated cost targets*, 2023, One Earth, 6, 899-917; CDR.fyi, *Bridging the Gap: Durable CDR Market Pricing Survey*

- *Purchaser and Supplier Expectations in 2025 and 2030*, 2025.

