



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Kan hydrogen som drivstoff i personbiler bidra til lavere klimagassutslipp?

Could hydrogen as fuel in passenger cars
contribute to lower greenhouse gas emissions?

Jonas Haugen Atterås

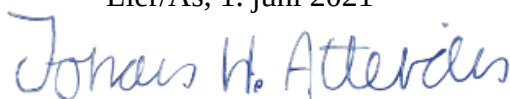
Fornybar energi

Forord

Denne oppgaven er skrevet som en del av min toårige master ved Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Først og fremst vil jeg gjerne starte med å takke min veileder Erling Holden for fantastisk god oppfølging, raske svar og hjelp til struktur og oppbygging gjennom arbeidet med oppgaven.

Jeg vil også takke mine foreldre for korrekturlesing av oppgaven og ikke minst uvurderlig støtte gjennom hele min studietid. Til slutt vil jeg få rette en stor takke min samboer, Linn for tålmodighet, støtte, og gjentatt korrekturlesing gjennom arbeidet med oppgaven.

Lier/Ås, 1. juni 2021



Jonas Haugen Atterås



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Sammendrag

Transport med personbil står for store mengder av Norge og Europa sitt klimagassutslipp. Norge, sammen med mange andre land har i den sammenheng påtatt seg en rekke forpliktelser for å senke klimagassutslippene. En måte å få ned utslippene er å ta i bruk alternative drivstoff. Et slikt alternativ drivstoff er hydrogen.

Hydrogen som drivstoff i en brenselcelle gir i utgangspunktet kun vann som biprodukt. Hvilket betyr at det ikke produseres noen form for klimagasser under kjøring. Dette gjør hydrogen til et mulig attraktivt drivstoff som har fått økende oppmerksomhet både på norsk og europeisk skala de siste årene. Det er imidlertid utfordringer knyttet til selve produksjonen av hydrogen.

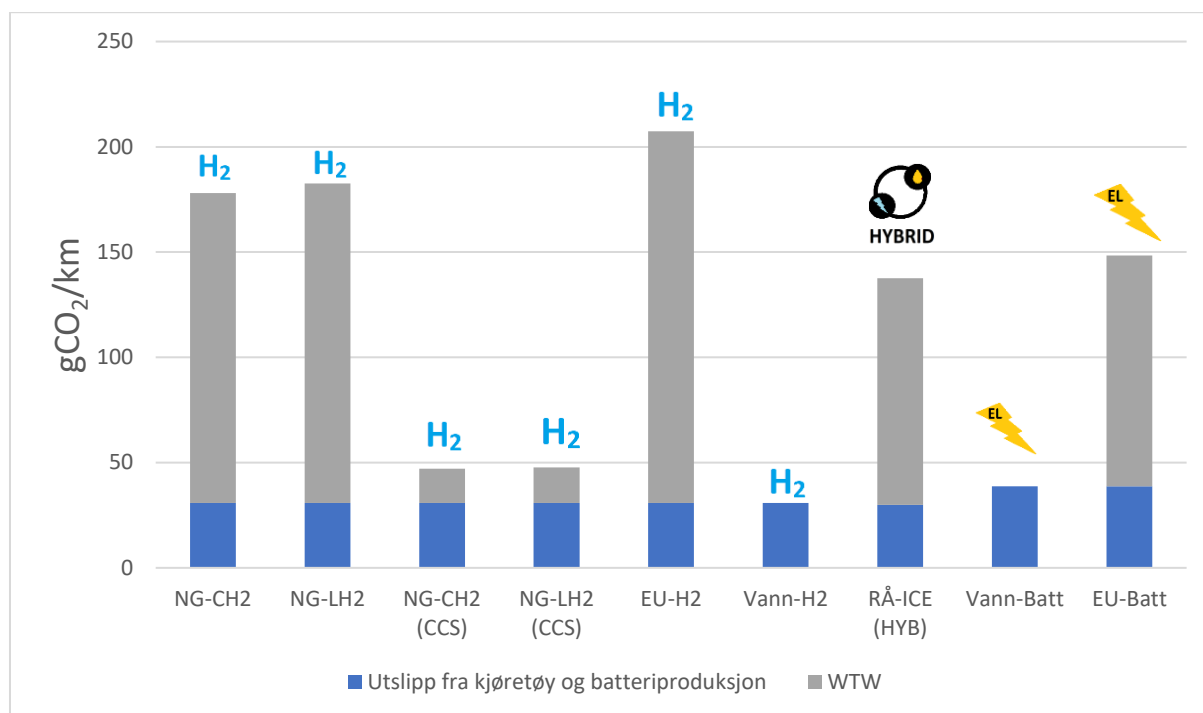
I utgangspunktet finnes det mange forskjellige metoder å produsere hydrogen på, men disse har alle varierende grader av klimavennlighet. For å kunne være et levedyktig alternativ må hydrogen konkurrere mot allerede relativt veletablerte teknologier som el og hybridbiler, fra et klimamessig perspektiv. Det er derfor av interesse å undersøke i hvilken grad hydrogen som drivstoff kan være med å bidra til lavere klimagassutslipp og i den sammenheng hvilke former for hydrogenproduksjon er bedre eller dårligere enn alternativene. I denne oppgaven undersøkes dette fra både norsk og europeisk perspektiv.

For å svare på spørsmålet benyttes energikjedeanalyse. Energifkjedeanalyse er en metode for å analysere den totale energibruken gjennom flere delprosesser som til sammen danner en energikjede. Et kort eksempel er utvinning av råolje og alle etterfølgende prosesser frem til råoljen har blitt bensin. I denne oppgaven er det undersøkt ni forskjellige energikjeder. Seks av disse er hydrogenkjeder, hvorav fire tar utgangspunkt i dampreforming av naturgass og to er basert på elektrolyse med enten vannkraft eller en EU-miks som strømlleverandør. De resterende energikjedene er alternativer til hydrogen hvorav to er energikjeder som resulterer i elektrisitet i en elbil, og en tredje er utvinning av råolje til bensin. Videre er energikostnader og utslipp fra bil og batteriproduksjon vurdert og presentert.

Datagrunnlaget for denne oppgaven baserer seg på sekundærdata fra andre studier, målinger og undersøkelser.

Resultatene fra analysen i denne oppgaven viser at hydrogen kan være med på å redusere klimagassutslippene, men at det som regel vil være avhengig av situasjonen. Det er også svært avhengig av at man velger riktig produksjonsmetode.

Norge er i en spesiell situasjon med en enorm tilgang på fornybar energi gjennom vannkraft noe som gjør det vanskeligere for hydrogen å konkurrere med elektriske alternativer. Det kommer imidlertid frem at hydrogen produsert ved fornybar energi, og/eller dampreforming med karbonfangst er attraktive alternativer, spesielt på europeisk skala.



Figur 1: Totalt CO₂ utslipp per kilometer for 9 energikjeder.

Figuren viser CO₂ utslipp per kjøretøykilometer over en levetid på 20 år og en gjennomsnittlig kjørelengde på 12000km per år.

Abstract

Personal transport is associated with large volumes of Norway's and Europe's greenhouse gas emissions. Norway and several other countries have in that regard taken upon themselves a multitude of commitments to lowering the greenhouse gas emissions. One way of lowering greenhouse gas emissions is to implement alternative fuels. One such fuel could be hydrogen.

Hydrogen as fuel in a fuel cell produces only water as a byproduct. Meaning there is no harmful gases produced when driving. This makes hydrogen a potentially attractive fuel which has gained a lot of interest both in Norway and Europe. However, there are some obstacles associated with the production of hydrogen.

There are several ways to manufacture hydrogen, all varying in the degree of climate friendliness. To be a viable option hydrogen must compete against already relatively well-established technologies such as electric and hybrid cars from a climate perspective.

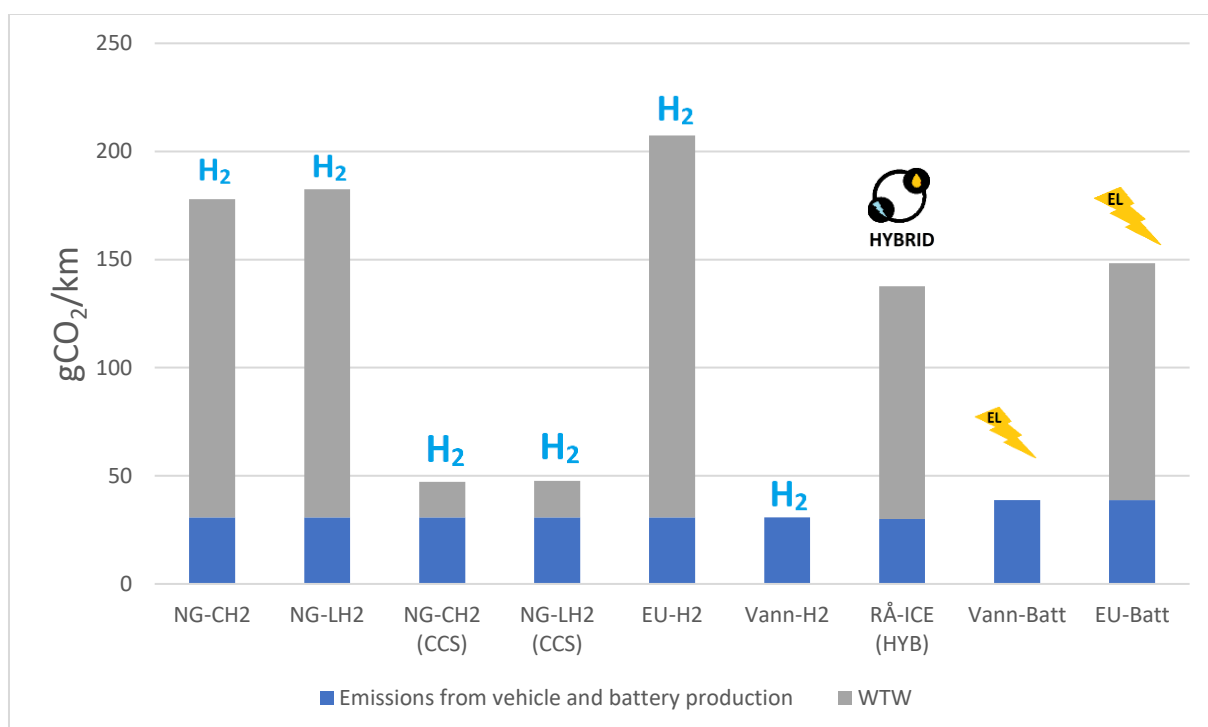
Therefore, it is of great interest to examine in what way hydrogen can contribute to lowering greenhouse gas emissions, and in that context which way of hydrogen manufacturing is better or worse than the alternatives. In this paper this question is examined both from a Norwegian, and a European perspective.

To give an answer, energy chain analysis is used. Energy chain analysis is a method of examining the total amount of energy used in several processes, which together form an energy chain. An example could be the extraction of crude oil, and all the subsequent processes until the crude oil has become gasoline. In this paper nine different energy chains have been examined. Six of these are hydrogen energy chains, four of which are based upon steam methane reformation, and two use electrolysis based upon either hydropower or an EU electricity mix. The remaining energy chains are alternatives to hydrogen where two of them result in electricity charged to the battery in an EV, and the third one is based upon crude oil extraction and refining. In addition energy costs and greenhouse gas emissions from car, and battery production have been estimated and presented.

The data used in this paper is based upon secondary sources from other studies, measurements, and research.

The results from this study's analysis show that hydrogen could help reduce greenhouse gas emissions, but it is usually dependent on the situation. It is also extremely dependent on which method is chosen for production. Norway is in a very particular situation where a lot of energy is supplied through hydropower.

This makes it harder for hydrogen to compete. However, the study also finds that hydrogen based upon renewable technologies, and/or steam methane reforming with carbon capturing technology could be an attractive alternative, especially on a European scale.



Figur 2: Total CO₂ emissions per kilometer for 9 energy chains.

The figure shows total CO₂ emissions per vehicle kilometer for a lifetime of 20 years, and an average annual milage of 12000 kilometers.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	IV
Figurliste	VIII
Tabelliste	IX
Nomenklatur	X
Symboler	X
1. Bakgrunn	1
1.2 Kunnskapsgrunnlag	4
1.3 Oppsummering kunnskapsgrunnlag	8
1.4 Problemstilling	9
1.5 Oppbygging av oppgaven.....	10
2. Metode	11
2.1 Analysemetode	13
2.2 Well-to-Wheel analyse	14
2.2.1 Well-to-tank.....	15
2.2.2 Tank-to-Wheel.....	15
2.3 Datakilder og -forutsetninger	15
2.4 Energikjedene	17
2.4.1 Dampreforming av naturgass til hydrogenproduksjon	18
2.4.2 Råoljebaserte drivstoff.....	19
2.4.3 Vannkraft til hydrogen	20
2.4.4 Vannkraft til El.....	21
2.4.5 Produksjon av elektrisk kraft i EU	22
2.4.6 Elektrisk kraft i EU-mix til hydrogen.....	23
3. Data	24
3.1 WTT energibruk	24
3.1.1 Fossil prosesser.....	24
3.1.2 Dampreforming	24
3.1.3 Råolje basert drivstoff	26
3.1.4 Europeisk elektrisitetssmiks.....	27
3.1.5 Vannkraft.....	29
3.1.6 Fremstilling av hydrogen ved elektrolyse av vann.....	29
3.2 Distribusjon	31
3.2.1 Distribusjon av elektrisk kraft	31
3.2.2 Distribusjon av fossile brenslere og hydrogen	31

3.3 TTW energibruk	33
3.3.1 Kjøretøy med elektrisk drivlinje.....	34
3.3.2 Kjøretøy med delt elektrisk og konvensjonell drivlinje	34
3.3.4 Kjøretøy med brenselcelle	34
3.4 Energibruk ved produksjon av kjøretøy	35
3.4.1 Batterier	36
3.4.2 Kjøretøyproduksjon.....	36
3.5 Data for beregning av totalt CO ₂ -utslipp	38
3.5.1 CO ₂ utslipp fra hybrid og elbil	39
3.5.2 CO ₂ utslipp fra elproduksjon	40
3.5.3 CO ₂ utslipp fra fossile energikilder.	40
3.6 Oppsummering	42
4. Resultater og diskusjon	44
4.1 Energibruk	44
4.2 CO ₂ utslipp	46
4.3 Mulige utfordringer og løsninger	49
4.4 vurdering av datakvalitet og avgrensninger	51
4.5 Forslag til videre arbeid.....	52
5.0 Konklusjon.....	53
Referanser.....	54

Figurliste

Figur 1: Totalt CO2 utslipp per kilometer for 9 energikjeder.	III
Figur 2: Total CO2 emissions per kilometer for 9 energy chains.	V
Figur 3: Enkel skjematisk fremstilling av en energikjede.	11
Figur 4: Energikjede delt opp i WTT og TTW.	12
Figur 5: Totalt energiforbruk inkludert kjøretøykonstruksjon.	12
Figur 6: Energikjedene for hydrogen produsert via dampreformeringsanlegg.....	18
Figur 7: Energikjede for råoljebasert drivstoff.....	19
Figur 8: Energikjede for Vannkraft til hydrogen.....	20
Figur 9: Energikjede for Vannkraft til el.....	21
Figur 10: Energikjede for EU-mix.	22
Figur 11: Energikjede for EU-mix til hydrogen.....	23
Figur 12: Andel av strøm produsert fra ulike teknologier i EU. Data hentet fra (International Energy Agency, 2020).	27
Figur 13: PEM elektrolyse av vann. Egen produksjon basert på (Shiva Kumar & Himabindu, 2019).	30
Figur 14 Totalt energibruk (Etot) per kjørt kilometer for 9 energikjeder.	44
Figur 15 Totalt CO2 utslipp per kilometer for 9 energikjeder.	46

Tabelliste

Tabell 1: skjematisk fremstilling av energikjedene.....	17
Tabell 2: Egenskaper hydrogen.....	25
Tabell 3 Egenskaper bensin.	26
Tabell 4: Viser elektrisitetsproduksjon per teknologi og virkningsgrader.	28
Tabell 5: Tap ved frakt av drivstoff.	32
Tabell 6: Egenskaper for de ulike kjøretøyene, alle tall oppgitt etter WLTP målt forbruk og utslipp.	34
Tabell 7: Viser energiforbruket ved kjøretøy og batteriproduksjon.	37
Tabell 8: CO2 utslipp fra kjøretøy og batteriproduksjon.	40
Tabell 9 Viser CO2-Faktor ved nedre brennverdi. Kilde: (Blok & Nieuwlaar, 2017)	40
Tabell 10 Virkningsgrader og CO2 utslipp, dampreforming.	41
Tabell 11 Oppsummeringstabell med oversikt over all data som er med i beregningen av totalt energiforbruk og CO2 utslipp.	42

Nomenklatur

H ₂	—	Hydrogen
CH ₂	—	Komprimert hydrogen
LH ₂ :	—	Flytende hydrogen
H _n	—	Nedre brennverdi
WTT	—	Primærenergiforbruk for drivstoff fra brønn til tank
TTW	—	Energiforbruk (drivstofforbruk) i kjøretøy
WTW	—	Primærenergiforbruk for drivstoff fra brønn til hjul
Etot	—	Totalt energiforbruk
CO ₂ tot	—	Totalt CO ₂ utslipp

Symboler

H₂

— Energikjeder som resulterer i hydrogen i hydrogenbil.



— Representerer energikjeder som resulterer i bensin og elektrisitet i hybridbil.



— Representerer energikjeder som resulterer i elektrisitet i elbil.

Det er økt fokus nasjonalt og internasjonalt på bruk av hydrogen som drivstoff for å redusere utslipp av klimagasser. Men hvor klimavennlig er egentlig hydrogen og hvordan kommer hydrogen ut sammenliknet med for eksempel moderne hybridbiler og elbiler? I denne oppgaven bruker jeg et såkalt livsløpsperspektiv for å finne svarene.

1. Bakgrunn

IPCC la i 2015 frem sin femte synteserapport om klimaendringer (IPCC, 2014). Rapporten redegjør for en rekke temaer tilknytter klimaendringer. I tillegg gjør rapporten en rekke observasjoner. Blant disse er det spesielt to bemerkelser som trekkes frem tidlig. Menneskelig påvirkning på klimasystemet er tydelig, og nylige antropogene utslipp er de høyeste noensinne. Rapporten bekrefter i tillegg at de nylige endringene har vist seg å gi store, utsprede endringer og påvirkninger for både mennesker, dyr og planter. Mellom perioden 1880 til 2012 regner IPCC med at den gjennomsnittlige globale temperaturen har økt mellom 0,65 og 1,06°C. Sannsynligvis var perioden mellom 1983 og 2012 den høyeste temperaturen på over 1400 år (IPCC, 2014). For å begrense virkningene av klimaendringer er det satt et mål om å begrense den globale oppvarmingen til 2°C og helst ikke mer enn 1,5°C. Gjennom Parisavtalen har en rekke land forpliktet seg til å rapportere sine klimagassutslipp, samt planlegge for hvordan dette skal gjennomføres, og fra 2023 skal alle land i verden rapportere hvert 5 år (Forente nasjoner, 2020).

Norge har gjennom prisavtalen tatt på seg en forpliktelse til å redusere sine klimagassutslipp med 50 og helst opp mot 55% innen 2030, sammenliknet med 1990 nivå (Klima- og miljødepartementet, 2020b). Dette er forsterket mål over det originale målet på 40% som Norge og EU godtok i 2018 (Miljøstatus, 2021). I tillegg til prisavtalen har Norge forankret klimapolitikken i Stortinget gjennom to klimaforlik for å sikre bred politisk enighet om klimapolitikken, og enighet rundt ansvaret for en reduksjon i klimagassutslippene. Forlik nummer en av 2008 sørget for at en rekke viktige virkemidler kunne benyttes i kampen mot klimaendringene. I 2012 kom forlik nummer to som viderefører og følger opp punktene i forlik en, samt legger til en beskrivelse av sentrale begreper i klimapolitikken. I tillegg presenterer klimaforliket 2012 mål for utslippsreduksjoner og en gjennomgang av ulike sektorer i økonomien (Klima- og miljødepartementet, 2020a).

I januar 2021 kom stortingsmelding 13, Klimaplan for 2020-2030. Meldingen legger frem politikken for hvordan Norge skal kutte i klimagassutslippene i perioden 2021 til 2030, i tråd med Norges egne mål og samarbeidet med EU.

Et sentralt element i meldingen er kutt i ikke kvotepliktige klimagassutslippene. Herunder jordbruk, transport og mer. Disse utslippene skal innen 2030 kuttes med 45% (Klima- og miljødepartementet, 2021).

Ifølge IEA står transportsektoren for nesten en fjerdedel av verdens klimagassutslipp (International energy agency, 2020). Herunder står veitransport (biler, busser, lastebiler og motorsykler) for nesten tre fjerdedeler av alle klimagassutslippene i transportsektoren. IEA legger til grunn for en holistisk tilnærming til transportsektoren for en bærekraftig utvikling og argumenterer for at nasjonale og multinasjonale samarbeid må opprettes, og opprettholdes om vi skal nå et såkalt «sustainable development scenario». Det trekkes spesielt frem tre viktige retningslinjer for å kutte i klimagassutslippene fra transportsektoren. Disse er: først og fremst redusere behovet for transport, effektivisere transporten, og legge til rette for mer miljøvennlige lavkarbon drivstoff (International energy agency, 2020).

IEA peker på hydrogen som et slikt lavkarbon drivstoff. På europeisk skala er transportsektoren svært avhengig av fossil energi. Ca. 95% av alle kilometerne kjørt med både personbil og annen transport skjer med råoljebaserte drivstoff. For å redusere utslippene fra transportsektoren har EU innført kvalitetskrav til drivstoffene og satt grenser for maksimalt CO₂ utslipp målt fra eksos. Ifølge «The European Commission's White Paper On Transport» skal utslippene reduseres med minst 60% innen 2050, sammenliknet med 1990 nivåer (European Environment Agency, 2020b). Målet skal nås ved hjelp av ny teknologi og effektivisering av eksisterende teknologi. En av de nye teknologiene som skal bidra til reduserte utslipp er bruk av hydrogen. I tillegg la Europakommisjonen i 2014 frem en strategi for utbygging av infrastruktur for alternative drivstoff. Blant de alternative drivstoffene er hydrogen og elektrisitet trukket fram som spesielt attraktive da de ikke fører med seg direkte klimagassutslipp under kjøring (Europakommisjonen, 2014).

Hydrogen er beskrevet i klimameldingen som energibærer med betydelig potensial til reduserte utslipp både nasjonalt og globalt, samt som mulig verdiskaper for norsk næringsliv (Klima- og miljødepartementet, 2021). I 2020 kom forskningsrådet på banen med en satsning på bærekraftig produksjon og bruk av hydrogen som en oppfølging av regjeringens hydrogenstrategi, og statsbudsjettet for 2021 omfatter bevilgning til hydrogensatsingen på 100 millioner kroner (Forskningsrådet, 2020). I tillegg til klimameldingen er et effektivt og miljøvennlig transportsystem viktige punkter av stortingsmeldingen om nasjonal transportplan 2022 til 2033 (Meld. St. 20 (2020–2021)).

Hydrogen som energibærer er aktuell både til lands og til vanns, i flyindustrien og i veitransportsektoren. Her er det veitransportsektoren som tidligere nevnt står for størsteparten av dagens utslipp. Av veitransporten utgjør personbiler den største enkeltkilden med en andel på snaut 80% av samlet total kjørelengde i Norge, og ca. 51% av de totale utslippene (Miljøstatus, 2020; Statistisk sentralbyrå, 2021b).

Hydrogendrevne biler har i utgangspunktet ingen klimagassutslipp under bruk, men fremstilling av hydrogen er ikke nødvendigvis utslippsfri. I dag er store deler av hydrogenproduksjonen basert på fossil energi med store klimagassutslipp (Tomasgard et al., 2019). Likevel mener Sintef i en rapport om hydrogen fra 2019 det er det mulig å produsere hydrogen på denne måten med lave utslipp, dersom produksjonen knyttes til CO₂-fangst og lagringssystemer (Tomasgard et al., 2019). En annen form for hydrogenproduksjon er elektrolyse. Gjennom elektrolyse kan hydrogen produseres uten klimagassutslipp, men elektrolyse er en energikrevende prosess som bruker mye strøm. Gitt at strømmen kommer fra fornybare energikilder er hydrogenet så godt som fri for utslipp. Kommer strømmen derimot fra CO₂ intensive energikilder som kull blir den svært lite klimavanlig. Det er altså viktig å se på hydrogenet gjennom et såkalt «livsløpsperspektiv». Det vil si at vi følger hydrogenet på veien «gjennom livet», fra produksjon til bruk. På denne måten er det mulig å si noe om den totale energimengden som kreves for fremstilling av hydrogen. Og ikke minst hvor stort det samlede utslippet av klimagasser er.

Det er imidlertid lite vits i å vite hvilket hydrogen som gir minst utslipp uten å vite noe om de andre mulighetene. Det er derfor inkludert to andre alternativer i denne studien. Nemlig elbil og en bensin-hybridbil. For å synliggjøre hvilket alternativ som gir best mulig miljømessige aspekter er det således viktig å evaluere hvordan hydrogenbilen kommer ut i forhold til konkurransen. Dette gjelder både i forhold til bruk av «drivstoff» og til produksjon av selve bilen. Svært høy energi og klimagassintensive produksjonsmetoder og materialer vil være med på å kunne bidra til høyere utslipp gjennom bilens livsløp. Man kan si at bilen med lavest produksjonskostnad starter løpet med et slags «forsprang». Det er imidlertid hvem som «vinner løpet» det er interessant å finne ut av. I det neste delkapittelet skal jeg se nærmere på hva forskningen sier om hvordan hydrogen kommer ut sett i et livsløpsperspektiv.

1.2 Kunnskapsgrunnlag

I kunnskapsgrunnlaget finnes en samling av flere studier presentert med et kort sammendrag av hva studien forsøker å svare på samt hva den konkluderer med. Til sammen skal kunnskapsgrunnlaget danne et bilde av hydrogen som drivstoff sammenlignet med andre alternativer, samt hvordan hydrogen produseres. I tillegg har kunnskapsgrunnlaget som formål å gi leseren en formening om hva som kan forventes av denne studien.

Kunnskapsgrunnlaget består av 10 individuelle studier med utgangspunkt i flere forskjellige land eller scenarioer. En kort oppsummering av funnene i kunnskapsgrunnlaget finnes i slutten av kapittelet.

(Bartolozzi et al., 2013) har sammenlignet hydrogen og elbil ved hjelp av livssyklusanalyse. Målet med undersøkelsen var å evaluere miljøpåvirkningen av hydrogen kjøretøy mot elektriske kjøretøy. I tillegg til miljøpåvirkninger fra produksjon av hydrogen har studien tatt for seg lagring, transport, distribusjon, produksjon og såkalt «end of life» påvirkninger. Det vil si at studien tar hensyn knyttet til miljømessige kostnader ved gjenvinning av kjøretøy. Studien konkluderer med tre hovedpoeng.

Det første hovedpoenget viser at bruk av fornybare energikilder gir bedre resultater for nesten alle innvirkningskategoriene enn bruk av Italiensk elektrisitetsmix. Det ingen overhvelmende indikatorer for hvilke av de fornybare teknologiene som gir best miljømessig resultat, men vind skiller seg ut som «aller best». Hovedpoeng nummer to viser at elbil scenarioer har generelt bedre miljømessige resultater enn hydrogenbiler, men det bemerkes at ingen lagring eller distribusjonstap er inkludert for elbil scenarioene. Likevel nevnes det at den lavere energieffektiviteten fra hydrogenproduksjon sansynligvis bidrar til dårligere resultater for hydrogenbiler. Det tredje hovedpoenget forteller at for scenarioer med elbil, er en større del av de miljømessige påvirkningene flyttet til produksjon og vedlikeholdsfasen, mens spesielt for scenarioer med hydrogen produsert via biomasse er innvirkningene skiftet til bruksfasen av hydrogenbilen. Det nevnes at disse skiftene varierer i stor grad med valg av energikilde (Bartolozzi et al., 2013).

I en livssyklusanalyse av kjøretøy basert på hydrogen eller fossile brennstoff, forsøker (Granovskii et al., 2006), å sammenlikne de to alternativene med fokus på energieffektivitet og miljøpåvirkning. Studien beskriver flere forskjellige energikjeder. Deriblandt utvinning av råolje og naturgass til fossile brennstoff og hydrogen via dampreforming, samt hydrogenproduksjon via elektrolyse med energi fra vind eller sol.

I tillegg tar den med seg energi og CO₂ ekvivalenter for transport, produksjon, og distribusjon (herunder kompresjon, kjøling og materialkostnader). Med utgangspunkt i en PEMFC (proton exchange membrane fuel cell), og en vanlig forbrenningsmotor viser studien at hydrogen produsert ved hjelp av vindenergi gir lavest energiforbruk totalt, samt lavest CO₂ utslipp. Studien viser og at hydrogenbiler må være minimum 25-30% mer effektive en konvensjonelle bensinbiler for å være konkurransedyktige forutsatt at hydrogenet kommer fra dampreformeringsanlegg (Granovskii et al., 2006).

En såkalt Well-to-Wheel analyse gjennomført av Pereira & Coelho i 2013 for hydrogenkjøretøy sammenligner flere forskjellige prosesser for hydrogenproduksjon. Denne studien fokuserer på å integrere modeller for å danne et realistisk bilde av den portugisiske kraftsektoren. Studien inkluderer både tall på energibruk og CO₂ utslipp for de forskjellige hydrogen produksjonsmetodene, og sammenligner disse med bensin. Inkludert i analysen finnes energikjeder som elektrolyse med portugisisk strøm miks, hydrogenproduksjon basert på biomasse, elektrolyse med vindkraft som elektrisitetsleverandør, elektrolyse med solkraft, dampreforming av naturgass etc. Analysen konkluderer med at hydrogenproduksjon fra vindkraft er den mest miljøvennlige metoden. Hydrogen produsert på denne måten har mer enn 85% lavere utslipp og 34% lavere energiforbruk sammenlignet med bensinbil. Et annet viktig funn er en økning på 43% i klimagassutslipp over bensin ved hydrogen produsert med elektrolyse og strøm supplert fra portugisisk elektrisitet mix (Pereira & Coelho, 2013).

En omfattende evaluering av fem hydrogenproduksjonsmetoder ble gjennomført av Cetinkaya et al., i 2012. Undersøkelsen tar utgangspunkt i en hydrogen-fyllestasjon i Toronto, Canada og hydrogenressurser i nærområdet. Blant produksjonsmetodene er dampreforming, kullforgasning, vannelektrolyse med kraft fra sol, eller vind, og termokjemisk splitting av vann. Energi og CO₂ ekvivalente utslipp fra de fem forskjellige energikjedene er evaluert og presentert. Studien har også sett på evnen til hydrogenproduksjon med de forskjellige metodene. Det konkluderes at termokjemisk splitting av vann gir best miljømessig resultat, etterfulgt av elektrolyse med strøm fra sol eller vindkraft. Sett fra et produksjonskapasitetsmessig perspektiv har både dampreforming av naturgass, kullforgassing og termokjemisk splitting en fordel over de fornybare alternativene (Cetinkaya et al., 2012).

En livssyklusanalyse av hydrogen som drivstoff i Australia har blitt gjennomført av Biswas et al., i 2013. Studien forsøker å svare på om hydrogen kan være et alternativ til bensin. Som kriterie setter studien at hydrogenet må ha et totalt lavere utslipp av skadelige gasser gjennom sin livssyklus enn det bensin har. Studien har tatt for seg to former for hydrogenproduksjon. Dampreforming av gass, og alkalisk elektrolyse med vann som råstoff. Undersøkelsen fant at hydrogen produsert ved dampreforming av gass generelt sett er bedre en konvensjonell bensin. For hydrogen produsert ved elektrolyse av vann er det svært avhengig av hvor strømmen kommer fra. Høy avhengighet av fossile brennstoff ga elektrolyse av vann dårligere miljømessige resultater enn konvensjonell bensin. Men hvis strømforbruket kommer fra vindenergi, gir hydrogenproduksjon med elektrolyse mye lavere utslipp enn både bensin og hydrogenproduksjon via dampreforming (Biswas et al., 2013).

Bhandari et al. har i 2014 gjennomgått over tyve studier som sammenligner ulike metoder for hydrogenproduksjon. Målet med studien har vært å undersøke hvilke potensiale hydrogenproduksjon via elektrolyse kan spille. I dag står elektrolyse for ca 4% av den globale hydrogenproduksjonen. Studien konkluderer med at det meste av forskning på temaet sammenligner konvensjonell strøm miks i området hvor hydrogenet produseres, med fornybar energi, men at parallell mellom elektrolyse og produksjon via abiomasse, kjernekraft, og fossile energikilder også eksisterer. Studien konkluderer videre med at produksjon fra fornybar energi er klart best med tanke på klima og miljø. Vind, sammen med vannkraft er de to ledende teknologiene men sol viser også lovende resultater. Studien nevner også at produksjon via biomasse viser gode resultater med tanke på GWP (global warming potential), eller potensiale til global oppvarming, men gir dårligere resultater på andre teamer som forsurningspotensial, og eutrofiering (Bhandari et al., 2014).

Simons & Bauer har i 2011 gjennomført en Well-to-Tank analyse av hydrogen som energibærer med målet at den skal brukes i en brenselcelle. Studien har satt som mål å sammenlikne forskjellige måter å produsere hydrogen. Undersøkelsen har hovedfokus på miljøprestasjonen fra de forskjellige produksjonsmetodene. Studien har satt 1kg hydrogen komprimert til 450kPa klar i pumpestatjon som basis for alle utregninger. Studien sammenlikner hydrogenet med miljøpåvirkningene fra konvensjonelle drivstoff samt naturgass. Studien har sammenlignet gassifisering av kull til syntesegass, produksjon av hydrogen ved bruk av biomasse, (i denne artikkelen er dette ansett for å være den grønne/fornybare teknologien), elektrolyse, med hensyn til forskjellige elektrisitetssmikser, dampreforming, og produksjon av hydrogen ved hjelp av termokjemisk fremstilling.

Studien konkluderer med at hydrogen som drivstoff i biler ikke automatisk gir bedre klimaregnskap en konvensjonelle drivstoff, men at ved bruk av metoder som elektrolyse av vann hvor strømmen er produsert fra fornybar kraft, eller kjernekraft vil gi lavere utslipp av klimagasser. Studien nevner også at med dagens teknologi (2007) vil hydrogen-drevne biler ha større utslipp av PM10 enn vanlige biler. Studien anerkjenner at den ikke har sett på teknologier som inkluderer vann, sol eller vind som utelukkende leverandør av elektrisitet til hydrogenproduksjon, og argumenterer for at disse alternativene burde undersøkes (Simons & Bauer, 2011).

Utslipp fra flere hydrogenproduksjonsmetoder med utgangspunkt i fossile energikilder har blitt analysert og sammenliknet med metoder for fremstilling av fossile brennstoff. De undersøkte hydrogenproduksjonsmetodene er reformering av bensin, diesel, eller naturgass til hydrogen, i tillegg er reformering av biodiesel fra soyabønner og reformering av avfallsolje fra matindustrien inkludert. Videre sammenlikner studien utslipp og energiforbruk fra kjøretøy som benytter hydrogen brenselcelle, batteri, og forbrenningsmotor. Resultatene indikerer lave utslipp fra både hydrogen og elektrisk kjøretøy. Blant hydrogenproduksjonsmetodene var det hydrogen fra naturgass, og hydrogen fra avfallsolje som viste best resultater. Elbiler viste generelt sett dårligere resultater enn hydrogenbiler. Dette begrunnes stor andel kullkraft i kina. Hvis elbiler skal kunne konkurrere med hydrogen fra dampreforming av naturgass konkluderer studien med at andelen kull må falle til ca. 40% og fornybarandelen må øke til 20% (Dong et al., 2016).

Smitkova et al., har i 2011 sammenlignet fire forskjellige måter å produsere hydrogen. To av disse er basert på termokjemisk splitting av vann. Disse er Westinghouse cycle (SW) og Sulphur-iodine cycle (SI). Det ble gjennomført livsløpsanalyse ved hjelp av simuleringsprogramvaren Simapro og resultatene ble sammenliknet med resultater fra livsløpsanalyser av gassifisering av kull, og kull pyrolyse. Sammenlikningen viser at termokjemisk splitting av vann er en attraktiv metode for hydrogenproduksjon på grunn av lave miljøpåvirkninger. Spesielt i sammenheng med bruk av solenergi til oppvarming da både SI og WH syklus krever høye temperaturer for å operere (Smitkova et al., 2011).

Koroneos et al., har i 2004 gjennomført livsløpsanalyse der hydrogen er produsert fra flere ulike produksjonsmetoder. Studien setter et tydelig skille mellom de fornybare og de ikke fornybare energikildene og grupperer de inn i to grupper (A og B). I gruppe A finnes de ikke fornybare energikildene som består av naturgass. I gruppe B finnes en rekke fornybare teknologier, blant disse er strøm fra vann, vind, og sol til elektrolyse, samt direkte konversjon fra bruk av solceller. Studien konkluderer med at valget av produksjonsmetode spiller meget stor rolle for hvor miljøvennlig hydrogenproduksjon er. I studien ble det funnet at direkte konversjon med bruk av solceller er lite attraktivt grunnet lav virkningsgrad samt høye kostnader for produksjon av solceller. Videre ble det funnet at fornybare energikilder gir best miljømessig resultat, men det er utfordringer her også knyttet til lav utnyttingsgrad. Dampreforming ble funnet til å ha stort potensiale for global oppvarming grunnet store CO₂ og SO_x utslipp (Koroneos et al., 2004).

1.3 Oppsummering kunnskapsgrunnlag

Av kunnskapsgrunnlaget kommer det frem noen viktige poeng. I de aller fleste tilfeller er fornybar energi til hydrogenproduksjon attraktivt, men det finnes utfordringer i form av elektriske kjøretøy. Elektrisitet fra vindkraft trekkes flere ganger frem som «vinneren», altså den teknologien som i et livsløpsperspektiv gir best miljø og klimamessige resultater. Dampreforming av naturgass er en dominerende teknologi, med stort potensiale for høyt produksjonsvolum og er i den forstand en utfordrer til fornybar energi. I land med høy andel fossile energikilder og spesielt høy andel kullkraft i elektrisitetsmiksen er hydrogenbiler ofte å foretrekke uansett om hydrogenet produseres via dampreforming eller elektrolyse med fornybare energikilder. Dette kan endre seg med høy andel fornybar energi i elektrisitetsmiksen. Hydrogen produsert ved hjelp av termokjemisk splitting av vann viser gode resultater, men det viktig å notere seg at teknologien er en lang vei unna kommersialisering (Tomasgard et al., 2019).

Vi har nå fått et greit bilde av hvilke teknologier som later til å prestere best under gitte scenarioer, men det er fremdeles usikkert i hvilken grad hydrogenbiler kan være en del av det grønne skiftet i Norge, og Europa. Fra kunnskapsgrunnlaget lærer vi at hydrogen under de rette omstendighetene er attraktivt, men Norge har en helt spesiell elektrisitetsmikse, hvordan dette vil påvirke levedyktigheten for hydrogen her til lands er usikkert. Det er også interessant å vite noe om konkurransedyktigheten til hydrogen i større skala i et stadig mer sammenknyttet Europa.

Kunnskapsgrunnlaget danner et bilde for land som Italia, og Portugal, men med en svært kompleks elektrisitetssituasjon i ett samlet EU er det usikkert hvordan hydrogen som drivstoff måler seg med andre alternativer og om det kan være et godt alternativ for satsing for EU landene.

1.4 Problemstilling

Kunnskapsgrunnlaget gir en smakebit på hva som er interessant å svare på. Som et overordnet mål kan man si at denne oppgaven skal bidra med mer kunnskap om hydrogen som drivstoff i personbiler kan bidra til å redusere utslippet av klimagasser. Det er i den sammenheng noen spesifikke spørsmål det er viktig å stille seg:

1. Hvilken metode for hydrogenproduksjon gir lavest utslipp?
2. Kan hydrogenbilen konkurrere mot moderne el og hybridbiler, og under hvilke betingelser er det i så fall fordelaktig å benytte seg av hydrogen?

For å gi svar på dette skal vi se på to parametere, nemlig energi og CO₂ utslipp. Mengden energi som må til for å flytte bilen fra A til B er en viktig parameter. Et høyt energibruk er ofte korrelert med større utslipp, men ikke alltid. I denne oppgaven brukes energimengden i flere tilfeller som et mellomledd for utregning av utslipp.

For at en hydrogenbil skal ansees som «bedre» enn alternativene gjelder følgende kriterier. Det forutsatt at hydrogenbilen må ha enten lavere energibruk eller lavere CO₂ utslipp, eller begge deler, enn alternativene. Lavere CO₂ utslipp, men høyere energibruk kan i tilfelle det skulle være aktuelt ansees som «bedre», spesielt om energien kommer fra fornybare kilder. Lavere energibruk, men høyere utslipp vil ikke anses som bedre. Det kan være verdt å bemerke seg at høyt energiforbruk i en del tilfeller kan tenkes å føre til andre miljømessige problemer som for eksempel beslaglegging av store areal. Dette er imidlertid ikke undersøkt i denne oppgaven, men diskuteres kort i kapittel 4.

Som referansekjøretøy er det tatt utgangspunkt i persontransport med en bil i Golf-klassen. Alle beregninger er basert på gjennomsnittlige norske kjørelengder og tar utgangspunkt i WLTP målt forbruk i bilene.

I oppgaven anvender jeg et livsløpsperspektiv der energibruk og utslipp av klimagasser i hele livsløpet inkluderes. Spesifikt benytter jeg meg av en såkalt energikjedeanalyse (nærmere beskrevet i kapittel 2) der en energikjede kan sees på som en sammenkobling av prosesser som til sammen danner grunnlaget for at en bil skal kunne forflytte seg fra A til B.

Disse prosessene består av alt fra utvinning av råmaterialer til bilen nyttiggjør seg av «drivstoffet» til bevegelse. Energikjedeanalyse anvendt i transportsektoren kalles gjerne «Wheel-to-Well» analyse. I oppgaven analyserer jeg 9 energikjeder for hydrogenbiler (basert på ulike energikilder og produksjonsmetoder), elbiler (med ulike forutsetninger om bruk av energikilde) og bensin hybridbil. Energikjedene er presentert i detalj i kapittel 2.

Resultatene fra analysen er delt opp og beregnet ut ifra noen enkle begreper. Disse skal jeg gå dypere inn på senere, men kort oppsummert kan de beskrives som:

- Etot: Den totale energimengden, består av WTT+TTW, og produksjon av kjøretøy og batterier.
- WTT: Omtaler de prosessene som skjer fra utvinning av drivstoff til det er på tanken av bilen.
- TTW: Energien brukt til å flytte bilen fra A til B.
- Produksjon av kjøretøy og batterier handler om energimengden som kreves for å lage bilen.

Energiberegningene utgjør så grunnlaget for å beregne de totale utslippene av klimagasser (CO₂).

1.5 Oppbygging av oppgaven

Denne oppgaven er bygget opp etter følgende måte: i kapittel 2 redegjøres det for metoden som brukes gjennom oppgaven. Metoden er i stor grad basert på den veletablerte fremgangsmåten presentert i (Holden, 2003), men inneholder også enkelte andre elementer. I kapittel 3 beskrives all dataen oppgaven baserer seg på. Kapittel 3 har i denne omgang fått stor oppmerksomhet og kan sees på som oppgavens «hovedkapittel», da oppgaven er avhengig av et svært godt etablert datagrunnlag. I kapittel 4 presenteres og diskuteres oppgavens resultater. Det tas også opp noen andre sentrale temaer som ikke er tidligere diskutert, og det gis forslag til videre arbeid. I kapittel 5 finnes en kort konklusjon.

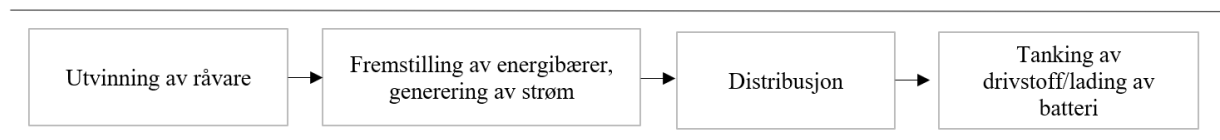
Det er viktig å understreke at når det snakkes om Europa er det tatt utgangspunkt i EU – 28. Det vil si de 28 medlemslandene som var medlem av EU- per 30. januar 2020 (Mustad, 2020). Grunnlaget for dette er at Storbritannia som gikk ut av EU 31. januar 2021 er en stor nasjon som står for ca. 11% av det totale EU-28 utslippet (Eurostat, 2021).

2. Metode

Denne studien benytter seg av metoden «energi og miljømessige livsløpsanalyser». En livsløpsanalyse er i utgangspunktet en metode utviklet for å analysere de miljømessige konsekvensene fra et produkt, eller en tjeneste. Poenget er å inkludere alle de miljømessige aspektene gjennom et «livsløp» slik at man kan foreta gode avgjørelser som gir minst mulig miljøbelastning (Nestaas & Grønmo, 2020). Denne formen for analyse forkortes gjerne til LCA som står for «life cycle analysis».

I dag har mange land utviklet egne standarder for gjennomføring av livsløpsanalyser og metoden er i tillegg internasjonalt standardisert gjennom ISO og SETAC (ISO, 2006; United Nations Environment Programme, 2011). De første livsløpsanalysene kom imidlertid på 1970 tallet. Disse var kjent som livsløpsenergianalyser og fokuserte i hovedsak på mengden primærenergi som kreves for å utføre en funksjon, for eksempel produksjon av en råvare, leveransen av en tjeneste eller liknende (Blok & Nieuwlaar, 2017).

I denne studien benyttes livsløpsenergianalyse. Vi skal imidlertid forholde oss til begrepet energikjedeanalyse (Blok & Nieuwlaar, 2017), men resultatet vi er ute etter er for så vidt de samme. Målet er altså å kalkulere det totale primærenergiforbruket for en rekke energikjeder. I tillegg skal vi benytte oss av dette energiforbruket til å beregne CO₂ utslipp. En enkel utgave av en energikjede er vist i figur 3.

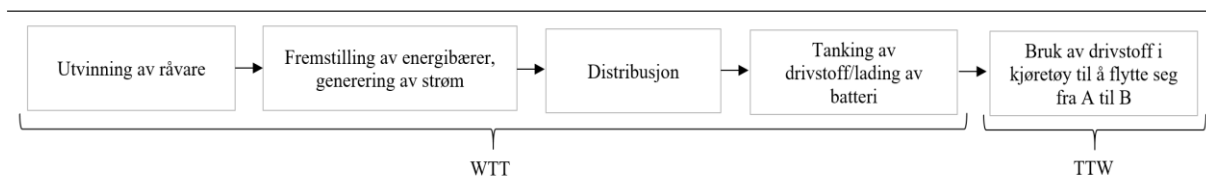


Figur 3: Enkel skjematisk fremstilling av en energikjede.

Energikjedeanalyser innenfor transportsektoren kalles gjerne «Well-to-Wheel-analyser», og kan fortrinnsvis deles opp i to hoveddeler (Blok & Nieuwlaar, 2017). Den første hoveddelen omhandler drivstoffet og forkortes WTT eller «Well-to-Tank». På norsk kan det oversettes som «brønn til tank analyse».

Enten det er snakk om konvensjonelle drivstoff eller alternativer som el, eller hydrogen sier en WTT analyse noe om hvor mye primærenergi som kreves for å levere en viss mengde ferdig drivstoff på tanken, eller strøm ladet på et batteri. Den andre hoveddelen av en WTW analyse består av motor, og drivverk – altså den energien som trengs for å flytte bilen fra A til B. Denne delen av analysen forkortes TTW «Tank-to-Wheel». Til sammen utgjør WTT og TTW en fullstendig WTW analyse (Blok & Nieuwlaar, 2017; Holden, 2003).

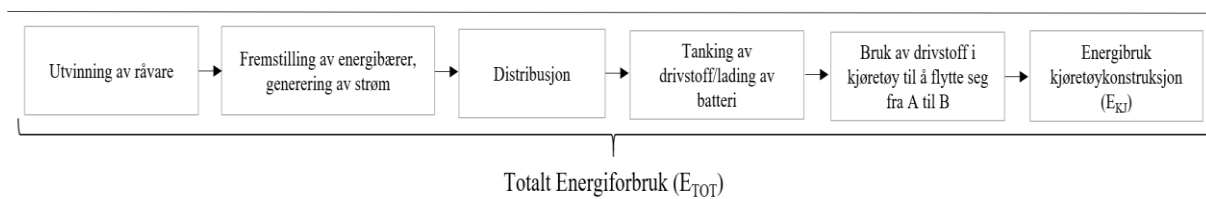
Figur 4 viser hvilken del av en full WTW analyse som dekkes av WTT og TTW.



Figur 4: Energikjede delt opp i WTT og TTW.

Ved gjennomføring av en energikjedeanalyse er det viktig å tydeliggjøre hvor systemgrensene i analysen er satt. Hvilke aktiviteter knyttet til produksjon, bruk, transport etc. skal man inkludere i analysen? Forutsatt at man allerede har satt seg et mål om hva man skal finne ut av og eventuelt hvilke energikjeder man ønsker å sammenligne kan man bruke denne informasjonen til å sette systemgrenser. Ønsker man for eksempel å sammenligne konvensjonelle drivstoff med el må vi finne en enhet som lar seg anvende for begge (Blok & Nieuwlaar, 2017). Her lønner det seg for eksempel ikke å benytte seg av liter, kg, meter, eller liknende, dessuten har vi tidligere bestemt at vi er ute etter å vite mengde primærenergi per enhet, mer spesifikt MJ primærenergi per kilometer (MJ_P/km).

I tillegg til energiforbruket fra drivstoffproduksjon er målet med denne studien å inkludere transportmidlenes livsløp. Herunder finner vi den energimengden som knyttes til produksjon, av transportmidler, inkludert produksjon av motor, drivverk, batterier og liknende. Heretter omtales denne energimengden som (E_{KJ}). Ytterligere har studien også som mål å inkludere CO_2 utslipp knyttet til denne prosessen.



Figur 5: Totalt energiforbruk inkludert kjøretøykonstruksjon.

2.1 Analysemetode

Vi skal se nærmere på fremgangsmåten for beregning av energibruk og CO₂ utslipp. Totalt energibruk er gitt av sammenhengen:

$$(1) E_{TOT} = WTW + E_{KJ}$$

der,

E_{TOT} = Totalt primærenergiforbruk for energikjede nr. 1 [MJ_P/km]

WTW = Primærenergiforbruk for drivstoff fra brønn til hjul for energikjede nr. 1 [MJ_P/km]

E_{KJ} = Primærenergiforbruk fra kjøretøy og batteriproduksjon for energikjede nr. 1 [MJ_P/km]

I Blok & Nieuwlaar kalles denne fremstillingen for tredje orden representasjon, noe som innebærer at alle tidligere tap, herunder energibruket i hele drivstoffets livsløp er tatt med i beregningen, og det i tillegg er inkludert den energimengden som kreves for å produsere kjøretøyet (Blok & Nieuwlaar, 2017). Videre kan uttrykket deles opp ytterligere. Vi vet fra tidligere at WTT omhandler prosessene fra utvinning til drivstoffet er på tanken. Blok kaller det andre ordens representasjon. Det totale primærenergibruket (E_{TOT}) tilsvarer det Blok kaller tredje ordens representasjon.

WTT resultatene er et produkt av tap i delprosessene frem til kjøretøyet (figur 1) og beregnes av sammenhengen:

$$(2) WTT = \frac{1}{\prod_1^n \eta_n}$$

der,

WTT = Primærenergiforbruk for drivstoff fra brønn til tank [MJ_P/MJLevert]

η = Virkningsgrad for delprosess n (se figur 1) [%]

Blok & Nieuwlaar omtaler dette som «energy required for energy» (ERE), som på norsk vil bli noe sånt som (primær)energibehov for (levert)energi. I bunn og grunn er det snakk om mengden primærenergi i MJ per MJ energi levert. Nå kan vi se at $WTW = ERE * TTW$, dermed har vi kommet så langt at vi kan begynne å få svar på det studien forsøker å svare på.

WTW beregnes så av sammenhengen:

$$(3) WTW = WTT * TTW$$

der,

WTT = ... (beregnet av formel (2) [MJp/MJLevert kjøretøy]

TTW = Energiforbruk (drivstofforbruk) i kjøretøy [MJ/km]

Til slutt skal vi se på totalt CO₂ utslipp. Dette gjøres ved å benytte seg av den totale energimengden ganget med en utslippsfaktor for den enkelte primærenergikilde, pluss utslipp fra bil og eventuell batteriproduksjon. Totalt CO₂-utslipp er gitt av sammenhengen:

$$(4) \text{CO}_{2\text{TOT}} = E_{\text{TOT}} * \text{utslippsfaktor} + \text{CO}_{2\text{PROD}}$$

der,

$\text{CO}_{2\text{TOT}}$ = Totalt CO₂ utslipp gitt i [g/km]

E_{TOT} = Primerenergiforbruk i [MJ/km]

Utslippsfaktor = CO₂ utslipp gitt i [g/MJ]

$\text{CO}_{2\text{PROD}}$ = CO₂ utslipp fra produksjon av kjøretøy og batterier gitt i [g/km]

2.2 Well-to-Wheel analyse

Ved gjennomføring av en «Well-to-Wheel»-analyse er man avhengig av store mengder data. I en perfekt verden ville kanskje denne dataen stamme utelukkende fra simuleringer og laboratoriemålinger. I virkeligheten ville dette blitt en ekstremt krevende affære. Derfor kan det være lurt å dele inn dataen som benyttes i to hovedgrupper, primær og sekundærdata. Når det snakkes om primærdata menes det simuleringer, eller målinger utført i laboratorium. Sekundærdata oppdrives gjennom kritisk gjennomgang av allerede eksisterende litteratur. Det vil som regel alltid forbli et spørsmål om hvilken grad man baserer seg på sekundærdata (Holden, 2003).

Et annet viktig poeng ved en WTW analyse er i hvilken grad man bestemmer seg for å gå inn på de individuelle delprosessene. Valget her står mellom å bruke data for individuelle delprosesser, eller å benytte seg av ferdige WTW data. Begge metodene har fordeler og ulemper. Velger man å basere seg på allerede eksisterende livsløpsdata vil mengden data man behøver å hente inn bli mye mindre, men man mister muligheten til å etablere analyser for nye energikjeder. Man vil i tillegg miste mye av «kontrollen» over analysen og delprosessene ved at man mister muligheten til å kontrollere detaljer innad i hver delprosess (Holden, 2003).

2.2.1 Well-to-tank

Well-to-Tank betegner de delprosessene som ligger mellom og inkluderer utvinning, til drivstoffet er på kjøretøyets tank. I denne studien er WTT prosessen delt opp i fem delprosesser.

1. Utvinning: Produksjon/utvinning av en energikilde.
2. Transport: Transport av energikilde fra produksjon/utvinningssted til anlegg for produksjon av drivstoff.
3. Drivstoff produksjon
4. Distribusjon: Distribusjon av drivstoffene fra produksjonssted ut til fyllestasjoner. Eventuelt via nettsystem til ladestasjoner.
5. Tanking/sluttbehandling: Fylling av drivstoff på kjøretøyets tank etter eventuell reformering, kjøling, komprimering, etc.

2.2.2 Tank-to-Wheel

Hvis det nå skulle være aktuelt å utvide analysen, vet vi fra tidligere at $WTT+TTW=WTW$. TTW omhandler den delen av analysen hvor kjøretøyet flytter seg fra A til B. Det er altså snakk om at kjøretøyet benytter seg av drivstoffet på tanken til å utføre et arbeid. Enten det er i form av en brenselcelle, eller forbrenning av bensin i en konvensjonell motor må det omdannes en viss mengde energi. Denne energien kan komme fra flere kilder, men i denne studien er det snakk om kjemisk eller elektrisk energi som omdannes til kinetisk energi, eller bevegelsesenergi om du vil.

2.3 Datakilder og -forutsetninger

Denne studien baserer seg utelukkende på sekundær data. Det vil si at det blir desto viktigere å sørge for et godt datagrunnlag. For selve analysen er det lagt til grunn en delprosess tilnærming. Det innebærer at data for hver enkel del av energikjeden ble hentet inn og vurdert. Det er derfor besluttet at et minimum av to kilder skal ligge til grunn for de tallene som regnes for å være av spesielt viktig karakter. Herunder finner vi tall som vil føre til store endringer i analysen, for eksempel virkningsgrader i kraftverk, hvor små endringer vil gi store utslag på sluttresultatet.

Det er i tillegg besluttet å benytte et såkalt «best available technology» eller (BAT) prinsipp. På norsk oversettes det til noe sånt som beste tilgjengelige teknologi.

Det vil si at tallene benyttet for hver enkelt delprosess i analysen er valgt ut ifra hva som kan rimelig forventes av et moderne anlegg eller kjøretøy. Denne fremgangsmetoden er valgt fordi de konvensjonelle drivstoffene i analysen består av moden teknologi i motsetning til de alternative drivstoffene. Her kan det også være verdt å notere seg at litteraturen opererer med store sprik i dataene. For eksempel er virkningsgraden for et dampreformeringsanlegg oppgitt til mellom 70% og 90% (Peng, 2012; Aarnes et al., 2019). Dette er noe som vil kunne gi store utslag i analysen avhengig av tallet man velger. Det er naturligvis sånn at noen vil ha interesse av å fremstille teknologien sin best mulig. Begrepet kalles «oversell» og går ut på at man konstant opererer med virkningsgraden på 90%, samtidig som man kanskje viser til laveste virkningsgrad for konkurrerende teknologier, «overkill». Mekanismene bak en slik dynamikk kan være mange, men det er ikke nødvendig å gå videre inn på dette nå. Målet med å benytte et beste tilgjengelige teknologi prinsipp er altså å unngå et scenario hvor det er «oversell» eller «overkill» for et eller flere av drivstoffene.

Litteratursøket er gjennomført med hjelp av databaser som Brage, google scholar, og søkemotoren i Elseveier. Det er i tillegg hentet informasjon fra artikler i magasiner og aviser, nettsider og statistikkdatabanker som SSB. International energy agency (IEA), og European environment agency (EEA), har begge vært viktige kilder for innhenting av statistikk. En annen viktig kilde er elektroniske bøker.

2.4 Energikjedene

I utgangspunktet finnes det enormt mange energikjeder å velge mellom. Likevel er det ikke sånn at det er hensiktsmessig å analysere alle. Det skyldes flere grunner. Noen energikjeder er i seg selv lite lovende for fremtiden, mens andre baserer seg på teknologier som ikke er relevante for verken norske eller europeiske forhold.

Det er i tillegg fordelaktig å begrense antall energikjeder da å inkludere for mange, fort vil føre til rotete og uoversiktlige resultater, samt drukne ellers interessante budskap og funn (Holden, 2003). I denne studien er det valgt å analysere energikjeder som allerede er godt tilgjengelige i Norge og Europa, og som i litteraturen viser seg som relevante for fremtiden. Fra kunnskapsgrunnlaget vet vi at vind er den teknologien som viser seg som mest lovende.

I denne studien er vindenergikjeden byttet ut med vann. Dette er fordi vann er dominerende energiteknologi i Norge, og har også en god andel i den europeiske elektrisitetsmiksen. Vann og vindenergi er i tillegg begge sett på som rene fornybare energikilder.

Det er likevel vanskelig å se for seg en større bilpark hvor alt hydrogen kommer fra vannkraft, eller elektrisitet da det vil kreve enorme mengder strøm. I litteraturen kommer det frem at hydrogenproduksjon gjennom dampreforming av naturgass er den dominerende teknologien verden over. Spesielt trekkes dampreforming med karbonfangst frem som et godt alternativ. I Tabell 1 er det fremstilt en oversikt over de forskjellige energikjedene.

Tabell 1: skjematisk fremstilling av energikjedene.

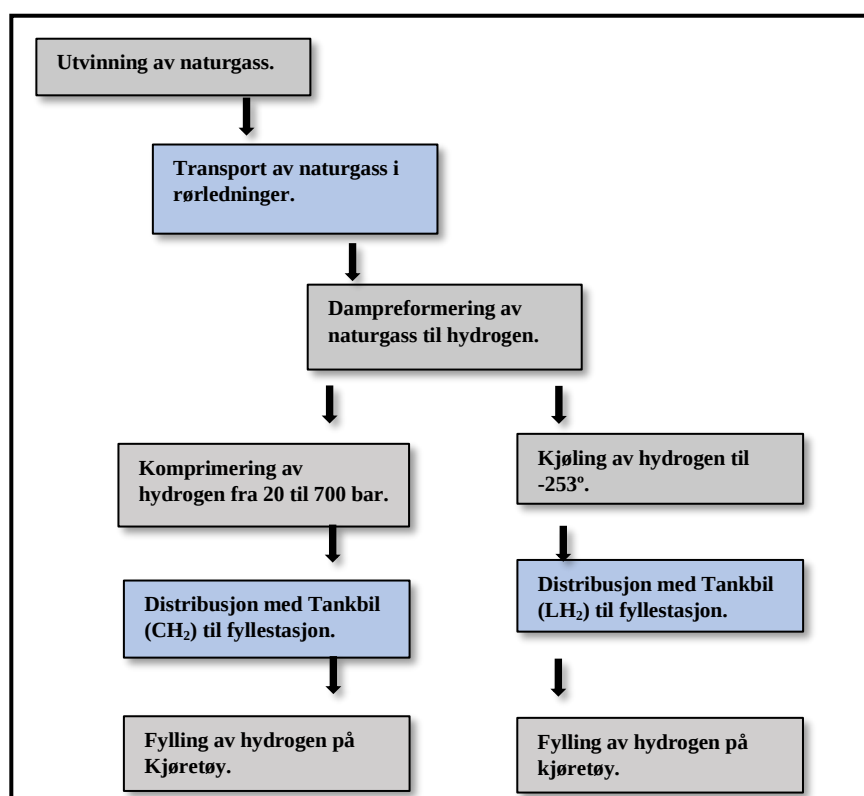
Energikjede	Produksjonsmetode	Drivstoff	Kjøretøy/motor	Kortnavn	Nr.
Naturgass	Dampreforming	Hydrogen	Brenselcelle	NG-CH2	1
	Dampreforming med karbonfangst			NG-LH2	2
				NG-CH2 (CCS)	3
				NG-LH2 (CCS)	4
	EU-MIX			Elektrolyse	
Vannkraft	Elektrolyse		Vann-H2	6	
Råolje	Raffinering	Bensin	Forbrenningsmotor/ elmotor (Hybrid)	RÅ-ICE (HYB)	7
Vannkraft	Elproduksjon	Strøm	Elmotor	Vann-Batt	8
EU-MIX				EU-Batt	9

2.4.1 Dampreforming av naturgass til hydrogenproduksjon

Naturgassprodusert hydrogen danner fire energikjeder og tar utgangspunkt i naturgassutvinning i Nordsjøen. Gassen fraktes i rørledninger til sentralt dampreformeringsanlegg på land. Distribusjon til fyllestasjon kan foregå på flere måter, men i dette tilfellet er transport med lastebil/trailer vurdert. Grunnen til dette er den enorme kostnaden assosiert med utbygging av rørnett (Ocean Hyway Cluster, 2020). Normalt sett har frakt foregått ved hjelp av komprimert hydrogen (CH_2) i såkalte rørhengere. For transport med rørhenger komprimeres hydrogenet til høyt trykk, normalt rundt 700 bar. På denne måten kan det leveres ca. 1000kg hydrogen av gangen (Aarnes et al., 2019). Det er tatt utgangspunkt i at hydrogen produseres med et trykk på 20 bar (García, 2015).

En annen metode for frakt av hydrogen med trailer/tankbil er i flytende form (LH_2). Denne metoden gjør det mulig å transportere opptil 3500kg hydrogen per tankbil. Frakt av hydrogen i flytende form er mer energikrevende og gir mer tap en CH_2 , men gjør opp for mye av dette med høyere transportvolum og energitetthet (Ocean Hyway Cluster, 2020; Aarnes et al., 2019)

Figur 6 viser en skjematisk fremstilling av energikjedene for hydrogen produsert via dampreforming. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes i tabell 11.

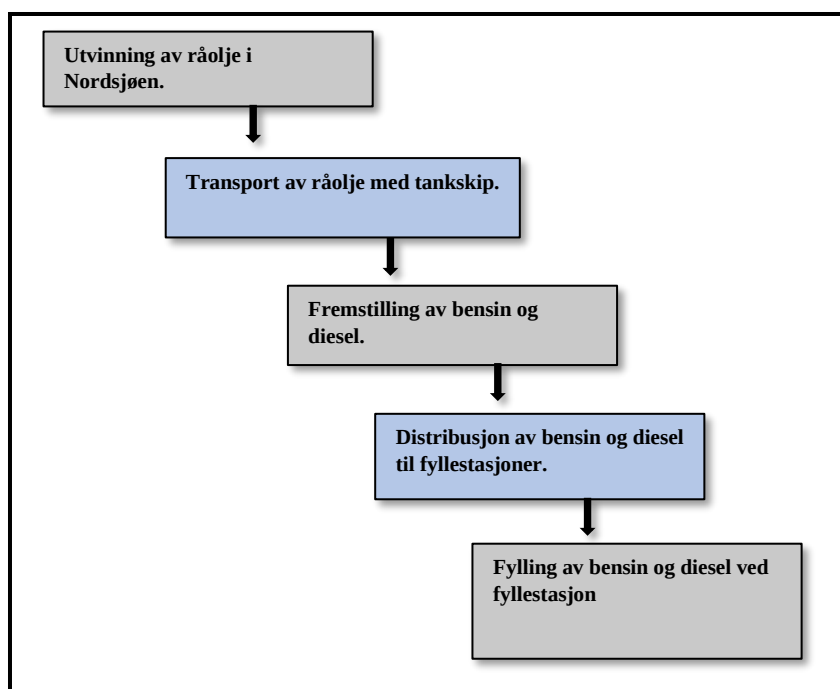


Figur 6: Energikjedene for hydrogen produsert via dampreformeringsanlegg.

2.4.2 Råoljebaserte drivstoff

Det råoljebaserte drivstoffet i denne studien tar utgangspunkt i råolje utvinnet i Nordsjøen. Herifra fraktes råoljen med skip til raffineri på land. Ved raffineriet fremstilles bensin som videre fraktes med tankbil til fyllestasjoner.

Figur 7 viser en skjematisk fremstilling av energikjeden for det råoljebaserte drivstoffet. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes i tabell 11.



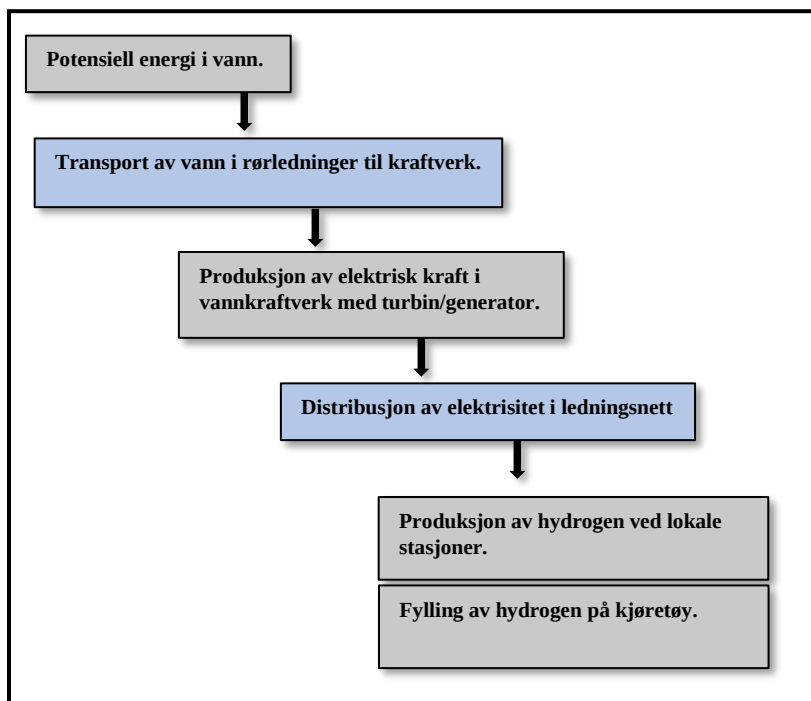
Figur 7: Energikjede for råoljebasert drivstoff.

2.4.3 Vannkraft til hydrogen

Denne energikjeden tar utgangspunkt i vannkraft som leverandør av elektrisk kraft til lokal hydrogenproduksjon. Energifkjeden starter med den potensielle energien i vannet, som fraktes gjennom rørgater til et vannkraftverk. I vannkraftverket produseres elektrisk kraft ved hjelp av turbin/generator. Den elektriske kraften distribueres så ut på ledningsnettet og til brukerne.

På fyllestasjonene benyttes den elektriske kraften til elektrolyse av vann og hydrogen produseres. Deretter fylles hydrogenet direkte på kjøretøyet. Denne formen for hydrogenproduksjon eliminerer behovet for å frakte hydrogenet over lengre avstander.

Figur 8 viser en skjematisk fremstilling av energikjeden for vannkraft til hydrogen. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes i tabell 11.

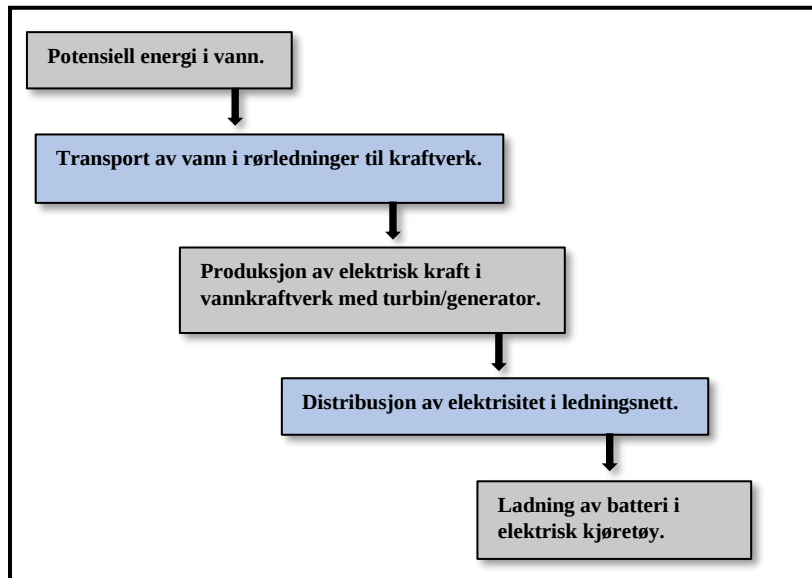


Figur 8: Energifkjede for Vannkraft til hydrogen.

2.4.4 Vannkraft til El

Denne energikjeden er veldig lik som energikjeden for vannkraft til hydrogenproduksjon, men i dette tilfellet ender energikjeden opp som elektrisk kraft tilført et elbilbatteri.

Figur 9 viser en skjematisk fremstilling av energikjeden for vannkraft til hydrogen. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes i tabell 11.

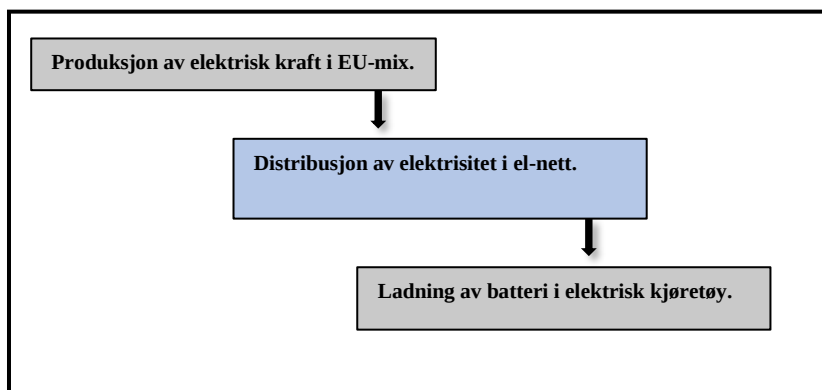


Figur 9: Energikjede for Vannkraft til el.

2.4.5 Produksjon av elektrisk kraft i EU

Denne energikjeden tar utgangspunkt i elektrisk kraft produsert i en EU-miks inkludert Storbritannia. Denne el-miksen består i hovedsak av strøm produsert fra Kull, olje, naturgass, bioenergi, kjernekraft, vann, sol og vind. De forskjellige teknologiene danner i utgangspunktet alle sin egne energikjede, men i likhet med hverandre munner de ut i levert strøm. I denne studien har virkningsgraden og energiproduksjonen for hver enkelt av de største teknologiene blitt regnet ut slik at de kan representeres som ett system.

Figur 10 viser produksjon av elektrisitet i en EU-miks. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes tabell 11.

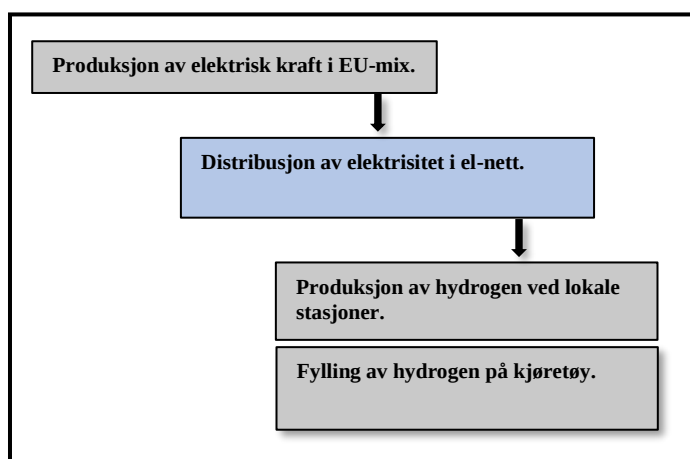


Figur 10: Energikjede for EU-mix.

2.4.6 Elektrisk kraft i EU-mix til hydrogen

Denne energikjeden likner i stor grad på energikjeden «Vannkraft til hydrogen», men her er utgangspunktet for elektrisk kraft hentet fra EU-mix. Det vil si at det er en rekke teknologier som leverer strøm til lokale stasjoner hvor hydrogen produseres ved elektrolyse av vann. I liket med energikjeden for EU-miks til elektriske kjøretøy benytter også denne energikjeden en samlet virkningsgrad for de el-produserende teknologiene.

Figur 11 viser produksjon av elektrisitet i en EU-miks. Data benyttet for hver enkelt delprosess finnes i tabell 11.



Figur 11: Energifkjede for EU-mix til hydrogen.

3. Data

I dette kapittelet presenterer jeg data som er brukt i beregning av samlet energibruk og CO₂-utslipp. Kapittelet har fire deler. I den første delen (kapittel 3.1) presenterer jeg (energi)data for prosessene fra utvinning av energikilde til bruk i kjøretøyet (WTT). Energikrevende prosesser (f.eks. dampreforming, elektrolyse, produksjon av strøm) går jeg gjennom nokså detaljert; mindre prosesser oppgis med verdi og kilde. I den andre delen (kapittel 3.2) presenterer jeg data for energibruk i kjøretøyet (TTW), henholdsvis brenselcelle H₂, elbil og hybrid fossilbil. I den tredje delen (kapittel 3.3) går jeg gjennom energibruk ved produksjon av kjøretøy for de tre typene, herunder også nødvendig tilleggskomponenter (f.eks. batteri). I den fjerde delen (kapittel 3.4) presenterer jeg data for beregning av CO₂-utslipp.

3.1 WTT energibruk

3.1.1 Fossil prosesser

Fossile brenslere kan defineres som tidligere tiders solenergi, og består i hovedsak av organisk materiale og har i den sammenheng store mengder karbon. De fossile prosessene består her av dampreforming, og utvinning og raffinering av råolje til bensin, og en rekke prosesser involvert i forbindelse med elektrisitetsproduksjon i EU, som utvinning og brenning av kull, og gass. Felles for de fossile prosessene er at de ikke er fornybare, og at de fører med seg betydelige CO₂ utslipp (Rosvold & Hofstad, 2018). Vi skal se nærmere på de fossile prosessene som er av størst betydning for denne studien. Andre relevante tall finnes i tabell 11.

3.1.2 Dampreforming

Hydrogen er en potent energikilde. I tillegg til at hydrogen er antatt å være det mest vanlige grunnstoffet i universet (Tomasgard et al., 2019), inneholder hydrogen enormt mye energi, spesielt om man regner per kg. Sammenliknet med konvensjonelle drivstoff som bensin og diesel har hydrogen nesten tre ganger så høyt energiinnhold. I tillegg har hydrogen den fordel at gassen ikke har noen form for klimagassutslipp verken ved forbrenning eller i en brenselcelle. Likevel er det store utfordringer med bruk av hydrogen som energikilde.

Hydrogen opptrer naturlig under svært små mengder i gassform. Kombinert med hydrogenets lave vekt og lave tetthet forsvinner gassen raskt ut av atmosfæren (Kofstad & Pedersen, 2019). Det vil si at hydrogen må fremstilles kunstig om man vil ha store nok mengder for å benytte seg av gassen som energibærer/lagringsmedium. Hydrogenets lave tetthet gjør at et meget stort volum gass må til for å få noe særlig energi ut av gassen.

En løsning er å komprimere og/eller å kjøle hydrogenet til -253°C for å danne flytende hydrogen, hvilke har mye større potensiale som energibærere. Under høyt trykk, og eller svært kalde temperaturer er det nemlig mulig å lagre store mengder gass og dermed store mengder energi. Dette kommer heller ikke helt uten kostnad, da både komprimering og nedkjøling er svært energikrevende prosesser. Tabell 2 viser en skjematisk fremstilling av hydrogens egenskaper, samt energimengde og tap som forekommer ved komprimering og kjøling av hydrogen til flytende form (Kofstad & Pedersen, 2019; Tomasgard et al., 2019).

Tabell 2: Egenskaper hydrogen.

Egenskaper hydrogen		Kilde
Energi per kg	120MJ/kg	(National Academies Press, 2004)
Energi per nm^3	10,78MJ/ nm^3	(National Academies Press, 2004)
Energikostnad komprimering til 700 bar	10% tap	(Burheim, 2017)
Kjøling av hydrogen fra gass til flytende.	15% tap	(Aziz, 2018)
Avdamping fra flytende hydrogen på tankbil.	3% tap	(Aziz, 2018)

Den mest vanlige og kostnadseffektive måten å fremstille hydrogen på er gjennom dampreformasjon av naturgass som i hovedsak består av Metan. I et dampreformeringsanlegg reagerer vann og naturgass for å danne hydrogen. Prosessen krever store mengder energi til oppvarming for å få reaksjonen mellom vannet og naturgass til å skje. Den høye temperaturen som kreves oppnås ofte ved brenning av deler av naturgassen istedenfor å kjøre den gjennom reformeringsprosessen (Hofstad, 2017). Hvorfor dampreforming er en prosess som fører med seg relativt store CO_2 utslipp forklares i kapittel 3.4.3. Omkring 50 prosent av verdens hydrogen er produsert ved hjelp av dampreforming, og anleggene opererer med store forskjeller i virkningsgrad. Vi skal imidlertid forholde oss til prinsippet om BAT og dermed en virkningsgrad på 85% som er presentert som øvre virkningsgrad i rapport om hydrogenproduksjon i Norge av (Aarnes et al., 2019). sammenliknet med andre studier ligger dette estimatet mellom øvre teoretisk grense på 90,7% (Peng, 2012), og et noe mer konservativt estimat på 74% funnet av (Velazquez & Dodds, 2017).

3.1.3 Råolje basert drivstoff

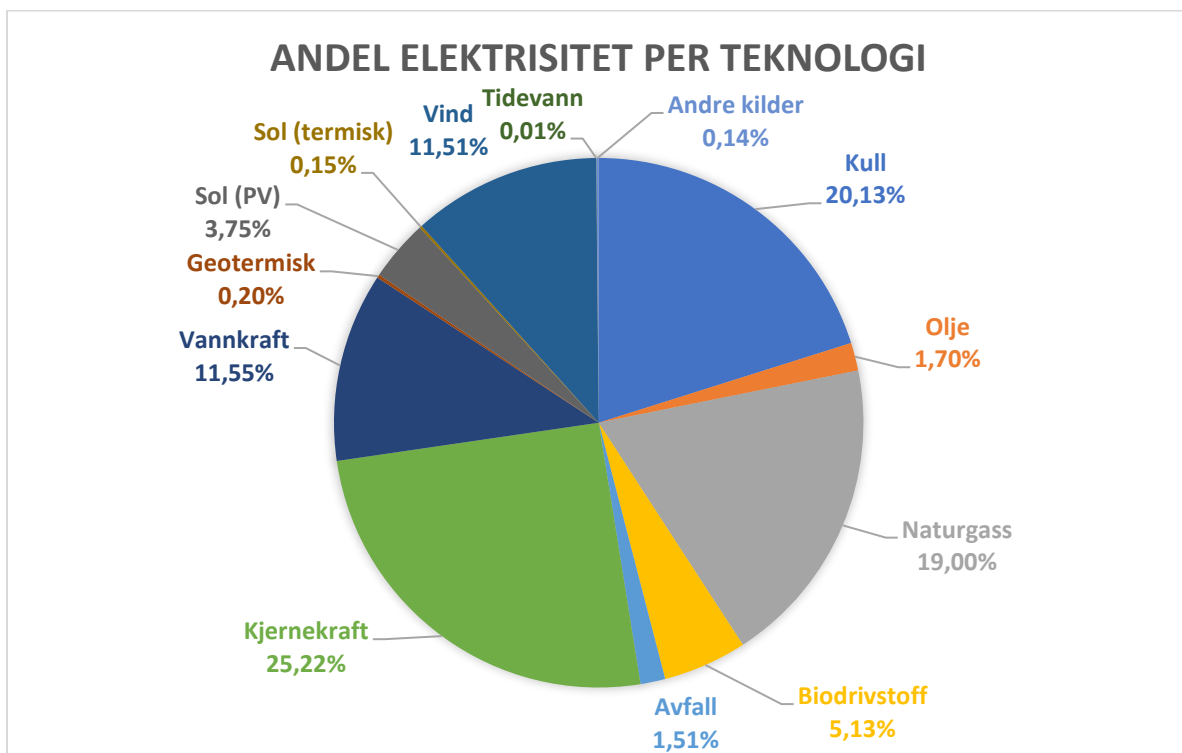
I denne studien er bensin inkludert som del av energikjede for bil med både konvensjonell motor og batteri, bedre kjent som hybridbil. Utvinning og raffinering av råolje til bensin er en moden teknologi, men i likhet med hydrogen har bensin også sine utfordringer. Gjennom årevis med utvikling har petroleumsindustrien blitt relativt effektiv på utvinning av råolje. Raffinering er heller ikke en prosess hvor det går tapt svært mye energi, selv om det også her er noen tap. Tabell 3 viser egenskaper for bensin. CO₂ utslipp ved forbrenning av bensin i vist i tabell 8, kapittel 3.4.3.

Tabell 3 Egenskaper bensin.

Egenskaper bensin		Kilde
Utvinning	1-3%	(Blok & Nieuwlaar, 2017)
Transport	1-5%	(Blok & Nieuwlaar, 2017)
Lagring	2%	(Blok & Nieuwlaar, 2017)
Raffinering	5-15%	(Blok & Nieuwlaar, 2017)
MJ/kg Bensin	44 MJ/kg (H _n)	(Demirel, 2016)
MJ/L Bensin	32,5MJ/L (H _n)	(Hofstad, 2019a)

3.1.4 Europeisk elektrisitetssmiks

Europeisk elektrisitetssmiks består i utgangspunktet av en rekke forskjellige teknologier, men det er store forskjeller i mengden strøm produsert fra de ulike teknologiene. For å kunne si noe om virkningsgraden til den samlede elektrisitetsproduksjonen i EU er det nødvendig å vite noe om virkningsgradene til de forskjellige teknologiene. Likevel er det sånn at å estimere virkningsgraden i hvert enkelt kraftverk for hele EU ville blitt nærmest umulig da det i tillegg til mange teknologier er tusenvis av leverandører. Denne studien setter derfor en praktisk grense på minimum 3%. Det vil si at teknologi som står for mindre enn 3% av den totale elektrisitetsproduksjonen i EU ikke er vurdert. Figur 12 viser elektrisitetsproduksjon i prosent for EU basert på andel per teknologi.



Figur 12: Andel av strøm produsert fra ulike teknologier i EU. Data hentet fra (International Energy Agency, 2020).

Av figuren ser vi at kull, gass og kjernekraft er dominerende teknologier, men at vann, vind, biodrivstoff og sol også bidrar signifikant til den totale energiproduksjonen. Til sammen utgjør de drøyt 96% av den totale elektrisitetsproduksjonen i EU. Etter at alle teknologier som faller under 3% grensen er ekskludert gjenstår 7 hovedgrupper, det er disse det er interessant å vite virkningsgrader for. I tråd med BAT prinsippet er tallene her også valgt ut fra fremtidsrettede anlegg som opererer med relativt høy virkningsgrad. Tabell 4 viser virkningsgrader for de ulike teknologiene.

Tabell 4: Viser elektrisitetsproduksjon per teknologi og virkningsgrader.

Teknologi (t)	GWh	Andel i prosent (p)	virkningsgrad	standard	Kilde
Kull	660266	20,13 %	44 %	høyeffekt	(Prehn-Sletten, 2011)
Naturgass	622935	19,00 %	63 %	høyeffekt	(General Electric, 2018)
Kjernekraft	827007	25,22 %	45 %	høyeffekt	(WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021)
Vannkraft	378639	11,55 %	100 %	høyeffekt	
Vind	377423	11,51 %	100 %	høyeffekt	
Bio	168115	5,13 %	40 %	høyeffekt	(Electropaedia, 2005)
Sol	122972	3,75 %	100 %	høyeffekt	
Total	2989242	96,28 %	59,26%		

Virkningsgraden for de ubetinget fornybare energikildene er satt til 100%. Dette er fordi solinnstråling, vind, og regn faller ubetinget. Energien er altså tilgjengelig uten at vi trenger å putte noe energi inn for å få energi ut. Dette er selvsagt en sannhet med modifikasjoner, da det kreves energi for å bygge vindmøller, vannkraftanlegg, og solceller, men energikravet til slike installasjoner er ikke vurdert for fossile energikilder, og det vil dermed ikke bli rettferdig om de skal inkluderes for de ubetinget fornybare. Den samlede energieffektiviteten i det europeiske strømnettet er gitt ved:

$$(5) \text{ Samlet virkningsgrad} = [\eta_{\text{Kull}} * p_{\text{Kull}}] + [\eta_{\text{Naturgass}} * p_{\text{Naturgass}}] + [\eta_{\text{Kjærnekraft}} * p_{\text{Kjærnekraft}}] + [\eta_{\text{Vannkraft}} * p_{\text{Vannkraft}}] + [\eta_{\text{Vindkraft}} * p_{\text{Vindkraft}}] + [\eta_{\text{Bio}} * p_{\text{Bio}}] + [\eta_{\text{Sol}} * p_{\text{Sol}}]$$

Hvor η = virkningsgraden for teknologi (t) oppgitt i %.

Og p = andel strøm produsert av teknologi (t) oppgitt i %.

Med verdier for η og p (tabell 4) beregnes samlet virkningsgrad:

$$(6) \text{ Samlet virkningsgrad} = [\text{Kull } (0,2013 * 0,44)] + [\text{Gass } (0,19 * 0,63)] + [\text{kjærnekraft } (0,2522 * 0,45)] + [\text{vann } (0,1155 * 1)] + [\text{Vind } (0,1151 * 1)] + [\text{Bio } (0,0513 * 0,40)] + [\text{Sol } (0,0375 * 1)] = 59,26\%$$

Den samlede virkningsgraden ender altså på snaut 60%. Det er viktig å understreke at dette bare er et estimat og at det her er knyttet noe usikkerhet til resultatet. Likevel gir tallet et godt grunnlag for videre utregninger. Den gjennomsnittlige energieffektiviteten for varmekraftverk i EU var i underkant av 50% i 2016 ifølge EEA (European Environment Agency, 2021). Det er imidlertid viktig å huske på at dette inkluderer eventuell varme solgt til andre aktører (European Environment Agency, 2015).

Dermed er vårt estimat på 60% sannsynligvis noe høyt, men det er vesentlig poeng at økende mengde fornybar energi er med på å gi en markant bedring i energieffektiviteten i vårt estimat. Man ser også av tabell 4 at estimatet kun gjelder for drøyt 96% av all kraftutvikling i EU. Inkluderes de resterende 3,7 prosentene vil det sannsynligvis ha en effekt på energieffektiviteten, men denne effekten vurderes å være så lav at den faller innenfor det som kan sies å være en usikkerhetsmargin i utregningene, og er derfor ikke vurdert.

3.1.5 Vannkraft

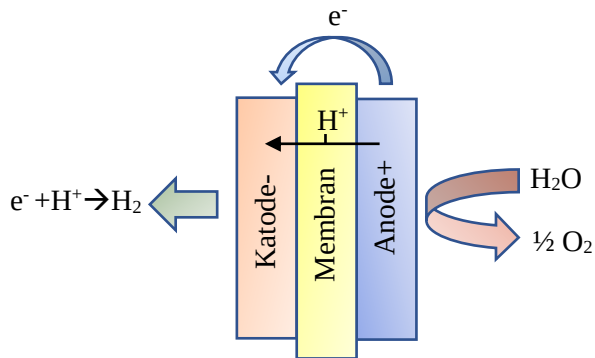
En av energikjedene inkludert i denne studien forutsetter vannkraft som eneste energikilde til enten lokal hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse, eller som strømkilde til ladning av batterier. Energifkjedene er begge ment som fornybare alternativer til mer tradisjonelle og dominerende metoder for både hydrogen og elproduksjon.

Felles for disse energikjedene er null utslipp av CO₂ fra driftsfasen av anleggene. Fra kunnskapsgrunnlaget vet vi at både elbiler og hydrogenbiler enten direkte eller indirekte drevet av vindkraft gir svært gode resultater, spesielt sammenliknet med konvensjonelle drivstoff som bensin og diesel. Men også sammenliknet med elbiler og hydrogenkjøretøy som får sin elektrisitet fra elektrisk miks med større andel fossile energikilder, eller hydrogen fra dampreforming. I denne omgang er vannkraft valgt som fornybar energikilde da vannkraft er den dominerende bidragsyteren i norsk elproduksjon. I 2019 besto 87% av den norske elektrisitmiksen av vannkraft (NVE, 2021).

3.1.6 Fremstilling av hydrogen ved elektrolyse av vann

Elektrolyse av vann til fremstilling av hydrogen er et godt alternativ til dampreforming, spesielt fordi elektrolyse av vann kan foregå uten bruk av fossile brennstoff, forutsatt at elektrisiteten kommer fra fornybare energikilder. I tillegg kan elektrolyse av vann produsere hydrogen med svært høy renhet. Det finnes flere forskjellige måter å gjøre elektrolyse av vann, men flere av de er fortsatt på forskningsstadiet og andre har lavere virkningsgrader og leverer hydrogen med lavere renhet. Vi skal derfor holde oss til polymerelektrolyttmembranenelektrolyse, heretter omtalt som PEM elektrolyse.

I PEM elektrolyse pumpes vann til en anode hvor vannet splittes til oksygen (O_2), og protoner (H^+), og elektroner (e^-). Protonene står så fritt til å reise gjennom en membran og over til katodesiden av elektrolyse apparatet, mens elektronene blir tvunget til å reise gjennom en ekstern krets, for å komme til katodesiden. Ved katodesiden kombineres så protonene og elektronene igjen og danner hydrogen (H_2) (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). En enkel fremstilling av prosessen er fremstilt i figur 13.



Figur 13: PEM elektrolyse av vann. Egen produksjon basert på (Shiva Kumar & Himabindu, 2019).

Elektrolyse av vann krever en viss mengde energi, men moderne PEM elektrolyse er energieffektivt og opererer med virkningsgrader opp mot 80 til 90% (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). I denne studien er elektrolyse av vann gjennom PEM elektrolyse inkludert i energikjede med elektrisitet fra EU-mix, og i energikjede med ren vannkraft. Et viktig poeng her er at PEM elektrolyse fortsatt er en ny teknologi innenfor kommersialiseringen av hydrogenproduksjon (Shiva Kumar & Himabindu, 2019), men Nel Hydrogen leverer storskala anlegg som kan produsere over ti tonn hydrogen i døgnet (Nel, 2019).

3.2 Distribusjon

Enten det er i form av komprimert hydrogen på en rørhenger, eller i form av strøm i høyspentnettet krever alle de forskjellige energikildene en eller annen form for distribusjon. Men ulikheter i drivstoffenes egenskaper gjør at denne prosessen i stor grad er forskjellig for hver av energikildene. Det er viktig å understreke at det her er snakk om distribusjon av ferdigstilte drivstoff og ikke transport av for eksempel råolje til raffineri, eller kull fra gruve til kraftverk. Energibruk fra disse prosessene er gitt i tabell 11.

3.2.1 Distribusjon av elektrisk kraft

Ifølge data samlet av The World Bank i 2018 var tapet i det europeiske strømmettet på ca. 6,2% i 2014 (The World Bank, 2018a). Det vil si at omkring 94% av den strømmen som går ut på nettet ender opp hos sluttbruker, og resten går tapt. Tapet i det norske ledningsnettet lå på omkring 6,02% for det samme året (The World Bank, 2018b). Vi skal for enkelhets skyld forholde oss til 6% tap for både energikjeden som forutsetter europeisk elektrisitetssmi, og for energikjeden som forutsetter vannkraft som leverandør av elektrisk kraft.

3.2.2 Distribusjon av fossile brensler og hydrogen

Distribusjon av fossile brensler og hydrogen faller i samme kategori da det i hovedsak er transport via lastebil det er snakk om. I denne studien er det altså snakk om bensin og hydrogen i enten komprimert eller flytende form. For å gi best mulig grunnlag for sammenligning er det lagt til grunn samme transportlengde for både ferdigstilt bensin og hydrogen. Denne avstanden er på 300km. Da det var vanskelig å finne eksakte tall for forbruk på lastebiler med henholdsvis hydrogen i gass eller flytende form, eller bensin for så å sammenlikne disse, er det valgt å bruke gjennomsnittlig forbruk fra samme lastebil for alle tre. Det er også vurdert at forskjellen i energibruk her vil være så liten at utslaget vil spille svært liten rolle for sluttresultatet.

Ifølge Norges lastebileier-forbund har en moderne 2016 modell lastebil et forbruk på ca. 3,18 liter diesel per mil. Eller 0,318 liter per km (Stølen, 2016). Diesel har en energimengde på 38,19MJ/L ved nedre brennverdi (Staffell, 2011). En normal mengde hydrogen fraktet per tur vet vi fra tidligere ligger på ca. 1000kg for hydrogen i gassform, og 3500kg for flytende hydrogen. I tabell 2 ser vi at hydrogen inneholder 120MJ/kg. Tap i distribusjon med lastebil er gitt ved formel 7.

$$(7) \text{ Tap ved frakt (\%)} = E_b/E_{tr} * 100$$

Hvor E_b = Energimengden brukt under transport, (MJ)

Og E_{tr} = Energimengden transportert (MJ).

Energimengden brukt i transport er gitt av formelen:

$$(8) E_b = L_b * MJ_d$$

Hvor L_b er mengden drivstoff brukt (L)

Og MJ_d er MJ/L diesel.

Energimengden transportert er gitt av formelen:

$$(9) E_{tr} = E_t * MJ_t$$

Hvor E_t = Mengden drivstoff transportert, og

MJ_t = Mengden energi i transportert drivstoff.

Tabell 5 viser prosentmessig tap ved transport av drivstoff forutsatt 300km frakt distanse og forbruk på 0,318 liter per mil.

Tabell 5: Tap ved frakt av drivstoff.

Drivstoff	Tap ved frakt
Komprimert hydrogen (CH_2)	3,03%
Flytende hydrogen (LH_2)	0,87%
Bensin	0,28%

(Utgangene er vist under tabellen).

$$(10) \text{ Prosentmessig tap ved transport av } CH_2 = 3643MJ / 120000MJ * 100 = 3,03\%$$

Hvor,

$$(11) \text{ Energimengde i transportert } CH_2 = 120MJ/kgH_2 * 1000kgH_2 = 120000MJ/\text{transportenhet} (CH_2)$$

Er energimengden fraktet per transportenhet, og

$$(12) \text{ Energimengde brukt i til transport av } CH_2 = 95,4L * 38,19MJ/L = 3643MJ$$

Er energimengden bruk til transport. Energimengden brukt, beregnes ut ifra antall liter diesel brent under transport, som er gitt formel av formel 13.

(13) Antall liter diesel brent per transportenhet $3,18\text{L} / 10\text{km} * 300\text{km} = 95,4\text{L}$

Det prosentmessige tapet ved frakt av flytende hydrogen (LH_2), forutsatt samme energiforbruk per transportenhet (formel 13), er gitt av formelen:

(14) Prosentmessig tap ved transport av (LH_2) = $3643\text{MJ}/420\,000\text{MJ} * 100 = 0,87\%$

Hvor,

(15) Energimengden i transportert $\text{LH}_2 = 3500\text{kg} (\text{LH}_2) * 120\text{MJ/kgH}_2 = 420\,000\text{MJ/transportenhet} (\text{LH}_2)$.

Ifølge en artikkel i enerWE har hver enkelt tankbil som frakter bensin en kapasitet på ca. 40 000 liter (enerWE, 2016). Vi vet fra tabell 3 at bensin har en energimengde på $32,5\text{MJ/L}$. Forutsatt samme drivstoff-forbruk som for flytende og komprimert hydrogen ser vi at energimengden som går tapt er knapt 0,3%. Prosentmessig tap fra transport av bensin er gitt i formel:

(16) Prosentmessig tap ved transport av bensin = $3643\text{MJ}/1300000\text{MJ} * 100 = 0,28\%$

Hvor,

(17) Energimengden i transportert bensin = $32,4\text{MJ/L} * 40\,000\text{L/transportenhet} = 1300000\text{MJ/transportenhet}$.

Er energimengden transporter per transportenhet.

3.3 TTW energibruk

I denne studien er det valgt å bruke Volkswagen Golf og Toyota Mirai som referansekjøretøy for analysen. Volkswagen Golf er den bil i kompaktklassen som både leveres som hybrid og med elektrisk drivlinje (Volkswagen, 2021). Toyota Mirai er den nyeste satsningen fra Toyota innenfor hydrogenrevne kjøretøy, og finnes i dag i to generasjoner. Det er valgt å benytte data for første generasjon Toyota Mirai, da det eksisterer bedre datagrunnlag for denne. Mirai er noe større enn golf og faller innenfor kategorien medium størrelse bil. Likevel er forskjellen i størrelse såpass liten at den vurderes å ikke spille noen stor rolle for resultatet av analysen. Utvalget av hydrogenkjøretøy er også relativt begrenset og Mirai er en av de kjøretøyene som faller nærmest Golf. Mirai er i tillegg på salgstoppen i både Norge og Europa, og det finnes gode tall på forbruk (Toyota, 2021).

3.3.1 Kjøretøy med elektrisk drivlinje

Den heelelektriske utgaven av utgaven av Volkswagen Golf har fått navnet E-golf, og har vært i salg i Norge siden 2014. I denne studien er det valgt å ta utgangspunkt i en utgave av E-Golf med 35,8kWh batteripakke på 318kg, og motoreffekt på 136kW (EVSpecifications, 2021; Volkswagen, 2021).

3.3.2 Kjøretøy med delt elektrisk og konvensjonell drivlinje

Som referanse for kjøretøy med både elektrisk og konvensjonell drivlinje er det tatt utgangspunkt i en Volkswagen Golf GTE. Golf GTE er utstyrt med både en 1,4 liters bensinmotor, og en elmotor som til sammen yter 180kW. I tillegg er golf GTE utrustet med et 13 kilowattimers batteri (Volkswagen, 2021). Da det er vanskelig å oppdrive vekten av det mindre batteriet i hybridgolfen er det forutsatt at Volkswagen benytter samme litium ion batteriteknologi til batteriet i sine hybridbiler som de gjør i de heelelektriske kjøretøyene, og at batteriet veier 115,5kg. Batterivekt hybridgolf er gitt ved formelen:

$$(18) \text{ Batterivekt} = 8,882\text{kg/kWh} * 13\text{kWh} = 115,5\text{kg}$$

Basert på,

$$(19) \text{ Batterivekt (kg/kWh)} = 318\text{kg}/35,8\text{kWh} = 8,882\text{kg/kWh}$$

Golf GTE 1,4 utgaven i denne studien har en egenvekt på 1549kg (Volkswagen, 2021). Uten batteri vil det si at bilen veier 1433,5kg.

3.3.4 Kjøretøy med brenselcelle

Hydrogenkjøretøyet i denne analysen som tidligere nevnt basert på Toyota Mirai, da Golf ikke leveres som hydrogenkjøretøy. Mirai er utstyrt med en 114kW brenselcelle som leverer strøm til en elmotor med cirka samme effekt. Som drivstoff for brenselcellen bruker Mirai hydrogen fra to tanker som til sammen holder opptil 5kg hydrogen ved 700 bar (Toyota, 2014).

Tabell 6: Egenskaper for de ulike kjøretøyene, alle tall oppgitt etter WLTP målt forbruk og utslipp.

Modell	Forbruk/kilometer (MJ)	Kilde
Toyota Mirai	1,128	(Toyota, 2021)
Volkswagen E-Golf	0,575	(NAF, 2020)
Volkswagen Hybrid	1,0131	(Volkswagen, 2021)

3.4 Energibruk ved produksjon av kjøretøy

På utsiden minner hydrogenbiler mye om konvensjonelle biler, men på innsiden er ulikhetene mange. Hydrogenbiler benytter seg av en elektrisk motor for å drive hjulene, men i motsetning til en ren batteribil har ikke hydrogenbilen behov for store batterier som leverer strøm til elmotoren. Hydrogenbilen anvender seg nemlig av en brenselcelle. I brenselcellen lages strøm gjennom en kjemisk reaksjon med oksygen og hydrogen, det eneste biproduktet er vann. Hydrogenbilen er dog avhengig av robuste og relativt store trykktanker for oppbevaring av hydrogen. I tillegg er det normalt at hydrogenbilene har et lite batteri som kan levere strøm til brenselcellen ved behov, samt fungere som energilagringsmedium for strøm skapt ved regenerativ bremsing. Det vil si at bilen bruker motstanden i de elektriske motorene til å bremse, dette gjør at elmotorene blir generatorer i den tiden bilen er under oppbremsing. Istedenfor at energien blir omgjort til varme som ved bruk av konvensjonelle bremses, skapes det strøm. Strømmen kan så lagres på det lille batteriet (Bethoux, 2020; Chau, 2014).

Alle disse komponentene krever en viss mengde energi ved produksjon, men spørsmålet er hvor mye? I boka *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market* fra 2010 er energimengden fra produksjon av materialer og montering av hydrogen og hybridbiler estimert til 78 900MJ per bil. Tallene er basert på livsløpsanalyse av en medium størrelse personbil på ca. 1300kg (Pistoia, 2010).

En studie av Wang et al., 2013 sammenliknet kjøretøy med hydrogendrevet brenselcelle (heretter kalt hydrogenbil) og batteridrevne elbiler, samt biler med konvensjonell forbrenningsmotor med livsløpsperspektiv. Studien vurderer energiforbruk ved henholdsvis 0, 40 og 100% resirkulerte råvarer. I studien ble det konkludert med et energibruk på 129,8GJ for 100% nyutvinnede materialer, 106,9GJ, for 40% resirkulerte materialer, og 70,7GJ for 100% resirkulerte råvarer, per bil. Tallene inkluderer både energiforbruk til materialutvinning og montering, og gjelder for en medium størrelse personbil på ca. 1300kg. Studien tar utgangspunkt i produksjon av biler lagt til Kina, med en elektrisitetsmiks preget av høy andel kullkraft, (>70%), hvilke kan bidra til på forklare høye kostnader, spesielt for 100% nyutvinnede råvarer (Wang et al., 2013). Da totalt resirkulerte materialer regnes som urealistisk skal vi forholde oss til tallene fra Pistoia, 2010 på 78,9GJ/bil, et tall som stemmer relativt godt overens med funnene i Wang et al., og ansees for å være et realistisk estimat, men samtidig være i tråd med prinsippet om BAT.

3.4.1 Batterier

Romare & Dahllöf, 2017 har gjort en gjennomgang av litteraturen for energi og klimagassutslipp fra lithium ion batterier. Rapporten fokuserer på energi og klimagassutslipp fra hvert enkelt av de store stegene i batteriproduksjonen. Disse stegene er gruvedrift, raffinering av materialer til kvaliteten er god nok for batteribruk, og montering av batteriene. Basert på de fem livsløpsanalysene inkludert i gjennomgangen konkluderer Romare & Dahllöf (2017) med et energiforbruk på mellom 350 og 650MJ/kWh batterikapasitet. Rapporten understreker at det er store sprik i datasettet og at mye av dataen er sekundærdata.

Da denne studen tar utgangspunkt i Golf-klassen, og da nermere bestemt en e-Golf er batteriene produsert i Sør-Korea og har en kapaistet på 35,8kWh, og en vekt på 318kg (Coffin & Horowitz, 2018; EVSpecifications, 2021). Total energibruk til batteriproduksjon er presentert i formel 20:

(20) Total energibruk batteriproduksjon: $35,8\text{kWh} \cdot 350\text{MJ/kWh} = 12\,530\text{MJ}$.

I denne studien er det tatt utgangspunkt i 350MJ/kWh batterikapasitet. Dette er i samsvar med de lavere estimatene presentert i litteraturen og vurdert til å være et realistisk tall. Det kan være greit å notere seg her at det finnes studier som viser mye lavere tall slik som 10,7MJ/kWh, eller 3,1MJ/kWh.

Disse studiene bygger på et såkaldt bottom-up perspektiv, og er regnet for å være mindre korrekt da de sannsynligvis mangler flere steg knyttet til fabrikkeringsprosessen, som de andre studiene med top-down perspektiv får med seg (Romare & Dahllöf, 2017).

3.4.2 Kjøretøyproduksjon

En studie av Sato & Nakata, 2020 har sett på energi og materialbruk fra konstruksjon av biler med konvensjonell forbrenningsmotor. Studien tar for seg materialflyten fra utvinning til montering av bilene, og evaluerer energibruk for hvert steg i prosessen. Det er i hovedsak 7 materialer som utgjør mellom 85 og 96% prosent av komposisjonen. Disse er stål, jern, glass, gummi, plastikk, aluminium og kobber. Det konkluderes med en energibruk på 62GJ totalt per bil, eller 41,8MJ/kg. Sammenliknet med resultater for to andre studier, hvilke resultater er 53 MJ/kg (Nemry et al., 2008) og 81MJ/kg (Schweimer & Levin, 2000), kommer det frem at dette resultatet er lavere enn tidligere studier viser. Dette kan forklares med at studien til Sato & Nakata, 2020, inkluderer delvis resirkulerte materialer, (85% av støpte aluminium deler og 100% av støpt jern). Studien inkluderer i tillegg ikke energibruk til diverse væsker og materialer som for eksempel kjølevæske, smøremidler etc. (Sato & Nakata, 2020).

Det er også verdt å nevne at det er mange års mellomrom mellom disse studiene, og at energieffektivitetet sannsynligvis er forbedret med årene (Oh & Hildreth, 2014).

Foruten batteriet består resten av materialene i en elbil og en bil med forbrenningsmotor av mye felles komponenter (Qiao et al., 2017). Den store forskjellen vil være i form av at forbrenningsmotoren og kraftoverføring er byttet ut med et batteri og elmotor.

Batteriet i en e-Golf står som tidligere nevnt for 318kg, av bilens totale vekt på 1650kg (EVSpecifications, 2021). Det vil si at en e-Golf uten batteri veier ca 1332 kg. Basert på disse funnene er energikostnaden fra kjøretøy gitt av formel 21.

$$(21) \text{ Energikostnad kjøretøyproduksjon inkludert batterier } (E_{KJ}) = E_K + E_{Batt}$$

Hvor,

E_K = Primærenergiforbruk fra kjøretøyproduksjon

Og

E_{Batt} = Primærenergiforbruk fra batteriproduksjon.

Tabell 7: Viser energiforbruket ved kjøretøy og batteriproduksjon.

Transportmiddel	kjøretøy	Batteri	Totalt	Totalt per km	Kilde
Hydrogenbil	78 900MJ	N/A	78 900MJ	0,3287MJ	(Pistoia, 2010)
Elbil	55 677MJ	12 530MJ	68 207MJ	0,2841MJ	(Romare & Dahllöf, 2017; Sato & Nakata, 2020)
Hybridbil	58 499 MJ	4550MJ	63 049MJ	0,2627MJ	(Romare & Dahllöf, 2017; Sato & Nakata, 2020)

For utregning av energibruk per kilometer er det lagt til grunne en gjennomsnittlig kjørelengde på 12 000 kilometer i året og en levetid på 20 år. Tallene er valgt utifra norske kjørelengder og gjennomsnittlig levealder for personbiler i følge SSB (Statistisk sentralbyrå, 2021a; Statistisk sentralbyrå, 2021b).

For produksjon av hydrogenbil er energikravet relativt høyt sammenliknet med de andre alternativene, spesielt uten iregnet resirkulerte råvarer. Dette kan skyldes et relativt stort behov for ualminnelige materialer som platinum, grafitt, polymer membran etc. (Pistoia, 2010).

Batteriproduksjon er energikrevende, likevel kommer e-Golfen i denne studien godt ut. Det kan skyldes at golfen har relativt liten batteripakke (35,8kWh). Om man legger til grunn større batteripakke, for eksempel 85kWh batteripakken fra Tesla model S vil batteripakken utgjøre et energiforbruk på ca. 30 000MJ alene.

3.5 Data for beregning av totalt CO₂-utslipp

I rapporten til Romare & Dahllöf, 2017 konkluderes det med et klimagassutslipp på 150 til 200kg CO₂eq/kWh batterikapasitet, men at dette vil variere i stor grad med hvor produksjonen ligger fordi elektrisitetbruk står for 45-60% av energibruken i produksjonen. Rapporten tar utgangspunkt i en elektrisitetsmiks med mellom 50 og 70% fossil andel. Rapporten nevner og at hvis man legger til grunn svensk elektrisitetsmiks med mye lavere fossil andel kan man få utslippet fra batteriproduksjonen ned på ca 11kg CO₂eq/kWh (Romare & Dahllöf, 2017). Vi skal imidlertid forsøke å holde oss til rene CO₂ utslipp. En studie av Sullivan & Gaines (2010) estimerer CO₂ utslippet fra lithium-ion batterier til ca 12,5kg CO₂/kg batteri, basert på elektrisitetsmiks fra USA. CO₂ utslipp fra batteriproduksjon er gitt ved:

(22) CO₂ utslipp batteri (CO₂BATT): 12,5kgCO₂/kg batteri 12,5*318= 3975kgCO₂/batteri etter (Sullivan & Gaines, 2010).

(23) CO₂ utslipp batteri (CO₂BATT): 150 kgCO₂/kWh batterikapasitet, 150*35,8= 5370 kgCO₂/batteri etter (Romare & Dahllöf, 2017).

Sammenlignet med Romare & Dahllöf, 2017 ser vi at 2010 studien av Sullivan & Gaines gir et noe lavere estimat, enn Romare & Dahllöf, (3975kgCO₂/batteri vs 5370kgCO₂/batteri). Dette kan delvis forklares med at studien av Romare & Dahllöf inkluderer flere klimagasser enn CO₂, herav utslipp gitt i CO₂ ekvivalenter.

Batteriene i denne studien er som tidligere nevnt produsert i Sør-Korea. Sør-Korea har en fossil andel på ca 69% (Hofstad, 2019b), mens USA har fossil andel på ca 60% (Energy Information Administration, 2020). Det kan dermed gjøres et argument for at CO₂ utslippet vil være noe høyere enn estimert av Sullivan og Gaines, mens begge andelene faller innenfor rammene i Romare & Dahllöf på fossil andel mellom 50 og 70%. Videre er det valgt å benytte tallet konkludert med i Sullivan og Gaines da dette viser rene CO₂ utslipp og er vurdert til å være i tråd med prinsippet om BAT uten å være et urealistisk estimat.

3.5.1 CO₂ utslipp fra hybrid og elbil

Utslipet fra produksjon av konvensjonelle kjøretøy ble funnet til å ligge mellom 4 og 7 kgCO₂/kg kjøretøy basert på en gjennomgang av litteraturen i (Ajanovic & Haas, 2019). I tråd med prinsippet om BAT skal vi forholde oss til 4kgCO₂/kg kjøretøy for produksjon av el, og hybridbil. Utfordringen er at vi må forholde oss til et batteri i tillegg til selve bilen. Denne utfordringen er forsøkt løst ved å regne ut CO₂ utslippene fra produksjon av selve bilen, for så å legge batteri til i etterkant, på samme viset som ved utregning av energibruk. Appliserer man den samme metoden for beregning av CO₂ utslipp fra produksjon av hydrogenbil får man et estimat på 7400kg. Det er imidlertid ikke sann at produksjon av hydrogenbiler nødvendigvis krever de samme materialene etc. som normale biler, selv om mye vil være likt. Hydrogenbiler har blant annet et relativt stort behov for platinum, hvilke er svært energikrevende å fremstille. I Pistoia, 2010 er likevel CO₂ utslippet beregnet til å være ca 5390kgCO₂ per bil, basert på Nord-Amerikanske forhold (Pistoia, 2010). Til motsetning er CO₂ utslippet per bil beregnet til å være 15537kgCO₂ i en studie fra Kina med utgangspunkt i Toyota Mirai (Chen et al., 2019). Det er altså store sprik fra studie, til studie. Her er det mulig at andelen fornybar energi versus fossile brenslers som inngår i elektrisitetsmiksen er med på å gi høyere CO₂ utslipp fra studien basert på produksjon av bil i Kina. Det er også verdt å merke forskjellen mellom de to studiene hva angår størrelse på bilen, da Pistoia, 2010 tar utgangspunkt i en bil på 1300kg, mens Mirai fra Chen et al., 2019 veier ca 1850kg.

Det er besluttet å benytte en hybridløsning hvor CO₂ utslipp fra produksjon av hydrogenbil beregnes med en faktor på 4 kgCO₂/kg kjøretøy. Denne løsningen faller mellom ytterpunktene og er vurdert som et godt estimat med fokus på prinsippet om BAT. Dermed kan CO₂ utslipp fra produksjon av kjøretøy gis ved formelen:

$$(24) \text{ CO}_2 \text{ utslipp kjøretøyproduksjon (CO}_{2\text{PROD}}) = 4\text{kgCO}_2/\text{kg bil} * \text{Bilens vekt} + \text{CO}_{2\text{BATT}}.$$

Hvor,

(CO_{2BATT}) er mengden CO₂ fra batteriproduksjon. (Se kapittel 3.5).

Tabell 8: CO₂ utslipp fra kjøretøy og batteriproduksjon.

Transportmiddel	kjøretøy	Batteri	Totalt	Totalt per km
Hydrogenbil	7400 kgCO ₂	N/A	7400 kgCO ₂	30,8gCO ₂ /km
Elbil	5328 kgCO ₂	3975 kgCO ₂	9303 kgCO ₂	38,7gCO ₂ /km
Hybridbil	5734 kgCO ₂	1443 kgCO ₂	7177 kgCO ₂	29,9 gCO ₂ /km

3.5.2 CO₂ utslipp fra elproduksjon

Selv om elektrisitet i seg selv er fri for klimagassutslipp er ikke nødvendigvis produksjon av strøm spesielt miljøvennlig. Et produkt av de fossile energikildene i den europeiske strømmiksen er utslipp av CO₂. I 2019 ble utslippet estimert av EEA til å ligge på 275gCO₂e/kWh for EU landene samlet. Dette tilsvarer et utslipp på cirka 76gCO₂e/MJ (European Environment Agency, 2020a).

3.5.3 CO₂ utslipp fra fossile energikilder.

Enten det er i form av direkte omgjøring av naturgass til hydrogen, eller gjennom brenning i et kraftverk for å skape strøm, inkluderer denne studien flere fossile energikilder. Felles for alle de fossile energikildene er som tidligere nevnt utslipp av CO₂, likevel er det store forskjeller i mengden avhengig av kilde. Tabell 9 viser CO₂ utslipp for de forskjellige fossile energikildene gitt i gram (g) per MJ ved nedre brennverdi (H_n).

Tabell 9 Viser CO₂-Faktor ved nedre brennverdi. Kilde: (Blok & Nieuwlaar, 2017)

CO ₂ -Faktor oppgitt ved nedre brennverdi	
Drivstoff	gCO ₂ /MJ (H _n)
Naturgass	56
Kull	101
Råolje	73
Diesel	74
Bensin	69

Av tabellen ser man at spesielt kull gir store CO₂ utslipp, men at utslipp fra andre fossile kilder også er betydelige. I denne studien er naturgass inkludert både som stor bidragsyter til strømproduksjon i EU, men også som kilde til hydrogenproduksjon gjennom dampreforming. Fra tidligere er det kjent at dampreforming av naturgass som i hovedsak består av metan (CH₄) foregår i to steg. I steg en reagerer gassen (CH₄) med vann (H₂O), over en nikkelkatalysator og det dannes karbonmonoksid (CO) og hydrogen (H₂). I steg to hentes enda mer hydrogen ut av prosessen ved å la karbonmonoksid reagere med vann enda en gang, men denne gangen med kobber eller jern som katalysator. Produktet er som nevnt mer hydrogen, i tillegg til CO₂ (Hofstad, 2017). Reaksjonslikninger for hydrogenproduksjon gjennom dampreforming er vist i reaksjonslikningene 1 og 2.



Steg en i denne reaksjonen er det som kalles endoterm. Det vil si at det kreves energi for å få reaksjonen til å gå. Vanlig temperatur i dampreformeringsanlegg er ca. 800°C. Som tidligere nevnt er det vanlig å brenne deler av naturgassen for å opprettholde den høye temperaturen som kreves i dampreformasjonsanlegget, noe som igjen fører til mer CO₂ utslipp (Hofstad, 2017).

En måte å mitiggere CO₂ utslippene på er gjennom karbonfangst (CCS). Moderne karbonfangstteknologi gjør det mulig å redusere mengden CO₂ som slipper ut i atmosfæren betydelig, uten at det i stor grad går utover virkningsgraden i produksjonsanlegget. En rapport av IEA i 2017 viste at det var mulig å redusere CO₂ utslippet fra et dampreformeringsanlegg med 90% med så lite som 10% tap i virkningsgrad (IEAGHG, 2017). De samlede utslippene fra dampreforming av naturgass, samt virkningsgrader ved henholdsvis 0 og 90% karbonfangst er vist i tabell 10. Tallene inkluderer både CO₂ fra kjemisk konvertering og forbrenning.

Tabell 10 Virkningsgrader og CO₂ utslipp, dampreforming.

Teknologi	Virkningsgrad	gCO ₂ /MJ H ₂ (H _n)	Kilde
Dampreforming	85%	75	(Aarnes et al., 2019)
Dampreforming med CCS	75%	7,5	(Sun & Elgowainy, 2019)

3.6 Oppsummering

I tabell 11 er det laget en samling av all dataen som er med i beregningene for de ulike energikjedene. Energikjeder med navn og tall er gitt i tabell 1, og beskrevet i kapittel 2.

Tabell 11 Oppsummeringstabell med oversikt over all data som er med i beregningen av totalt energiforbruk og CO₂ utslipp.

Energikjede									
	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4	Nr.5	Nr.6	Nr.7	Nr.8	Nr.9
Delprosess									
— Utvinning	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	1	0,97	1	0,98
— Transport	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1	0,98	1	0,95
— Produksjon	0,85	0,85	0,75	0,75	0,75	0,788	0,9	1	0,59
— Prosessering	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,9	0,98	1	1
— Distribusjon	0,97	0,99	0,97	0,99	0,9	0,9	0,99	0,9	0,9
Beregninger									
— ERE MJp/MJd	1,45	1,5	1,64	1,7	1,76	1,56	1,19	1,11	2,04
— TTW (MJ/km)	1,128	1,128	1,128	1,128	1,128	1,128	1,013	0,575	0,575
— WTT (MJ/km)	0,505	0,566	0,723	0,792	0,866	0,639	0,199	0,064	0,583
— KJ prod (MJ/km)	0,328	0,328	0,328	0,328	0,328	0,328	0,262	0,284	0,284
— WTW (MJ/km)	1,962	2,023	2,180	2,249	2,323	2,096	1,474	0,923	1,442
— CCS faktor	1	1	0,1	0,1	1	1	1	1	1
— Utslipp produksjon (CO ₂ prod)	30,83 3	30,833	30,833	30,833	30,833	30,833	29,99	38,762	38,762
— WTW (gCO ₂ /km)	147,1 48	151,707	16,348	16,865	176,556	0	107,633	0	109,601
— Utslipp totalt (g/km)	177,9 81	182,540	47,181	47,698	207,389	30,833	137,623	38,762	148,363

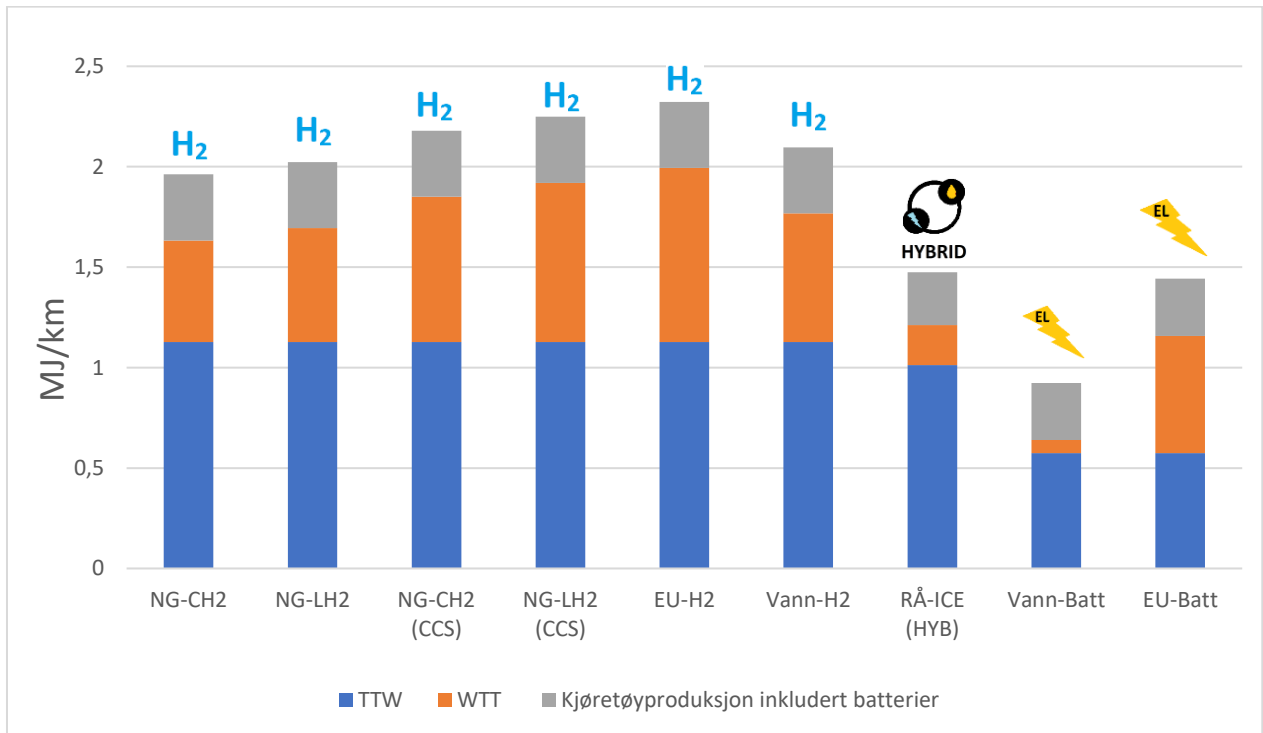
Forklaring til delprosesser og beregninger

- Utvinning omfatter prosessen med å gjøre råvaren tilgjengelig. For eksempel boring etter olje.
- Transport er prosessen med å frakte råvaren fra utvinning til produksjonsanlegg.
- Produksjon omhandler prosessen med å ferdigstille råvaren for eksempel raffinering av råolje, til bensin.
- Prosessering er videre behandling av drivstoffet som for eksempel komprimering, eller nedkjøling av hydrogen.
- Distribusjon er prosessen med å distribuere drivstoffet fra produksjonsanlegget og ut til fyllestasjoner, eventuelt via ledningsnettets som strøm.
- ERE, TTW, WTT, WTW er forklart i kapittel 2.
- KJ prod er energimengden som går med til kjøretøyproduksjon i MJ/km.
- CCS faktor omhandler karbonfangst. 1 er ingen fangst, og 0 er total fangst.
- Utslipp produksjon (CO_2prod) er størrelsen på CO_2 utslippet fra batteri, og kjøretøyproduksjon oppgitt per kilometer.
- Utslipp totalt er det sammenlagte utslippet fra produksjon, og WTW utslipp gitt i g/km.

4. Resultater og diskusjon

4.1 Energibruk

I figur 15 er totalt energibruk (Etot) fremstilt som summen av (i) energi fra utvinning til kjøretøy (WTT), energi i kjøretøy (TTW) og energi til produksjon av kjøretøy og batterier (Eprod). Summen av WTT og TTW er som tidligere nevnt WTW.



Figur 14 Totalt energibruk (Etot) per kjørt kilometer for 9 energikjeder.

Etot= WTW (WTT+TTW) + kjøretøyproduksjon (inkludert batterier). En fullstendig beskrivelse av energikjedene og data benyttet er gitt i kapittel 2 og i tabell/figur 11.

Av figuren legger man fort merke til at det er betydelige variasjoner for de forskjellige energikjedene. De mest krevende energikjedene har over dobbelt så høyt totalt energibruk (Etot), som den med lavest.

Det kan være lurt å notere seg at energibruk fra kjøretøyproduksjon og bruk i kjøretøyet (TTW) er likt for alle energikjedene som ender opp i samme «drivstoff». Det vil derfor kun være (TTW) bruk som skiller energibruken innad i kjedene som ender opp i samme produkt. For eksempel er energibruken for å bygge E-Golf den samme i de to kjedene som ender opp i elektrisitet. Det sammen gjelder hydrogenkjedene, men nok om det.

Hydrogenkjeden med lavest (Etot) er kjeden som tar utgangspunkt i dampreforming og frakt av hydrogen som komprimert gass. Litt overraskende er den store energimengden som kreves for å fremstille hydrogen gjennom elektrolyse, altså Vann-H2 kjeden.

Forklaringen på dette er høyt elektrisitetsforbruk fra selve elektrolyse prosessen. Ikke fullt så overraskende er hydrogen fremstilt ved dampreforming med karbonfangst blant de mest energikrevende prosessene. Det skyldes tap i virkningsgrad fra karbonfangstanlegget. Sammenliknet med el og hybridkjeden har hydrogenkjedene jevnt over høyere totalt energiforbruk. Noe som stemmer godt overens med funnene i (Bartolozzi et al., 2013).

Ser man nærmere på figuren blir det tydeliggjort at el basert på vannkraft er en svært energieffektiv prosess. Det vil si at energimengden som kreves for utvinning til «drivstoffet er på tanken», er lav. Dette gjelder imidlertid ikke for el-kjeden med utgangspunkt i EU-Mix, noe som skyldes en mye lavere total virkningsgrad for elproduksjon i EU. Sagt med andre ord har denne energikjeden høyt (WTT) forbruk sammenliknet med el fra vannkraft. Det kan også være greit å merke seg at elbilene har markant lavere TTW forbruk enn de andre bilene. Dette skyldes sannsynligvis betydelig bedre virkningsgrad i de elektriske motorene elbiler benytter seg av, sammenliknet med alternativene.

Hybridkjeden lander et sted imellom el og hydrogenkjedene. Denne energikjeden preges av både relativt lavt energibruk til produksjon av selve bilen, og lavt (WTT) bruk, sammenliknet med hydrogenkjedene, men høyere en el basert på vannkraft. Den største bidragsyteren her er forbruk i selve bilen kjent som (TTW) bruk.

Når det gjelder kjøretøyproduksjon blir det fort tydelig at forskjellene er relativt små. Dette er den parameteren som står for lavest bidrag i alle energikjedene bortsett fra energikjeden for elbil basert på vannkraft.

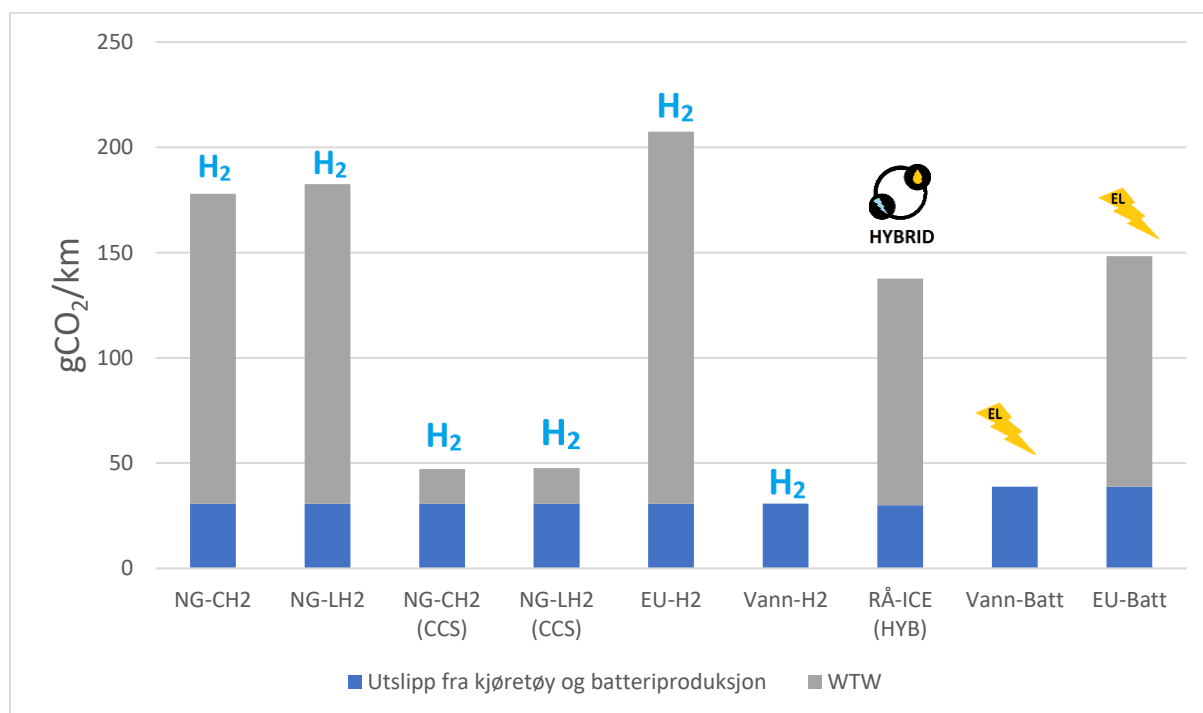
En kort oppsummering av funnene er som følger:

- Det er store forskjeller i mengden energi brukt for de forskjellige energikjedene.
- Den mest energieffektive hydrogenkjeden er dampreforming uten karbonfangst med transport av hydrogen i form av komprimert gass.
- Elbilkjeden som tar utgangspunkt i vannkraft, er svært energieffektiv.
- Hybridkjeden har relativt lavt energiforbruk sammenliknet med hydrogen, men likevel høyere en elbilkjeden som tar utgangspunkt i vannkraft.
- Elbiler basert på EU-mix har høyere energiforbruk enn hybridbilen, men lavere enn hydrogen.
- Produksjon av biler og batterier utgjør i de fleste tilfeller en liten del av det totale energiforbruket.

Ved første øyekast kan det virke som hydrogen energikjedene er «dårligere» enn de andre. Det er imidlertid viktig å notere seg at høyt energibruk ikke nødvendigvis må være «dårlig». For å svare på dette kan det være greit å oppsummere problemstillingen. Denne studiens overordnede mål var å finne ut om hydrogen som drivstoff i personbiler kan være med på å redusere utslippet av klimagasser. I kommende delkapittel om CO₂ utslipp skal jeg se nærmere på dette.

4.2 CO₂ utslipp

I figur 16 er totalt CO₂-utslipp (CO_{2TOT}) fremstilt som summen av (i) utslipp fra utvinning til bruk i kjøretøyet (WTW) og (ii) utslipp fra produksjon av kjøretøy og batterier (CO₂-prod). Se kapittel 3 for detaljer om begreper og data. På samme måte som for energi er CO₂ mengden her også lik for de respektive bilene, altså lik for hydrogenbilene etc. På samme måte blir det altså WTW utslippene som gir ulikheter innad i energikjeder som munner i samme «drivstoff». Først og fremst presenteres funnene fra analysene, etterfulgt av et dypere dykk og diskusjon.



Figur 15 Totalt CO₂ utslipp per kilometer for 9 energikjeder.

$CO_{2TOT} = E_{TOT} * \text{utslippsfaktor} + CO_{2PROD}$. En fullstendig beskrivelse av energikjedene og data benyttet er gitt i kapittel 2 og i tabell/figur 11.

Det blir med en gang tydelig at utslipp ikke nødvendigvis henger sammen med energibruk. Faktisk er de to nest mest energikrevende energikjedene, blant de med lavest utslipp. «Vinneren» er imidlertid hydrogen i denne omgang, grunnet noe lavere (CO₂ prod) versus elbil.

Energikjeden med aller størst utslipp er imidlertid også en energikjede som munner i hydrogen. Elektrolyse ved hjelp av europeisk elektrisitetsmiks er den eneste av energikjedene som ender opp med et utslipp over 200g CO₂ per km. Høye utslipp fra elektrolyse stemmer godt med resultatene fra (Pereira & Coelho, 2013), som legger til grunn Portugisisk elektrisitetsmiks med CO₂ intensitet tilsvarende EU-miks. Det samme gjelder funnene i (Bartolozzi et al., 2013) som tar utgangspunkt i Italiensk elektrisitetsmiks som også er relativ lik EU-mix.

De fire energikjedene som tar for seg dampreforming, med og uten karbonfangst har plutselig byttet side sammenlignet med resultatene fra energiregnskapet. Dampreforming med karbonfangst kommer godt ut og lander på tredje og fjerdeplass, hvor dampreforming og frakt med komprimert hydrogen akkurat danker ut flytende hydrogen grunnet det høye energibehovet som kreves for å kjøle hydrogen til flytende form, men her er det marginale forskjeller.

Når det gjelder dampreforming uten karbonfangst ser regnskapet mye dårligere ut. Begge disse energikjedene taper ovenfor både el og hybridløsninger. Dette stemmer godt med funnene i (Granovskii et al., 2006), som konkluderte med at dampreforming måtte være 25-30% mer effektiv for å kunne konkurrere med konvensjonelle bensinbiler. Likefullt er dette et motsigende resultat sammenlignet med funnene i (Biswas et al., 2013), en forklaring på dette er at Biswas et al., 2013, ikke utviklet et eget scenario for bensinbiler, men baserte seg på preeksisterende data fra et analyseprogram. I følge (Dong et al., 2016) er kjøretøy basert på dampreforming bedre enn elektriske kjøretøy fra et klimaperspektiv. Dette motstrider også funnene i denne studien, men det understrekes at dette sannsynligvis skyldes høy andel kullkraft i kina hvor studien tar plass (Dong et al., 2016).

Energikjedene som ender i elektrisitet viser omtrent det samme bilde for utslipp som for energibruk. Vannkraft kommer i denne omgang på en andreplass rett bak den beste hydrogenkjeden. Elbil baser på elektrisitet er imidlertid ikke like attraktivt. Her viser det seg at elbiler får et relativt høyt utslipp, og ender opp på en sjetteplass, bak flere av hydrogenkjedene, og hybridbilen.

Dette kan igjen knyttes til den relativt høye andelen fossil energi i EU-miks, og selv om den er noe lavere i EU, enn Kina, stemmer dette overens med funnene i (Dong et al., 2016) hvor strømmen kommer fra kinesisk elektrisitmiks med høy andel kullkraft. Dårlige klimamessige resultater grunnet elektrisitet fra ikke fornybare energikilder kommer også frem av både (Simons & Bauer, 2011), og (Bhandari et al., 2014).

Når det gjelder hybridløsningen faller denne et sted midt mellom de beste energikjedene og det verste på en femteplass. Dette er den energikjeden som likner mest på konvensjonelle bensinbiler. Om en skulle gjøre en sammenlikning med bensinbilene fra kunnskapsgrunnlaget stemmer dette ganske godt med resultatene fra både (Pereira & Coelho, 2013), og (Granovskii et al., 2006). Det er imidlertid viktig å understreke at det sannsynligvis vil være en del forskjell på hybrid og konvensjonelle bensinbiler.

Hvilken del av energikjeden som gir størst bidrag til bruk av energi, og utslipp av CO₂ er varierende avhengig av forutsetningene fra energikjede til energikjede. Noe som også understrekes i funnene til (Bartolozzi et al., 2013).

En kort oppsummering av funnene er som følger:

- Energikjedene med utgangspunkt i fornybar energi er svært attraktive fra et klimaperspektiv.
- Det er ikke nødvendigvis sammenheng mellom stort energiforbruk og utslipp, selv om dette i noen tilfeller sammenhenger.
- Karbonfangst kan være med på å senke klimagassutslippene signifikant.
- El og hydrogenbiler basert på strøm fra EU-mix er lite attraktivt. Det vil i disse tilfellene være mer attraktivt med hybridbiler.
- Produksjon av biler og batterier utgjør i mange tilfeller en liten del av det totale utslippet, men for energikjeder med utgangspunkt i fornybare energikilder, eller med karbonfangst flyttes majoriteten av utslippene gjennom livsløpet over på produksjon.

4.3 Mulige utfordringer og løsninger

I dette kapittelet skal jeg diskutere noen av resultatene fra analysen, og ta opp noen viktige poeng.

Det ikke er realistisk å kunne «fore» hele Europa med vannkraft. Det er imidlertid mulig å se for seg et scenario hvor tilnærmet all elektrisk kraft kommer fra fornybar energi. Det kan argumenteres for at dette vil gi et nokså likt resultat som ved bruk av vannkraft, med tanke på utslipp av klimagasser da fornybar energi ikke har noen direkte utslipp, uavhengig av valgt teknologi. Vi vet for eksempel fra kunnskapsgrunnlaget at vindenergi er lukrativt. Et viktig poeng er likevel at utbygging av fornybar energi i stor skala ofte fører med seg andre økologiske problemer. For eksempel nevner naturvernforbundet betydelige arealinngrep, og store naturødeleggelser i sammenheng med vindkraftutbyggingen i Norge (Naturvernforbundet, 2021). Heller ikke vannkraft er fritatt store økologiske innvirkninger. Tidligere har det i stor grad vært fokus på fisk og dyr som lever i og rundt elver og vassdrag, men det er i senere tid også kommet frem at vannkraftrelatert infrastruktur har gitt store påvirkninger på andre landbaserte økosystemer (Norsk institutt for naturforskning, 2021). Basert på oppdagelsene gjort i Norge, er det rimelig å anta at storskala utbygging av fornybar energi ellers i Europa vil føre med seg liknende påvirkninger. Videre er ikke dette temaet undersøkt i denne studien, men det anerkjennes at utbygging av fornybar energi trolig kan skape store utfordringer.

Dampreforming av naturgass ser ut til å være en teknologi med to svært forskjellige sider. Til tross for at dampreforming fører med seg store klimagassutslipp er det mye enklere å fange opp karbon fra et stort anlegg hvor alle utslippene er samlet. I konvensjonelle forbrenningsmotorer flyttes store deler av utslippet ut til hvert enkelt kjøretøy, noe som gjør karbonfangst mye vanskeligere om ikke nær umulig.

Dette gjør dampreforming med karbonfangst til en mulig attraktiv teknologi. Til tross for at dette er en energikrevende prosess er utslippene lave, forutsatt at man oppnår ønsket rensesgrad. Et annet viktig poeng er at dampreforming av naturgass er en teknologi med potensiale for stort produksjonsvolum. Noe som vil være kritisk for at hydrogen skal kunne brukes på en skala hvor bidraget vil være stort nok til å gi signifikant redusert utslipp. Det er imidlertid viktig å huske på at det i denne studien er benyttet prinsippet om beste mulige teknologi, og det er usikkert hvorvidt storskala dampreforming vil kunne operere med rensesgrad på opptil 90% uten at det går kraftig utover virkningsgraden.

Her er det likevel verdt å nevne at dampreforming selv med rensegrader ned mot 60-50% vil kunne være attraktivt med tanke på klimagassutslipp, sammenliknet med el fra europeisk elektrisitetssmix, og hybridalternativet.

På den andre siden er naturgass en fossil ressurs som vil ta slutt før eller siden. Ifølge en artikkel fra ZME Science vil gassreservoarene holde i ca. 54 år til med dagens utvinning. En annen artikkel fra Millennium Alliance for Humanity and the Biosphere (MAHB) har estimert ca. 60 år igjen før vi er tomme for gass (Kuo, 2019; Puiu, 2021). Det er dermed vanskeligere å forsvare dampreforming av naturgass i stor skala, spesielt om virkningsgraden i prosessen skulle falle signifikant i kombinasjon med karbonfangst.

Et interessant alternativ er å bruke hydrogen som lagringsmedium ved overskuddsenergi fra fornybar energiproduksjon. For eksempel på nattestid når elvekraftverk, eller vindturbiner potensielt kan produsere mer strøm enn det som brukes. Dette temaet er ikke utredet i denne oppgaven, men det nevnes som et viktig alternativ.

4.4 vurdering av datakvalitet og avgrensninger

I dette delkapittelet skal jeg gå igjennom noen av svakhetene/begrensningene som dukker opp gjennom analysen.

- All dataen i denne oppgaven er basert på sekundærdata. Det er viktig å understreke at disse tallene er estimater basert på undersøkelser, hentet fra flere forskjellige analyser og studier, dette kan føre til at de inkluderte paramenterne varierer, og man kan derfor få forskjellige tall avhengig av tilnærming.
- Bruk av beste tilgjengelige teknologi (BAT): Prinsippet om BAT vil bidra til et urealistisk positivt resultat spesielt fra dagens perspektiv. Dog gir prinsippet mulig et innblikk i hva som er mulig å oppnå i fremtiden, men her vil det alltid være et usikkerhetsmoment.
- Beregning av CO₂-utslipp fra EU-mix er basert på gjennomsnittlige tall for virkningsgrader etc., og er kun et estimat. Et slikt regnestykke vil i virkeligheten bli enormt komplekst og man vil nok aldri få helt nøyaktige resultater. For utslippsdataen her er det også benyttet CO₂ ekvivalenter da det ikke fantes data på rene CO₂ utslipp. Fordi resten av oppgaven baserer seg på rene CO₂ utslipp er dette noe som kan føre til en viss usikkerhet når man sammenlikner utslippene. Mengden CO₂ som slippes ut fra Europeisk energiproduksjon er vanskelig å beregne i seg selv. Det ble derfor vurdert at usikkerhetsmomentet her er såpass stort fra før at det ikke vil spille noen stor rolle. Det vil likevel være fordelaktig å benytte mer nøyaktig data i fremtiden.
- Mangel på like kjøretøy: Ideelt ville det ha vært å få individuelle data direkte fra bilfabrikantene når det gjelder produksjonskostnader både for energi og for utslipp. Dette er likevel noe som nærmest ikke eksisterer, og svært store deler av litteraturen baserer seg på generelle tall og antakelser basert på materialkomposisjonen av de forskjellige kjøretøyene. Det er i tillegg benyttet en felles tilnærming for utregning av energi og utslipp både for selve bilen og for batteriene, noe som er med på å øke usikkerheten. Ideelt sett ville man hatt en hydrogendreven Golf til sammenlikning med de to andre kjøretøyene som begge er av merke Volkswagen Golf. Dette er imidlertid ikke tilgjengelig og Mirai ble valgt som hydrogendrevet alternativ. Denne bilen er større og tyngre en Golf, noe som også fører til et usikkerhetsmoment. Data for energi utslipp fra hydrogenbilproduksjon er generelt manglende og inneholder store sprik.

- Denne oppgaven ser ikke på avdamping fra flytende hydrogen, noe som sannsynligvis ville påvirket resultatet fra disse energikjedene. Dette øker usikkerheten noe.
- Ved en livsløpsanalyse vil det alltid være nødvendig å avgrense analysen. Hvor man setter en slik grense vil spille stor rolle for resultatet av analysen. Jo fler parametere som inkluderes jo mer nøyaktig vil analysen bli, men det vil også bli desto mer data, her er det mulig å fortsette nærmest til evig tid. I denne oppgaven er systemgrensene satt der det føles mest naturlig, med tanke på oppgavens omfang i både tid og tilgjengelige data/muligheter.

4.5 Forslag til videre arbeid

Basert på funnene i denne studien, og gjennomgangen av oppgaven i forrige delkapittel trekkes følgende områder frem som spesielt viktige for videre arbeid:

- Hva er faktiske energikostnader og utslipp fra produksjon av hydrogenbiler?
- Vil hydrogen produsert med høyere andel fornybar energi i Europa kunne være med på å senke utslippene av klimagasser?
- Hvordan vil storskala utvikling av fornybar energi påvirke økologien i Norge og Europa?
- I hvilken grad kan dampreforming med karbonfangst ta del i hydrogenproduksjon? Er dette en levedyktig prosess med tanke på fremtidens transportbehov sett opp imot mengden naturgass som behøves?
- I hvilken grad kan overskuddsenergi fra fornybare energikilder brukes til hydrogenproduksjon? Og er denne produksjonen stor nok til å støtte et levedyktig marked for hydrogenbiler?
- Hvordan vil et stadig mer sammensatt kraftmarked være med på å påvirke levedyktigheten til hydrogenbiler i land som Norge?
- Hva vil kostnadene ved etablering av et nettverk for fylling av hydrogen bli? (Økonomisk, og miljømessig).

5.0 Konklusjon

Målet med denne oppgaven var å finne ut om hydrogen som drivstoff i personbiler kan bidra til reduserte klimagassutslipp. Videre forsøker studien å finne ut hvilken form for hydrogenproduksjon som gir minst klimagassutslipp, og om hydrogenbilen kan konkurrere med el og hybridbiler. Totalt har 9 energikjeder blitt utredet og sammenliknet med andre studier.

Hydrogendrevne biler fremstår som en lovende teknologi så lenge det er mulig å benytte fornybar energi til hydrogenproduksjon. Det kommer frem at dampreforming med karbonfangst har stort potensial til å senke klimagassutslippene på europeisk skala.

Det må likevel nevnes at de eksisterende forholdene der hydrogenbilen introduseres er med på å bestemme i hvilken grad hydrogen som drivstoff har potensiale til å senke klimagassutslippene. I områder med svært god tilgang på fornybar energi til strømproduksjon vil elbilen være svært attraktiv. Dette gjelder for eksempel Norge som har tilgang på store mengder «ren» strøm.

På europeisk skala er imidlertid ikke strømmen like «ren» som i Norge. Dette gjør hydrogenbilen til et mer attraktivt alternativ, spesielt i en overgangsfase hvor man beveger seg vekk fra fossile energikilder.

Referanser

- Ajanovic, A. & Haas, R. (2019). On the Environmental Benignity of Electric Vehicles. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems*, 7 (3): 416-431. doi: 10.13044/j.sdewes.d6.0252.
- Aziz, M. (red.). (2018). *Production, transportation, and utilization of carbon-free hydrogen*. Online: AIP Conference Proceedings.
- Bartolozzi, I., Rizzi, F. & Frey, M. (red.). (2013). *Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy*. Applied energy, b. 101. Kidlington: Kidlington: Elsevier Ltd.
- Bethoux, O. (2020). Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives. *Energies*, 13 (21): 1. doi: 10.3390/en13215843.
- Bhandari, R., Trudewind, C. A. & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of cleaner production*, 85: 151-163. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
- Biswas, W. K., Thompson, B. C. & Islam, M. N. (2013). Environmental life cycle feasibility assessment of hydrogen as an automotive fuel in Western Australia. *International journal of hydrogen energy*, 38 (1): 246-254. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.044.
- Blok, K. & Nieuwlaar, E. (2017). *Introduction to energy analysis*. 3. utg. Abingdon: Routledge.
- Burheim, O. S. (2017). *Chapter 8 - Hydrogen for Energy Storage*. Engineering Energy Storage: Academic Press. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814100-7.00008-0>.
- Cetinkaya, E., Dincer, I. & Naterer, G. F. (2012). Life cycle assessment of various hydrogen production methods. *International journal of hydrogen energy*, 37 (3): 2071-2080. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.064.
- Chau, K. T. (2014). *Pure electric vehicles*. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Woodhead Publishing. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.655>.
- Chen, Y., Hu, X. & Liu, J. (2019). Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles Considering the Detailed Vehicle Components: Comparison and Scenario Analysis in China Based on Different Hydrogen Production Schemes. *Energies*, 12 (15): 3031. doi: 10.3390/en12153031.
- Coffin, D. & Horowitz, J. (2018). The Supply Chain for Electric Vehicle Batteries. *Journal of International Commerce and Economics*.
- Demirel, Y. (2016). *Energy Sources*. Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling. Cham: Springer. Tilgjengelig fra: https://doi.org/10.1007/978-3-319-29650-0_2.
- Dong, J., Liu, X., Xu, X. & Zhang, S. (2016). Comparative life cycle assessment of hydrogen pathways from fossil sources in China. *International journal of energy research*, 40 (15): 2105-2116. doi: 10.1002/er.3586.
- Electropaedia. (2005). *Electricity Generation from Biofuels*. Tilgjengelig fra: <https://www.mpoweruk.com/biofuels.htm> (lest 13.04.2021).
- Energy Information Administration. (2020). *Electricity in the United States is produced (generated) with diverse energy sources and technologies*. Tilgjengelig fra: <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/electricity-in-the-us.php#:~:text=Fossil%20fuels%20are%20the%20largest,U.S.%20electricity%20generation%20in%202020.&text=Coal%20was%20the%20third%20largest,in%202020%E2%80%94about%2019%25>. (lest 16.05.2021).
- enerWE. (2016). - *En stasjon kan selge fra et par tusen liter til flerfoldige titusen liter daglig*. Tilgjengelig fra: <https://enerwe.no/bensin-cirkel-k/en-stasjon-kan-selge-fra-et-par-tusen-liter-til-flerfoldige-titusen-liter-daglig/138861#:~:text=Tankbilene%20som%20kj%C3%B8rer%20rundt%20har,diesel%2C%20fordelt%20p%C3%A5%20flere%20tanker>. (lest 20.04.2021).
- Europakommisjonen. (2014). on the deployment of alternative fuels infrastructure. *Official Journal of the European Union*.

- European Environment Agency. (2015). *Efficiency of conventional thermal electricity generation*. Tilgjengelig fra: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/efficiency-of-conventional-thermal-electricity-generation-1/assessment#:~:text=The%20efficiency%20of%20electricity%20production,and%20input%20for%20electricity%20production>. (lest 13.04.2021).
- European Environment Agency. (2020a). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation*: European Environment Agency. Tilgjengelig fra: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-6#tab-googlechartid_googlechartid_googlechartid_googlechartid_chart_11111 (lest 14.04.2021).
- European Environment Agency. (2020b). *Transport*. Tilgjengelig fra: <https://www.eea.europa.eu/soer/2015/europe/transport> (lest 05.05.2021).
- European Environment Agency. (2021). *Efficiency of conventional thermal electricity and heat production in Europe*. Tilgjengelig fra: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/efficiency-of-conventional-thermal-electricity-generation-4/assessment-2> (lest 10.04.2021).
- Eurostat. (2021). *Greenhouse gas emissions by source sector*. Tilgjengelig fra: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_air_gge&lang=en (lest 24.05.2021).
- EVS specifications. (2021). *2020 Volkswagen e-Golf SE*. Tilgjengelig fra: <https://www.evspecifications.com/en/model-driving-range/7d1ddc> (lest 25.03.2021).
- Forente nasjoner. (2020). *Parisavtalen*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen> (lest 03.05.2021).
- Forskningsrådet. (2020). *Regjeringens hydrogenstrategi og øremerking av midler til hydrogen*. Tilgjengelig fra: <https://www.forskningsradet.no/utlysninger/hydrogensatsing-2021/regjeringens-hydrogenstrategi-og-oremerking-av-midler-til-hydrogen/> (lest 04.05.2021).
- García, L. (2015). 4 - Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks. I: Subramani, V., Basile, A. & Veziroğlu, T. N. (red.) *Compendium of Hydrogen Energy*, s. 83-107. Oxford: Woodhead Publishing. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423614000042>. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-361-4.00004-2>.
- General Electric. (2018). *BREAKING THE POWER PLANT EFFICIENCY RECORD...AGAIN!* Tilgjengelig fra: <https://www.ge.com/gas-power/resources/articles/2018/nishi-nagoya-efficiency-record> (lest 23.02.2021).
- Granovskii, M., Dincer, I. & Rosen, M. A. (2006). Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles. *International journal of hydrogen energy*, 31 (3): 337-352. doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.10.004.
- Hofstad, K. (2017). *Dampreforming*. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/dampreforming> (lest 14.04.2021).
- Hofstad, K. (2019a). *Energivare*. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energivare> (lest 14.04.2021).
- Hofstad, K. (2019b). *Sør-Korea - energi*. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/S%C3%B8r-Korea-energi#:~:text=Fossil%20energi%2C%20i%20hovedsak%20kull,energi%20var%204%2C3%20prosent>. (lest 15.04.2020).
- Holden, E. (2003). *Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer - år 2010*. Prosjekt energi- og miljødata for samferdsel. Sogndal: Vestlandsforskning. Tilgjengelig fra: <https://www.vestforsk.no/nn/publication/energi-og-miljodata-alternative-og-konvensjonelle-drivstoffer-ar-2010> (lest 28.01.2021).
- IEAGHG. (2017). *Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Plant with CCS*. IEA Greenhouse, gas R&D programme. Tilgjengelig fra: https://ieaghg.org/exco_docs/2017-02.pdf (lest 05.04.2021).

- International Energy Agency. (2020). *Tracking Transport 2020*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020> (lest 04.05.2021).
- International Energy Agency. (2020). *Total primary energy supply, 2018*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/regions/europe> (lest 13.03.2021).
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014*. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Tilgjengelig fra: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (lest 03.05.2021).
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Tilgjengelig fra: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (lest 22.03.2021).
- Klima- og miljødepartementet. (2020a). *Klimaforliket*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/> (lest 04.05.2021).
- Klima- og miljødepartementet. (2020b). *Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamålet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (lest 04.05.2021).
- Klima- og miljødepartementet. (2021). *Klimaplan for 2021–2030*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-13-20202021/id2827405/> (lest 04.05.2020).
- Kofstad, P. K. & Pedersen, B. (2019). Hydrogen. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hydrogen> (lest 15.04.2021).
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G. & Moussiopoulos, N. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International journal of hydrogen energy*, 29 (14): 1443-1450. doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.01.016.
- Kuo, G. (2019). *When Fossil Fuels Run Out, What Then?* Tilgjengelig fra: <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/> (lest 11.05.2021).
- Meld. St. 20 (2020–2021). *Nasjonal transportplan 2022–2033*. I: Samferdselsdepartementet (red.). Oslo: Samferdselsdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-20-20202021/id2839503/> (lest 05.05.2021).
- Miljøstatus. (2020). *Klimagassutslipp fra veitrafikk*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/klimagassutslipp-fra-veitrafikk/> (lest 07.05.2021).
- Miljøstatus. (2021). *Miljømål 5.2*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.2/> (lest 07.07.2021).
- Mustad, E. (2020). Brexit. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Brexit> (lest 24.05.2021).
- NAF. (2020). *Rekkeviddetest Volkswagen e-Golf*. Tilgjengelig fra: <https://www.naf.no/elbil/elbiler-i-norge/volkswagen-e-golf/rekkeviddetest-volkswagen-e-golf/> (lest 13.04.2020).
- National Academies Press. (2004). *The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs*. Washington, D.C.: National Academies Press. Tilgjengelig fra: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=4a7cd6f0-5de4-4a4f-9abf-ade015abbb0%40pdc-v-sessionmgr06&bdata=JnNpdGU9ZWWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#AN=121269&db=e000xww>.
- Naturvernforbundet. (2021). *Vindkraft*. Tilgjengelig fra: <https://naturvernforbundet.no/vindkraft/> (lest 11.05.2021).
- Nel. (2019). *The World's Most Efficient and Reliable Electrolysers*. Tilgjengelig fra: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-C.pdf> (lest 21.04.2021).

- Nemry, F., Leduc, G., Mongelli, I. & Uihlein, A. (2008). *Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car)*. European Commission's Integrated Product Policy framework. Tilgjengelig fra: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9c8b8592-14b5-40df-b810-7c26681cfe06/language-en> (lest 02.04.2021).
- Nestaas, I. & Grønmo, S. (2020). livsløpsanalyse. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/livsl%C3%B8psanalyse> (lest 10.03.2021).
- Norsk institutt for naturforskning. (2021). *Miljøeffekter av vannkraft*. Tilgjengelig fra: <https://www.nina.no/V%C3%A5re-fagomr%C3%A5der/Fornybar-energi/Vannkraft> (lest 11.05.2021).
- NVE. (2021). *Hvor kommer strømmen fra?* Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/hvor-kommer-strommen-fra/?ref=mainmenu> (lest 15.04.2021).
- Ocean Hyway Cluster. (2020). *Hydrogen Value Chain*. Tilgjengelig fra: <https://www.oceanhywaycluster.no/valuechain> (lest 24.02.2021).
- Oh, S.-C. & Hildreth, A. (2014). Estimating the Technical Improvement of Energy Efficiency in the Automotive Industry—Stochastic and Deterministic Frontier Benchmarking Approaches. *Energies*, 7 (9): 6196-6222. doi: 10.3390/en7096196.
- Peng, X. D. (2012). Analysis of the Thermal Efficiency Limit of the Steam Methane Reforming Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51 (50): 16385-16392. doi: 10.1021/ie3002843.
- Pereira, S. R. & Coelho, M. C. (2013). Life cycle analysis of hydrogen – A well-to-wheels analysis for Portugal. *International journal of hydrogen energy*, 38 (5): 2029-2038. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.029.
- Pistoia, G. (2010). *Electric and Hybrid Vehicles : Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. 1 utg. Amsterdam: Elsevier. Tilgjengelig fra: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=3179862f-24da-495d-8b08-370f221c4148%40pdv-sessmgr01&bdata=JnNpdGU9ZWWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#AN=342445&db=e000xww> (lest 30.03.2021).
- Prehn-Sletten, S. (2011). *Kullkraftverk og gasskraftverk med CO2-fangst basert på absorpsjon*. Masteroppgave. Trondheim: NTNU. Tilgjengelig fra: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/234532/460139_FULLTEXT01.pdf?sequence=3&isAllowed=y (lest 07.03.2021).
- Pui, T. (2021). *How long before the world runs out of fossil fuels?* Tilgjengelig fra: <https://www.zmescience.com/science/news-science/how-long-fossil-fuels-last-43432/> (lest 11.05.2021).
- Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., Jiang, S. & Hao, H. (2017). Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China. *Applied energy*, 204: 1399-1411. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.041.
- Romare, M. & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. Tilgjengelig fra: <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede95a9/1496136143435/C243.pdf> (lest 22.03.2021).
- Rosvold, K. A. & Hofstad, K. (2018). fossilt brensel. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/fossilt_brensel (lest 20.04.2021).
- Sato, F. E. K. & Nakata, T. (2020). Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. *Energies*, 13 (9): 2396. doi: 10.3390/en13092396.
- Schweimer, G. W. & Levin, M. (2000). *Life Cycle Inventory for the Golf A4* Tilgjengelig fra: <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf> (lest 22.04.2021).
- Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2 (3): 442-454. doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

- Simons, A. & Bauer, C. (2011). *Life cycle assessment of hydrogen production*. Cambridge: Cambridge University Press. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Simons3/publication/272130890_Life_cycle_assessment_of_hydrogen_production/links/54f99fc80cf210398e991366/Life-cycle-assessment-of-hydrogen-production.pdf.
- Smitkova, M., Janíček, F. & Riccardi, J. (2011). Life cycle analysis of processes for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 36 (13): 7844-7851. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.177.
- Staffell, I. (2011). *The Energy and Fuel Data Sheet*. Tilgjengelig fra: https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf (lest 20.04.2021).
- Statistisk sentralbyrå. (2021a). *Bilparken*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken#:~:text=Bilenes%20gjennomsnittsalder%20ved%20vraking%20%C3%B8kte,16%2C2%20%C3%A5r%20for%20varebiler>. (lest 23.03.2021).
- Statistisk sentralbyrå. (2021b). *Kjørelengder*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/klreg> (lest 23.03.2021).
- Stølen, S. I. (2016). *Så mye har lastebilen utviklet seg på 20 år*. Tilgjengelig fra: <https://lastebil.no/Aktuelt/Nyhetsarkiv/2016/Saa-mye-har-lastebilen-utviklet-seg-paa-20-aar> (lest 20.04.2021).
- Sullivan, J. L. & Gaines, L. (2010). *A REVIEW OF BATTERY LIFE-CYCLE ANALYSIS: STATE OF KNOWLEDGE AND CRITICAL NEEDS*: Argonne National Laboratory.
- Sun, P. & Elgowainy, A. (2019). *Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET®*. Tilgjengelig fra: https://greet.es.anl.gov/publication-smr_h2_2019 (lest 05.03.2021).
- The World Bank. (2018a). *Electric power transmission and distribution losses (% of output) - European Union*. Tilgjengelig fra: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=EU> (lest 20.04.2021).
- The World Bank. (2018b). *Electric power transmission and distribution losses (% of output) - Norway*. Tilgjengelig fra: https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?name_desc=true&locations=NO (lest 20.04.2021).
- Tomasgard, A., Blekkan, E. A., Karstad, P. I., Møller-Hols, S., Størset, S., Ulleberg, Ø., Berstad, D., Dawson, J., Løvås, T., Nekså, P., et al. (2019). *Hydrogen i fremtidens lavkarbonsamfunn*. Tilgjengelig fra: https://www.ntnu.no/documents/7414984/0/Hydrogen+i+framtiden_rapport_A4_web_LR+28-03-2019.pdf/cbcf5251-7a61-41ac-88ea-faef5daf558c (lest 15.04.2021).
- Toyota. (2014). *Outline of the Mirai*. Tilgjengelig fra: https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf. (lest 15.04.2021).
- Toyota. (2021). *The New Toyota Mirai*. Tilgjengelig fra: <https://newsroom.toyota.eu/the-new-toyota-mirai/> (lest 13.04.2021).
- United Nations Environment Programme. (2011). *GLOBAL GUIDANCE PRINCIPLES FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT DATABASES*. I: Programme, U. N. E. (red.). Tilgjengelig fra: https://cdn.ymaws.com/sites/www.setac.org/resource/resmgr/publications_and_resources/global-guidance-principles-u.pdf (lest 16.03.2021).
- Velazquez, A. A. & Dodds, P. (2017). *Production of Hydrogen*. Tilgjengelig fra: [https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methane-steam-reforming#:~:text=Steam%20Reforming%20of%20Gas%20and,\(US%20DoE%2C%202015a\)](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methane-steam-reforming#:~:text=Steam%20Reforming%20of%20Gas%20and,(US%20DoE%2C%202015a)). (lest 27.04.2021).
- Volkswagen. (2021). *Den nye Volkswagen GOLF*. Tilgjengelig fra: https://www.volkswagen.no/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/no/priser-og-brosjyrer/golf/Brosjyre_GTI.pdf (lest 13.04.2021).

- Wang, D., Zamel, N., Jiao, K., Zhou, Y., Yu, S., Du, Q. & Yin, Y. (2013). Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China. *Energy*, 59: 402-412. doi: 10.1016/j.energy.2013.07.035.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. (2021). *Nuclear Power Reactors*. Tilgjengelig fra: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (lest 13.04.2021).
- Aarnes, J., Haugom, G. P. & Norheim, B. (2019). *PRODUKSJON OG BRUK AV HYDROGEN I NORGE*. Synteserapport om produksjon og bruk av hydrogen i Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf> (lest 19.04.2021).



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway