



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

En tekno-økonomisk undersøkelse av biojetdrivstoff og E-fuel som alternative fornybare flydrivstoff for langdistanse i 2040

A techno-economic study of biojetfuel and E-fuel as
alternative renewable long-distance aviation fuels in
2040

Anna Cohen

Fornybar energi

Forord

Oppgaven er skrevet som en del av masterstudiet i fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).

Hovedveileder for oppgaven har vært Torjus Folsland Bolkesjø og biveileder Eirik Ogner Jåstad.

Balmorel-modell er kjørt av Eirik Ogner Jåstad.

Ås, 1. juni 2021

Anna Cohen

Sammendrag

Denne oppgaven ser på hvordan luftfarten i Norge kan bli fossilfri i 2040 ved bruk av fornybart drivstoff. Det er allerede i dag utviklet metoder for fornybart drivstoff. Det fornybare drivstoffet kan blandes inn med fossilt drivstoff til bruk i luftfart, men det er usikkerhet knyttet opp mot oppskalering av produksjon.

Avinor har utarbeidet en prognose for hvor mange CO₂-ekvivalenter luftfart kommer til å bidra med i 2040. Ved å gå ut ifra denne prognosen er det i oppgaven kommet fram til at det trengs i overkant av én milliard liter jetdrivstoff for å dekke drivstoffbehovet i norsk luftfart både innenlands, interkontinentalt og til Europa med forbindelse til Norge i 2040.

Det er gjort tekno-økonomiske beregninger av kostnader, kraftbehov og hydrogenbehov for flere scenarioer: Scenario 1. Biojetdrivstoff, som kan produseres gjennom en Fischer Tropsch (FT) prosess, eller en etanolvermeringprosess. Scenario 2. E-fuel, som kan produseres enten med karbonfangst fra punktutslipp (alternativ 1) eller karbonfangst direkte fra luft (alternativ 2). Disse scenarioene sammenlignes med et basescenario hvor dagens fossile drivstoffsituasjon fortsetter videre til 2040. De totale kostnadene er lavest for basescenarioet med en literpris på 3-4NOK. For biojetdrivstoff varierer literprisen mellom 17 og 22NOK, og for E-fuel mellom 18 og 25NOK. Med en læringsrate på 8% blir de fornybare drivstoffene konkurransedyktige med fossilt innen 2040. Det er også utført en sensitivitetsanalyse av scenarioene.

Estimeringer ved bruk av Balmorel-modellen viser at overgang til E-fuel (Scenario 2) vil føre til en økning i investering i fornybar energi i Norge på 28% sammenlignet med basescenarioet, og mesteparten av investeringene vil være i vindkraft. Kraftprisen, beregnet som et gjennomsnitt av to norske regioner, går opp med rundt 13% sammenlignet med basescenarioet. Norge vil gå fra å være netto eksportør av kraft i basescenarioet, til å ha netto import i Scenario 2 alternativ 2. Biojetdrivstoff (Scenario 1) vil ha liten innvirkning på kraftsystemet, grunnet lavere kraftbehov enn for E-fuel.

Hver teknologi kan teoretisk dekke hele drivstoffbehovet. Men med tanke på at det skal brukes avansert biojetdrivstoff og billig elektrisitet, vil en kombinasjon av flere teknologier være en mer robust løsning.

Abstract

This thesis investigates how the aviation sector in Norway could be fossil free by 2040 by using renewable fuels. Today, methods have already been developed to produce renewable fuels. Renewable fuels can also be mixed with fossil fuels in aviation, but there are uncertainties with regard to upscaling production.

Avinor has made a prognosis for how many CO₂ equivalents aviation will contribute with in 2040. Starting with this prognosis, it is calculated in the thesis that slightly more than one billion liters of jet fuels will be needed for aviation inside of Norway, as well as intercontinental and European flights with a connection to Norway in 2040.

Techno-economic calculations of cost, electricity demand and hydrogen demand are carried out for several scenarios: Scenario 1. Biojetfuel, produced through a Fischer Tropsch (FT) process, or a process of ethanol fermentation. Scenario 2. E-fuel, produced either with carbon capture from point source (alternative 1) or by carbon capture directly from the air (alternative 2). These scenarios are compared with a base scenario in which today's fossil fuel situation continues until 2040. The total cost is lowest for the base scenario, with a price per liter at NOK 3-4. For biojetfuel, the price per liter varies between NOK 17 and 22, and for E-fuel, between NOK 18 and 25. With an 8% learning rate for the renewable fuels, they will be competitive with fossil fuel by 2040. A sensitivity analysis of the scenarios has also been carried out.

Estimations using the Balmorel model show that by transitioning to E-fuel (Scenario 2), the investment in renewable energy in Norway will increase by 28% compared to the base scenario, and most of this will be in the wind sector. The electricity price, calculated as the average of two Norwegian regions, will increase by around 13% compared to the base scenario. Norway will go from being a net exporter of energy in the base scenario to being a net importer in Scenario 2 alternative 2. Biojetfuel (Scenario 1) will not have a big effect on the electricity system, because of lower demand for electricity than in the E-fuel scenario.

All the technologies can theoretically cover the total fuel demand, but regarding the fact that the biojetfuel has to be advanced and E-fuel should be produced mostly when electricity prices are low, a combination of several technologies would be a more robust solution.

Figurliste

Figur 1: Verdikjede for biomasse og E-fuel baser på (The Royal Society, 2019).....	18
Figur 2: Fordeling mellom avansert og konvensjonelt biodrivstoff for salg til veitransport i perioden 2015 til 2020 (Miljødirektoratet, 2019a).....	21
Figur 3: Verdikjeden for Fischer Tropsch basert på trevirke. Figuren er basert på Serrano og Sandquist (2017).	22
Figur 4: Verdikjede for etanolvermering. Basert på (Serrano & Sandquist, 2017).	24
Figur 5: Verdikjede for E-fuel. Basert på (Bjartnes et al., 2020).	25
Figur 6: Kombinasjon av karbonfangst for E-fuel (punkt og direkte), og utslipp fra industri.....	27
Figur 7: Kostnadsutvikling på ulike modenhetsnivåer. Inspirert av (Spek et al., 2017).....	30
Figur 8: Prognose for utfasing av karbon i luftfart med ulike virkemidler (Transport & Environment, 2018).	31
Figur 9: Drivstoffbehov for innenlands, interkontinentale og europeiske flygninger til og fra Norge fra 2016, og estimert fram til 2040 (1000 liter). Basert på Avinor (2020).	44
Figur 10: Investering i kraft i Norge i 2040.....	47
Figur 11: Årsgjennomsnitt av el i 2040	49
Figur 12: Elmiks gjennom året i 2040	50
Figur 13: Netto eksport av strøm (GWh) fra Norge i 2040.	51
Figur 14: Dekke drivstoffbehovet med biomasse eller E-fuel med 8% læringsrate	55
Figur 15: Dekke drivstoffbehovet med biojetdrivstoff og E-fuel. 8% læringsrate for biojetdrivstoff og 16% læringsrate for E-fuel.....	56
Figur 16: Sensitivitetsanalyse biojetdrivstoff med Fischer Tropsch.....	57
Figur 17: Sensitivitetsanalyse biojetdrivstoff etanolvermering.	58
Figur 18: Sensitivitetsanalyse E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp.	59
Figur 19: Sensitivitetsanalyse E-fuel med karbonfangst direkte fra luft (NOK/liter).....	60
Figur 20: Årsutvikling av strømpris (€/MWh).....	74

Tabelliste

Tabell 1: Egenskaper til fossile drivstoff.....	33
Tabell 2: Elbehov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff Fischer Tropsch og etanolvermentering (Serrano & Sandquist, 2017).....	34
Tabell 3: Samlede kostnader for biojetdrivstoffproduksjon med Fischer Tropsch og etanolvermentering.	36
Tabell 4: Elbehov og hydrogenbehov for produksjon av E-fuel.....	37
Tabell 5: Produksjonskostnader for E-fuel (Brynolf et al., 2018).	39
Tabell 6: Priser fossilt drivstoff	41
Tabell 7: Elbehov for E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp og direkte fra luft.	46
Tabell 8: Kraftpriser for alternativene i regionene NO1 og NO2 (NOK/MWh)	48
Tabell 9: Elbehov og hydrogenbehov for å dekke drivstoffbehovet i 2040.....	53
Tabell 10: Prosentvis andel som el-behovet for biojetdrivstoff utgjør, sammenlignet med E-fuel	54
Tabell 11: Investeringskostnader, variable kostnader, samlede kostnader, elbehov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff, E-fuel og fossilt drivstoff.....	54
Tabell 12: Elbehov for E-fuel (alternativ).....	65

Enheter

kg	-	kg
kWh	-	kilowatt time
mill	-	millioner
MJ	-	megajoule
Mt	-	megatonn
MW	-	megawatt
Nm ³	-	normalmeter ³
PJ	-	petajoule
TWh	-	terawatt time

Andre forkortelser

A	-	Årlig kapitalkostnad
ASTM	-	American Society for Testing Materials (standardiseringsorganisasjon)
CCS	-	Carbon Capture and Storage (karbonfangst og lagring)
CCU	-	Carbon Capture and Utilization (karbonfangst og -utnyttelse)
CHP	-	Combined Heat and Power (kraftvarme)
DAC	-	Direct air capture (karbonfangst direkte fra luft)
E-fuel	-	Electrical fuel (drivstoff produsert med karbon, hydrogen og kraft)
AtJ	-	Alcohol to Jet (Etanolvermentering)
EU	-	European Union (Den europeiske union)
FT	-	Fischer Tropsch
ICAO	-	International Civil Aviation Organization (FNs luftfartsorganisasjon)
FVD	-	Forvaltning, drift og vedlikehold
GAMS	-	General Algebraic Modeling System (programvare for Balmorel)
GROT	-	Grener og topper
I	-	Investeringskostnader
IATA	-	International Air Transport Association (Den internasjonale organisasjon for lufttransport)
JetA1, JetA	-	De to vanligste flydrivstofftypene i Norge
K	-	Variable kostnader
n	-	Antall år
NO1 og NO2	-	Regionnummer i Norge
PtL	-	Power to Liquid (verdikjede for flytende produkter produsert med elektrisitet/kraft)
PtX	-	Power to X (verdikjeder for produkter produsert med elektrisitet/kraft)
r	-	Kalkulasjonsrente
TRL	-	Technological Readiness Level (modenhetsnivå)

Innholdsfortegnelse

Forord.....	2
Sammendrag.....	3
Abstract.....	4
Figurliste.....	5
Tabelliste.....	6
Enheter	7
Andre forkortelser	8
Kapittel 1: Introduksjon	11
1.1 Det overordnede problemet.....	11
1.2 Fornybare løsninger i luftfarten.....	11
1.3 Formål og problemstilling.....	14
1.4 Oppbygging av oppgave.....	15
Kapittel 2: Fornybare løsninger for langdistanse luftfart.....	17
2.1 Verdikjeder for E-fuel og biojetdrivstoff	18
2.1.1 Flydrivstoff.....	18
2.1.2 Biojetdrivstoff.....	19
2.1.3 E-fuel	25
2.2 Sammenligning av biojetdrivstoff og E-fuel.....	28
2.3 En kombinasjon av bio og E-fuel som jetdrivstoff?.....	30
2.4 Situasjonen i Norge med hensyn til produksjon av flydrivstoff.....	31
Kapittel 3 Metode.....	33
3.1 Drivstoffbehov i 2040	33
3.2 Scenario 1: Biojetdrivstoff	34
3.2.1 El-behov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff	34
3.2.2 Økonomiske beregninger biojetdrivstoff.....	35
3.3 Scenario 2: E-fuel.....	37
3.3.1 El-behov for E-fuel.....	37
3.3.2 Økonomiske beregninger for E-fuel.....	38
3.3.3 Kraftsystemeffekter i E-fuel-scenariot.....	40
3.4 Basescenario: Fossile drivstoff.....	40
3.5 Verktøy for sammenligning av scenarioer: Læringskurve og sensitivitetsanalyse	41

3.6 Forutsetninger om valuta og inflasjon.....	42
Kapittel 4: Resultater	43
4.1 Drivstoffbehov 2040.....	43
4.2 Scenario 1: Biojetdrivstoff	44
4.2.1 El-behov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff	44
4.2.2 Kostnader biojetdrivstoff.....	45
4.3 Scenario 2: E-fuel.....	46
4.3.1 Elbehov og hydrogenbehov for E-fuel	46
4.3.2 Kraftsystemeffekter i E-fuel-scenarioet.....	46
4.3 Kostnader for E-fuel	52
4.4 Basescenario: Fossile drivstoff.....	52
4.5 Sammenligning og mulige kombinasjoner av biojetdrivstoff og E-fuel	53
4.5.1 Totale kostnader, hydrogen og el-behov for biodrivstoff og E-fuel for 2040	53
4.5.2 Læringskurver.....	55
4.6 Sensitivitetsanalyse	56
4.6.1 Biojetdrivstoff.....	56
4.6.2 E-fuel	58
4.7 Ressursgrunnlag	60
Kapittel 5: Diskusjon	61
Kapittel 6: Konklusjon.....	67
Litteraturliste:.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.

Kapittel 1: Introduksjon

1.1 Det overordnede problemet

Menneskeskapte klimagassutslipp fører til global oppvarming. Dette gjør blant annet at temperaturene øker, polene smelter, og vi får mer ekstremvær. Ved å slippe ut klimagasser påfører vi kloden skader som i mange tilfeller er permanente (Norsk polarinstitutt, 2018). På den andre siden har vi luftfarten som bidrar til disse utslippene, men som også er en bærebjelke i samfunnet, ikke minst i det norske samfunnet, både økonomisk og sosialt. Et godt flytilbud i Norge gir en stor grad av mobilitet for reising innad i landet, og det gir god tilkobling til resten av Europa og resten av verden for frakt av varer samt arbeids- og feriereiser. Problemet er hvordan man kan opprettholde et godt flytilbud samtidig som utslippene går ned (Samferdselsdepartementet, 2021)(kapittel 8).

I Norge slippes det årlig ut 42,7Mt CO₂-ekvivalenter, og flytransport står for ca. 7% av disse utslippene (Schlaupitz, 2019). Utslipp fra flysektoren øker jevnlig og uten inngrep viser EU-beregninger at mengden utslipp vil kunne dobles eller tredobles innen 2050 (Bannon, 2018). Andelen utslipp fra flysektoren vil også øke i forhold til totalen (Bannon, 2018). Utslippene virker også negativt inn på samfunnsnyten i et land. Bruk av ikke-fornybare ressurser kan knyttes opp mot lavere gjennomsnittsalder, energimangel og lav kjøpekraft i utviklingsland (International Energy Agency, 2021).

1.2 Fornybare løsninger i luftfarten

Global oppvarming er noe som angår alle land, og som i Norge både myndigheter, forskere og frivillige organisasjoner har prøvd å finne framgangsmåter for å begrense. Myndigheter og frivillige organisasjoner tar sikte på å basere sin argumentasjon og sine forslag på forskning. Se for eksempel Wormslev et al. (2016) eller (Regjeringen, 2020b). Reduksjon av klimagassutslipp vil også kunne føre til samfunnsnytte, og bidra til FNs bærekraftsmål (FN, 2021). I et globalt

perspektiv vil overgang til fornybar energi gi en gjennomsnittlig høyere levealder, tilgang til ren energi for alle og økt kjøpekraft (International Energy Agency, 2021).

Den norske regjeringen mener at det med nye teknologier og satsinger vil være mulig å redusere utslippene fra luftfarten i stor grad. Norge er i en slik posisjon økonomisk at de kan gå foran og starte prosessen med å utvikle miljøvennlig luftfart (Samferdselsdepartementet, 2021)(kapittel 1). Det er flere muligheter for å gå over til mer fornybart drivstoff i luftfarten, som E-fuel, biojetdrivstoff, hydrogen, elektrisitet fra sol, vind og vann og ulike hybride løsninger (Ekspertutvalget – teknologi og fremtidens transportinfrastruktur, 2019).

For å oppnå målet om en mer bærekraftig luftfart har den norske regjeringen satt seg egne målsetninger for klimagassutslipp, i tillegg til at de må forholde seg til internasjonale regelverk. Norge innførte i 2020 krav om at minimum 0,5% av biodrivstoffet skal være avansert biodrivstoff (se kapittel 2.1.2 nedenfor). I tillegg legger regjeringen til rette for null- og lavutslippsteknologier i luftfarten (Samferdselsdepartementet, 2021)(kapittel 6).

Mesteparten av luftfarten er kvotepliktig i EUs kvotesystem med noen unntak (Miljødirektoratet, 2021). Alle land får utdelt kvoter, og kvoter som brukes utover dette kjøpes. Etter hvert settes prisene på karbonkvotene opp (Samferdselsdepartementet, 2021) (kapittel 6), og antall kvoter reduseres med 2,2% årlig (Miljødirektoratet, 2019b).

Det er flere muligheter for å gjøre luftfart mer miljøvennlig. Det kan gjøres små eller store endringer i flydesign, man kan endre folks adferd med hensyn til å fly, eller man kan skifte ut drivstoffet som brukes. Den europeiske miljøorganisasjonen Transport and Environment går gjennom flere mulige måter å redusere utslipp fra luftfart på (Transport & Environment, 2018).

Det er mulig å endre design på fly på en slik måte at de blir mer miljøvennlige. Eksempelvis kan man ved reparasjoner bytte ut gamle deler med nye deler i lettere materialer, eller man kan sette

på ulike type aerodynamiske finner. På lengre sikt kan man bytte ut gamle fly med fly som har utforming som gir mindre luftmotstand, endre størrelsesforhold mellom kropp og vinge på flyet, flytte drivstofftank og motor eller øke topphastigheten. Alle disse designtypene vil gi redusert forbruk av drivstoff (Transport & Environment, 2018).

En annen metode for å redusere utslipp er å endre adferd rundt det å fly. Naturvernforbundet ser på hvordan flybillettpris kan redusere flytrafikk, og estimerer at flytrafikken innenriks vil reduseres med 38% dersom billettprisene øker med 50% (Schlaupitz, 2019). Folk flyr enten i forbindelse med jobb eller på fritiden på ferieturer. I jobbsammenheng kan man for eksempel gå over til videomøter i større grad. På ferieflyturer vil økt klimabevissthet, Norgesferier framfor utenlandsferier, sjeldnere reiser, og å være lenger på feriedestinasjonen kunne føre til at man flyr mindre (Schlaupitz, 2019).

Det er størst potensial for utslippskutt innenfor teknologi og drivstoff (9 mill tonn CO₂) sammenlignet med andre tiltak (1 mill tonn CO₂) (Bannon, 2018).

Korte flyreiser vil kunne gå over til å bli drevet med elektrisitet, mens dette ikke er et realistisk alternativ på lengre turer. Det er estimert at elektriske fly på korte flyturer vil kunne bli utbredt i betydelig grad i løpet av de neste 15-20 årene (Ekspertutvalget – teknologi og fremtidens transportinfrastruktur, 2019). Årlig slippes det ut 915 millioner tonn CO₂, hvorav 80% av utslippene skjer på langdistanse (over 1500km)(Norsk E-fuel, 2020b).

Innenfor langdistanseluftfart er det to mulige løsninger på drivstoff per i dag. Den ene er å bruke biomasse til å produsere avansert biojetdrivstoff (Rambøll, 2017). Norge bruker per i dag lite biojetdrivstoff, men det har lenge blitt brukt biodrivstoff i veitransport. Her er teknologien, ressursene og kunnskapen til å produsere biodrivstoff allerede på plass (Wormslev et al., 2016). Fremgangsmåten for å produsere biodrivstoff til andre sektorer, slik som marin sektor og luftfart, vil kunne gi noen tekniske og økonomiske utfordringer (Miljødirektoratet og Sjøfartsdirektoratet, 2018) og (International Renewable Energy Agency, 2017). Dette gjør at modenheten (se kapittel

2.2 nedenfor) til biojetdrivstoff er noe lavere enn for biodrivstoff til veitransport. Den andre muligheten er å bruke den relativt nye teknologien Power to X. Denne teknologien tar utgangspunkt i elektrisitet og gjør det om til et annet produkt (X). I produksjon av flytende drivstoff vil vi få Power to Liquid. Drivstoffet som blir produsert, blir kalt E-fuel (elektrisk drivstoff), hvor råstoffene hydrogen og CO₂ brukes. Prosessen krever mye strøm (Rambøll, u.å.).

Flere aktører ser på biomasse og E-fuel som fornybare flydrivstoff. Naturvernforbundet bruker begge drivstofftypene i sitt miljøscenario for 2040. De tar utgangspunkt i å bruke så mye som mulig avansert biojetdrivstoff (begrenset av hensyn til avskoging, andre biomassebehov etc.), og deretter dekke resten av behovet med E-fuel (Schlaupitz, 2019). Avinor legger også inn disse drivstoffene i sin prognose fram mot 2050 (Avinor, 2020).

1.3 Formål og problemstilling

I denne oppgaven skal jeg undersøke hvordan klimautslippene fra langdistanseluftfart kan reduseres ved å gå over til de alternative jetdrivstoffene biodrivstoff og E-fuel mot 2040. Mer spesifikt vil oppgaven omhandle ulike scenarioer for dekking av jetdrivstoffbehovet i 2040 med fornybart drivstoff. Det som ligger til grunn for valget av år, er at det er langt nok frem i tid til at de aktuelle teknologiene vil kunne bli modne nok, samtidig som det er nær nok til at vi har tilgang til estimater for en rekke andre variabler, og på den måten er i en «overskuelig» framtid.

Flere aktører, som Det internasjonale energibyrået (2021) og Avinor (2020), har prognoser for fossilfri luftfart fram mot 2050. I disse prognosene vil det fremdeles være fossile drivstoff i 2040. På den andre siden gjør FNs luftfartsorganisasjon ICAO (2019) prognoser med fossilfritt luftfart litt før 2040.

Det forskes etter hvert mye på E-fuels internasjonalt. I for eksempel Hermesmann et al. (2021) diskuteres potensialet for de ulike teknologiene innenfor Power to X (blant annet produksjonen av E-fuel). Et annet eksempel er Blanco et al. (2018), som ser på potensialet for E-fuel og hydrogen i et lavutslippssamfunn i Europa. Til tross for dette er E-fuel fremdeles fraværende i mange norske planleggings- og overblikksdokumenter. Eksempelvis i *Handlingsplan for infrastruktur for alternative drivstoff i transport* (Samferdselsdepartementet, 2019) og *Nasjonal transportplan 2022–2033* (Samferdselsdepartementet, 2021) blir det skrevet om både hydrogen, elektrisitet og biodrivstoff, men E-fuel ikke blir nevnt. Med denne oppgaven ønsker jeg å rette fokus mot hvordan også denne teknologien kan brukes i et fremtidsestimat.

Noe jeg ser på, og som er forskjellig fra det andre har gjort, er hvordan kraftsystemet og kraftpriser vil bli påvirket dersom man dekker hele flydrivstoffbehovet med E-fuel i 2040. Jeg sammenligner også kostnadene ved å dekke behovet med E-fuel, biodrivstoff og en kombinasjon av begge disse.

Med utgangspunkt i dette har jeg kommet fram til følgende problemstilling for oppgaven:

- *Hvordan kan drivstoffbehovet for langdistanseluftfart dekkes av fornybart biojetdrivstoff og E-fuel i 2040, og hvilke tekniske og økonomiske konsekvenser vil dette ha?*

1.4 Oppbygging av oppgaven

I kapittel 2 presenterer jeg ulike fornybare løsninger for langdistanseluftfart, både de tekniske verdikjedene og hva situasjonen er i Norge i dag.

I kapittel 3 går jeg gjennom metoder som er brukt. Det er gjort forutsetninger for tekno-økonomiske analyser, samt at det er definert to scenarioer (henholdsvis biojetdrivstoff og E-fuel), og ulike metoder som kan påvirke disse. Fossilt drivstoff er satt som basescenario.

I kapittel 4 er det gjort tekno-økonomiske beregninger for avansert biojetdrivstoff og E-fuel i tråd med forutsetninger gjort i metodekapittelet.

I kapittel 5 diskuteres resultatene, og de ulike konsekvensene de ulike alternativene kan ha.

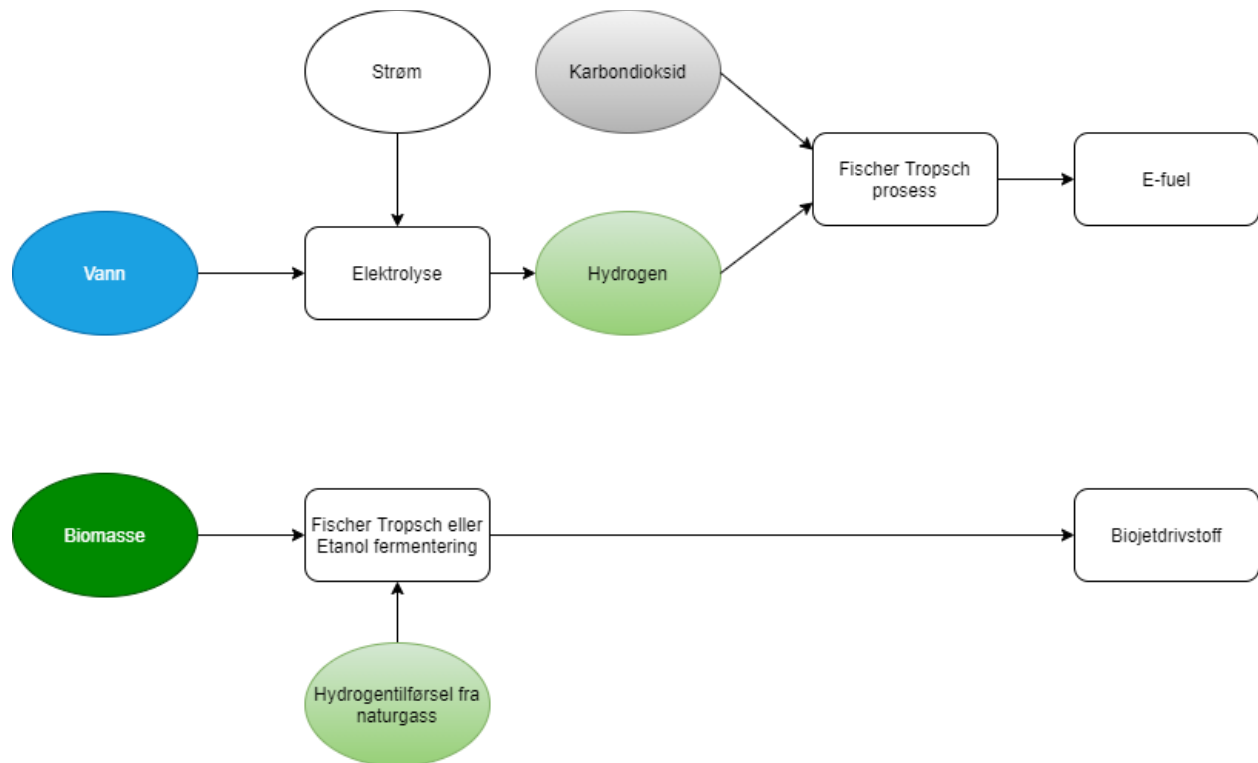
I kapittel 6 trekkes det en konklusjon.

Kapittel 2: Fornybare løsninger for langdistanseluftfart

Teknologiene for å produsere fornybart flydrivstoff til langdistanseluftfart er allerede under utvikling. Norge er i en startfase av E-fuelproduksjon, og lovgivning vil også føre til at produksjon av avansert jetdrivstoff vil gå opp. I dette kapitlet skal jeg gå gjennom verdikjedene og medførende karbonutslipp for biojetdrivstoff og E-fuel. Videre sammenlignes bruk av biojetdrivstoff og E-fuel samt muligheten for å kombinere disse. Deretter ses det på situasjonen i Norge i dag med tanke på både fornybar energi og muligheter for produksjon av biojetdrivstoff og E-fuel.

Den statlige luftfartsbedriften, Avinor, har utarbeidet en prognose for hvor mye CO₂-ekvivalenter luftfart kommer til å bidra med i årene fram til 2040. I prognosen inkluderer de flyturer innenlands, interkontinentalt og i Europa (Avinor, 2020).

2.1 Verdikjeder for E-fuel og biojetdrivstoff



Figur 1: Verdikjede for biomasse og E-fuel baser på (The Royal Society, 2019)

2.1.1 Flydrivstoff

Flydrivstoff har strenge krav til egenskaper for å kunne tåle temperatur og trykk som det utsettes for under en flytur. Kerosene/parafin brukes mye i flydrivstoff på grunn av lavt frysepunkt, og de vanligste jetdrivstofftypene, JetA1 og JetA, bruker kerosene. Det er mulig å bruke både fossilt og syntetisk drivstoff (E-fuel, biojetdrivstoff) som jetdrivstoff (Kang et al., 2019). Biodrivstoff og E-fuel kan i teorien da enten blandes inn eller erstatte fossilt drivstoff (UngEnergi, 2020). I regelverket er det satt grenser for hvor mye fornybart drivstoff som maksimalt kan blandes inn (Wormslev et al., 2016). I oppgaven er det hovedfokus på vanlige rutetrafikkfly. Småfly og militærfly er ikke tatt med videre. Disse typene fly kan også bruke andre typer flydrivstoff.

Det er innført avgifter på fossile flydrivstoff. Ved å sette en avgift på karbon gir myndighetene støtte til prinsippet om at utslipper skal betale. I tillegg øker det prisene på fossilt drivstoff, og med dette minker forskjellen mellom pris på fornybart og fossilt drivstoff.

For luftfart er det for 2021 satt karbonavgift på innenriks trafikk på 1,51NOK per liter, mens det er gitt unntak for fly i utenriks fart. Dette står i kapittelet «Miljøavgifter på mineralske produkter mv.» og underkapittel «B. CO₂-avgift på mineralske produkter (kap. 5543 post 70)», og §1a) og §3d) Vedtak om særavgifter (2020). Karbonavgift er et virkemiddel for å få den som slipper ut karbon til å også betale for det (Regjeringen, 2020a).

2.1.2 Biojetdrivstoff

Biodrivstoff kan produseres fra alt biologisk materiale (Miljødirektoratet, 2019a), slik som biomasse fra matplanter, trevirke, organisk materiale sendt til avfallsbehandling og marin biomasse (Wormslev et al., 2016). Utslipp av karbon fra biomasse er i naturen karbonnøytralt. Ved bruk av biomasse til energiproduksjon ønsker man å ivareta det naturlige kretsløpet med utslipp og opptak av karbon til luften, samtidig som ressursen kan utnyttes på en effektiv måte. Når det er en balanse, vil bruk av ressursen være karbonnøytral. (UngEnergi, 2020). Hvis man driver rovdrift eller ikke planter på nytt, vil biojetdrivstoff føre til netto utslipp (Amundsen, 2019). Bruk av biomasse regnes ofte som å være klimanøytralt, men på grunn av ubalanse vil det også kunne være mer forurensende enn fossile drivstoff (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008). Trevirke utgjør den største biokilden i Norge (Wormslev et al., 2016). Norsk Skogeierforbund har også gått ut og sagt at det må være industri med biomasse for at man skal kunne nå nasjonale og internasjonale klimamål (Norges Skogeierforbund, u.å.).

Avhengig av opphav deler vi biojetdrivstoff inn i generasjoner. Første generasjon (konvensjonelt) omfatter landbruksvekster. Andre generasjon (avansert) omfatter rester og avfall fra næring, landbruk (Miljødirektoratet, 2019a) og gren og topper (GROT) fra skogbruk (Hohle, 2001), som utgjør ca. 1/3 av ressursen. Ca. 25% av massevirke kan brukes til å produsere drivstoff (NHO luftfart, 2017). Tredje og fjerde generasjons biojetdrivstoff omfatter marin

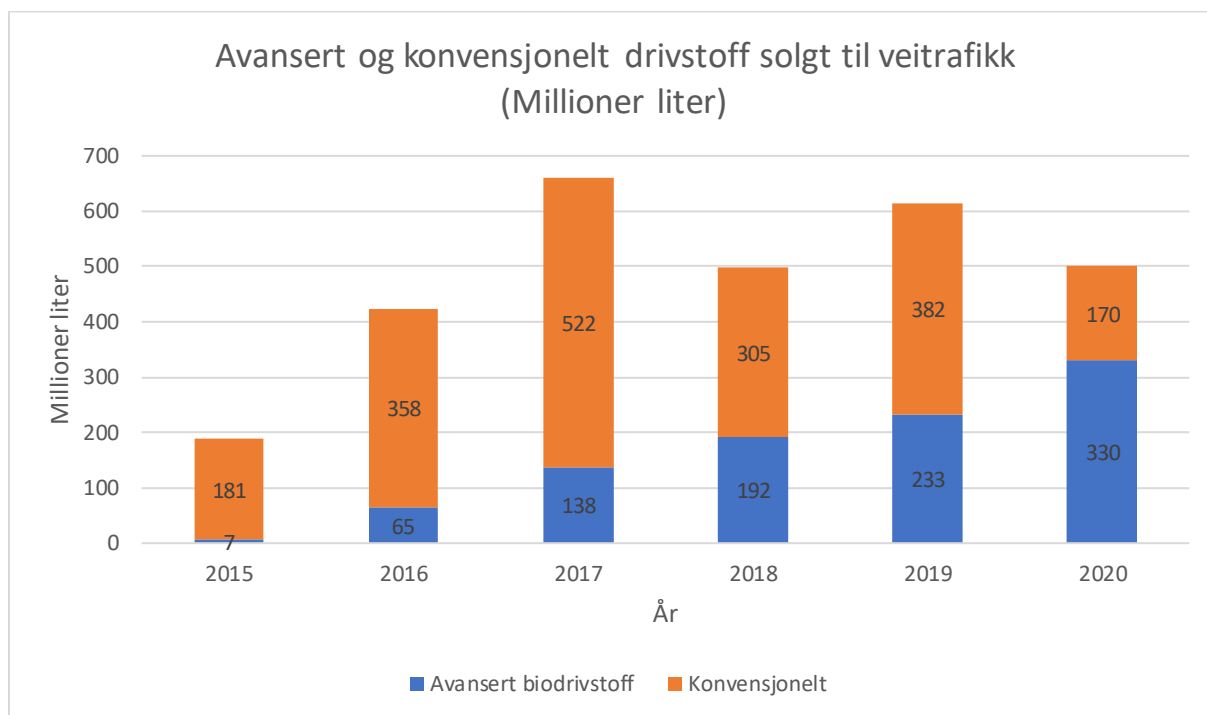
biomasse og avanserte biokjemiske metoder. De to siste er ikke aktuelle per i dag, men kan være interessante på lang og mellomlang sikt (UngEnergi, 2020). Fordelen med marin produksjon er at det vokser raskt og på et areal som brukes lite til andre ting.

Klimautslipp avhenger av hvilken generasjons bioråstoff som brukes, slik at høyere generasjonstall er mer klimavennlig (UngEnergi, 2020). Avansert biodrivstoff vil som oftest ha lavere livsløpsutslipp enn konvensjonelt biodrivstoff. Avansert biodrivstoff er del av en større skogindustri som både henter ut skogvirke til blant annet å bygge hus (ca. 20%) og produsere papir (ca. 50%). Utslippene ved å ta ut biodrivstoff i samme prosess vil i dette tilfellet være lavt. Med konvensjonelt biodrivstoff dyrkes og samles biomassen inn med det eneste formål å bli gjort om til biodrivstoff. Da vil alt av utslipp knyttet til prosessen bli satt på drivstoffet. I tillegg tar man opp landareal og matvekster som kunne blitt spist (NHO luftfart, 2017).

EUs fornybardirektiv har satt krav til hva som kan regnes som avansert biodrivstoff. For det første må bruk og produksjon av biodrivstoff føre til at klimagassene reduseres med minst 50% (60% for nye bedrifter) sammenlignet med fossilt. For det andre skal man ikke produsere biomasse på en måte som går ut over biodiversitet, på områder hvor det er et naturlig høyt karboninnhold eller på steder med regnskog eller myr (det er mindre strenge krav dersom biodrivstoff er produsert fra avfall eller rester fra produksjonsprosesser). Det er to vanlige måter å regne på karbonutslipp på. Den første er å se utslipp i et nasjonalt perspektiv, og den andre er å se på utslipp i et globalt perspektiv. Norge importerer det meste av biomasse som vi bruker. I et nasjonalt regnskap regnes derfor kun utslipp fra forbrenning. Videre kan vi gjøre klimaregnskapet nøytralt ved å plante mer skog. Den andre metoden vurderer livsløpsutslipp fra råstoff, produksjon og transport (Miljødirektoratet, 2019a). Et eksempel på et konvensjonelt biodrivstoff er palmeolje. Dette er mye omdiskutert på grunn av arealkonflikter (ILUC - *indirect land use change*) (UngEnergi, 2020).

Mesteparten av biodrivstoffet som blir brukt i Norge, kommer fra import. Kilden til råstoff var i 2020 størst for det som ville blitt sortert som avfallsprodukter (slakteavfall, brukt frittyrolje) samt

rapport. Figur 2 under viser fordelingen mellom konvensjonelt og avansert biodrivstoff i perioden 2015 til 2020. Ut ifra grafen ser man at andelen avansert biodrivstoff øker.



Figur 2: Fordeling mellom avansert og konvensjonelt biodrivstoff for salg til veitransport i perioden 2015 til 2020 (Miljødirektoratet, 2019a).

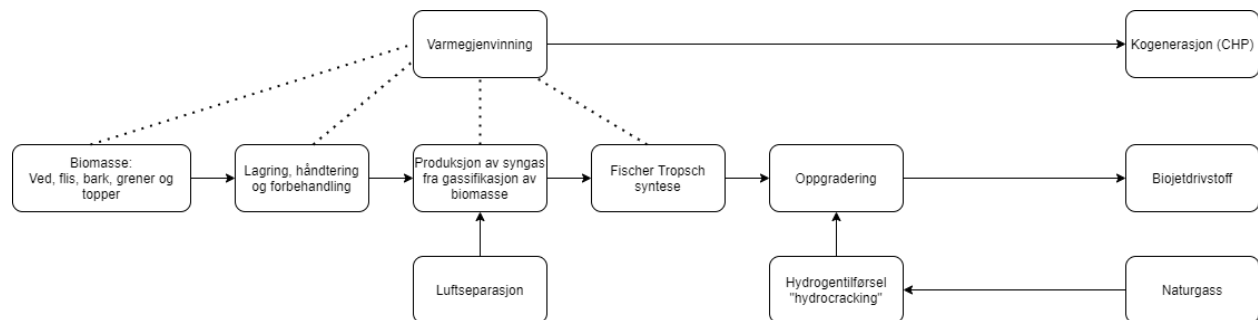
Det er stort potensial for å produsere biodrivstoff i Norge, da det er god tilgang til biomasse. Det i hovedsak andre generasjonsdrivstoff som vil være interessant å bruke til produksjon av drivstoffet (Avinor, u.å.-a). Det er et stort marked for treprodukter i Norge, og avansert biodrivstoff vil kunne være med på å utnytte treindustrien i en enda større grad.

Biomasseveksten ligger på rundt 425TWh i året, og av dette kan ca. 15TWh brukes til energiformål (Fjordkraft, u.å.). Avinor regner med at 30-40% av drivstoffbehovet kan dekkes av biojetdrivstoff i 2040 (Avinor, 2020).

Det er seks mulige måter å produsere biojetdrivstoff på som er sertifisert av standardiseringsorganisasjonen ASTM (European Union Aviation Safety Agency, u.å.). Videre skal jeg konsentrere meg om to av verdikjedene, for produksjon av biojetdrivstoff, som er etanolfermentering (AtJ) og Fischer Tropsch (FT) (Serrano & Sandquist, 2017). Den første er en Fischer Tropsch syntese, og den andre er en etanolfermentering. Begge prosessene kan produsere en rekke produkter til transportsektoren, og det kan også produseres drivstoff til fly.

Fischer Tropsch

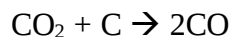
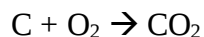
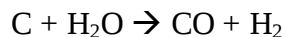
Verdikjeden for Fischer Tropsch syntese (FT) av biomasse er illustrert i figur 3.



Figur 3: Verdikjeden for Fischer Tropsch basert på trevirke. Figuren er basert på Serrano og Sandquist (2017).

Figur 3 viser verdikjeden for biojetdrivstoffproduksjon med Fischer Tropsch prosess. Råvaren som brukes i Fischer Tropsch-syntese er her biomasse. Avhengig av hva slags biomasse man bruker, får man konvensjonelt eller avansert biojetdrivstoff som sluttprodukt (Serrano & Sandquist, 2017). Etter at biomassen har blitt levert til produksjonsplassen, blir det satt til lagring. Herfra blir biomassen håndtert, og det blir gjort nødvendig forbehandling. Dette inkluderer tørking av biomasse samt oppkutting til små biter. Kombinasjonen av disse to prosessene optimaliseres for å minimere bruk av strøm og varme. Når forbehandlingen er ferdig, blir biomassen varmet opp under forhold med oksygenunderskudd. Dette fører til at biomassen går over til et nytt produkt som blir kalt syngas (Serrano & Sandquist, 2017).

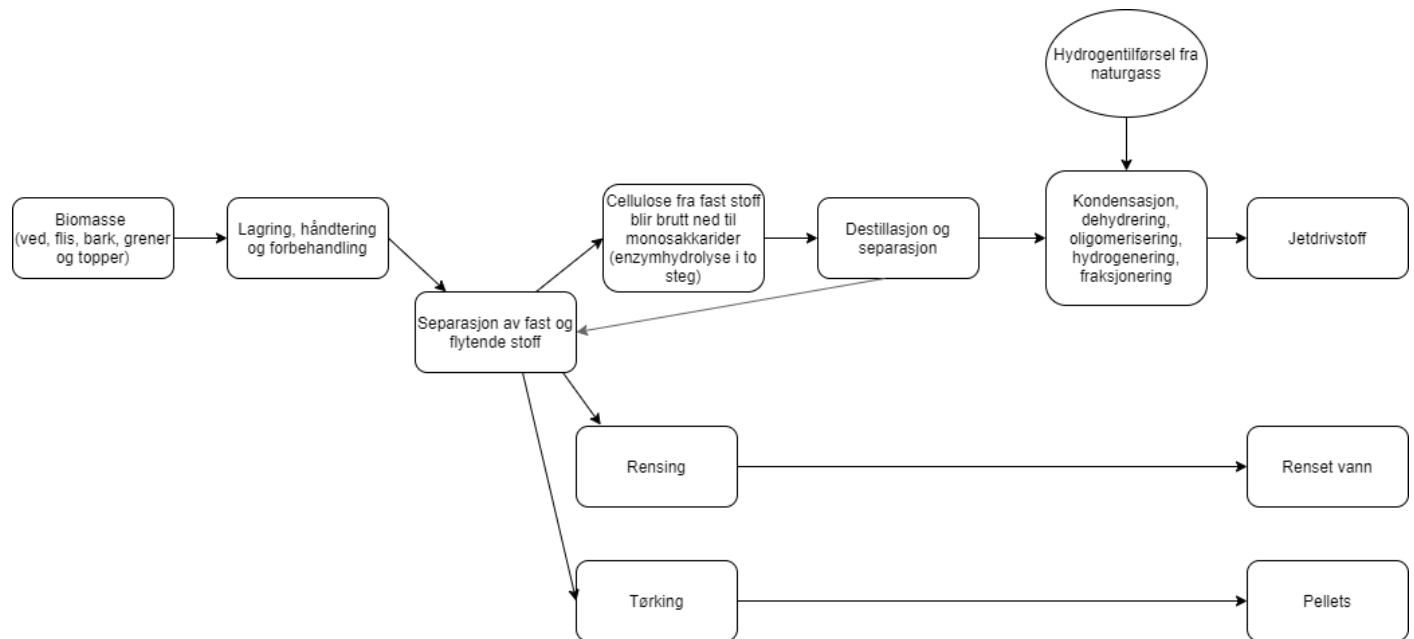
Reaksjonslikninger for produksjon av syngas fra biomasse (Serrano & Sandquist, 2017).:



Drivstoff består av hydrokarboner satt sammen til kjeder eller ringe. Gjennom Fischer Tropsch-prosessen brukes syngas som «byggesteiner» til å produsere hydrokarbonkjeder. Videre blir FT-produktene oppgradert til å få riktig lengde. Dette skjer ved å tilsette hydrogen (produsert fra naturgass). Dette skjer gjennom tre samtidige prosesser hvor kombinasjonen varierer avhengig av forutsetninger og teknologi. Korte kjeder bygges opp til alkene kjeder gjennom oligomerisering og hydrogenisering. Nafta og kerosene blir hydrogenisert og destillat og voks brytes ned med hydrocracking. Produksjon kan skje ved lav temperatur (170–270 grader celsius) eller høy temperatur (320 grader celsius og oppover) (Klerk, 2016).

Fischer Tropsch-prosessen kan produsere mange ulike sluttprodukter, og ett av disse er biojetdrivstoff. FT-prosessen er eksoterm, den frigir energi. Varmen samles inn og produseres som et biprodukt (prosessen er såkalt CHP – combined heat and power). Det er vanskelig å produsere FT-produkter i stor skala, da dette vil gå utover renheten til syngasen (Serrano & Sandquist, 2017).

Etanolvermentering



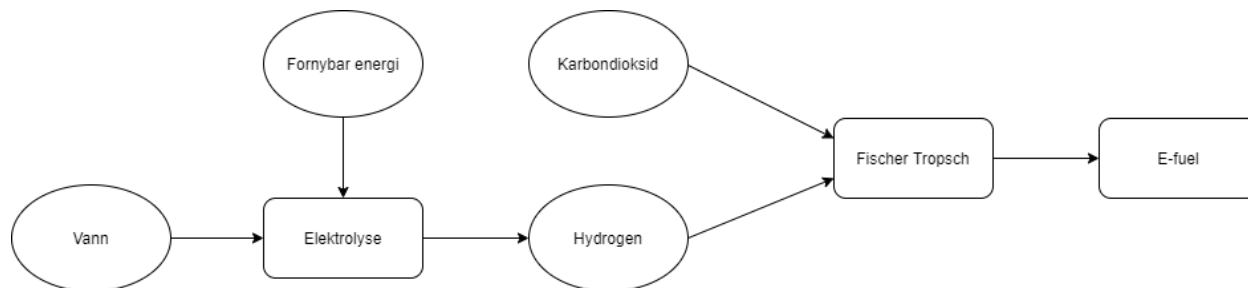
Figur 4: Verdikjede for etanolvermentering. Basert på (Serrano & Sandquist, 2017).

Figur 4 viser verdikjeden for biojetdrivstoffproduksjon med etanolvermenteringsprosessen. Råvaren for etanolvermentering er biomasse. Biomasse fra trevirke inneholder polysakkarider kalt cellulose og hemicellulose. Disse bindingene brytes ned i forbehandlingen til monosakkarider ved at det tilsettes syre eller enzymer. Det er flere mulige måter å gjøre dette på. Den mildeste måten, som er vist i figure 4, og som vil blir forklart videre, er enzymhydrolyse. Det vil også være mulig å tilsette en svak eller sterk syre i hydrolysen. I prosessen vil man miste noe råstoff. Det er viktig å miste minst mulig syre/enzymer, siden dette gir økonomisk tap og virker negativt på miljøet om det slippes ut.

Når prosessen har gått en periode, skilles fast og flytende stoff fra hverandre. Enzymhydrolyse foregår i to steg, så prosessen gjentas to ganger. Restprodukter blir rensed og tørket, og det blir dannet rensed vann og pellets som biprodukt.

Monosakkaridene blir ved fermentering omdannet til etanol. Denne etanolen blir igjen destillert og etterbehandlet, og vi får laget biojetdrivstoff. Produktet blir oppgradert ved å tilsette hydrogen («hydrocracking») fra naturgass. Etanolvermentering er en velkjent teknologi. Prosessen brukes i storskala, da med enzymhydrolyse (Serrano & Sandquist, 2017).

2.1.3 E-fuel



Figur 5: Verdikjede for E-fuel. Basert på (Bjartnes et al., 2020).

Figur 5 viser verdikjeder for produksjon av flydrivstoff med E-fuel. For å produsere E-fuel trenger man flere råvarer. Man trenger energi, hydrogen produsert gjennom elektrolyse, karbon gjennom fangst av karbondioksid fra luft eller punktutslipp, og produksjon av drivstoffet gjennom Fischer Tropsch-syntese og kondisjonering (Bjartnes et al., 2020). (Brynolf et al., 2017). Valg av energi, elektrolyse og karbonfangstvariant virker inn på klimaregnskapet (Bjartnes et al., 2020).

Fornybar energi

E-fuelproduksjon er en endoterm prosess og krever store mengder energi for å bli utført. Mye energi går også tapt under produksjonen. Dette gjør at E-fuel har en lav virkningsgrad. Derfor er det viktig å bruke fornybare ressurser for at høy energietterspørsel ikke skal føre til karbonutslipp. Hvis elektrisiteten kommer fra fossile kilder, vil prosessen med å lage E-fuel være mer forurensende enn å bruke fossilt drivstoff direkte (Bjartnes et al., 2020).

Norge produserer mye fornybar strøm. Den norske fornybare kraftproduksjonen startet for over 125 år siden med fokus på vannkraft. Det er gode forutsetninger i Norge med mye vann, variert terreng og vind (Statkraft, u.å.-b). Videre har det de siste årene i Norge blitt produsert rekordmye fornybar energi, og det har også blitt innført fornybar strøm fra nye teknologier, hvor mye av strømmen er uregulerbar (Energifakta Norge, 2019). Økt andel fornybar energi og økt andel uregulerbar kraft, gjør det interessant å se på E-fuel.

E-fuel innebærer karbonfangst og -utnyttelse (carbon capture and utilization, CCU). Ved teknologiutvikling og produksjon vil det gi en læringsrate for CCU. På grunn av teknologiske likheter kan dette videreføres til CCS (carbon capture and storage). CCS er et viktig virkemiddel for å få ned karbonutslippene (Regjeringen, 2019).

Elektrolyse

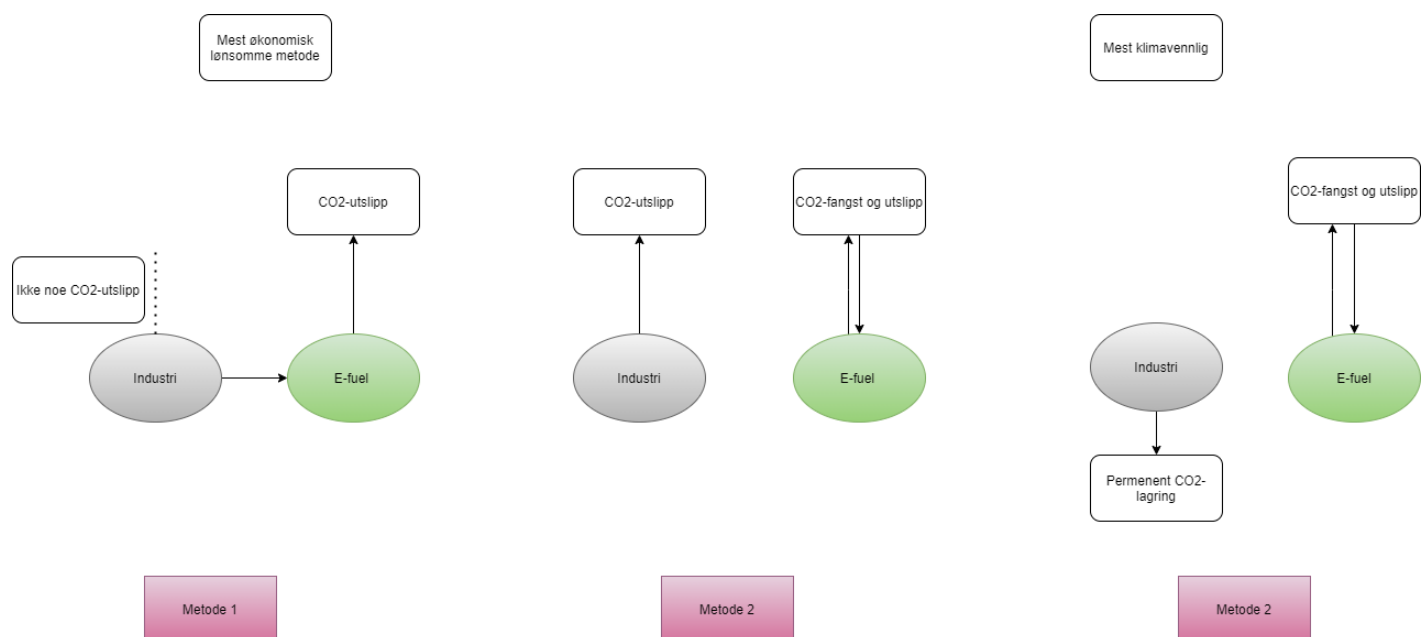
Hydrogen finnes ikke fritt i naturen, men er alltid bundet med andre stoffer. Det er ulike prosesser for å skille ut hydrogenet (grått, blått, turkis og grønt), og metoden brukt avgjør hvor miljøvennlig det er. For E-fuel er det lagt opp til å produsere grønt hydrogen (hvor elektrisitet helst fornybart brukes). Denne prosessen er energikrevende, men er ikke forurensende. Hvis man derimot bruker grått hydrogen (produsert fra kull, gass og naturgass), er det enkelt å produsere, men forurensende. Blått hydrogen er et sted i midten (produseres med samme råstoffer som grått hydrogen, men uten karbonutslipp) (Valestrand, 2019).

Det er flere måter å få tak i hydrogen på. Den første måten er alkaline produksjon. I denne prosessen sendes vann og elektrisitet gjennom to membraner, og H_2 og O_2 skilles ut. Denne teknologien er brukt i vannkraft, og har eksistert i mer enn 100 år. Jeg har valgt å se videre på alkaline produksjon, siden denne teknologien er mer stabil og det derfor er lettere å forutse hvordan den vil påvirke kostnader. Det er også mulig å bruke PEM-elektrolyse. Denne metoden går ut på mye av det samme som alkaline, men det er brukt andre råstoffer som tåler energiendringer bedre. PEM-elektrolyse er mer åpen for uforutsigbar fornybar energi, men krever videre teknologiutvikling, samt at det er store kostnader og lite produksjon av materialene som trengs. Det er også mulig å ha en solid oxid prosess. Denne prosessen har en høyere virkningsgrad og bruker elektroder og elektrolytter framfor membraner. Hovedutfordringen er lav stabilitet samt lav tilpasningsgrad til mye fornybar energi (Brynolf et al., 2018).

Karbonfangst

Karbonfangst har blitt diskutert og utviklet siden 1970-tallet (The IEA Greenhouse Gas R&D Programme, u.å.).

Karbondioksidet kan fanges opp på flere måter. Enten direkte fra luft/havet (DAC-direct air capture) eller fra direkteutslipp fra industrien. En mulighet er karbonfangst fra industri til bruk til E-fuel. Denne metoden flytter utslippspunktet fra industrien til der E-fuelet brukes. I prosessen hvor karbonet samles direkte fra luft, blir store mengder luft samlet inn ved bruk av store vifter. Luften som samles inn, vil passere forbi en selektiv membran som fanger opp karbondioksid. Dette gjør at E-fuel vil være karbonnøytralt over tid. På den andre siden vil industrien slippe ut like mye karbondioksid som i første scenario, og den vil ikke bli gjenbrukt til E-fuel. Hvis vi ser på både utslipp fra industrien og fra E-fuel, vil dette scenarioet ikke gi lavere karbonutslipp enn den første muligheten. Karbonet kan enten brukes til for eksempel E-fuelproduksjon, eller det kan lagres permanent under bakken. Det er svært store lagringskapasiteter for karbon. Globalt er det anslått at det kan lagres 5 til 30 trillioner tonn Climeworks (2021). Den siste muligheten er å permanent lagre karbonutslipp fra industri og samtidig direktefangst til bruk for E-fuel. I dette tilfellet vil nettoutslipp fra både E-fuelproduksjon og industri være lavere enn i den første og andre metoden. Denne løsningen vil åpne for permanent lagring av karbon, og på lang sikt vil dette være den mest klimanøytrale løsningen (Bjartnes et al., 2020). Når E-fuel er mer etablert vil det kunne være mulig å i tillegg hente ut karbon direkte fra luften til E-fuel produksjon i tillegg til å hente ut karbon for å deretter lagre det permanent. Hvis dette gjøres kan produksjonen i teorien gi netto opptak av karbon (Norsk E-fuel, 2020a).



Figur 6: Kombinasjon av karbonfangst for E-fuel (punkt og direkte), og utslipp fra industri.

Norge har et stort marked for fornybar energi, noe som gjør E-fuel produksjon gunstig (Hofstad & Rosvold, 2020). Råvarene vann og karbondioksid er billige og enkle å få tak i. Avhengig av produksjonsprosess kan karbonregnskapet for E-fuel bli negativt eller nøytralt. For å oppnå nøytralt karbonregnskap må energien som brukes være nøytral, hydrogenet som brukes må være grønt, og det må være karbonfangst direkte fra luft. Dette kan fremme læring for permanent lagring av karbon fra industripunktutslipp (CCS – carbon capture and storage).

2.2 Sammenligning av biojetdrivstoff og E-fuel

Biojetdrivstoff er en velkjente teknologier. Det er som nevnt ovenfor allerede satt inn omsetningskrav for avansert biodrivstoff i flysektoren, og mengden biodrivstoff har i andre deler av transportsektoren hatt en jevn vekst de siste årene. Bærekraftig biodrivstoff teller ikke inn på Norges klimaregnskap, men blir ført som null utslipp. I nasjonal transportplan er det ønskelig at mengden biomasse skal fortsette å øke, og at det skal brukes avansert biodrivstoff. Det er viktig å følge med på det globale biodrivstoffmarkedet for å unngå indirekte negative effekter av å bruke mer avansert biojetdrivstoff også fra import og eksport ifølge Samferdselsdepartementet (2021).

E-fuel er en relativt ny måte å se på drivstoffproduksjon på. Prosessen baserer seg på kjente teknologier og bruker disse på en ny måte.

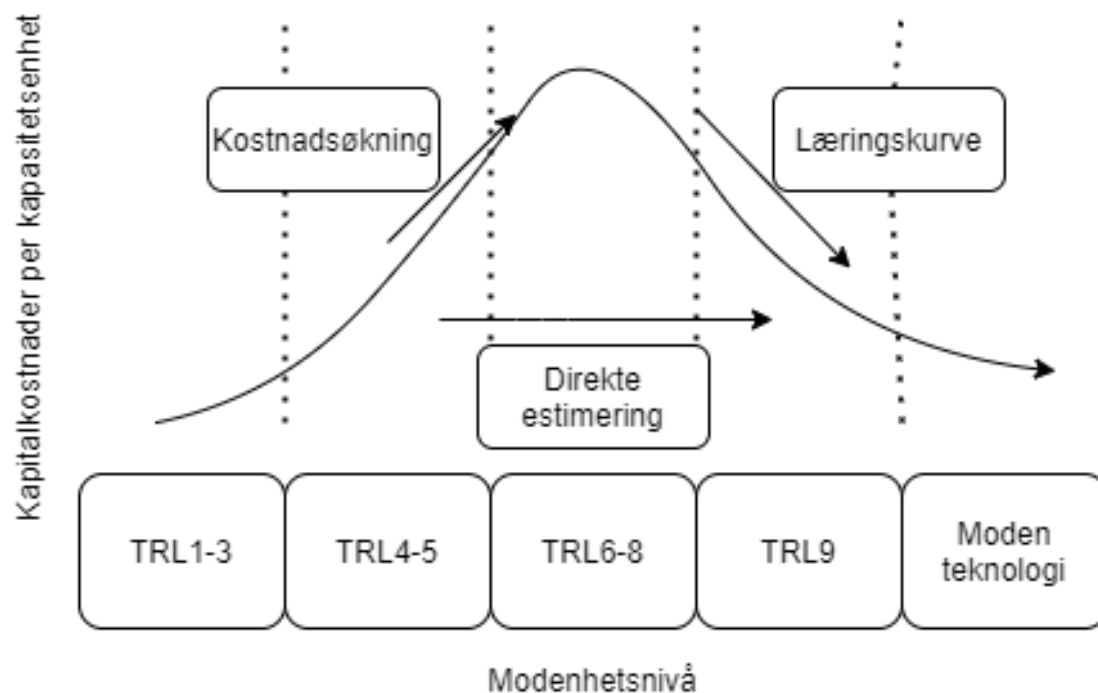
Arbeidet med Power to X startet i Tyskland på starten av 2000-tallet, og de første vellykkede forsøkene på å lage små mengder av E-fuel ble gjort i 2010. E-fuel er svært energikrevende og det er også forutsatt fornybar energi (Process Worldwide, 2020).

Det er mulig å sammenligne hvor modne teknologiene er ved å bruke en modenhetsskala. Teknologisk modenhetsnivå (TRL) er en skala som skalerer hvor langt en teknologi har kommet med en skala fra 1 til 9. Skalaen går fra teknologiutvikling gjennom umoden (ca. 1-4) og moden teknologi (ca. 5-8) og til markedsutvikling gjennom umoden (ca. 8-9) og modent marked (9). 5-7 er TRL pilotering og demonstrasjon, og TRL 8 er fullskala (M.Prussi et al., 2019). E-fuel Fischer Tropsch (lav temperatur) har en modenhet på ca. 5 (Teknologi validert i relevante miljøer). Og

FT (høy temperatur) har et modenhetsnivå på ca. 6 (Demonstrasjon gjennom pilotanlegg av teknologi). Modenhetsgraden for biodrivstoff i transportsektoren er (uten luftfart) for Fischer Tropsch 9TRL (Mortensen et al., 2019). og etanolfermentering er på 9TRL (Stafford et al., 2017). E-fuel har modenhet 6-7TRL (Li et al., 2012). E-fuel og biojetdrivstoff er ca. like modne teknologier, mens biodrivstoff for transportsektoren har en høyere modenhetsgrad.

Kostnadsutvikling ved introduksjon av en ny teknologi bygger på kostnader for produksjon samt læringsrate i forbindelse med teknologilæring som man kan se under i figur 7. I begynnelsen vil kostnadene gå opp med innføring og oppstart av bedrift. Kostnadene vil være høye da det kreves ny forskning samt spesialtilpasset utstyr. I denne prosessen vil man stadig lære mer om hvordan prosessene fungerer og hvordan man kan optimalisere drift. Når teknologiene begynner å ligge på modenhetsnivå 6-8, blir læringskostnadene mer dominante enn kostnadsøkningene, og kostnad per produserte enhet vil gå ned.

Det er interessant å se på kostnadsutvikling for teknologier med lav modenhetsgrad og høye kapitalkostnader. Dette gjøres for å få et innblikk i hvor mye som skal til av ulike tiltak for å få teknologier for å gjøre en teknologi konkurransedyktig, samt gi insentiv til investeringer. Dette vil kunne tilsi at teknologien har en bratt læringskurve foran seg, det vil si en betydelig kostnadsreduksjon. Bruk av fossile drivstoff har vært brukt i lang tid, og med tid har læringsraten gått veldig ned på grunn av dette (Li et al., 2012).



Figur 7: Kostnadsutvikling på ulike modenhetsnivåer. Inspirert av (Spek et al., 2017).

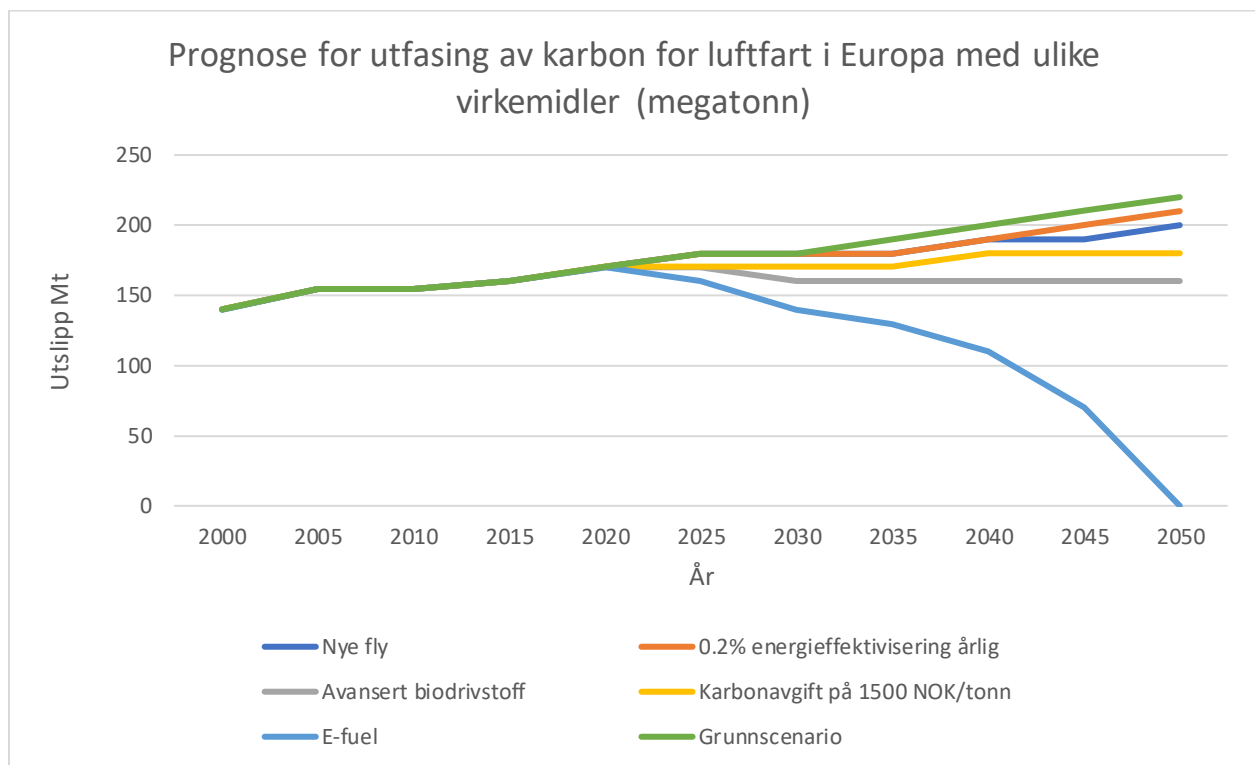
2.3 Kombinasjon av biojetdrivstoff og E-fuel

Det er mulig å kombinere bruken av de biomassebaserte prosessene og E-fuel på flere måter. De kan utfylle hverandre for å oppnå en målsetting om mengde syntetisk drivstoff.

Teknologiutviklingen av Fischer Tropsch-prosessen kan ha positiv innvirkning både på biojetdrivstoff og E-fuel. De kan brukes sammen i industrien, hvor varme fra biomasseproduksjon blir brukt videre i E-fuel produksjon (Valestrand, 2019).

Den europeiske miljøorganisasjonen Transport and Environment har laget en prognose for hvordan flysektoren kan gi nullutslipp av CO₂. Figur 8 viser estimert CO₂-utslipp fram mot 2050, og hvordan virkemidlene sammen kan redusere utslippene til null. Hvis man fortsetter å bruke fossile drivstoff uten spesielle tiltak, er det estimert en økning av utslipp fram mot 2050, slik den grønne kurven viser. Den røde kurven viser virkninger på disse utslippene dersom det er en årlig

energieffektivisering på 0,2% årlig. På grafen kan man se at utslippene blir litt redusert. Den mørkeblå kurven viser hvordan nye fly vil redusere utslippene. Denne effekten starter først rundt 2040. Den gule kurven viser forventet utslippsreduksjon av en karbonavgift på 1500NOK/tonn. Den grå kurven viser ytterligere utslippsreduksjoner ved bruk av biojetdrivstoff, og den lyseblå kurven viser reduksjonsutslippene for bruk av E-fuel. Alle virkemidlene reduserer CO₂-utslippene, og E-fuel er virkemiddelet som gjør det mulig å oppnå fossilfri luftfart innen 2050, i denne prognosen (Transport & Environment, 2018).



Figur 8: Prognose for utfasing av karbon i luftfart med ulike virkemidler (Transport & Environment, 2018).

2.4 Situasjonen i Norge med hensyn til produksjon av flydrivstoff

I dette delkapittelet skal jeg se på fornybar kraftproduksjon i Norge og muligheter for å produsere avansert biojetdrivstoff og E-fuel. Avinor eier, driver og utvikler mesteparten av luftfarten i Norge, og Avinor er igjen eid av Samferdselsdepartementet (Avinor, u.å.-c).

Regjeringen utvikler samferdselspolitiske og miljøpolitiske planer, og skriver for eksempel *Nasjonal transportplan* (Samferdselsdepartementet, 2021). NVE er norsk statlig forvalter av fornybar vannkraft og annen fornybar energi (NVE, 2021). Statkraft produserer fornybar energi, og er eid av Nærings- og fiskeridepartementet (Statkraft, u.å.-a). Andre viktige aktører er miljøorganisasjoner som Naturvernforbundet (Naturvernforbundet, u.å.) og forskningsinstitutter som SINTEF (SINTEF, u.å.).

Det er to bedrifter, Nordic Blue Crude (Nordic Electrofuel, 2021) og Norsk E-fuel (Norsk E-fuel, 2020b) som planlegger å starte opp produksjon av E-fuel i Norge, på industriområdet Herøya ved Porsgrunn, i løpet av henholdsvis 2022 og 2023 (Teknisk Ukeblad, 2020). Disse vil bli verdens første E-fuel anlegg i fullskala (Sunfire, 2020). Grunnen til at de bygges i Norge, kan være at E-fuel er energikrevende, og Norge har mye fornybar energi som kan utnyttes til å produsere E-fuel. Herøya har en god beliggenhet for E-fuelproduksjon, da det er et allerede eksisterende industriområde med mye tilgjengelig elektrisitet og direkte tilgang til havn (Herøya Industripark, u.å.). I tillegg er det også kun to timer og kjøre inn til Oslo (Google Maps, u.å.). I Norsk E-fuel er det fire samarbeidspartnere som har gått sammen for å realisere E-fuel-industri på Herøya. En av dem, tyske Sunfire, jobber med å produsere hydrogen til hydrolyse til bruk for E-fuel. For å produsere 100 millioner liter drivstoff trenger sunfire 20 Megawatt med fornybar energi. Climeworks, jobber med å fange karbondioksid direkte fra luften. Per i dag fanges det inn et par tusen tonn CO₂ fra luften hvert år med Climeworks. Når E-fuel starter opp, skal det i begynnelsen samles inn 25000 tonn CO₂ årlig, og det skal gå opp til 100 000 tonn i løpet av 3-4 år. Valinor er norsk investor i fornybar energi og Paul Wurth jobber med lokasjon og teknisk gjennomføring av anlegg.

I Norge er det mest økonomisk lønnsomt å plassere E-fuel produksjon steder med høy produksjon og lite kraftoverføringsmuligheter, men det må også være mulig å transportere drivstoffet på vei eller båt bort fra investeringsstedet. Investeringskostnadene for E-fuel på Herøya ligger på om lag 5,5 milliarder NOK (60% av dette skal dekkes av Norge). Det er også lagt opp til å ta opp lån for å dekke noe av kostnadene (Norsk E-fuel, 2020a).

Kapittel 3 Metode

I denne oppgaven er det gjort tekno-økonomiske beregninger for E-fuel og biojetdrivstoff for kostnader, råvareforbruk og el-behov. Alle beregningene er gjort per liter jetdrivstoff og deretter skalert opp til det antall liter som er nødvendig for å dekke det estimerte jetdrivstoffbehovet i 2040. De ulike teknologiene er valgt for å kunne finne spesifikke totale kostnader, og for å kunne sammenligne kostnader mellom ulike teknologier. Jeg har utarbeidet to scenarioer for fornybart flydrivstoff (Scenario 1 biojetdrivstoff og scenario 2 E-fuel), og et basescenario for sammenligningens skyld.

3.1 Drivstoffbehov i 2040

Tabell 1: Egenskaper til fossile drivstoff

	Verdi	Enhet	Kilde
CO ₂ -utslipp	3,15	tonn CO ₂ /tonn	(Green Air, 2021)
Massetetthet	0,8	kg/liter	(Airliners, 2007)
Energitetthet	34,69	MJ/liter	(Air BP, 2000)

Prognoser gjort av Avinor, estimerer at det i 2040 vil slippes ut 2,6 millioner CO₂-ekvivalenter i luftfart i Norge, forutsatt bruk av fossilt jetdrivstoff. For å få med all langdistansetransport valgte jeg all kommersiell lufttransport med tilknytning til Norge (Norge, interkontinentalt og Europa). Det er lagt inn forutsetninger om forventet trafikkvekst og effektivisering. Prognosen ser på CO₂-ekvivalenter knyttet opp mot bruk av fossilt jetdrivstoff, og det er ikke lagt inn forutsetninger om fornybart drivstoff, selv om dette er forventet at vil skje (Avinor, 2020).

3.2 Scenario 1: Biojetdrivstoff

3.2.1 El-behov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff

Jeg har brukt Serrano og Sandquist (2017) for å gjøre utregninger av el-behov for Fischer Tropsch og etanolfermentering. Serrano og Sandquist gjør et anslag for hydrogenbehov for Fischer Tropsch. De angir ikke tall på hydrogenbehov for etanolfermentering. Siden begge prosessene bruker hydrogen fra naturgass, og bruker hydrogenet til å oppgradere til ferdig produkt, har jeg valgt å sette verdien for hydrogenbehov for etanolfermentering til det samme som for Fischer Tropsch.

For utregninger av hydrogenbehov har jeg tatt utgangspunkt i en normalmeter³ (Nm³), som vil si den hydrogenmengden man finner i en m³ ved trykk 1 bar og temperatur 0 grader celsius.

Tabell 2: Elbehov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff Fischer Tropsch og etanolfermentering (Serrano & Sandquist, 2017)

		Enhet
Elbehov Fischer Tropsch	33	kWh/GJ
Hydrogenbehov Fischer Tropsch	522 – 1160	Nm ³ / m ³
Elbehov Etanolfermentering	6	kWh/GJ
Hydrogenbehov etanolfermentering	522 – 1160	Nm ³ / m ³

3.2.2 Økonomiske beregninger biojetdrivstoff

De økonomiske beregningene for biojetdrivstoff (Fischer Tropsch og etanolfermentering) er gjort med utgangspunkt i Serrano og Sandquist (2017). De estimerer kostnader for en rekke underkategorier, som for eksempel kostnad for frakt og lagring og timelønn for ansatte, og samler deretter disse i investeringskostnader (I) og variable kostnader (K, kalt C i kilden). Investeringskostnadene er gitt ut ifra ulike anleggsstørrelser, og de variable kostnadene er gitt som dollar/GJ. I mine beregninger går jeg ut fra disse estimatene. De totale kostnadene blir: $I + K$

For å gjøre investeringskostnadene om til årlige kostnader bruker jeg annuitetsmetoden. I denne metoden beregnes årlig kapitalkostnad (A) med følgende formel, der I_0 er investert beløp det første året, r er kalkulasjonsrenten og n avskrivningstiden

(Hohle, 2001):

$$A = I_0 * \frac{r}{100} * \frac{(1 + r)^n}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^n - 1}$$

Forutsetningene som jeg la til grunn for å kunne regne ut dette, var en kalkulasjonsrente på 7% (Serrano & Sandquist, 2017) og avskrivningstid på 25 år (National Renewable Energy Laboratory, u.å.) Serrano and Sandquist bruker 25år som avskrivningstid (2017).

Investeringskostnadene avhenger av hvor mange fabrikker som skal bygges, og hva slags kapasitet hver av fabrikkene skal ha. Fabrikkene varierer i størrelse fra å ha kapasitet til 150MW råvare, til 300MW, 450MW og den største størrelsen som er 600MW (Serrano & Sandquist, 2017). Jeg har valgt å se på den fabrikkstørrelsen som har størst kapasitet, siden energibehovet ligger på hele 10TWh, som vil si at fabrikk med størst kapasitet ikke dekker behovet, og at med størst kapasitet trengs det likevel flere fabrikker. I tillegg vil kostnadene per enhet gå ned ved økende kapasitet, noe som gjør at de totale kostnadene blir optimaliserte (Serrano & Sandquist, 2017).). I artikkelen blir investeringskostnaden regnet for kapasitet for råvare, og ikke for ferdig produkt. For å gå over til ferdig produkt setter man inn effektiviseringsgraden for

biojetdrivstoffproduksjon (O'Malley et al., 2021). Effektiviseringsgraden er i denne oppgaven regnet ut ved å ekstrapolere O'Malley et al.'s effektiviseringstall for biomasseråvare fra 2025-2035 fram til 2040. Dette ble gjort ved å fortsette trenden fra tall i rapporten.

Tabell 3: Samlede kostnader for biojetdrivstoffproduksjon med Fischer Tropsch og etanolfermentering.

	Antall	Enhet	Kilde
Investeringskostnaden for en fabrikk med installasjonskapasitet på 600MW	1606,6 millioner	US\$	(Serrano & Sandquist, 2017)
1 GJ	0,28	MWh	(Unitjuggler, u.å.)
Total variabel kostnad per GJ med fabrikkstørrelse på 600MW	61,77	US\$/GJ	(Serrano & Sandquist, 2017)
Total permanent investering per fabrikk med installasjonskapasitet 600MW	450,9million	US\$	(Serrano & Sandquist, 2017)
Total variabel kostnad	55,04	US\$/GJ	(Serrano & Sandquist, 2017)
Brukstimer	6000	Timer/året	(Brynildsen & Næss, 1992)

3.3 Scenario 2: E-fuel

3.3.1 El-behov for E-fuel

De ulike prosessene i E-fuel produksjon er elektrolyse, karbonfangst og syntese og kondisjonering med Fischer Tropsch prosessen. Alle disse leddene krever elektrisitet, og samlet sett viser de hvor mye elektrisitet som trengs for å produsere en liter E-fuel. Det er gjort en forutsetning om at elektrolyseeffektiviteten er 80% (Brynolf et al., 2018). I resultatdelen har jeg både brukt et samlet samlet tall for kraftbehovet. Jeg har regnet ut el-behovet for E-fuel på to måter. I den første regnet jeg ut el-behovet for hver delprosess, og i den andre regnet jeg på el brukt mot hvor mye drivstoff som blir produsert for alle prosessene samlet. I begge fremgangsmåtene bruke jeg en gjennomsnittverdi mellom høy og lav temperatur i Fischer Tropsch prosessen.

Tabell 4: Elbehov og hydrogenbehov for produksjon av E-fuel

	Verdi	Enhet	Kilde
H ₂	1,17	GJ H ₂ /GJ drivstoff	(The Royal Society of Chemistry, 2021) som er tilleggsfil til (Millinger et al., 2021)
CO ₂	0,071	GJ CO ₂ /tonn drivstoff	(The Royal Society of Chemistry, 2021) som er tilleggsfil til (Millinger et al., 2021)
Elbehov for karbonfangst fra punktutslipp	250-300	kWh/tonn	(Jackson & Brodal, 2019)
Elbehov LT (170-220 grader) DAC	1750 + 250	kWhel/tCO ₂	(Fasihi et al., 2019)
Elbehov HT (320 grader +)	1535	kWhel/tCO ₂	(Fasihi et al., 2019)
1 kg hydrogengass	33	kWh	(NVE, 2019)
33kWh hydrogengass	0,1188	GJ	(Unitjuggler, u.å.)
1kg hydrogengass	41,4	kWh	(Lichner, 2020)
Effektivitet	80	%	(Statkraft, 2019)
Brukstimer	6000	timer/år	(Brynildsen & Næss, 1992)

3.3.2 Økonomiske beregninger for E-fuel

De økonomiske beregningene for E-fuel er gjort hovedsakelig med bakgrunn i Brynolf et al. (2018), og det er regnet ut årlige investeringskostnader og variable kostnader.

Formelen nedenfor viser de årlige produksjonskostnadene. Investeringskostnadene er gjort om til årlige kostnader ved hjelp av annuitetsmetoden. Forutsetningene som er lagt til grunn i Brynolf et al. (2018) for å bruke denne formelen er en kalkulasjonsrente på 5% og avskrivningstid på 25 år.

De totale kostnadene regnes ut ifra årlige investeringskostnader og variable kostnader. Årlige investeringskostnader (I) inkluderer elektrolysør, drivstoffsyntese og anleggskostnader. De variable kostnadene (K, FVD) inkluderer forvaltning, drift og vedlikeholdskostnader (FDV) for elektrolysør og drivstoffsyntese samt kostnader for stack, elektrisitet, vann og karbonfangst. Stack betyr serier av hydrogenbrenselceller som brukes i elektrolysen (Bjartnes et al., 2021). Jeg ser bort i fra profitt knyttet opp mot salg av varme og oksygen i likhet med Brynolf et al. (2018). Dette gjøres fordi profitten er usikker (fra ingen påvirkning til 10% reduksjon i variable kostnader i noen studier), og er forventet å ha liten påvirknings på kostnadene, som man kan se ut i fra tabell 6 i artikkelen.

$$\text{Totale kostnader} = I_{\text{elektrolysør}} + I_{\text{drivstoffsyntese}} + I_{\text{anlegg}} + \text{FDV}_{\text{elektrolysør}} + \text{FDV}_{\text{drivstoff syntese}} + K_{\text{stack}} + K_{\text{elektrisitet}} + K_{\text{vann}} + K_{\text{CO}_2\text{-fangst}}$$

Tabell 5: Produksjonskostnader for E-fuel (Brynolf et al., 2018).

Investeringskostnader		
$I_{\text{elektrolysør}}$	1100(600-2600)	€ ₂₀₁₅ /kW electrolyser
$I_{\text{drivstoffsyntese}}$	400(300-700)	€ ₂₀₁₅ /kWh fuel
I_{anlegg}	1100 + 400 = 1500	€ ₂₀₁₅ /kW
Variable kostnader		
$FDV_{\text{elektrolysør}}$	38,5	€ ₂₀₁₅ /kW elc
K_{stack}	1500	€ ₂₀₁₅ /kW
$K_{\text{elektrisitet}}$	45	€ ₂₀₁₅ /MWh
K_{vann}	1	€ ₂₀₁₅ /tonn
$FDV_{\text{drivstoffsyntese}}$	120	€ ₂₀₁₅ /tonn
$K_{\text{karbonfangst(punktutslipp)}}$	30	€ ₂₀₁₅ /tonn
$K_{\text{karbonfangst(direkte fra luft)}}$	950	€ ₂₀₁₅ /tonn

Hvis de to fremgangsmåtene for karbonfangst kjøres sammen er det estimert at ca. 90% av karbonet vil hentes fra punktutslipp og ca. 10% direkte fra luft i 2040. Dette er basert på forutsetninger gjort av International energy agency (2021).. Tallene er framkommet ved å finne prosentandelen av karbonfangst direkte fra luft estimert for 2030 og for 2050, og deretter ta gjennomsnitt for å få et estimat for 2040. I 2030 er det estimert at direktefangst fra luft kommer til å utgjøre 90Mt CO₂, mens totale utslipp er på 1670Mt CO₂, noe som vil si at direktefangst utgjør 5,39%. I 2050 er estimatet 630Mt CO₂ for fangst direkte fra luft og 7600 Mt CO₂ totalt, noe som gir prosentandel på 12,96% for karbonfangst fra punktutslipp

3.3.3 Kraftsystemeffekter i E-fuel-scenariet (Balmorel)

Balmorel er en energisystemmodell som ser på strøm- og varmesektoren i et internasjonalt perspektiv. Det er en Bottom-up modell laget for å modellere endringer i energisystemet. Modellen bruker gitte forutsetninger for å kunne lage et estimat av hvordan en tenkt situasjon vil utvikle seg, og estimatet kjøres deretter gjennom dataprogrammet GAMS. Balmorel ble utviklet i Danmark og blir i Norge videre utviklet ved NMBU. Balmorel brukes i forskningsartikler og som planleggingsverktøy for bedrifter (Wiese et al., 2018). Et eksempel på en rapport som bruker Balmorel er Nordic Energy Technology Perspectives (2016).

Jeg bruker Balmorel for å beregne kraftsystemeffekter ved produksjon av E-fuel. Det er lagt inn tre alternativer for sammenligning i Balmorel. Basealternativet/basescenariet, er å fortsette å bruke fossilt drivstoff. De to andre alternativene er varianter av Scenario 2 (E-fuel), hvor alternativ 1 er å bruke 100% E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp, mens alternativ 2 er å bruke 100% E-fuel med karbonfangst direkte fra luft. Balmorelmodellen er kjørt for 2040, da dette er referanseåret for oppgaven. Data er beregnet utover fire uker (uke 4, 17, 30 og 43), som er jevnt fordelt utover året. Innenfor hver uke er det hentet inn data fra 72 timer med tidsaggregering (mandag, tirsdag og lørdag). Jeg har satt en begrensning om at eventuelle investeringer i ny kraft skal skje i regionene Sørøst-Norge (NO1) og Sørvest-Norge (NO2), og forutsatt at etterspørselen er fordelt 50/50 mellom NO1 og NO2 med flat produksjonsprofil gjennom hele året. Det er antatt en karbonpris på 57euro per tonn. I tillegg til å beregne effekter på kraftprisene i Norge for de ulike alternativene har jeg også sett på hvordan alternativene vil slå ut med hensyn til import/eksport mellom Norge og henholdsvis Sverige, Danmark, Tyskland og UK. Jeg valgte å se på disse landene siden disse har størst innvirkning på kraftsystemet i Norge.

3.4 Basescenario: Fossile drivstoff

Jeg har regnet ut kostnadene ved å dekke flydrivstoffbehovet i 2040 med fossilt drivstoff, for å kunne sammenligne med de fornybare drivstoffene. Jeg hentet inn drivstoffpriser fra de siste 5

årene (april 2016 til februar 2021) og fant en gjennomsnittspris. Jeg har gått såpass langt tilbake i tid, fordi prisene nå grunnet korona er usikre, og ved å se på flere tall vil man få en gjennomsnittspris som er mindre påvirket av koronapandemien. (Index Mundi, 2021)

I tillegg til drivstoffkostnader må det for innenlandsturer i Norge betales en ekstra karbonavgift. Denne ligger på 545NOK/tonn CO₂.

Tabell 6: Priser fossilt drivstoff

		Enhet	Kilde
Priser fossil drivstoff	14,28	NOK/gallon	(Index Mundi, 2021)
1 US gallon lqd	3,785	Liter	(Wight Hat Ltd, 2020)
Karbonavgift	545	NOK/tonn CO ₂	(Avinor, u.å.-b)

3.5 Verktøy for sammenligning av scenarioer: Læringskurve og sensitivitetsanalyse

3.5.1 Læringskurve

Læringskurve er et begrep som brukes for fenomenet hvor kostnadene reduseres desto mer man lager av et produkt. Etter hver som man blir bedre kjent med teknologien går produksjonstiden ned og kostnadene for råstoff går også ned. Læringskurven er ofte bratt i starten og avtar etter hver som produksjonen øker. Det er vanlig å si at kostnadene går ned med en viss læringsrate for hver dobling i produksjon (MAAW, u.å.).

Kostnadene i Scenario 1 og 2 er regnet ut ifra dagens priser. For å komme opp til den årlige produksjonen som trengs for å dekke hele flydrivstoffbehovet må produksjonen dobles 31 ganger. Deretter kan vi legge til en læringsrate for hver dobling. Jeg har tatt utgangspunkt i en læringsrate på 8% for biojetdrivstoff (NHO luftfart, 2017), og brukte også samme antakelse for

E-fuel. Jeg har også sett på læringskurven som sammenhengen mellom læringsrate og modenhetsgrad TRL (kapittel 2.2). Dette gjør at E-fuel kan få en noe høyere læringsrate enn biojetdrivstoff.

3.5.2 Sensitivitetsanalyse

I sensitivitetsanalysen er de totale kostnadene delt opp i kostnadskomponenter. Deretter blir hver komponent redusert og økt med 10 og 20%, samtidig som de andre komponentene blir holdt stabile. Ved å gjøre dette kan man se hvor stor effekt en endring av hver av komponentene vil ha å si for de totale kostnadene (Stavseth, 2020).

3.6 Forutsetninger om inflasjon og valuta

Det er ikke hensyn til inflasjon, men opererer med dagens kroner.

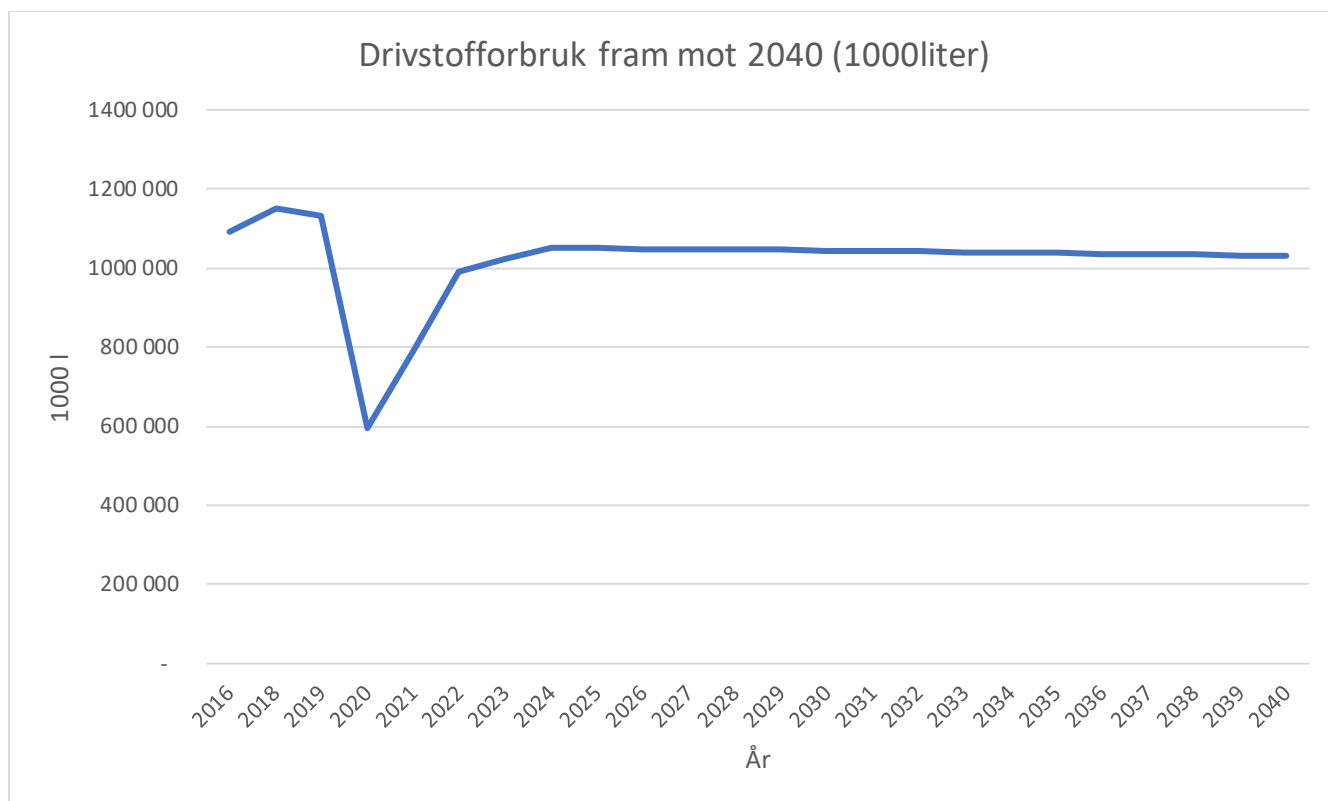
Om valutakurser: Der hvor prisene er omgjort fra dollar til norske kroner, er det lagt inn en valutakurs på 8,29NOK per US\$. Denne valutakursen er hentet den 6.mai 2021. For euro er det lagt inn en valutakurs på 10,00 NOK per €. Denne valutakursen er også hentet den 6.mai 2021. (Valutakalkulator, 2021).

Kapittel 4: Resultater

4.1 Drivstoffbehov i 2040

Det estimerte drivstoffbehovet i 2040 er basert på basescenarioets utslipp på 2,6 millioner tonn CO₂-ekvivalenter (se kapittel 3.1). Det kreves 3.15 tonn CO₂-ekvivalenter for å produsere ett tonn jetdrivstoff (tabell 1), noe som vil si at det totale drivstoffbehovet er 825 397 tonn.

Massetettheten til biodrivstoff er 0,8kg/liter (tabell 1), som gir totalt drivstoffbehov på 1 031 746 032liter. Figur 9 viser forbruket fra 2016 til 2020 og estimert forbruk fram til 2040. Figuren baserer seg på Avinor sine beregninger om CO₂-ekvivalenter utslipp. På grafen ser man en tydelig nedgang i drivstofforbruk i perioden 2020 til 2024. Denne nedgangen skyldes koronapandemien og strenge reguleringer/ frarådinge fra å fly. Avinor, bruker Den internasjonale organisasjon for lufttransport (IATA) prognoser i sine beregninger til å si at luftfarten i Norge vil gå til tilbake til førkoronanivå i 2024. Det er usikkerhet om langtidsvirkningene av korona, men jeg følger her Avinors estimer.



Figur 9: Drivstoffbehov for innenlands, interkontinentale og europeiske flygninger til og fra Norge fra 2016, og estimert fram til 2040 (1000 liter). Basert på Avinor (2020).

Energitettheten til jetdrivstoff er 34,69MJ/liter (tabell 1), og med antall liter estimert gir dette et totalt energibehov på 35,79PJ for å dekke drivstoffbehovet. Volum regnes som 1000liter/m³ og dermed utgjør hele drivstoffbehovet 1 031 746 m³.

4.2 Scenario 1: Biojetdrivstoff

4.2.1 El-behov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff

Elbehovet for Fischer Tropsch-prosessen er 33,2kWh/GJ (tabell 2), og for etanolfermentering 6kWh/GJ (tabell 2). For å produsere alt drivstoffet tilsvarer dette 9,94TWh, det vil si et samlet el-behov for Fischer Tropsch på 1,19TWh, og for etanolfermentering på 0,21TWh.

Hydrogenbehovet er $842 \text{ Nm}^3 / \text{m}^3$ (tabell 2). Hydrogen har en vekt på $0,0361 \text{ kg/m}^3$ (tabell 2). Totalt antall m^3 drivstoff er $1\,031\,746 \text{ m}^3$ (kapittel 4.1). Dette gir et hydrogenbehov på $77\,051,62$ tonn hydrogen for Fischer Tropsch (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, u.å.). Hydrogenbehovet for etanolfermentering blir også $77\,051,62$ tonn hydrogen (se kapittel 3.2.1).

4.2.2 Kostnader biojetdrivstoff

Kostnader biojetdrivstoff (Fischer Tropsch)

Energibehovet er $35,77 \text{ PJ}$, og ved 600 MW installert kapasitet og 6000 brukstimer per fabrikk (tabell 3) og en effektiviseringsgrad på 66% , kan alt drivstoffet produseres ved 4 fabrikker. Total årlig investering på å sette opp 4 fabrikker som kan produsere nok til å dekke hele drivstoffbehovet er omregnet fra dollar $4,54$ milliarder NOK. De variable kostnader er $61,67 \text{ dollar/GJ}$ (kilde 4). Total energibruk er $35,79 \text{ PJ}$, som gir en total variabel kostnad omregnet fra dollar på $18,17$ milliarder NOK. Samlet blir den totale årlige kostnaden $22,71$ milliarder NOK.

Kostnader etanolfermentering

Etanolfermentering har lik installert effekt og brukstimer som Fischer Tropsch (tabell 3), noe som gjør at akkurat som med FT skal det investeres i 4 fabrikker. Dette gir en årlig investeringskostnad omregnet fra dollar på $1,27$ milliarder NOK. De variable kostnader er $55,04 \text{ dollar/GJ}$ (kilde 4), og total energibruk er $35,79 \text{ TJ}$, som gir en total variabel kostnad omregnet fra dollar på $16,3$ milliarder NOK. Den totale årlige kostnaden blir $17,57$ milliarder NOK.

Kostnader biomassekombinasjon

Det er også mulig å dekke behovet med en kombinasjon av biojetdrivstoff som blir produsert gjennom en Fischer Tropsch-prosess, og en etanolfermenteringsprosess. Hvis man dekker halvparten av behovet med hver av teknologiene, og ellers holder alle andre variabler like, blir

investeringskostnadene 2,18 milliarder NOK, og de variable kostnadene 17,24 milliarder NOK. Totale kostnader for å produsere alt drivstoffet med denne kombinasjonen blir 19,41 milliarder NOK.

4.3 Scenario 2: E-fuel

4.3.1 Elbehov og hydrogenbehov for E-fuel

Det totale energibehovet blir som et gjennomsnitt av høy og lav temperatur (kapittel 2.1.2), 17,32TWh for karbonfangst fra punktutslipp og 22,44TWh fra direktefangst av CO₂ fra luft (Schmidt & Weindorf, 2016).

Tabell 7: Elbehov for E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp og direkte fra luft.

	Totalt energibehov
Beregnet fra en kilde som angir samlet el-behov (Schmidt & Weindorf, 2016)	
Karbonfangst fra punktutslipp (Scenario 2, alternativ 1)	17,32TWh
Direktefangst av karbon fra luft (Scenario 2, alternativ 2)	22,44TWh

4.3.2 Kraftsystemeffekter i E-fuel-scenarioet (Balmorel)

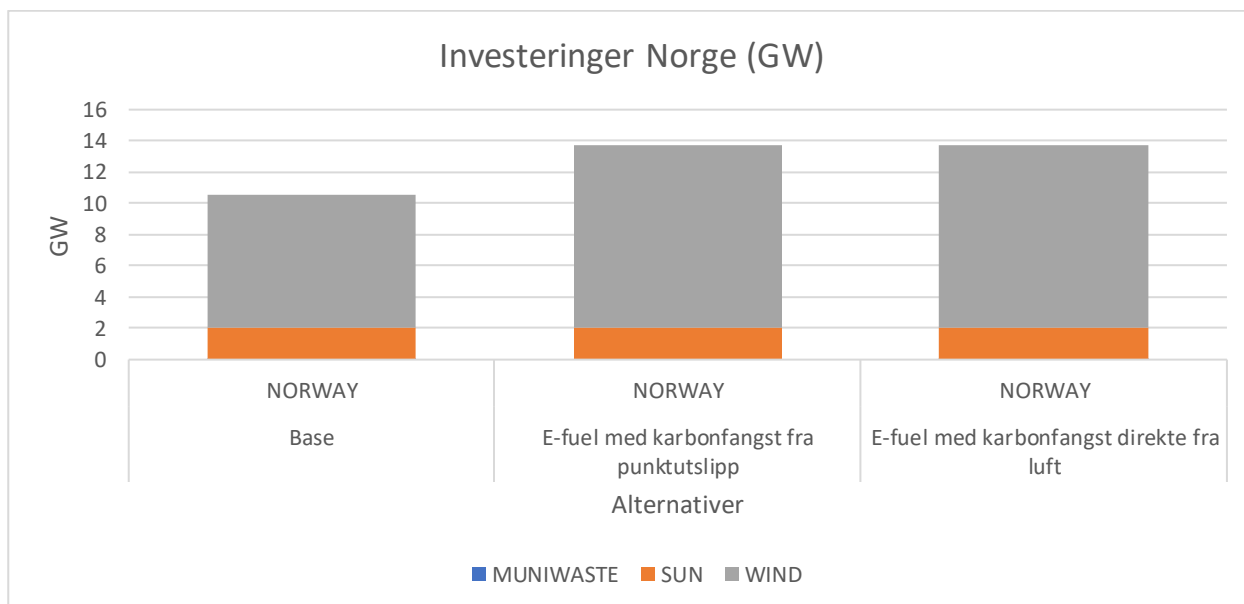
Det totale el-behovet for E-fuel settes inn i Balmorel-modellen. I Balmorelmodellen regner vi med elbehovet for karbonfangst fra direkteutslipp (alternativ 1) med verdi på 17TWh, elbehovet for karbonfangst direkte fra luft (alternativ 2) med verdi på 22TWh og basescenariet som er uten

E-fuel. Estimert strømpris som gjennomsnitt over året ligger på ca. 36€/MWh i basealternativet, 40 €/MWh for alternativ 1 og 41 €/MWh for alternativ 2. T

Investeringer i Norge per teknologi:

I alternativene hvor drivstoffbehovet dekkes av E-fuel, er investeringer i ny teknologi høyere enn i basealternativet hvor det ikke blir brukt E-fuel. Den prosentvise endringen vil i E-fuel alternativ 1 med 17TWh være 27,08% økning i alternativ 1 sammenlignet med basealternativet, og 27,09% økning i alternativ 2. Endringen i investeringer vil øke med ca. 3,15GW sammenlignet med basealternativet.

I tabell 10 under, under kan man se at størsteparten av økningen vil skje som investeringer i vindkraft. Det vil være minimal økning i håndtering av avfallsprodukter, og ingen nye investeringer i sol.



Figur 10: Investering i kraft i Norge i 2040

Elpriser i Norge pr spotområde – årsprofil

Tabellen er lagt ved som vedlegg til oppgaven av lesbarhetshensyn.

Elprisene varierer over året, og det er rimeligere strømpriser på sommer enn på vinter. Elprisene er høyest i januar med priser rundt 70-80 euro per MWh. I april ligger prisene på rundt 20-30 euro/MWh. I juli er gjennomsnittlig prisene lavest på rundt 10-15 euro/MWh. I oktober går prisene noe opp igjen til en pris på rundt 40-50 euro/MWh.

Elprisene har stor betydning for kostnader for E-fuel produksjon, og da spesielt for E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp. Dette kan man se i sensitivitetsanalysen, der endringer i elpriser gir størst utslag med karbonfangst fra punktutslipp, og størst etter karbonfangstkostnader for E-fuel med karbonfangst direkte fra luft.

Det er ikke så store forskjeller, men NO2 har litt høyere strømpris sammenlignet med NO1 i en årsutvikling. Prisøkningen ved E-fuel sammenlignet med fossilt drivstoff er større i NO2 enn NO1. Forskjellen er 13,5NOK/MWh fra alternativ 1 til alternativ 2. Fra basealternativet er forskjellen på henholdsvis 38,9 og 52,4 NOK/MWh.

Tabell 8: Kraftpriser for alternativene i regionene NO1 og NO2 (NOK/MWh)

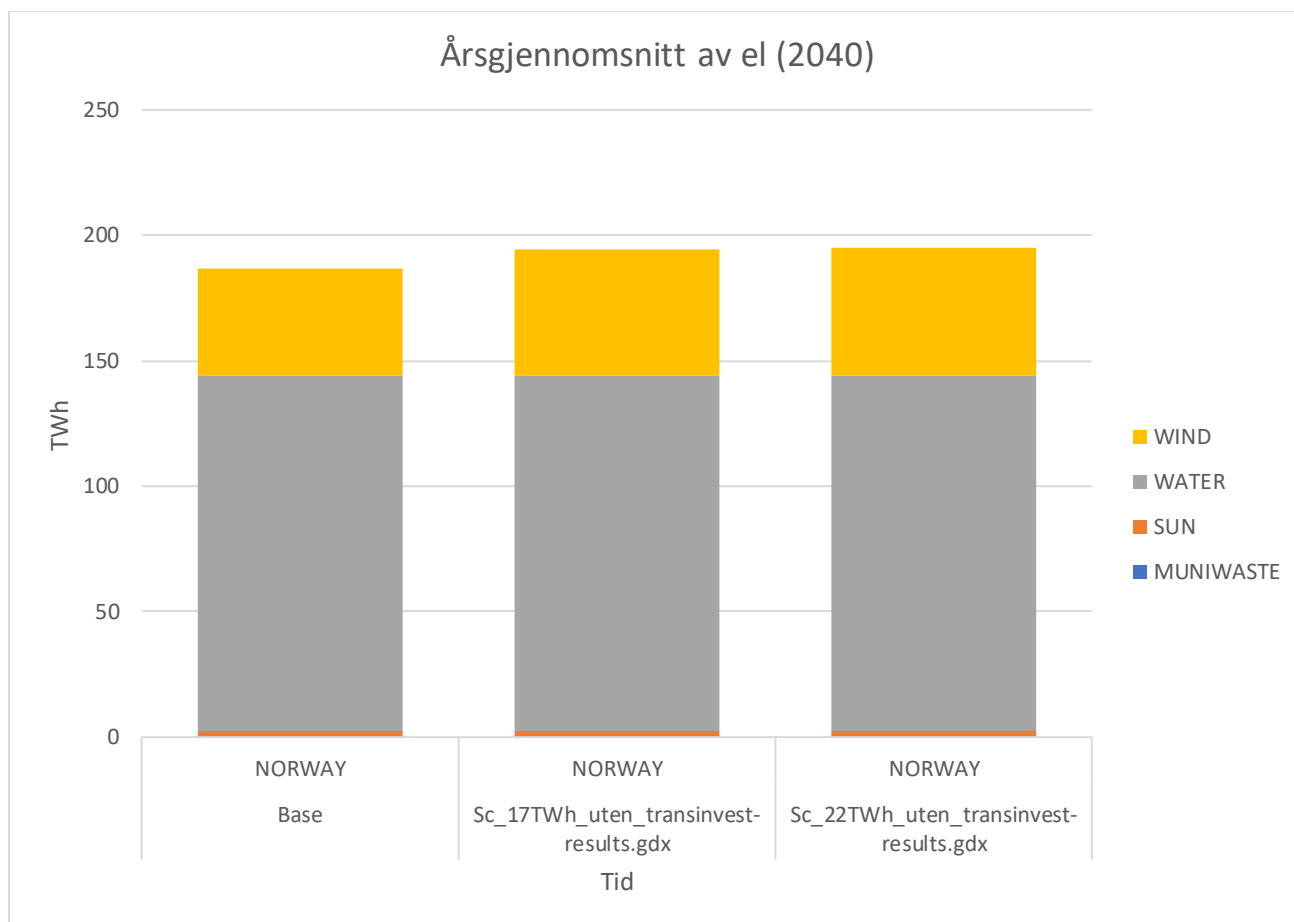
	Alternativ 1	Alternativ 2	Basealternativ
NO1	395,6	409,5	359,7
NO2	398,9	412,1	357,0
Gjennomsnitt 2040	397,3	410,8	358,4

Elmiksen i Norge – årsprofil

Ved en økning fra basealternativ til alternativ 1 og 2, vil det komme mer vind inn i elmiksen. De andre variablene vil ikke endre seg.

Muniwaste (bioavfall) vil gå litt ned fra basealternativ 0,206 til alternativ 1 og 2 0,196.

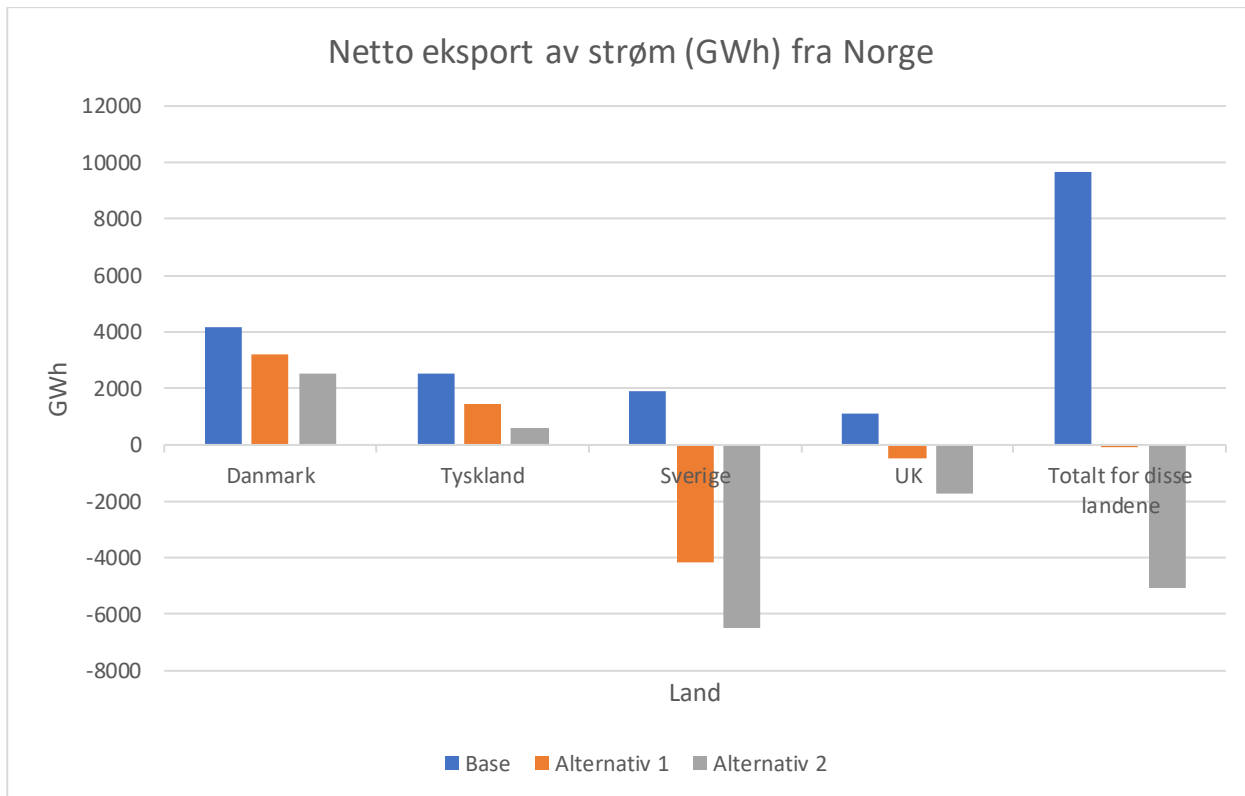
Muniwaste vil ikke være interessant for E-fuel, siden mesteparten går til fjernvarme. Figur 11 viser årsgjennomsnitt. og figur 12 viser årsutvikling.



Figur 11: Årsgjennomsnitt av el i 2040

Netto eksport årsgjennomsnitt

Norge vil gå fra netto eksport til Sverige og UK til å ha netto import i alternativ 1 og 2. Norge vil eksportere mindre strøm til Danmark og Tyskland i alternativ 1 og 2, sammenlignet med basealternativet. Totalt for landene vil det i basealternativ være netto eksport på ca 10TWh, i alternativ 1 vil det være omrent like stor import som eksport, og i alternativ 2 vil det være netto import på ca. 5TWh.



Figur 13: Netto eksport av strøm (GWh) fra Norge i 2040.

4.3.2 Kostnader for E-fuel

Det er ulik variabel kostnad for karbonfangst fra punktutslipp og karbonfangst direkte fra luften. Eneste forskjell i totale kostnader mellom de to scenarioene vil være kostnad for karbonfangst, og begge utregningene bruker samme formel.

Årlige investeringskostnader vil ved energibehovet på 10TWh (kapittel 4.1) og med 6000 brukstimer i året (tabell 1) være, omregnet fra euro, 4,3 milliarder NOK. De variable kostnader vil for E-fuel karbonfangst fra punktutslipp bli omregnet fra euro 14,8 milliarder NOK, og med karbonfangst direkte fra luft blir kostnadene omregnet fra euro 22,5 milliarder NOK.

Det er også mulig å dekke drivstoffbehovet ved en kombinasjon av E-fuel produsert med karbon hentet fra punktutslipp og direkte fra luften. Med en kombinasjon der 10% er direkte fra luft og 90% fra punktutslipp, blir årlige investeringskostnadene 4,3 milliarder NOK, de variable kostnadene 15,6 milliarder NOK, og de totale kostnadene for å dekke hele drivstoffbehovet blir 19,9 milliarder NOK.

4.4 Basescenario: Fossile drivstoff

De totale kostnadene for dekke drivstoffbehovet med fossile drivstoff blir 3,90 milliarder NOK årlig uten CO₂ avgift, 4,30 milliarder NOK årlig med CO₂ avgift, og 3,99 milliarder med forutsetning om kombinasjon av innenlands og utenlands flytrafikk (kapittel 3.1).

4.5 Sammenligning og mulige kombinasjoner av biojetdrivstoff og E-fuel

4.5.1 Totale kostnader, hydrogen og el-behov for biodrivstoff og E-fuel for 2040

Tabell 9: Elbehov og hydrogenbehov for å dekke drivstoffbehovet i 2040

	Hydrogenbehov	El-behov (TW)
E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp	41,88PPJ H ₂	17,32
E-fuel med karbonfangst direkte fra luft	41,88P H ₂	22,44
Biojetdrivstoff Fischer Tropsch	77 060tonn	1,19
Biojetdrivstoff Etanol fermentering	77 060tonn	0,21

Elbehov ved bruk av biomasse

Energibehovet for å produsere alt drivstoffet med biomasse vil med Fischer Tropsch prosessen kreve 1,19TWh, og for etanolfermentering trengs det 0,21TWh (tabell 7).

Hvis man sammenligner elbehovet for å produsere biojetdrivstoff med behovet for å produsere alt med E-fuel, er det veldig lite elektrisitet som trengs for å produsere biojetdrivstoff. Selv den mest elektrisitetskrevenne løsningen med biojetdrivstoff (Fischer Tropsch-prosess) trenger bare 6,8% av den elektrisiteten som trengs for den minst elektrisitetskrevenne løsningen (hvor det er karbonfangst fra punktutslipp) fra E-fuel. ‘

E-fuel vil ha innvirkning på el-markedet, som man kan se i kapittel 4.3. Endringen er tydelig, men ikke dramatisk stor.

Tabell 10: Prosentvis andel som el-behovet for biojetdrivstoff utgjør, sammenlignet med E-fuel

	Punktutslipp	Direkte fra luft
Fischer Tropsch	1,19TWh/17,32TWh = 6,8%	1,19 TWh /22,44 TWh = 5,3%
Etanolfermentering	0,21 TWh /17,32 TWh = 1,2%	0,21 TWh /22,44 TWh = 0,9%

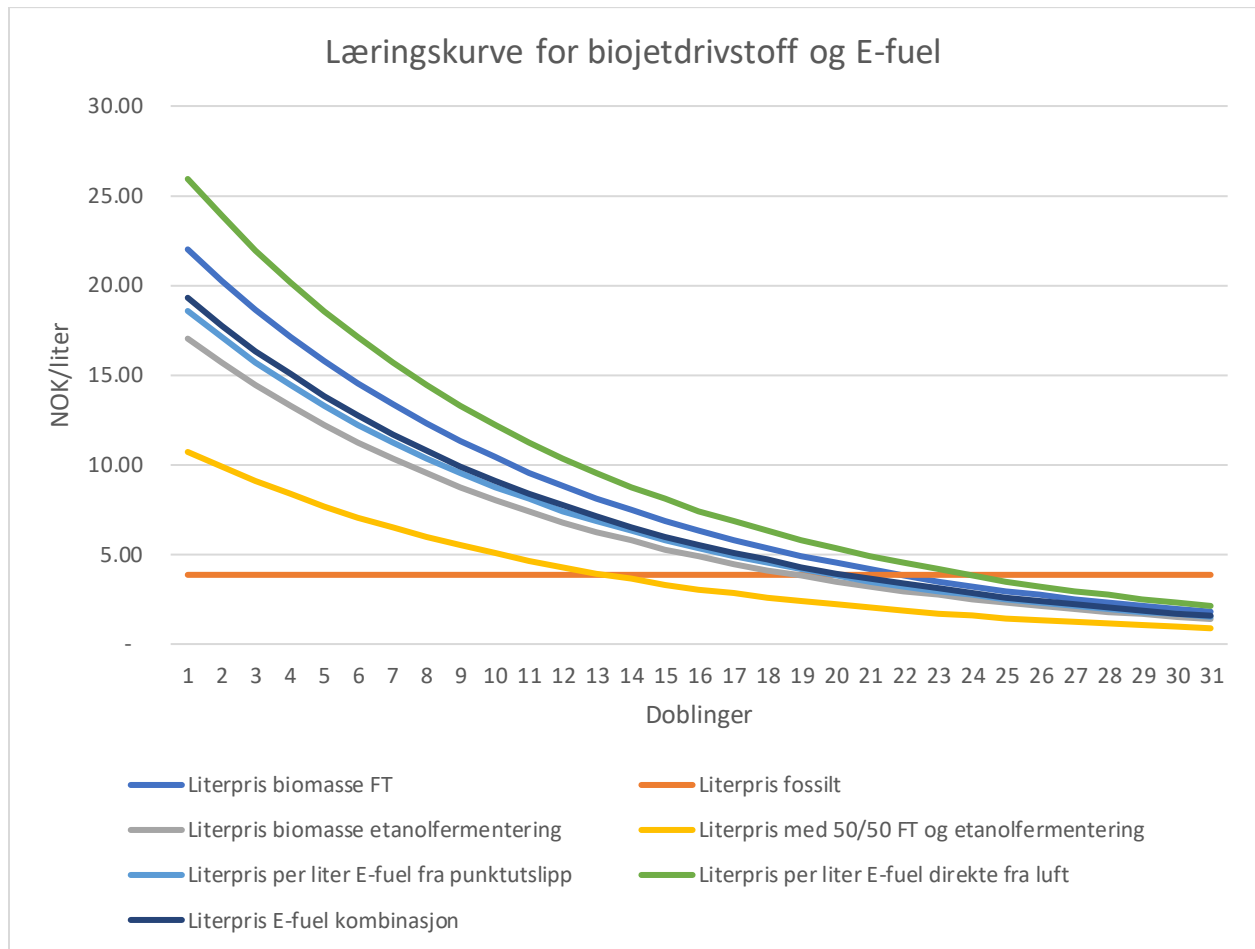
Tabellen under viser samlede kostnader for alle scenarioene, både investeringskostnader, variable kostnader, totale kostnader og kostnad per liter.

Tabell 11: Investeringskostnader, variable kostnader, samlede kostnader, elbehov og hydrogenbehov for biojetdrivstoff, E-fuel og fossilt drivstoff

	Investerings- kostnader (MrdNOK)	Variable kostnader (MrdNOK)	Totale kostnader	Totale kostnader per liter (NOK/liter)
Scenario 1				
Biojetdrivstoff Fischer Tropsch	4,54	18,17	22,71	22,01
Biojetdrivstoff Etanol fermentering	1,27	16,30	17,56	17,03
Biojetdrivstoff kombinasjon 50/50	2,8	17,24	19,41	18,8
Scenario 2				
E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp	4,30	14,86	19,16	18,57
E-fuel med karbonfangst direkte fra luft	4,30	22,46	26,76	25,93
E-fuel med 10% DAC og 90% punktutslipp	4,3	15,62	19,92	19,31
Basescenario (fossilt drivstoff)				
uten CO ₂ -avgift			3,90	3,71
med CO ₂ -avgift			4,30	4,16
Med CO ₂ -avgift på innenlands og uten CO ₂ -avgift interkontinentalt og Europa			4,05	3,92

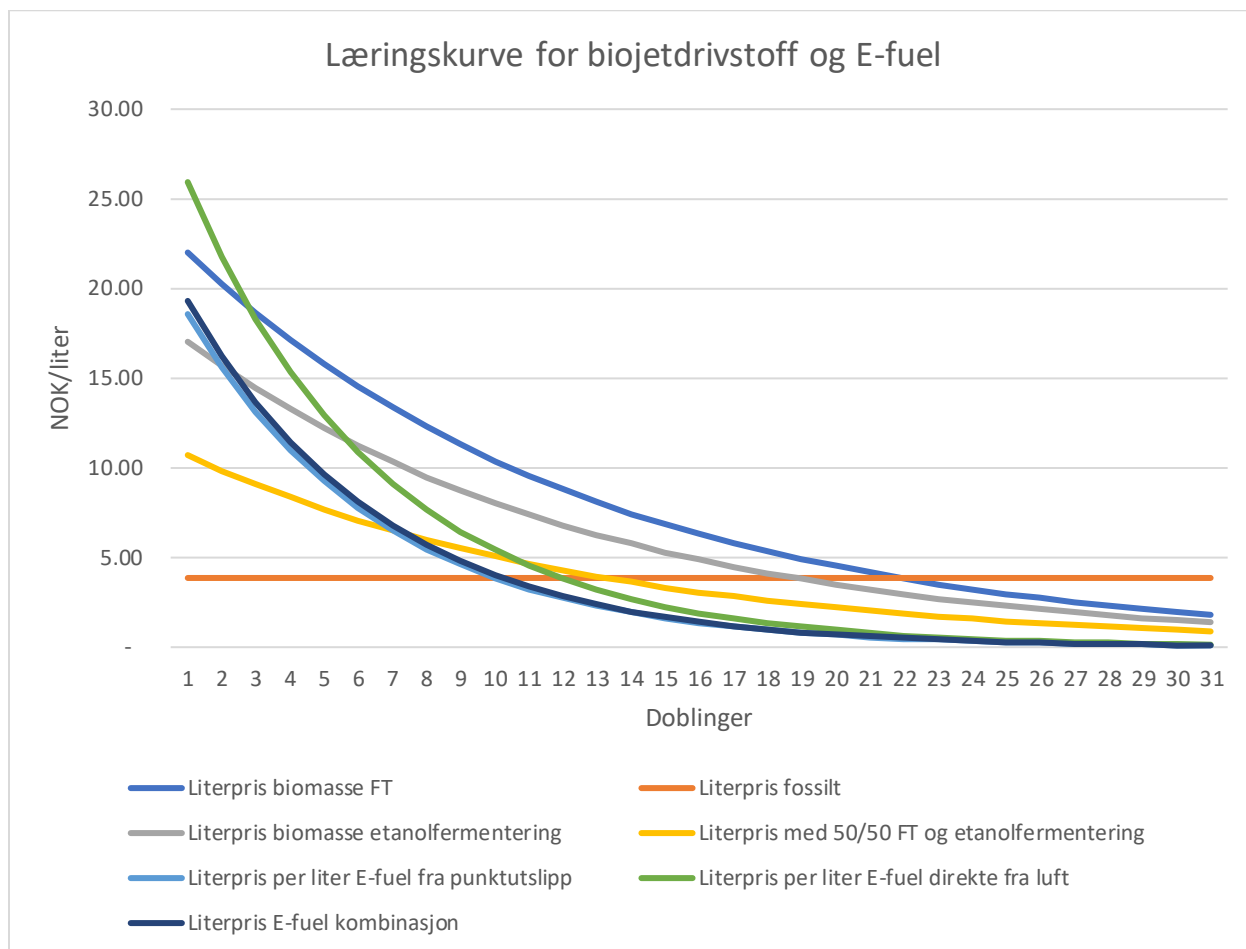
4.5.2 Læringskurver

E-fuel og biomasse antas i utgangspunktet å ha lik læringsrate: Det er satt inn en læringsrate på 8% for både biojetdrivstoff og E-fuel. Literprisen for kombinasjon vil bli konkurransedyktig med fossile drivstoff først, og E-fuel direkte fra luft blir sist konkurransedyktig.



Figur 14: Dekke drivstoffbehovet med biomasse eller E-fuel med 8% læringsrate

Vi antar så at E-fuel har en høyere læringsrate enn biomasse: læringsrate 8% for biojetdrivstoff og 16% for E-fuel. Med bakgrunn i at TRL for biojetdrivstoff i transportsektoren er høy, og hvordan dette kan påvirke E-fuel.



Figur 15: Dekke drivstoffbehovet med biojetdrivstoff og E-fuel. 8% læringsrate for biojetdrivstoff og 16% læringsrate for E-fuel.

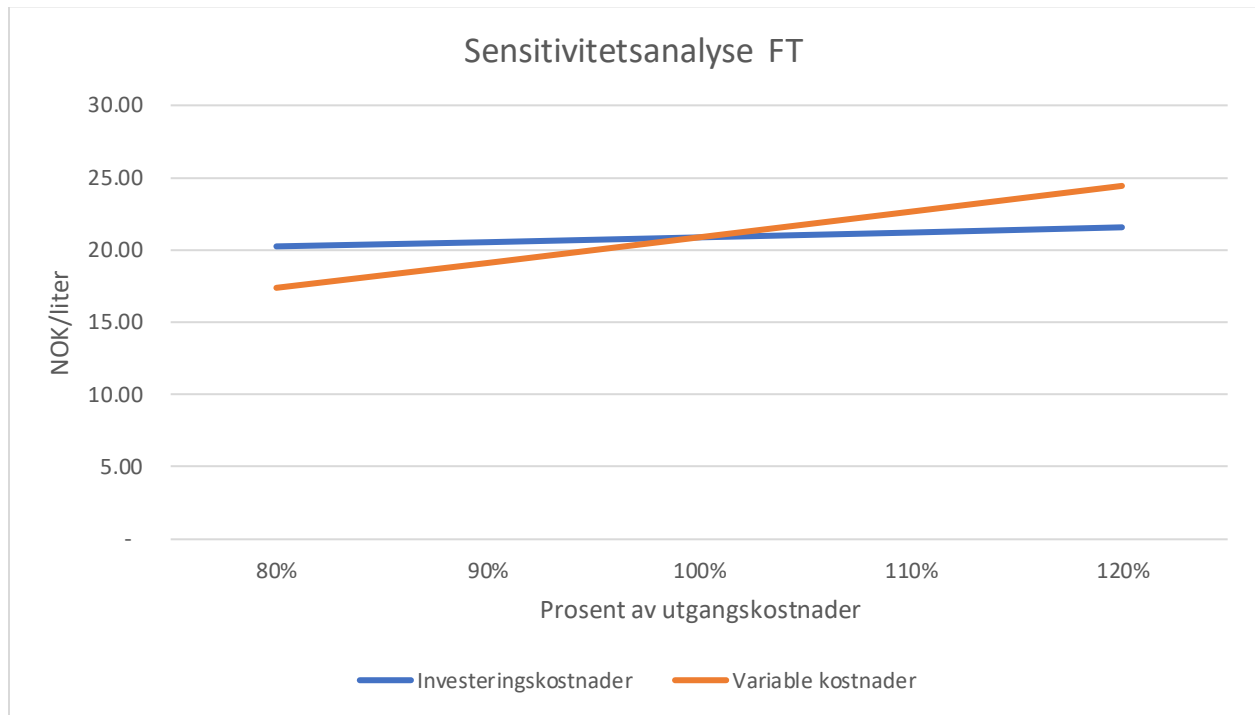
4.6 Sensitivitetsanalyse

4.6.1 Biojetdrivstoff

For biomasse er det gjort en sensitivitetsutregning for variable kostnader og investeringskostnader. Dette er samlevariabler som dekker flere ulike variabler. Disse er ikke tatt med hver for seg, da hver av disse ville ført til en større usikkerhet sammenlignet med å bruke tall fra rapporten direkte.

Biojetdrivstoff Fischer Tropsch

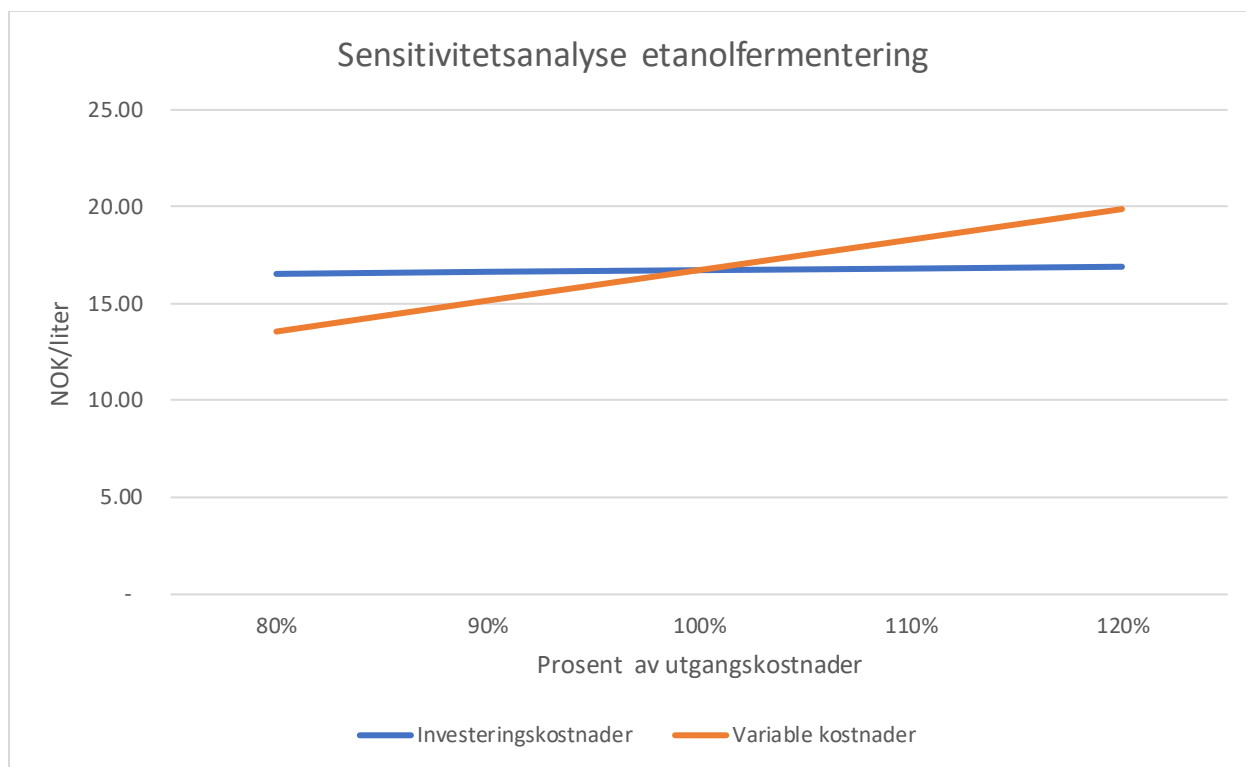
Endring i de variable kostnadene har stor innvirkning på literkostnaden for drivstoffet, mens endringer i investeringskostnadene har liten påvirkning på literkostnaden for biojetdrivstoff med Fischer Tropsch.



Figur 16: Sensitivitetsanalyse biojetdrivstoff med Fischer Tropsch

Biojetdrivstoff etanolvermentering

Likt som for Fischer Tropsch vil endring i variable kostnader påvirke literkostnaden i stor grad, mens endringen i investeringskostnaden vil ha liten innvirkning på literskostnad.

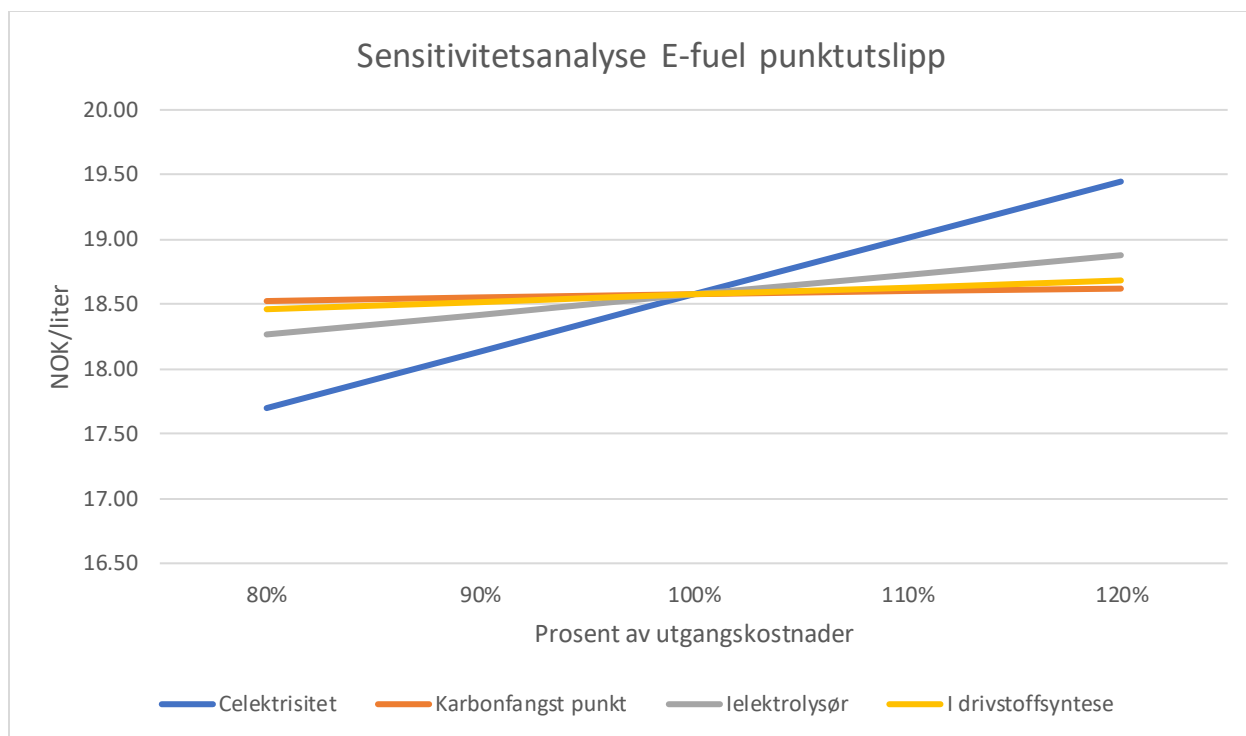


Figur 17: Sensitivitetsanalyse biojetdrivstoff etanolfermentering.

4.6.2 E-fuel

Karbonfangst fra punktutslipp

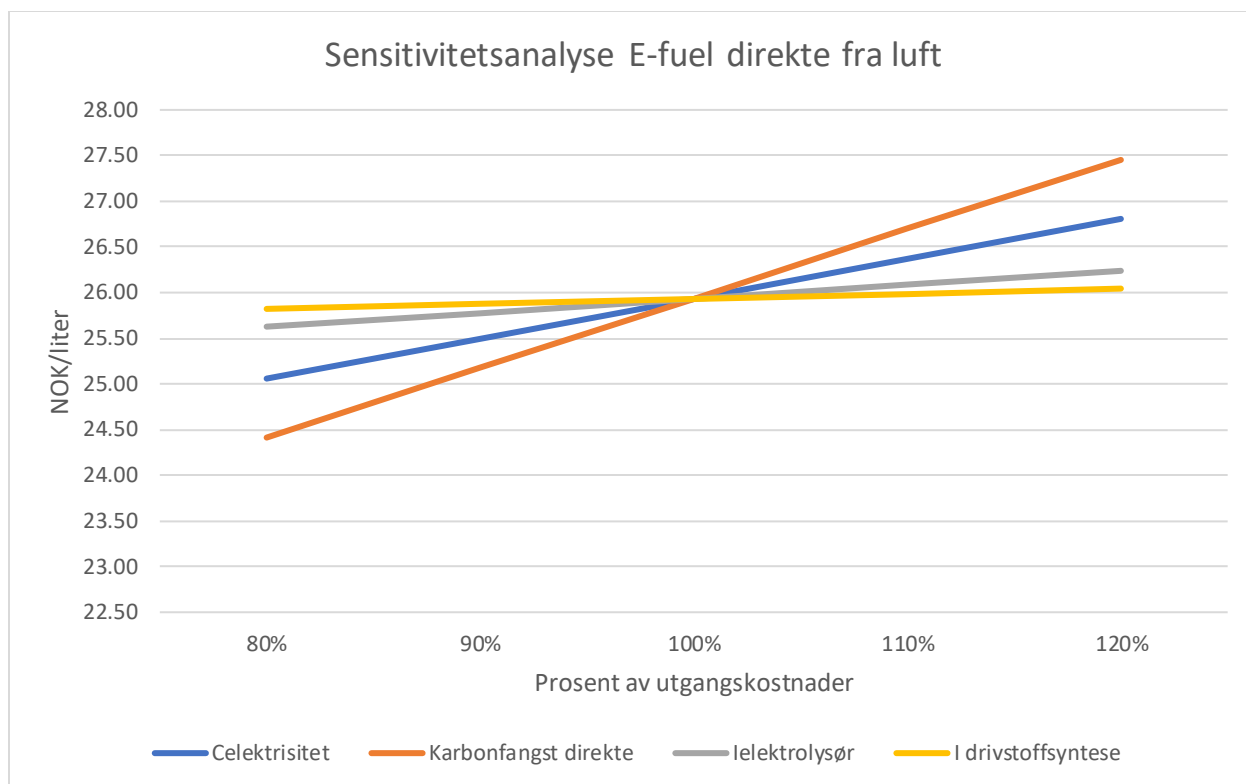
For E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp er det elektrisitetsprisen som påvirker den totale kostnaden mest. Investeringskostnader for drivstoffsyntese og karbonfangst fra punktutslipp endrer totalkostnadene lite hvis prisene på disse går opp eller ned.



Figur 18: Sensitivitetsanalyse E-fuel med karbonfangst fra punktutslipp.

Karbonfangst direkte fra luft

Prisen på karbonfangst har stor innvirkning på literprisen på E-fuel. Elektrisitetsprisen vil også virke inn i noe grad. Endringen i elektrisitetsprisen vil være lik for karbonfangst fra punktutslipp og direkte fra luft, men siden literprisen ved E-fuel direkte fra luft er høyere, vil endringen i prisen på elektrisitet ha lavere innvirkning på karbonfangst direkte fra luft enn på karbonfangst fra punktutslipp. Endring i investeringskostnader for elektrolysør og drivstoffsyntese har liten påvirkning på literkostnaden for produksjon av E-fuel.



Figur 19: Sensitivitetsanalyse E-fuel med karbonfangst direkte fra luft (NOK/liter)

4.7 Ressursgrunnlag

Alt drivstoffet kan dekkes fra biomasse. I teorien kan alt biojetdrivstoffet også dekkes av biomasse produsert i Norge.

Det trengs 10TWh biodrivstoff. Biodrivstoffet som produseres må være avansert, og biomassen som hentes ut, må være beregnet for energiformål.

Drivstoffbehovet kan også dekkes av E-fuel. Hvis all energien skal produseres i Norge, krever dette en økning på investeringer i ny fornybar energi på ca. 3,15TWh utregnet i Balmorel. Dette kan for eksempel dekkes ved å sette opp 23,3km² dekket med solceller eller 225 vindturbiner. Dette tilsvarer et sted mellom 3-20 vindparker, avhengig av størrelse. Dette kan virke som en realistisk mulighet. Likevel vil det i Balmorel være netto import av strøm ved produksjon av E-fuel, spesielt når det er karbonfangst direkte fra luft. Dette vil gjøre vindturbinbehovet mindre i Norge (NVE, 2019b). E-fuel er avhengig av priser på spesielt elektrisitet. Prisene på elektrisitet er lavest på sommeren.

Kapittel 5: Diskusjon

Ved valg av teknologi ser man på flere ulike aspekter slik som: kostnader og lønnsomhet, bærekraft, muligheter for norsk industri, usikkerhet knyttet til teknologisk utvikling og etterspørsel. I dette kapittelet skal jeg drøfte disse aspektene.

Biojetdrivstoff og E-fuel kan få støtte gjennom ENOVA. Dette gjelder ny investering og det gis ikke støtte til drivstoff som må produseres for å dekke omsetningskravet (Enova, u.å.).

Det er mulig å produsere nok biojetdrivstoff til å dekke drivstoffbehovet, men dette er muligens ikke optimalt. For det første er det tatt utgangspunkt i at all årlig tilvekst av biomasse som kan brukes til energiformål brukes til biomasse. Dette vil hindre andre sektorer som for eksempel biler og fjernvarme til å bruke biomassen. Avinor har gjort anslag på at 30-40% av jetdrivstoffet kan dekkes av biomasse. Biomasse brukes også til mange andre formål som eksempelvis byggemateriale og fjernvarme

Mye bruk av biomasse vil også kunne gå ut over hvor mye konvensjonelt og avansert biojetdrivstoff som brukes i alle sektorer/land. (Avinor, 2020).

Biodrivstoff er en del av løsningen, men en for sterk satsing kan påvirke produksjonen negativt. Man bør holde høyt fokus på avansert drivstoff og fokusere på norsk produksjon. Man skal ikke bruke biomasse som kan brukes til mat eller høyverdige formål som byggematerialer eller papirproduksjon.

E-fuel er energikrevende, og produksjonsprisen er derfor avhengig av elprisen. For karbonfangst fra punktutslipp gir elprisen størst utslag på sensitivitetsanalysen. Utrekningene fra Balmorel viser at i et årsgjennomsnitt på el-priser gjennom året vil el-prisene være lavest i sommermånedene. I tillegg bruker E-fuel fornybare energi som i de fleste tilfellene er uregulerbare. For å produsere E-fuel på en best mulig måte, må produksjonen kunne være

fleksibel. Kostnadene for produksjonen vil bli lavest hvis det er mulig å produsere når strømmen er billigst, og å kunne produsere E-fuel når det er mye fornybar energi tilgjengelig.

Det er ikke sikkert at løsningen som gir lavest utslipp av karbon, er det beste valget på kort sikt. Med tanke på kostnader er det mer økonomisk lønnsomt å satse på fangst fra punktutslipp da dette sparer kostnader både med tanke på langtidslagring av karbondioksid samt kostnader for å samle inn karbondioksid fra luft.

Produksjon av E-fuel er fremdeles på et tidlig stadium og det kan være løftende for teknologien å begynne med prosesser som gir høyere utslipp for å kunne fremme utvikling og starte opp en læringskurve.

Videre ser man på hvordan bruk av teknologi kan fremme andre teknologier. Etanolvermentering er det billigste drivstoffvalget basert på kostnad per liter, men både E-fuel og biomasse har en prosess som bruker Fischer Tropsch-metoden. Selv om kostnadene for hver disse to teknologiene er høyere enn kostnadene for etanolvermentering, kan fordelene med at teknologiene fremmer hverandre overgå fordelene med lave priser på etanolvermentering.

En mulighet kan også være å få til en kombinasjon av biojetdrivstoff i samme bedrift. Ved å gjøre dette kan CHP som blir produsert bli utnyttet optimalt, E-fuel brukes når kraftprisene er lave, og biomasse brukes når kraftprisene er høye. Ved å bruke E-fuel og biojetdrivstoffteknologiene i samme anlegg kan man gjenbruke energien som blir produsert i Fischer Tropsch for en prosess til å starte opp den andre prosessen.

E-fuel med direktefangst sin læringskurve kan føre til en brattere læringskurve for direktefangst av karbon fra luften (CCU – carbon capture and utilization). Dette vil videre kunne fremme en læringskurve for fangst og lagring av CO₂ (CCS – carbon capture and storage). Sammen med

kutt av fossile drivstoff og innføring av fornybare ressurser, er CCS en viktig fremgangsmåte for å minimere global oppvarming.

Usikkerhet i data og utregninger

Det ligger en usikkerhet knyttet opp mot drivstoffbehovet for 2040. For det første vil alle prognoser for fremtiden være usikre. Videre er beregningene satt som et estimat, hvor det også er gjort flere omregninger for å komme over til antall liter. Prognosene for utslipp av karbon er regnet ut med en forventet effektiviseringsrate på 1,5%. Resultatet styrkes ved at Sunfire fikk lignende resultater på energibehov. Deres resultat var at energibehovet var 17kWh per liter (Norsk E-fuel, 2020a). Mine resultater var 17,7kWh (18,25PWh/1,031 milliarder liter).

Jeg har kvalitetssikret antall liter som jeg kom fram til opp mot tilsvarende utregninger gjort av bedriften Norsk E-fuel (2020a). I mine beregninger kom jeg fram til at ved å bruke en tetthet på 3,15 tonn CO₂ per tonn jetdrivstoff samt en tetthet på 0,8liter/kg (tabell 1) blir antall liter produsert for å spare utslipp til miljøet for 250 000 tonn CO₂-ekvivalenter, 99,2millioner liter fornybart drivstoff. Bedriften norsk E-fuel kom fram til at det vil være nødvendig å produsere 100 millioner liter E-fuel for å spare tilsvarende mengde CO₂. Dette resultatet styrker datagrunnlaget.

Det er flere måter å regne ut elbehovet for E-fuel.

Det er også mulig å regne ut elbehovet for hver prosess, og i disse beregningene kommer det også fram hvor mye hydrogen og CO₂ som trengs i hver delprosess. Det totale hydrogenbehovet blir, når det er 1,17GJ H₂/GJ drivstoff (tabell 4), og det trengs 35,77TJ (se kapitell 4.1) for å dekke flydrivstoffbehovet, som tilsvarer 2,5Mt H₂. Det totale karbonbehovet blir 2.5 Mt CO₂.

Ved å samle inn el-behov for ulike prosesser kom tallet på 20,13TWh fra punktutslipp og 23,92TWh direkte fra luft. Elbehov fra FT vil kunne være noe lavere for E-fuel siden råvaren er mer bearbeidet enn for biomasse. Det er verdt å nevne at det er stort sprik i litteraturen på energibehovet for E-fuel. I artikkelen (Soler, 2019) er elektrisitetsbehovet 89-99MJ per liter,

mens i (Kranenburg et al., 2020) 69 000kJ/liter. Disse verdiene ligger over og under verdiene jeg regnet ut som var 60,43 og 78,31 samlet beregning, og 70,24 og 83,47 hvor hvert ledd ble regnet ut hver for seg

El-behov for karbonfangst:

El-behovet for å fange CO₂ fra punktutslipp er 250-300kWh/tonn (tabell 4) (Lucquiaud et al., 2013) Jeg velger å bruke gjennomsnittet av disse tallene, altså 275kWh/tonn,. Med antall tonn som trengs lik 2,5Mt (tabell 1), blir det totale behovet for karbonfangst fra punktutslipp 0,7TWh

El behov fra fangst direkte fra luft er for lav temperatur (170-270 grader celsius) direktefangst (LT DAC) 1750kWhel/tCO₂+250kWhth/tCO₂ (samlet 2000kWh/tCO₂) (tabell 4) og for høy temperatur (320grader og oppover) direktefangst (HT DAC) er det 1535kWhel/tCO₂ (tabell 4). Gjennomsnittlig blir dette 1767,5kWh/tCO₂. Ved å bruke antall tonn CO₂ som trengs for å dekke behovet, som er 2541180.16Tonn CO₂, får man totalt behov på 4,49TWh med direktefangst av karbon fra luften.

El-behov for elektrolyse:

Ved å bruke det totale hydrogenbehovet på 41875785,71GJ H₂ og at energiinnholdet er 0,1188GJ/kg (tabell 4) får man at det trengs 352 489 779kg H₂, som videre med elbehov på 41,4kWh/kg (tabell 4) gir el behov på 14,59TWh. Med en effektivitet på 0,8 (tabell 1) blir samlet behov 18,24TWh.

Som vist tidligere trengs det 825 396,83 tonn jetdrivstoff for å dekke drivstoffbehovet. Ved å regne om først til joule og deretter til TWh får man at det trengs 25,8TWh for å produsere alt drivstoffet.

Raffinering:

Det trengs noe raffinering av Fischer tropsch prosessen for å produsere jetdrivstoff. Jeg tolker det som forsvarlig å se bort fra el-behov for dette med grunnlag i en denne rapporten: (Mortensen et al., 2019).

Tabell 12 under viser el-behov for de ulike scenarioene. Det framgår av kapittel 3.3.1 hvordan jeg har regnet ut tallene.

Tabell 12: Elbehov for E-fuel (alternativ)

Beregnet for hver el-behov for hver delprosess fra ulike kilder	
Karbonfangst fra punktutslipp	20,13TWh
Direktefangst av karbon fra luft	23,92TWh

Drøfting sensitivitetsanalyse

For Scenario 2 alternativ 1 (karbonfangst fra punktutslipp), er det størst usikkerhet knyttet opp mot kraftpriser. Kraftprisene varierer over året, og er gjennomsnittlig billigere på sommeren enn på vinteren. Dette vil si at årstid som drivstoffet produseres i har stor innvirkning på de totale kostnadene.

Balmorel gir stor endring i mengde kraft og liten endring i pris fra basealternativ til alternativ 2 og 3. Dette vil være påvirket av at det importeres mer strøm fra andre land. Dette ville kunne slått ut annerledes om vi også hadde forutsatt stor produksjon av E-fuel i andre land.

Kildekritikk

E-fuel er en mindre kjent teknologi, og flere kilder som skriver om fornybart jetdrivstoff nevner ikke E-fuel som et alternativ til løsning. Det er også knyttet usikkerhet opp mot hvor mange produksjonstimer et E-fuel verk trenger for å kunne drive lønnsom produksjon.

Debatten om fornybart er et tema som til tider kan være preget av sterke følelser. Dette kan føre til at effekter blir undervurdert eller overvurdert i ulike artikler. Særlig presse og annen ikke-forskningsbaserte kilder.

Beregning av drivstoff for 2020 er kun et estimat, hvor det også er gjort flere omregninger for å komme til antall liter. Videre er det lagt inn effektiviseringsrate på 1,5% som gjør at totale CO₂ utslipp vil bli noe lavere enn de faktiske literne som faktisk blir brukt.

Sammenligner tall man har fått med tallene man tenkte at man kom til å få basert på litteratur og forskning og styrkes.

Kapittel 6: Konklusjon

- *Hvordan kan drivstoffbehovet for langdistanseluftfart dekkes av fornybart biojetdrivstoff og E-fuel i 2040, og hvilke tekniske og økonomiske konsekvenser vil dette ha?*

Det er potensialer for både E-fuel og biomasse som drivstoffalternativer i 2040, men begrensninger i produksjonskapasitet gjør det vanskelig å dekke hele behovet med en enkelt teknologi. Biojetdrivstoff må produseres avansert, og E-fuel må bruke fornybare strømkilder, og produsere når strømmen er billig.

Kombinasjon av flere teknologier kan være en mulighet. Fischer Tropsch kan brukes i produksjon av både biojetdrivstoff og E-fuel, noe som gir godt grunnlag for samproduksjon.

Så stor som mulig del av produksjonen burde skje i Norge. (hvorfor burde produksjon skje i Norge?)

De fornybare drivstoffene er ikke konkurransedyktige med fossilt drivstoff per i dag, men ved satsing på produksjon vil det kunne bli lønnsomt innen 2040. Produksjon av E-fuel vil øke kraftbehovet og kraftprisen både i Norge og andre land, mens dette ikke skjer for biojetdrivstoff da kraftbehovet er lavere her enn ved E-fuel.

Litteraturliste:

- Air BP. (2000). *Handbook of Products*. Tilgjengelig fra: https://web.archive.org/web/20110608075828/http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/aviation/air_bp/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/a/air_bp_products_handbook_04004_1.pdf.
- Airliners. (2007). *Jet A Calculations*. Tilgjengelig fra: <https://www.airliners.net/forum/viewtopic.php?t=754781>.
- Amundsen, B. (2019). Ekspertpanel av forskere advarer om bioenergi. *Forskning.no*. Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/energi-klima-skog/ekspertpanel-av-forskere-advarer-om-bioenergi/1562319>.
- Avinor. (2020). *Bærekraftig og samfunnsnyttig luftfart*. Tilgjengelig fra: https://avinor.no/globalassets/konsern/om-oss/rapporter/avinor_baerekraftsrapport_2020.pdf (lest 28.05.2021).
- Avinor. (u.å.-a). *Biojetfuel*. Tilgjengelig fra: <https://avinor.no/konsern/klima/biojetfuel/biodrivstoff> (lest 27.05.2021).
- Avinor. (u.å.-b). *Forurensere betaler*. Tilgjengelig fra: <https://avinor.no/konsern/klima/forurensere-betaler/> (lest 01.06.2021).
- Avinor. (u.å.-c). *Samfunnsoppdraget*. Tilgjengelig fra: <https://avinor.no/konsern/om-oss/samfunnsoppdraget/samfunnsoppdraget> (lest 27.05.2021).
- Bannon, E. (2018). Roadmap to decarbonising European aviation. Tilgjengelig fra: <https://www.transportenvironment.org/publications/roadmap-decarbonising-european-aviation>.
- Bjartnes, A., Michelsen, L.-H. P. & Ursin, L. (2020). Hva er e-fuel? Tilgjengelig fra: <https://klimastiftelsen.no/publikasjoner/hva-er-e-fuel/> (lest 28.oktober).
- Bjartnes, A., Hirth, M. L., Michelsen, L.-H. P., Skaugen, H. & Ursin, L. (2021). Hydrogen som klimaløsning. Tilgjengelig fra: https://klimastiftelsen.no/wp-content/uploads/2021/03/2C_Temanotat_3_2021_Hydrogen.pdf.
- Blanco, H., Nijs, W., Ruf, J. & Faaija, A. (2018). Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918315368> (lest 30.05.2021).
- Brynildsen, A. & Næss, T. (1992). *Konsesjonskraft*. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1992/publikasjon1992_16.pdf.
- Brynolf, S., Taljegard, M., Grahm, M. & Hansson, J. (2017). Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117309358>.
- Brynolf, S., Taljegard, M., Grahm, M. & Hansson, J. (2018). Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309358>.
- Climeworks. (2021). *Direct air capture - A technology to reverse climate change*. Tilgjengelig fra: <https://climeworks.com/co2-removal>.
- Ekspertutvalget – teknologi og fremtidens transportinfrastruktur. (2019). Teknologi for bærekraftig bevegelsesfrihet og mobilitet. Tilgjengelig fra: https://www.regjeringen.no/contentassets/ccdc68196014468696acac6e5cc4f0e7/rapport-teknologiutvalget_web.pdf.
- Energifakta Norge. (2019). *KRAFTPRODUKSJON*. Tilgjengelig fra: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>.

- Enova. (u.å.). Tilgjengelig fra: <https://www.enova.no/bedrift/biogass/> (lest Lest 31.05.2021).
- European Union Aviation Safety Agency. (u.å.). Tilgjengelig fra: <https://www.easa.europa.eu/eaer/climate-change/sustainable-aviation-fuels?fbclid=IwAR3FzJKgkeXxD0F3Te0DjWGyBXz5xQIZpskkFdpzgdO5Y2MRI00q8swxznU> (lest Lest 01.06.2021).
- Fasihi, M., Efimova, O. & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224: 957-980. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307772?via%3Dihub>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- Fjordkraft. (u.å.). *Bioenergi – Biomasse som energikilde*. Tilgjengelig fra: <https://www.fjordkraft.no/bedrift/fornybar-energi/bioenergi/> (lest Lest 27.05.2021).
- FN. (2021). *FNs bærekraftsmål*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008). Environmental impacts of biofuels. I: *BIOFUELS: prospects, risks and opportunities*. Tilgjengelig fra: <http://www.fao.org/3/i0100e/i0100e05.pdf>.
- Google Maps. (u.å.). *Reisetid fra Oslo til Herøya (på kart)*. Tilgjengelig fra: <https://www.google.no/maps/dir/Oslo/3936+Her%C3%B8ya/@59.4882021,9.6403664,9z/data=!3m1!4b1!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x46416e61f267f039:0x7e92605fd3231e9a!2m2!1d10.7522454!2d59.9138688!1m5!1m1!1s0x46471fff23584d01:0xa7056f81e2a2c45f!2m2!1d9.648846!2d59.1114604!3e0> (lest Lest 27.05.2021).
- Green Air. (2021). *Glossary*. Tilgjengelig fra: <https://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=217>.
- Hermesmann, M., Grübel, K., Scherotzki, L. & Müller, T. E. (2021). Promising pathways: The geographic and energetic potential of power-to-x technologies based on regeneratively obtained hydrogen. Volume 138. Tilgjengelig fra: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030928X?casa_token=AMxo379dPFgAAAAA:5OP1gEmanlUwrHFnCv6ybh4W27mbJed9dceoSsZU_KhmMLrToYr5UTAQFcp5UnA_WWA73FbZteg.
- Herøya Industripark. (u.å.). *Tall og fakta*. Tilgjengelig fra: <https://www.heroya-industripark.no/om-industriparken/tall-og-fakta> (lest Lest 27.05.2021).
- Hofstad, K. & Rosvold, K. A. (2020). *Energi i Norge*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/energi_i_Norge.
- Hohle, E. E. (2001). *Bionergi. Miljø, teknikk og marked*.
- Index Mundi. (2021). *Jet Fuel Monthly Price - Norwegian Krone per Gallon*. Tilgjengelig fra: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel&months=60¤cy=nok>.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2019). Environmental Trends in aviation to 2050. Tilgjengelig fra: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg17-23.pdf.
- International Energy Agency. (2021). Net zero by 2050. A roadmap for the global energy sector. Tilgjengelig fra: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad0d4830-bd7e-47b6-838c-40d115733c13/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>.
- International Renewable Energy Agency. (2017). Biofuels for aviation. Technology brief. Tilgjengelig fra: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf.
- Jackson, S. & Brodal, E. (2019). Optimization of the Energy Consumption of a Carbon Capture and Sequestration Related Carbon Dioxide Compression Processes. *Energies*. Tilgjengelig fra: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/9/1603>. doi: <https://doi.org/10.3390/en12091603>.
- Kang, D., Kim, D., Kalaskar, V., Violi, A. & Boehman, A. L. (2019). Experimental characterization of jet fuels under engine relevant conditions – Part 1: Effect of chemical composition on autoignition

- of conventional and alternative jet fuels. Tilgjengelig fra:
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.005>.
- Klerk, A. d. (2016). Chapter 10 - Aviation Turbine Fuels Through the Fischer–Tropsch Process. I: *Biofuels for Aviation*. Tilgjengelig fra:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012804568800010X>. doi:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804568-8.00010-X>.
- Kranenburg, K. v., Delft, Y. v., Gavrilova, A., Kler, R. d., Schipper, C., Smokers, R., Verbeek, M. & Verbeek, R. (2020). *E-fuels: Toward a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation*. Tilgjengelig fra: <https://smartport.nl/wp-content/uploads/2020/09/20-11482-whitepaper-Voltachem-10.pdf>.
- Li, S., Zhang, X., Gao, L. & Jin, H. (2012). Learning rates and future cost curves for fossil fuel energy systems with CO2 capture: Methodology and case studies. *Applied Energy*: 348-356. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911008427>. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.046>.
- Lichner, C. (2020, 26.03.2020). Electrolyzer overview: Lowering the cost of hydrogen and distributing its production. *PV Magazine*. Tilgjengelig fra: <https://pv-magazine-usa.com/2020/03/26/electrolyzer-overview-lowering-the-cost-of-hydrogen-and-distributing-its-productionhydrogen-industry-overview-lowering-the-cost-and-distributing-production/>.
- Lucquiaud, M., Liang, X., Errey, O., Chalmers, H. & Gibbins, J. (2013). Addressing Technology Uncertainties in Power Plants with Post-Combustion Capture. *Energy Procedia*, 37: 2359-2368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.117>.
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik. (u.å.). *Wasserstoff Daten - Hydrogen Data*. Tilgjengelig fra: <http://www.h2data.de/> (lest Lest 27.05.2021).
- M.Prussi, O'Connell, A. & Lonza, L. (2019). Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28. *Biomass & Bioenergy*, 130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105371>.
- Miljødirektoratet. (2019a). Biodrivstoff. Tilgjengelig fra:
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fornybar-energi/biodrivstoff/>.
- Miljødirektoratet. (2019b). EUs system for klimavoter. Tilgjengelig fra:
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/klimavoter/eus-klimakvotesystem/>.
- Miljødirektoratet. (2021). Klimavoter: Kvotepliktig luftfart. Tilgjengelig fra:
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/klimavoter/kvotepliktig-luftfart/>.
- Miljødirektoratet og Sjøfartsdirektoratet. (2018). Kunnskapsgrunnlag for omsetningskrav i skipsfart. Tilgjengelig fra:
<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M1125/M1125.pdf>.
- Millinger, M., Tafarte, P., Jordan, M., Hahn, A., Meisele, K. & Thränade, D. (2021). Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustainable Energy & Fuels* (5): 828-843. doi: <https://doi.org/10.1039/D0SE01067G>.
- Mortensen, A. W., Wenzel, H., Rasmussen, K. D., Justesen, S. S., Wormslev, E. & Porsgaard, M. (2019). Nordic GTL – a pre-feasibility study on sustainable aviation fuel from biogas, hydrogen and CO2. Tilgjengelig fra: <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2019/10/Nordic-aviation-fuel-production-28-10-2019-final.pdf>.
- MAAW. (u.å.). *What is a Learning Curve?* Tilgjengelig fra:
<https://maaw.info/LearningCurveSummary.htm> (lest Lest 01.06.2021).
- National Renewable Energy Laboratory. (u.å.). *Useful life*. Tilgjengelig fra:
<https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html> (lest Lest 27.05.2021).

Naturvernforbundet. (u.å.). *Naturvernforbundet*. Tilgjengelig fra: https://naturvernforbundet.no/?lang=no_NO (lest Lest 27.05.2021).

NHO luftfart. (2017). *BÆREKRAFTIG DRIVSTOFF TIL LUFTFART - STATUS 2017*. Tilgjengelig fra: <https://www.nholuftfart.no/siteassets/bilder/barekraftig-drivstoff.pdf>.

Nordic Electrofuel. (2021). *Clean at scale - What we do?* Tilgjengelig fra: <https://nordicelectrofuel.no/>.

Nordic Energy Technology Perspectives. (2016). *Nordic Energy Technology Perspectives 2016*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2015/12/Nordic-Energy-Technology-Perspectives-2016.pdf>.

Norges Skogeierforbund. (u.å.). *Det grønne skiftet*. Tilgjengelig fra: <https://www.skog.no/vi-mener/det-gronne-skiftet/> (lest Lest 27.05.2021).

Norsk E-fuel. (2020a). *Recording of the Webinar: "Norsk-e-Fuel: Leading the Way to Renewable Aviation"*, 17.06.2020. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=aJUeREUEwDY>.

Norsk E-fuel. (2020b). *Supplying your renewable fuel, unlimited, on the road to climate neutral transportation* Tilgjengelig fra: <https://www.norsk-e-fuel.com/en/>.

Norsk polarinstitutt. (2018). *Globale klimaendringer*. Tilgjengelig fra: <https://www.npolar.no/tema/globale-klimaendringer/>.

NVE. (2019). *Hydrogen i det moderne energisystemet*. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_12.pdf.

NVE. (2021). *Om NVE*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/om-nve/?ref=mainmenu>.

O'Malley, J., Pavlenko, N. & Searle, S. (2021). *Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand* Tilgjengelig fra: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf>.

Process Worldwide. (2020). *Power to X Engineering. From Smokestack to Fuel Pump: "Clean" Fuel from Water and CO2*. Tilgjengelig fra: <https://www.process-worldwide.com/from-smokestack-to-fuel-pump-clean-fuel-from-water-and-CO2-a-910858/>.

Rambøll. (2017). *Bærekraftig drivstoff til luftfart*. Tilgjengelig fra: <https://no.ramboll.com/projects/rno/rapport-om-biodrivstoff-til-fly-2017>.

Rambøll. (u.å.). *Power-to-X: Integrating fluctuating renewable energy*. Tilgjengelig fra: <https://ramboll.com/partner-for-change/power-to-x> (lest Lest 27.05.2021).

Regjeringen. (2019). *CO₂-håndtering i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/co2-handtering/co2-handtering/id2601471/>.

Regjeringen. (2020a). *CO₂-avgiften*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/okonomi-og-budsjett/skatter-og-avgifter/veibruksavgift-pa-drivstoff/co2-avgiften/id2603484/>.

Regjeringen. (2020b). *Det grønne skiftet i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/gront-skifte/id2076832/?expand=factbox2686986>.

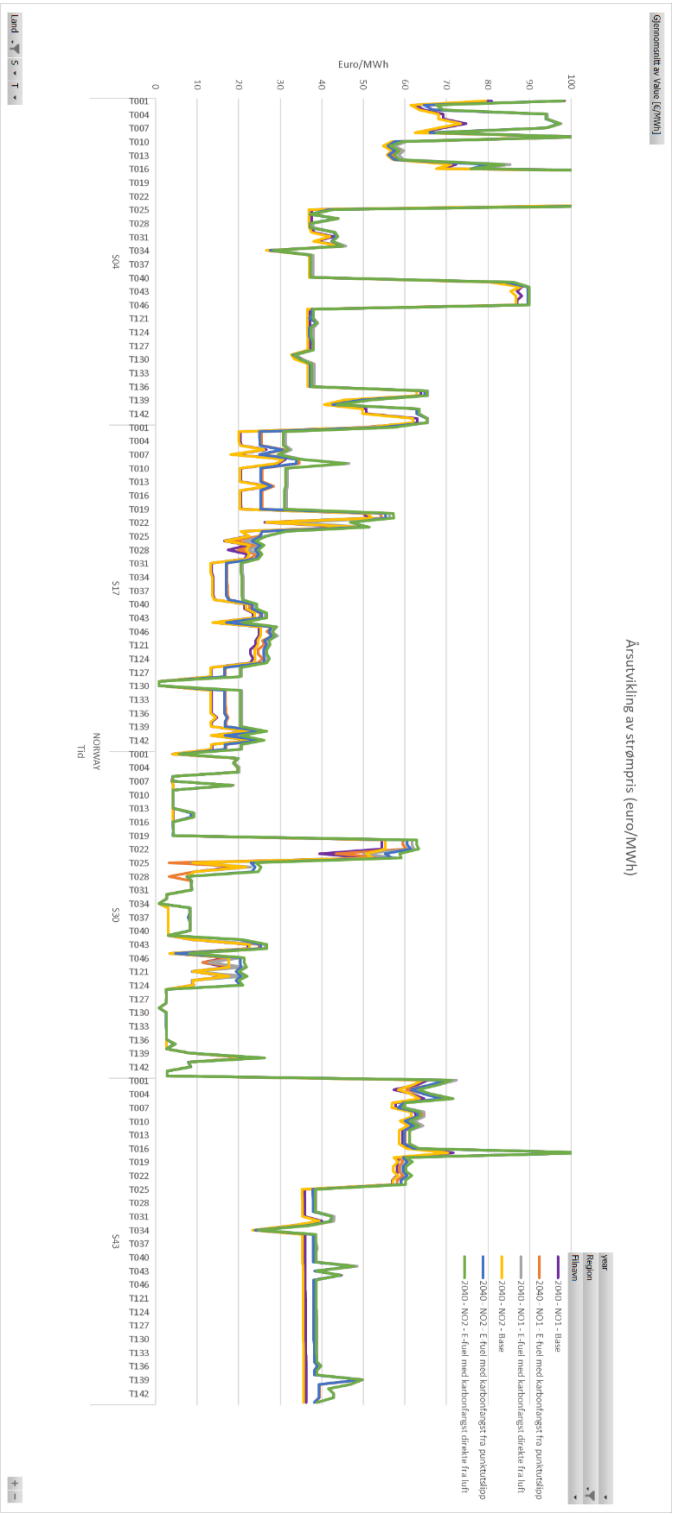
Samferdselsdepartementet. (2019). *Handlingsplan for infrastruktur for alternative drivstoff i transport*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/67c3cd4b5256447984c17073b3988dc3/handlingsplan-for-infrastruktur-for-alternative-drivstoff.pdf>.

Samferdselsdepartementet. (2021). *Meld. St. 20 (2020–2021) Nasjonal transportplan 2022–2033*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-20-20202021/id2839503/?ch>.

Schlaupitz, H. (2019). *Fossilfritt Norge Hvordan fase ut fossil energi innen 2040*. 52. Tilgjengelig fra: <https://naturvernforbundet.no/getfile.php/13148190-1581597872/Dokumenter/Rapporter%20og%20faktaark/2019/Fossilfritt%20Norge%20nettversjon.pdf>.

- Schmidt, P. & Weindorf, W. (2016). Power-to-Liquids potentials and perspectives for the future supply of renewable aviation Fuel. Tilgjengelig fra: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierrefrei.pdf.
- Serrano, G. d. A. & Sandquist, J. (2017). Comparative analysis of technologies for liquid biofuel production from woody biomass - Trends, learning and costs.
- SINTEF. (u.å.). SINTEF. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/> (lest Lest 27.05.2021).
- Soler, M. Y. A. (2019). A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review). 28. Tilgjengelig fra: https://www.etipbioenergy.eu/images/Concawe_A%20look%20into%20e-fuels%20in%20transport%20system_Oct19.pdf.
- Spek, M. v. d., Ramirez, A. & Faaij, A. (2017). Challenges and uncertainties of ex ante techno-economic analysis of low TRL CO2 capture technology: Lessons from a case study of an NGCC with exhaust gas recycle and electric swing adsorption. *Applied Energy*, 208: 920-934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.058>.
- Stafford, W., Lotter, A., Brent, A. & Maltitz, G. v. (2017). Biofuels technology - A look forward. Tilgjengelig fra: <https://www.wider.unu.edu/sites/default/files/wp2017-87.pdf>.
- Statkraft. (2019). Globale energitrender og norske muligheter - Statkrafts Lavutslippsscenario. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraft.no/globalassets/1-statkraft-public/lavutslippsscenario/2019.pdf>.
- Statkraft. (u.å.-a). Om Statkraft. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraft.no/om-statkraft/> (lest Lest 27.05.2021).
- Statkraft. (u.å.-b). Vannkraft. Tilgjengelig fra: https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vannkraft/?gclid=CjwKCAjwnPOEBhA0EiwA609ReYtthw-JqNGb1uqvvggSnFpqYKFZW0Be-hGc-72Rj_Zsuz6h3bwJh1RoCLnsQAvD_BwE (lest Lest 27.05.2021).
- Stavseth, M. R. (2020). Sensitivitetsanalyser – hvor robust er resultatet? *Tidsskriftet.no*. Tilgjengelig fra: <https://tidsskriftet.no/2020/04/medisin-og-tall/sensitivitetsanalyser-hvor-robust-er-resultatet>.
- Sunfire. (2020). *Renewables Everywhere - Electrolysis at its best*. Tilgjengelig fra: <https://www.sunfire.de/en/>.
- Teknisk Ukeblad. (2020). To bedrifter vil lage syntetisk drivstoff på Herøya: Eks-partner blir konkurrent og slår seg ned på nabotomta. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/to-bedrifter-vil-lage-syntetisk-drivstoff-pa-heroya-eks-partner-blir-konkurrent-og-slar-seg-ned-pa-nabotomta/493866?key=zbh08EHG>.
- The IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (u.å.). A Brief History of CCS and Current Status. Tilgjengelig fra: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Publications/Information_Sheets_for_CCS_2.pdf (lest Lest 27.05.2021).
- The Royal Society. (2019). Sustainable synthetic carbon based fuels for transport. Tilgjengelig fra: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf>.
- The Royal Society of Chemistry. (2021). *Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition*. Tilgjengelig fra: <http://www.rsc.org/suppdata/d0/se/d0se01067g/d0se01067g1.pdf>.
- Transport & Environment. (2018). *Roadmap to decarbonising European aviation*. Tilgjengelig fra: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf.
- UngEnergi. (2020). *Biodrivstoff*. Tilgjengelig fra: <https://ungenergi.no/energikilder/bioenergi/biodrivstoff/>.

- Unitjuggler. (u.å.). *Unitjuggler - Convert everything with ease*. Tilgjengelig fra: <https://www.unitjuggler.com/> (lest Lest 27.05.2021).
- Valestrand, M. (2019). «Grønt» CO₂ + hydrogen: Elektrobrensel kan overta som drivstoff. Tilgjengelig fra: <https://energiogklima.no/nyhet/gront-co2-hydrogen-elektrobrensel-kan-overta-som-drivstoff/>.
- Valutakalkulator. (2021). *Valutakalkulator*. Tilgjengelig fra: <http://valutakalkulator.co/>.
- Vedtak om særavgifter. (2020). *Storingsvedtak om særavgifter for budsjettåret 2021*. I: Finansdepartementet (red.). Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/STV/forskrift/2020-12-15-2884/KAPITTEL_10#%C2%A71_10.
- Wiese, F., Bramstoft, R., Koduvere, H., Alonso, A. P., Balyk, O., Kirkerud, J. G., Tveten, Å. G., Bolkesjø, T. F. & Ravn, M. M. H. (2018). Balmorel open source energy system model. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300038>.
- Wight Hat Ltd. (2020). *Metric Conversions* Tilgjengelig fra: <https://www.metric-conversions.org/no/volume/amerikanske-gallons-flytende-til-liter.htm>.
- Wormslev, E. C., Pedersen, J. L., Eriksen, C., Bugge, R., Skou, N., Tang, C., Liengaard, T., Hansen, R. S., Eberhardt, J. M., Rasch, M. K., et al. (2016). Sustainable jet fuel for aviation. Tilgjengelig fra: https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/FULLTEXT_Sustainable_Jet_Fuel_for_Aviation.pdf.



Figur 20: Årsutvikling av strømpris (€/MWh)



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway