



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Tredjegrads energikjedeanalyse av hydrogenbiler

Third Order Energy Chain Analysis of Hydrogen Cars

Hendricus Cornelus Renier Maessen

Fornybar energi

Forord

Denne oppgaven er skrevet som avslutningen av min fem år lange utdanning ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Først vil jeg takke min veileder Erling Holden for en utrolig god oppfølging gjennom hele masterskrivingen. En stor takk til mine kollektiv i Skogveien og Trekrone, som har vært mine hjem under studietiden min. En stor takk til vennene jeg har fått gjennom de fem siste årene, både i og utenfor Ås. Til slutt vil jeg takke familien min for støtten jeg har fått gjennom hele studietiden.

Ås, 10. mai 2022

Hendricus Cornelus Renier Maessen

Sammendrag

Norge har som mål om å redusere utslippet av klimagasser med minst 50% i 2030 sammenlignet med utslippsnivået i 1990 (Miljøstatus, 2021b). Utslipet fra veitrafikken utgjør ca. 17% av utslippene i Norge i dag (Miljøstatus, 2021c), og er da en sektor som må redusere utslippene sine for at Norge skal kunne nå klimamålet sitt. En mulighet for å redusere utslipp fra veitrafikken er å bytte ut dagens bensin og dieselpersonbiler med personbiler som benytter alternative drivstoff og har lavere utslipp. Dette inkluderer blant annet elbiler, hydrogenbiler og biler som benytter en hybridløsning mellom fossilt drivstoff og strøm. Fordelen med elbiler og hydrogenbiler er at de ikke har noe utslipp av klimagasser under selve kjøringen av personbilen i motsetning til konvensjonelle biler og hybridbiler som vil ha utslipp av klimagasser.

Problemstillingene i denne oppgaven er:

Kan hydrogen som drivstoff til personbiler bidra til å redusere utslipp av klimagasser fra persontransport? Hvilken måte å produsere hydrogen på vil føre til de laveste utslippene og hvordan kommer hydrogen ut sammenliknet med elbiler og hybridbil?

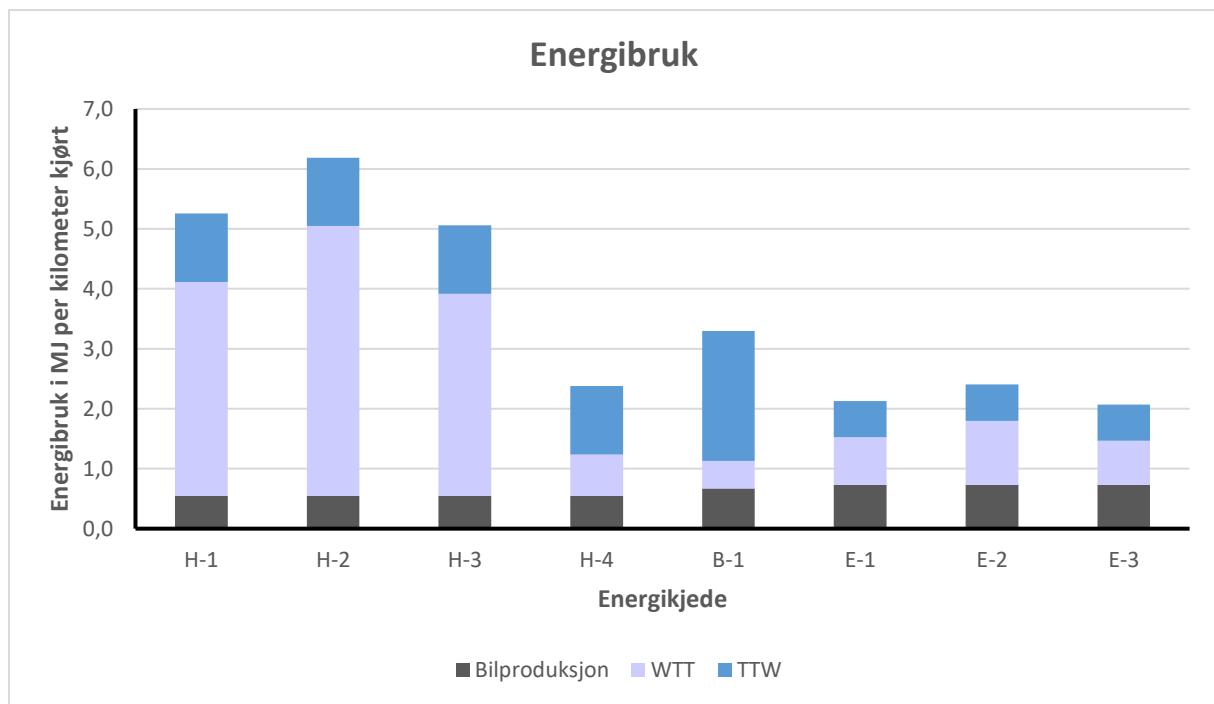
For å besvare problemstillingen benyttes energikjedeanalyse. Ved å bruke energikjedeanalyse er det mulig å beregne det totale energiforbruket i energikjedene. Det totale energibruket i kjedene er her definert som summen av energibruk fra utvinning av en energikilde til bruk i kjøretøyet, også kalt WTW, og energibruk til produksjon av kjøretøy, batterier og fremdriftssystem. Ved å finne det totale energiforbruket er det mulig å beregne det totale klimagassutslippet, som vil være hovedfokuset i denne oppgaven. De totale energimengdene som kreves i hver energikjedene er interessante å belyse, men de blir først og fremst brukt som en nødvendig mellomregning for å finne klimagassutslippet fra energikjedene. Totalt så tar oppgaven for seg 8 ulike energikjeder, som er kort beskrevet i Tabell 1. Av energikjedene benytter fire personbiler hydrogen som drivstoff, en benytter både strøm og bensin, altså en hybridbil, og de resterende tre energikjedene benytter strøm. I oppgaven er det lagt til grunn fire strømmikser: EU strømmiksen, en fossil strømmiks, en fornybar strømmiks og den norske strømmiksen. Det ble også utført følsomhets- og scenarioanalyser for energikjedene i oppgaven.

Tabell 1 Energikjedene

Energikjede	Kort beskrivelse
H-1	Brenselcelle med hydrogen fra EU strømmiks
H-2	Brenselcelle med hydrogen fra fossil strømmiks
H-3	Brenselcelle med hydrogen fra fornybar strømmiks
H-4	Brenselcelle med hydrogen fra dampreforming
B-1	Hybridbil med bensin og norsk strøm som drivstoff
E-1	Elbil med strøm fra EU strømmiks
E-2	Elbil med strøm fra fossil strømmiks
E-3	Elbil med strøm fra fornybar strømmiks

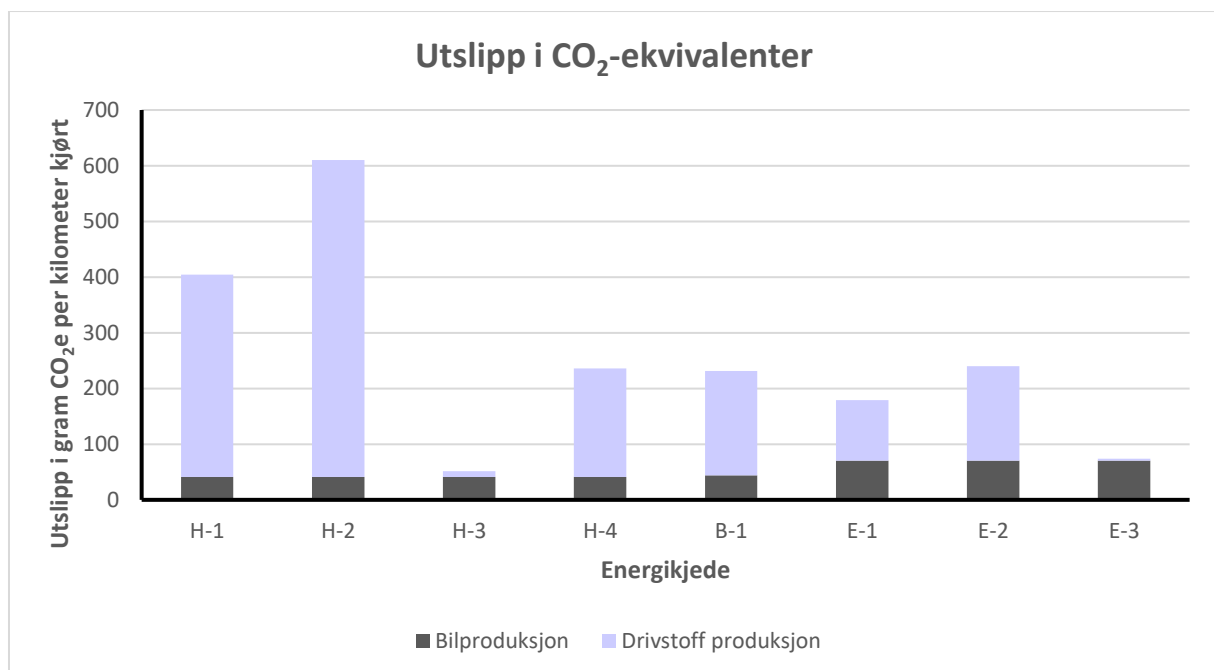
Resultatene presentert i Figur 1 viser at energikjedene som benytter strøm til å produsere hydrogen via elektrolyse (H-1, H-2 og H-3) er mer enn dobbelt så energikrevende enn alle de andre energikjedene i oppgaven, hovedsakelig på grunn av at disse energikjedene inneholder flere og mer energikrevende delprosesser og dermed et større energibruk. Figur 2 viser resultatet for utslippene fra de ulike energikjedene i CO₂e/km. Det laveste klimagassutslippet målt i CO₂e/km oppnås i energikjede H-3 som benytter hydrogen produsert ved bruk av den fornybare strømmiksen. Det antas at en personbil, uavhengig av type drivstoff som benyttes, kjører 214 118,4 km over sin levetid.

Følsomhetsanalysene som har blitt utført i denne oppgaven viser til at en endring i utslippet fra strømmiksene benyttet i energikjedene vil ha stor betydning for de totale utslippet av CO₂e/km for energikjedene. Derimot vil energikjeden B-1, for hybridbilen, ikke være følsom for endringer i utslippsfaktoren til strømmiksen, ettersom strøm bare blir brukt som drivstoff i en begrenset grad. Endring i utslippet fra dampreforming vil ha en stor innvirkning på utslippet fra energikjede H-4. Scenarioanalysene viser at resultatet fra energikjedene som benytter elektrolyse er mer følsomme for endringer i utslippet fra strømmiksen enn de andre energikjedene. Dette begrunnes med at disse energikjedene inneholder flere delprosesser. Valg av strømmiks for energikjede H-4 vil ha stor innvirkning på resultatet, mens valg av strømmiks for hybridbilen vil kun ha en liten påvirkning på resultatet.



Figur 1 Resultat for totalt energibruk.

WTT er totalt energibruk fra drivstoffproduksjonen. TTW er totalt energibruk fra drivstoffbruken. Bilproduksjon inkluderer produksjon av kjøretøy, batterier og fremdriftssystem. Se Tabell 1 for en nærmere beskrivelse av de enkelte energikjedene.



Figur 2 Resultat for utslipp

Bilproduksjon inkluderer utslipp fra produksjon av kjøretøy, batteri og fremdriftssystem. Drivstoffproduksjon inkluderer utslippene fra produksjonen av drivstoffet over kjøretøyets levetid.

Abstract

Norway has a goal to reduce the country's climate gas emissions by at least 50% in 2030, compared to the country's emission levels in 1990 (Miljøstatus, 2021b). Emissions from the road traffic sector account for around 17% of total present emissions (Miljøstatus, 2021c), thus the emissions from this sector have to be reduced in order for Norway to meet its climate target. One way of reducing emissions from the road traffic sector is by replacing gasoline and diesel cars with cars that use alternative fuels. This includes electric cars, hydrogen cars or hybrid cars, which use both gasoline and electricity as fuel. The advantage with electric cars and hydrogen cars is that they do not emit emissions while driving, in contrast to gasoline cars, diesel cars and hybrid cars.

The aim of this thesis is to answer the following questions:

Can hydrogen as a fuel contribute to reducing emissions of greenhouse gases from passenger transport? Which ways of producing hydrogen will lead to the lowest emissions and how are these compared to electric cars and hybrid car?

To answer this question energy chain analysis is used. By using energy chain analysis it is possible to calculate the total amount of energy used in each energy chain. The total energy amount in each chain is here defined as the sum of the energy used from the extraction of an energy source to its usage in a passenger vehicle, also called WTW, as well as the energy used in the production of the vehicle, batteries and propulsion system. By finding the total energy consumption it is possible to calculate the total greenhouse gas emissions, which will be the main focus in this thesis. The total energy amounts required in each energy chain are interesting to illuminate but are first and foremost used as a necessary between calculation to find the greenhouse gas emissions from the energy chains. Eight different energy chains are included within this thesis, these are presented in Table 2. Four of which used hydrogen as fuel, one is hybrid and thus uses both electricity and gasoline, and the remaining three use electricity as their fuel. The thesis uses four different electricity mixes: an EU electricity mix, a fossil electricity mix, a renewable electricity mix and the Norwegian electricity mix. Multiple sensitivity and scenario analyses were performed within this study as well.

Table 2 Energy chains

Energy chain	Brief description
H-1	Fuel cell with hydrogen from the EU electricity mix
H-2	Fuel cell with hydrogen from the fossil electricity mix
H-3	Fuel cell with hydrogen from the renewable electricity mix
H-4	Fuel cell with hydrogen from steam methane reforming
B-1	Hybrid car with gasoline and Norwegian electricity as fuel
E-1	Electric car with electricity from the EU electricity mix
E-2	Electric car with electricity from the fossil electricity mix
E-3	Electric car with electricity from the renewable electricity mix

The results for the energy usage are shown in Figure 3. It is shown that the energy chains that use electricity to produce hydrogen through electrolysis of water (H-1, H-2 and H-3) are more than twice as energy demanding than the other energy chains within the thesis. This is due to these energy chains containing many subprocesses and thus more losses. Figure 4 shows the results for the emissions from the various energy chains in CO₂e/km. The lowest emissions measured in CO₂e/km are from energy chain H-3, which uses hydrogen produced via electrolysis with electricity from a renewable energy mix. It is assumed that the cars, independent of the fuel used, are driven for a total of 214 118,4 km throughout their lifetime.

The sensitivity analyses within this thesis show that a change in emissions from the various electricity mixes used in this thesis will have considerable impact on the total amount of emissions measured in CO₂e for the energy chains. The hybrid vehicle model, B-1, is less sensitive for changes in the emissions from the electricity mix, as electricity only is used as a fuel to a limited degree. Changes in the emissions from the steam reforming process will greatly influence the emissions from energy chain H-4. The scenario analyses show that the energy chains which use electrolysis are more sensitive to changes in the emission from the electricity mix used, than the other energy chains. The reason for this is that these energy chains include many processes. The electricity mix used in energy chain H-4 will have a big impact on the results from the model but for energy chain B-1, the choice of electricity mix will have a limited effect on the results.

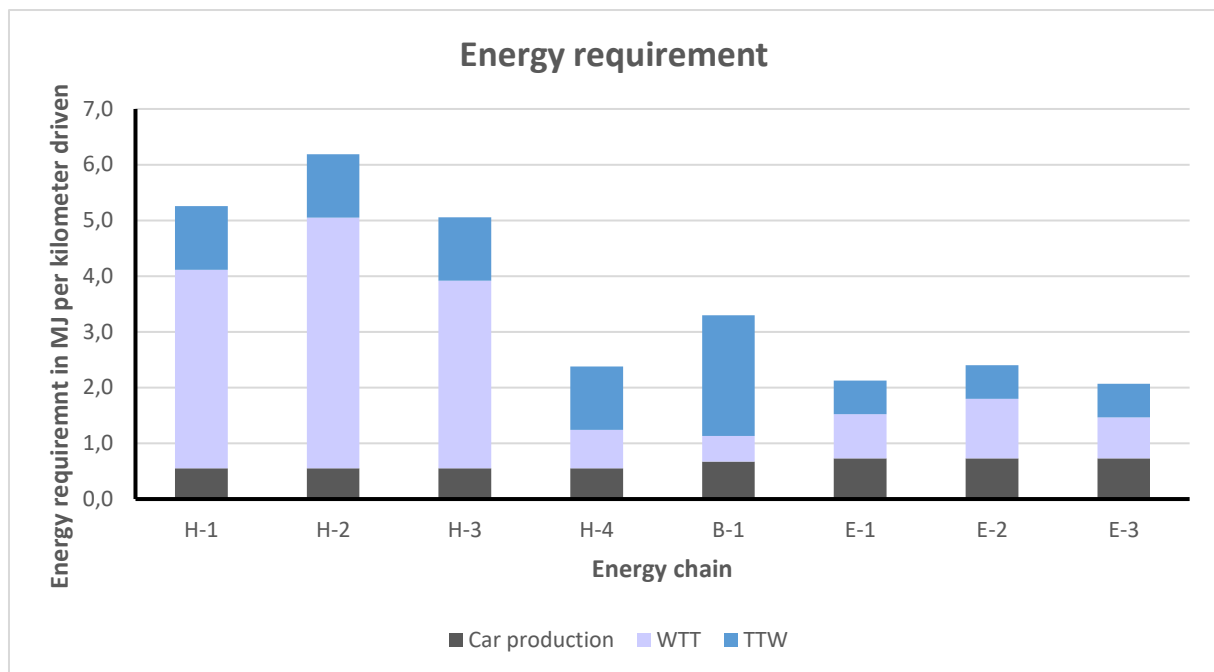


Figure 3 Results for energy requirement

WTT is the total energy usage from the fuel production. TTW is the energy usage from fuel consumption. Car production includes the production of the vehicle, batteries and propulsion system. See Table 1 for a detailed description of the energy chains.

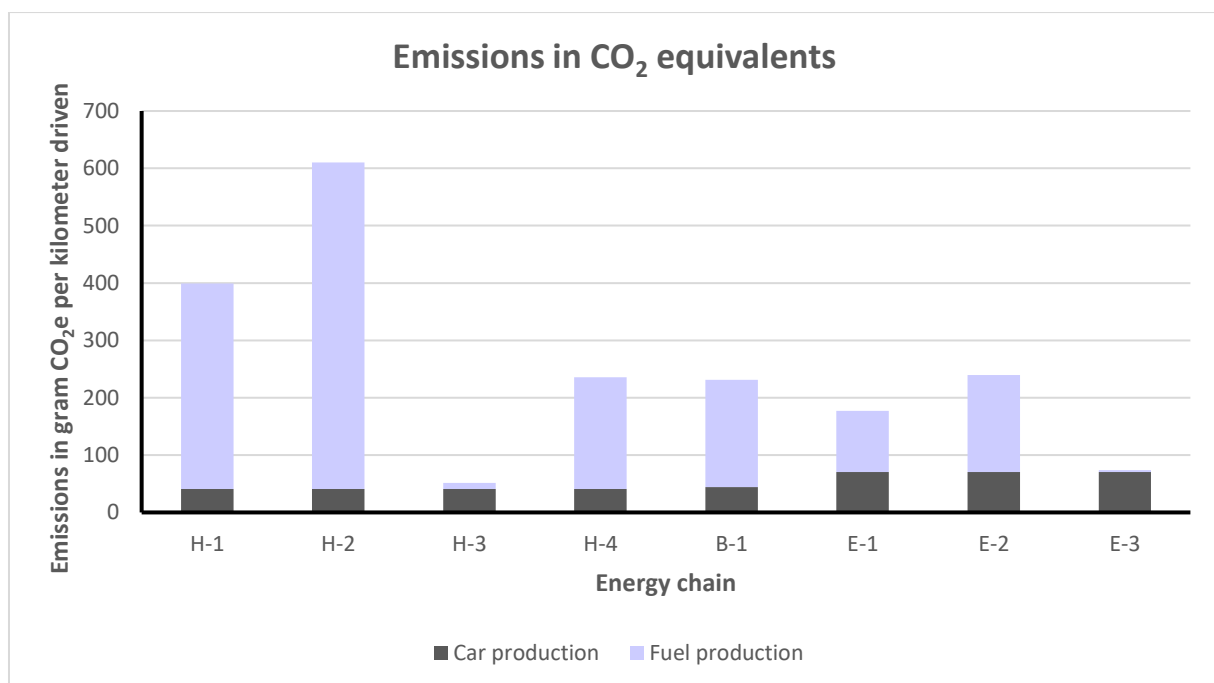


Figure 4 Results for emissions

Car production includes the emission from the production of the vehicle, batteries, and the propulsion system. Fuel production includes the emissions from the production of the fuel over the vehicle's lifetime.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	V
Figurliste	XI
Tabelliste	XII
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn for studien	1
1.2 Kunnskapsgrunnlag	5
1.2.1 Drivstoffproduksjon.....	5
1.2.2 Bilproduksjon.....	8
1.3 Oppsummering av kunnskapsgrunnlag	9
1.4 Problemstilling.....	10
1.5 Oppgavens oppbygging	11
2 Metode	12
2.1 Energikjedeanalyse.....	12
2.2 WTW, Well-to-Wheels analyse.....	13
2.2.1 WTT, Well-to-Tank analyse.....	13
2.2.2 TTW, Tank-to-Wheels analyse.....	14
2.3 Beregningsmetode	14
2.4 Systemgrenser: definering av energikjedene.....	16
2.5 Allokering.....	17
2.6 Datagrunnlag	17
2.7 Forutsetninger	18
2.8 Energikjedene	19
2.8.1 Energikjede H-1	21
2.8.2 Energikjede H-2	22
2.8.3 Energikjede H-3	23
2.8.4 Energikjede H-4	24
2.8.5 Energikjede B-1.....	25
2.8.6 Energikjede E-1.....	26
2.8.7 Energikjede E-2.....	27
2.8.8 Energikjede E-3.....	28
2.9 Følsomhetsanalyse	29
2.10 Scenarioanalyse	29
3 Data	30

3.1 WTT	30
3.1.1 EU strømmiksen	30
3.1.2 Fossil strømmiks	32
3.1.3 Utvinning av kull	32
3.1.4 Distribusjon av kull	33
3.1.5 Lagring av kull	33
3.1.6 Fornybar strømmiks	33
3.1.7 Norsk strømmiks	34
3.1.8 Distribusjon av strøm	36
3.1.9 Elektrolyse	37
3.1.10 Utvinning av naturgass	38
3.1.11 Transport av naturgass	38
3.1.12 Dampreforming	39
3.1.13 Kjøling av hydrogen	40
3.1.14 Utvinning av råolje	41
3.1.15 Transport av råolje	41
3.1.16 Lagring av råolje	42
3.1.17 Produksjon av bensin ved raffineri	42
3.1.18 Transport av drivstoff til fyllestasjon	42
3.2 TTW	43
3.2.1 Valg av personbilmodeller	43
3.2.2 Energibruk for produksjonen av kjøretøyproduksjon	45
3.3 Beregning av utslipp i CO ₂ e	48
3.3.1 Utslipp EU strømmiksen	48
3.3.2 Utslipp fossil strømmiks	49
3.3.3 Utslipp fornybar strømmiks	49
3.3.4 Utslipp norsk strømmiks	49
3.3.5 Utslipp fra naturgass	50
3.3.6 Utslipp dampreforming	50
3.3.7 Utslipp fra råolje	50
3.3.8 Utslipp fra personbilproduksjonen	50
3.4 Oppsummering av kapittel 3	55
4 Resultater og diskusjon	58
4.1 Resultatet for energibruk	58
4.2 Resultater for utslipp	60
4.3 Følsomhetsanalyse	62

4.3.1 Følsomhetsanalyse H-1	63
4.3.2 Følsomhetsanalyse H-4	64
4.3.3 Følsomhetsanalyse B-1.....	65
4.4 Scenarioanalyser	66
4.4.1 Endring i utslipp fra EU og den fossile strømmiksen	66
4.4.2 Mer klimavennlig strømproduksjon i EU.....	67
4.4.3 Ulike strømmikser for fossil hydrogenproduksjon	68
4.4.4 Ulike strømmikser for hybridbilen.....	69
4.5 Vurdering av datakvalitet	71
4.6 Datautfordringer	72
4.7 Hydrogen og bærekraft	73
4.8 Videre arbeid	74
5 Konklusjon	75
6 Kildeliste	76

Figurliste

Figur 1 Resultat for totalt energibruk.....	IV
Figur 2 Resultat for utslipp	IV
Figure 3 Results for energy requirement	VII
Figure 4 Results for emissions	VII
Figur 5 Registrerte personbiler etter drivstofftype i Norge (Miljøstatus, 2021a).....	2
Figur 6 Overordnet systemgrense	17
Figur 7 Energikjede H-1	21
Figur 8 Energikjede H-2	22
Figur 9 Energikjede H-3	23
Figur 10 Energikjede H-4	24
Figur 11 Energikjede B-1.....	25
Figur 12 Energikjede E-1.....	26
Figur 13 Energikjede E-2.....	27
Figur 14 Energikjede E-3.....	28
Figur 15 EU strømmiks i 2019.....	30
Figur 16 Norsk strømmiks i 2019.....	35
Figur 17 Resultatet for totalt energibruk	58
Figur 18 Resultatet for utslipp.....	60
Figur 19 Følsomhetsanalyse H-1	63
Figur 20 Følsomhetsanalyse H-4	64
Figur 21 Følsomhetsanalyse B-1.....	65
Figur 22 Scenarioanalyse for EU strømmiks og fossil strømmiks. Se Tabell 1 for spesifisering av energikjedene.....	67
Figur 23 Scenarioanalyse mer klimavennlig strømproduksjon i EU	68
Figur 24 Scenarioanalyse ulike strømmikser i hydrogenproduksjon H-4.....	69
Figur 25 Scenarioanalyse ulike strømmikser i B-1.....	70

Tabelliste

Tabell 1 Energikjedene	III
Table 2 Energy chains	VI
Tabell 3 Utslippsfaktorer	16
Tabell 4 Oversikt over energikjedene.....	20
Tabell 5 Virkningsgraden til EU strømmiksen.....	31
Tabell 6 Virkningsgraden til den norske strømmiksen	35
Tabell 7 Tap under distribusjon av strøm.....	36
Tabell 8 Effektivitet i elektrolyseprosessen.....	37
Tabell 9 Tap under naturgass transport	38
Tabell 10 Effektivitet i dampreformeringsprosessen	39
Tabell 11 Mengde energi som kreves for å kjøle ned 1 kg hydrogen.....	40
Tabell 12 Energitap under oljeutvinning	41
Tabell 13 Energitap for transport av råolje	41
Tabell 14 Energitap under raffinering	42
Tabell 15 Oversikt over referansebilmodellene	43
Tabell 16 TTW verdier	44
Tabell 17 Energibehovet i personbilproduksjonen	47
Tabell 18 Utslipp fra EU strømmiksen	48
Tabell 19 Utslipp fra vindkraft	49
Tabell 20 Oversikt over bilproduksjonsutslippene	54
Tabell 21 Oppsummering over data	56

Bruk av brenselcelledrevne hydrogenbiler kan bidra til å redusere klimagassutslippene fra personbiltransporten. Dette forutsetter imidlertid at hydrogen produseres på en klimavennlig måte. Så hvordan skal hydrogen produseres for å oppnå utslippsreduksjoner?

1 Introduksjon

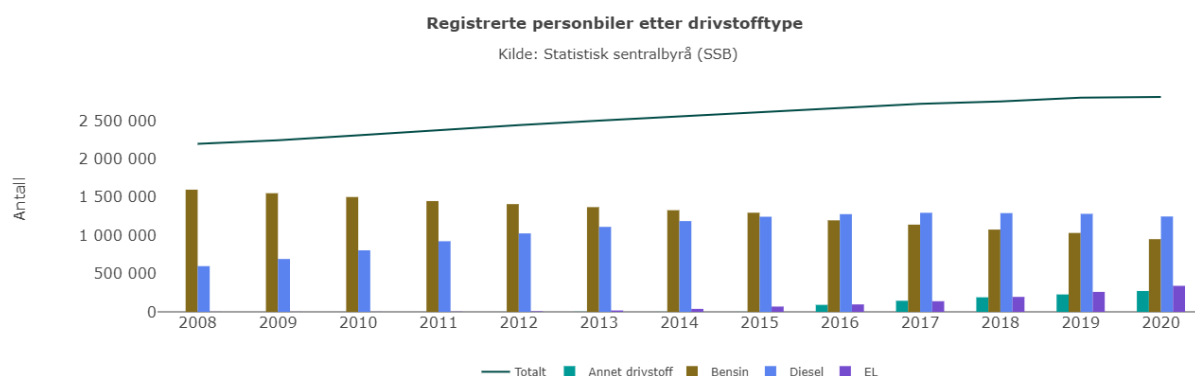
Denne introduksjonen har tre deler. Først redegjør jeg for problemene knyttet til utslippet av klimagasser i dag og transportsektorens rolle i problemet, samt hydrogen som en mulig løsning. Etter dette vil det bli presentert et kunnskapsgrunnlag over relevante studier gjort på dette feltet, som sammen med bakgrunnen for studien, danner bakgrunnen for problemstillingen. Kapitlet avsluttes med en oversikt over oppbyggingen av oppgaven.

1.1 Bakgrunn for studien

Mengden klimagasser i atmosfæren fortsetter å øke og effektene av klimaendringene merkes fortere enn først antatt (Allen et al., 2018). Siden 1880 har den gjennomsnittlige temperaturen på jorden økt med over 1° Celsius, og konsekvensene av dette rammer skjev, der de fattigste rammes hardest av følgene av klimaendringene. I 2015 ble FNs bærekraftsmål vedtatt i FN (Ravndal & Halleraker, 2021). Et av disse målene er mål nummer 13: *Stoppe klimaendringene*. Dette bærekraftsmålet sier at det må handles umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og konsekvensene av klimaendringene. De mest alvorlige konsekvensene av klimaendringene kan unngås om den globale oppvarmingen holder seg til under 1,5° Celsius, men slik situasjonen er i dag er vi ikke i bane for å nå dette målet (FN, 2021b). Følgene av klimaendringene inkluderer undergraving av den globale matsikkerheten, ekstremvær, flom, tørke, økt havnivå, hindring av økonomisk utvikling og undergraving av sosial stabilitet (Miljøstatus, 2021b)

Gjennom Parisavtalen, som har som mål å begrense den globale oppvarmingen (FN, 2020), har Norge forpliktet seg selv til å redusere utslippet av klimagasser med minst 50% og helst 55% i 2030 sammenlignet med nivået i 1990. Målet var egentlig en 40% reduksjon, men ble forsterket i 2020 til minst 50% (Miljøstatus, 2021b). I 2020 ble det sluppet ut 49,3 millioner tonn CO₂ ekvivalenter, herifra kalt CO₂e for resten av oppgaven, i Norge, som er en reduksjon på 4,2% fra utslippsnivået i 1990. Sektorene som har størst utslipp i Norge i dag er olje- og gassutvinning, industri, transport og veitrafikk. Veitrafikken i Norge hadde et samlet utslipp på 8,4 millioner tonn CO₂e i 2020, som utgjør 17% av det totale klimagassutslippet i Norge i 2020 (Miljøstatus, 2021c). Av dette utslippet kom 49% fra personbiler (Miljøstatus, 2021a). Når veitrafikken står for 17% av det årlige utslippet i Norge så må utslippene i denne sektoren reduseres mot 2030 for at Norge skal kunne møte sine forpliktelser i Parisavtalen.

Et tiltak for å redusere utslippene fra denne sektoren er å satse på elbiler. Disse blir ofte trukket frem som er mer klimavennlig alternativ i forhold til kjøretøy som bruker bensin eller diesel. Ved utgangen av 2020 var 54% av alle nye personbiler elbiler, og utgjorde da totalt 12,1% av den norske bilparken. Elbiler har under selve kjøringen ingen direkte klimagassutslipp, i motsetning til konvensjonelle biler. Konvensjonelle biler er dagens bensin og dieslbiler. Siden strømmen i Norge er tilnærmet 100% produsert fra vannkraft, så er utslippet fra strømproduksjonen lavt (Miljøstatus, 2021a). I Figur 5 er de registrerte personbilene etter drivstofftype i Norge presentert. Slik som figuren viser så øker andelen elbiler i Norge.



Figur 5 Registrerte personbiler etter drivstofftype i Norge (Miljøstatus, 2021a).

Det er derimot flere utfordringer knyttet til produksjonen og bruk av elbiler. Elbilene krever strøm for å kunne kjøre, og selve strømproduksjonen vil også medføre utslipp av drivhusgasser. Dette vil derimot variere med energikilden som brukes for strømproduksjonen. En av de største utfordringene for elbilene er knyttet til utvinningen av råstoffene som trengs for å produsere batteriene til elbilene. Et svært viktig råstoff i elbilbatteriene er kobolt, hvorav landet DR Kongo har de største reservene av metallet og står for ca. halvparten de totale reservene i verden (Statista, 2021). I koboltgruvene i DR Kongo har det vært rapportert om elendige arbeidsforhold for gruvearbeiderne. Arbeiderne blir utsatt for flere menneskerettighetsbrudd og ulike helserisiko. Samtidig har det vært rapportert om tilfeller om bruk av barnearbeid i disse gruvene (Amnesty, 2019). Selv om elbiler vil kunne hjelpe med å nå målet FNs bærekraftsmål 13 *Stoppe klimaendringene*, så vil utvinningen av råstoffene kunne ha negative følger for andre bærekraftsmål. Dette gjelder hovedsakelig bærekraftsmål 8 *Anstendig arbeid og økonomisk vekst* og bærekraftsmål 12 *Ansvarlig forbruk og produksjon* (FN, 2021a; FN, 2022a). Når arbeidere utsettes for forferdelige arbeidsforhold samtidig som det har blitt rapportert om barnearbeid vil dette ikke samsvare med verken anstendig arbeid eller ansvarlig produksjon.

Et alternativ til elbiler er å bruke hydrogen som drivstoff. Hydrogen, når det brukes til transport i personbiler, har i seg selv ingen utslipp utenom vann. Derimot oppstår det utslipp under selve

hydrogenproduksjonen. 96% av alt hydrogen blir i dag produsert fra fossile kilder, slik som av naturgass, mens en liten andel på 4% blir produsert gjennom elektrolyse, der fornybare energiresurser kan benyttes (Balat, 2008). Ved bruk av elektrolyse kan en produsere hydrogen med minimale klimagassutslipp. Elektrolyseprosessen bruker store mengder strøm, og hvis denne strømmen kommer fra fornybare energikilder så vil hydrogenet bli produsert med svært lave utslipp. Derimot vil også det omvendte gjelde. Altså vil utslippet fra hydrogenproduksjonen gjennom elektrolyse være svært avhengig av strømmen som blir brukt. I dag foregår elektrolyse i små kvanta og er en svært energikrevende prosess. Hvis for eksempel det norske industribehovet for hydrogen skal bli dekket gjennom elektrolyse ville det kreve 11,25 TWh (NVE, 2019). I Norge produseres det rundt 225 000 tonn hydrogen til industrien fra naturgass hvert år. Hydrogen produsert fra naturgass kalles også for blå hydrogen. (NVE, 2019).

I Norge har det blant annet vært forsknings- og demonstrasjonsprosjekter rundt produksjon av hydrogen ved bruk av vindkraft. Et slikt prosjekt ble startet i Utsira, Rogaland, i 2002. I forskningsprosjektet ble hydrogen produsert gjennom elektrolyse av vann ved bruk av strøm produsert fra vindkraft. Hydrogenet ble brukt til å levere energi til husstander, og hadde som baktenpe at hydrogen kan være en konkurrent til fossile energikilder. Slik at en kan produsere energi fra vindkraft og lagre det som hydrogen til senere bruk, istedenfor å bruke andre lagringsteknologier. Det ble konkludert med at selv om dette rent teknisk er mulig, så har slike system ikke kommet til et punkt hvor de kan konkurrere med andre lignende systemer (Ulleberg et al., 2010). Dette viser til hydrogenproduksjon ved bruk av fornybare energikilder er mulige å gjennomføre, men at det trenges en større satsning på dette området for å gjøre det til en kommersiell teknologi som kan konkurrere med mer etablerte løsninger.

En plass i Norge hvor de vil satse på hydrogenbiler er i Øst-Finnmark. I Berlevåg i Finnmark er det eneste stedet i Norge hvor det produseres grønn hydrogen. Grønn hydrogen er hydrogen produsert gjennom bruk av fornybare energikilder, i dette tilfellet gjennom kraft fra Raggovidda vindkraftverk. Planen til kommunene er å bruke hydrogenet i kommunale tjenestebiler. Begrunnelsen for dette er at hydrogenbiler vil være et bedre alternativ til elbiler i Finnmark, blant annet på grunn av den lengre rekkevidden og det faktumet at hydrogenbiler tåler kulde bedre enn elbiler. Derimot pekes det på at det mangler fyllestasjoner for hydrogen i regionen, men også i Norge generelt. I 2024 er det planlagt at et storskala-anlegg for hydrogenproduksjon vil stå klar i regionen, som da vil kunne levere hydrogen til transportsektoren (Vik, 2022). Hydrogenbiler er delvis holdt tilbake på grunn av manglende infrastruktur for dem i Norge.

En utfordring med lagring av hydrogen er sikkerhet. Hydrogen er et stoff som reagerer lett med andre stoffer og er av den grunn brannfarlig. Når hydrogen blandes med oksygen i luften vil blandingen være eksplosiv ved antenning, derav har denne blandingen kallenavnet knallgass (Kofstad & Pedersen, 2022). I 2019 førte en feilmontering ved en hydrogenstasjon i Sandvika til en kraftig eksplosjon der to personer ble sendt til legevakten (NRK, 2021). For å kunne øke andelen hydrogenbiler i den norske bilparken bør derfor sikkerheten rundt lagring av hydrogen ivaretas for å unngå skader på mennesker og miljø.

Hydrogenbiler er til salgs i Norge i dag, disse inkluderer blant annet Toyota Mirai og Hyundai NEXO, der den sistnevnte vil bli tilgjengelig i løpet av 2022 (Hyundai, U.Å.-b; Toyota, U.Å.). Regjeringen legger til grunn at alle nye personbiler i 2025 skal være utslippsfrie, noe som gir en mulighet før en økt andel hydrogenbiler i den norske bilparken (Regjeringen, 2017). Men for å kunne øke antall hydrogenbiler i den norske bilparken trengs det nødvendig infrastruktur, slik som fyllestasjoner for hydrogen. Forskningsrådet har pekt ut hydrogen som en hydrogenbærer som har betydelig potensial til å kunne redusere utslipp, men da må hydrogenet produseres fra energikilder som har et svært lavt eller ikke et utslipp i det hele tatt. Alternativt er det mulig å produsere hydrogen fra naturgass med karbonfangst for å redusere utslippet (Forskningsrådet, 2020). I 2020 var de totalt 153 registrerte personbiler i Norge som bruker hydrogen som drivstoff. De siste årene har mindre enn 10 nye hydrogenpersonbiler blitt registret (SSB, 2021a). Dette viser ikke bare til at bestanden av hydrogendrevne personbiler i Norge er lav, men veksten i bestanden også er svært lav. Det trengs da effektive tiltak for å øke andelen hydrogenbiler i Norge, som vil kunne bidra med å redusere utslippene fra transportsektoren.

En spansk studie fra 2020 skrevet av Navas-Angueta et al. forsøkte å finne ut hvordan å øke andelen hydrogenbiler i den spanske bilparken, og hvilke produksjonsteknologier som ville være aktuelle å dekke etterspørselen av hydrogen. Studien kommer frem til at det er mulig å redusere utslipp fra transportsektoren ved å øke andelen hydrogenbiler i bilparken, men dette er avhengig av flere viktige moment. Blant annet må fornybarandelen i den spanske strømmiksen øke slik at utslippet fra hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse reduseres, slik at drivstoffet har et lavere miljøavtrykk. Videre så må det introduseres strenge utslippskutt som vil gi befolkningen et større insentiv til å velge hydrogen- og elbiler. Dette kan da gjøres ved å øke avgifter på utslipp. Det blir påpekt i studien at dampreforming, som fortsatt er den mest brukte teknologien for hydrogenproduksjon i dag, kommer til å være den viktigste produksjonsmetoden i nærmeste fremtid, og at omstillingen til en grønnere produksjon vil ta tid (Navas Angueta et al., 2020). Dette viser til at selv om hydrogendrevne personbiler i det lange løp kan være et tiltak som vil redusere utslippene fra transportsektoren i det

lange løp så må flere tiltak introduseres for å gjøre det til en miljøvennlig og realistisk løsning for fremtidens transportsektor.

1.2 Kunnskapsgrunnlag

Kunnskapsgrunnlaget er en litteraturstudie der en oversikt over elleve studier relevante til problemstillingen vil bli presentert og kort oppsummert. Litteraturinnsamlingen i denne oppgaven ble gjennomført ved bruk av søkemotorene Google Scholar, Web of Science og Elsevier.

Litteraturstudien danner et bilde av kunnskapen som allerede er kjent på området rundt hydrogenproduksjon og bilproduksjon, samt gi leseren en smakebit på resten av studien.

Kunnskapsgrunnlaget vil være delt inn i to deler, en for studier innen produksjon av ulike drivstoff for personbiler, og den andre delen for studier innen produksjon av personbiler som bruker ulike drivstoffer. I neste underkapittel er det presentert en oppsummering av kunnskapsgrunnlaget for denne studien.

1.2.1 Drivstoffproduksjon

I studien fra 2004 fra Koroneos et al. var formålet å se på de miljømessige konsekvensene fra hydrogenproduksjon. Denne studien tokk utgangspunkt i seks produksjonsteknologier og delte dem inn i to grupper. Gruppe A er gruppen som benyttet seg av fossile energikilder og inneholder bare dampreforming av naturgass til hydrogen, og gruppe B som benytter seg av fornybare energikilder. For hver teknologi i hver gruppe ble det da utført en livsløpsanalyse for å se nærmere på de miljømessige konsekvensene av de ulike teknologiene. Studien kommer frem til at dampreforming av naturgass til hydrogen er teknologien som fører til størst utslipp av CO₂e, men som også er den mest økonomiske metoden å produsere hydrogen på. Det kommer frem at hydrogenproduksjon fra vindenergi, vannkraft og termisk solenergi er produksjonsmetodene som fører til lavest CO₂e utslipp blant de analyserte metodene. Studien viser til at både produksjonsmetode og energikilde er viktige faktorer som bestemmer hvor store utslippene til hydrogenproduksjonen blir. Hydrogenproduksjon fra solceller er derimot ikke å anbefale ettersom den har en svært lav virkningsgrad (Koroneos et al., 2004).

Lignende livsløpsanalyser ble også utført i en studie fra Granovskii et al. I denne studien blir det tatt for seg tre ulike metoder å produsere hydrogen på for transportsektoren. Hovedfokuset er å se på energimengden som kreves og utslippene i CO₂e for å produsere hydrogen. Den første metoden er gjennom utvinning av råolje og naturgass som blir brukt til produksjon av hydrogen. Videre så blir det sett på bruk av solenergi og vindenergi til å drive en elektrolyseprosess med vann for å fremstille hydrogen. Studien inkluderer utslipp av CO₂e som følge av utslipp fra produksjonen, transporten,

distribusjonen og kompresjonen av hydrogenet frem til endelig bruk. Studien viser at produksjon av hydrogen gjennom bruk av elektrolyse med strøm fra har lavest utslipp og det laveste energiforbruket for å produsere hydrogenet. De høyeste utslippene vil være fra hydrogen som er produsert fra råolje (Granovskii et al., 2006).

I en studie fra Australia ble det sett på påvirkningen hydrogenproduksjon og hydrogenbruk har på miljøet. Dampreforming av naturgass til hydrogen er den mest brukte hydrogenproduksjonsteknologien, men den fører til større utslipp av CO₂e. Til gjengjeld er dette en billig teknologi å bruke. Studien påpeker at når hydrogen blir produsert fra fossile kilder så blir utslippet flyttet fra mobile kilder, slik som personbiler, til et produksjonsanlegg istedenfor. Studien trekker frem produksjon av hydrogen gjennom elektrolyse av vann ved bruk av solenergi og direkte produksjon av hydrogen fra solceller som alternativer til dampreforming av naturgass. Noe som åpner opp for å eksportere solenergi i form av hydrogen. Studien kommer frem til at hydrogen produsert fra solenergi vil ha lavere utslipp i forhold til hydrogen produsert via dampreforming av naturgass. Utfordringen til solbaserte teknologier er derimot at den ikke enda er på et kommersielt nivå, samtidig som virkningsgraden til solbaserte teknologier er lave (Nowotny, 2011).

Wulf og Kaltschmitt (Wulf & Kaltschmitt, 2012) utførte også livssyklusanalyser for seks ulike hydrogenproduksjonsmetoder i sin studie fra 2012. Følgende produksjonsmetoder ble sett på i studien: produsere hydrogen gjennom elektrolyse ved bruk av fornybare energikilder, elektrolyse ved bruk av den tyske strømmiksen fra 2010, dampreforming av metan, hydrogenproduksjon fra glyserol pyroformering, forgassing av kull og forgassing av trevirke. Livssyklusanalysen inkluderer også strømmen som er nødvendig for å operere en påfyllingsstasjon for hydrogen, og energien som trengs for å transportere råstoffene inn i systemet. Forfatterne av studien konkluderer med at produksjon av hydrogen fra elektrolyse av vann med strøm fra fornybare energikilder vil føre til de laveste produksjonsutslippet. Det å produsere hydrogen fra trevirke fører også til lave utslipp. Produksjon av hydrogen fra glyserol har det høyeste CO₂e utslippet, hovedsakelig på grunn av produksjonen av glyserol.

I 2012 ble det utført en studie som gjennomførte flere livsløpsanalyser på ulike produksjonsmetoder for hydrogen av Cetinkaya et al.. Produksjonsmetodene som ble analysert i denne studien var dampreforming av naturgass, forgassing av kull, elektrolyse ved bruk av vind- og solenergi og termokjemisk vannsplittelse med en kobber-klor-syklus. Forfatterne valgte å fokusere på utslippet i CO₂e og den totale energibruken som grunnlaget for å sammenligne den miljømessige profilen til teknologiene. Studien kommer frem til at bruk av den termokjemiske syklusen gir det laveste utslippet i CO₂e, og at bruk av vind- og solenergi også medfører lave utslipp målt i CO₂e. De største

utslippene kommer fra dampreforming av naturgass og pyrolyse av kull. Videre kommer det frem at de fossile alternativene og den termokjemiske metoden har en større produksjonskapasitet enn de fornybare alternativene (Cetinkaya et al., 2012).

Bartolozzi et al. gjennomførte en studie der elektriske biler og hydrogendrevne biler ble sammenlignet ved bruk av livssyklusanalyser. Formålet med studien var å sammenlikne miljøpåvirkningen av elektriske biler og hydrogendrevne biler i Italia. Det ble i tillegg sett på flere ulike metoder å produsere hydrogen på i denne studien, slik at det er mulig å identifisere produksjonsmetoden som gir lavest utslipp. Studien inkluderer også miljøpåvirkninger fra lagringen, transporten og distribusjonen av hydrogenet. Konklusjonen i studien er at hydrogen produsert fra fornybare energikilder har en bedre miljømessig profil enn hydrogen produsert ved bruk av den italienske strømmiksen. Av de fornybare produksjonsmetodene er det vindenergi som har den laveste miljøpåvirkningen. Store deler av utslippet knyttet til hydrogenbruk kommer fra lagringen og distribusjonen av hydrogenet. Elektriske biler kommer svært godt ut av denne studien, men det bør nevnes at det ikke ble inkludert utslipp fra lagringen og distribusjonen av strømmen elbilene bruker. Til slutt så bemerkes det at hydrogenproduksjonen har en lavere energieffektivitet enn strømproduksjonen, noe som sørger for at hydrogenproduksjonen får en verre miljømessig profil (Bartolozzi et al., 2013).

I Bhandari et al. sin studie fra 2014 ble det gjennomført en gjennomgang 21 ulike studier om hydrogenproduksjon og en sammenlignet av dem. De fleste av studiene benyttet elektrolyse av vann til å produsere hydrogen, mens andre studier brukte metoder slik som dampreforming av naturgass. Målet av studien er å se på hvilke potensiale hydrogenproduksjon ved bruk av elektrolyse kan ha i fremtiden. Strømmen som brukes til å drive elektrolyse kan både komme fra fossile og fornybare kilder. Ut ifra sammenlikningen i studien kommer det frem at det globale oppvarmingspotensialet ved bruk av elektrolyse fra fornybare energikilder er lavt. Elektrolyse som benytter strøm fra vind- og vannkraft, kommer ut med en særlig gunstig miljøprofil. Bruk av solenergi og biomasse til å produsere hydrogen har større miljøpåvirkninger enn bruken av vind- og vannkraft. Derimot så vil bruken av biomasse ha lave utslipp av CO₂e, men til gjengjeld vil dette føre til større miljøbelastninger i form av for eksempel eutrofiering. Hovedkonklusjonen er at bruken av fornybare energikilder fører til lavere miljøpåvirkninger enn ved bruk av fossile energikilder, men at fossile energikilder, slik som dampreforming av naturgass, har større produksjonspotensial (Bhandari et al., 2014).

I studien gjennomført av Suleman et al. i 2015 tar forfatterne for seg fire ulike metoder å produsere hydrogen på og deres miljøpåvirkninger. Produksjonsmetodene som forfatterne tar for seg i studien

er dampreforming av metan til hydrogen, elektrolyse av vann til hydrogen ved bruk av ulike celler, strøm fra solenergi til å drive elektrolyse og strøm fra vindenergi til å drive elektrolyse. For å kvantifisere den miljømessige belastningen av produksjonsmetodene ble det utført livssyklusanalyser for hver produksjonsmetode. Studien konkluderer med at hydrogenproduksjon fra dampreforming av naturgass vil føre til de høyeste utslippet målt i CO₂e og at hydrogenproduksjon ved bruk av vindenergi har det laveste utslippet målt i CO₂e. Bruken av naturgass til dampreforming har også den største miljøpåvirkningen i andre påvirkningskategorier, slik som menneskelig toksisitet. Alle teknologiene har en betydelig lavere miljøpåvirkning enn det dampreforming av naturgass har (Suleman et al., 2015).

1.2.2 Bilproduksjon

Wang et al. utførte i 2013 en studie der de sammenlignet konvensjonelle forbrenningsmotorer, elektriske kjøretøy og hydrogendrevne kjøretøy i Kina ved bruk av livsløpsanalyse metodikk. I studien ble det fokusert på utslipp målt i CO₂e og energiforbruk i løpet av livssyklusene. Studien tar for seg livssyklusen til kjøretøyene og livssyklusen til drivstoffene separat. I denne studien ligger den kinesiske strømmiksen til grunn, som har en høy fossil andel. Resultatene fra denne studien viser at utslippene og energibruken varierer svært lite for de ulike typene kjøretøyene. Selve produksjonen av kjøretøyene står for en stor andel av energiforbruket (77%) og utslippet (70%). Drivstoffet som har høyest utslipp og energiforbruk er hydrogen produsert gjennom elektrolyse av vann ved bruk av strøm fra kullkraft. Derimot vil hydrogen produsert gjennom elektrolyse ved bruk av kjernekraft ha det laveste utslippet og energi konsumert. Forfatterne konkluderer at den kinesiske strømmiksen må minst ha en kjernekraft andel på 90% for at bruken av hydrogen- og elbiler skal kunne oppnå betydelige utslippsreduksjoner sammenlignet med konvensjonelle forbrenningsmotorer (Wang et al., 2013).

I 2015 utførte Onat et al. en livssyklusanalyse på flere ulike typer personbiler i USA. Det ble da tatt utgangspunkt i konvensjonelle, ikke ladbare hybrider, ladbare hybrider og elbiler. I studien la forfatterne også frem tre ulike strømmiks scenarier som ble brukt i studien: 1) en strømmiks fra hver stat i 2009, 2) en strømmiks fra hver stat i 2020 og 3) en 100% fornybar strømmiks fra solenergi. Studien kommer frem til at det beste alternativet i scenario 1 og 2 med hensyn på energieffektivitet er den ikke ladbare hybridbilen, ettersom de andre biltyperne hadde en lavere energivirkningsgrad. Forfatterne forklarer dette med at det vil oppstå tap knyttet til strømproduksjonen og distribusjonen. Videre konkluderer også forfatterne med at den ikke ladbare hybridbilen vil gi lavest utslipp av drivhusgasser. Derimot så vil elektriske biler være det beste valget i scenario 3, siden tapene som oppstår i energikjeden vil være lavere. Ladbare hybridbiler vil også få en betydelig reduksjon i utslippet sitt med en fornybar strømmiks. Det blir derimot pekt på at hva som er den beste løsningen

vil kunne variere mellom de ulike statene i USA, ettersom ulike forhold for personbiler ligger til grunn i hver og en av dem (Onat et al., 2015).

En annen studie fra 2022 skrevet av Buberger et al. ser på en liknende problemstilling. I deres studie ble det utført flere livssyklusanalyser på ulike kommersielt tilgjengelige personbiler. Målet i studien er å sammenligne det totale utslippene av klimagasser over de ulike personbilenes levetid. Studien inkluderer både utslipp knyttet til produksjonen, bruksfasen og gjenvinningen av materialene i personbilene. I totalt ble 790 ulike bilmodeller vurdert i studien. Drivstoffene som ble vurdert i denne studien er bensin, diesel, hydrogen, strøm og komprimert naturgass. Studien konkluderer med at elbiler har det laveste utslippet hvis strømmen de benytter blir produsert fra fornybare energikilder, sammenlignet med personbiler som benytter seg av andre drivstoffer. Derimot vil elbiler også ha de største produksjonsutslippene blant alle biltyper, dette er begrunnet med de store utslippet fra produksjonen av bilbatteriene. Hydrogenbiler har større utslipp enn elbiler ettersom en stor majoritet av hydrogenet som blir produsert i dag er fossilt hydrogen. Derimot vil hydrogenbilene komme bedre ut hvis hydrogenet blir produsert ved bruk av fornybare energikilder. I studien kommer det frem at det er et kunnskapshull rundt hydrogenbiler ettersom denne teknologien er forholdsvis ny på markedet. Forfatterne bemerker derfor at det trengs bedre data på produksjonen av hydrogenbiler, og at produksjonen av selve brenselcellen ikke er inkludert i studien grunnet manglende datagrunnlag (Buberger et al., 2022).

1.3 Oppsummering av kunnskapsgrunnlag

Fra kunnskapsgrunnlaget kommer det frem at hydrogenproduksjon fra fornybare kilder er en attraktiv metode for å produsere hydrogen, ettersom det medfører reduserte utslipp.

Hydrogenproduksjon fra vindkraft blir ofte utnevnt som produksjonsmetoden som medfører lavest utslipp målt i CO₂e. Miljøpåvirkningen ved bruk av elektrolyse vil derimot variere. Når fornybar energi, slik som fra vind- og solkraft, brukes til å drive elektrolysen er utslippene lave, hvis den ordinære strømmiksen til et land brukes til å drive elektrolysen vil utslippet være avhengig av strømmiksen til det individuelle landet. Dette kan medføre større utslipp fra elektrolysen enn hvis en utelukkende hadde benyttet fornybare energikilder. Bruk av biomasse til hydrogenproduksjon er også et alternativ, men ettersom biomassetilgangen er begrenset vil det bare kunne dekke en liten del av det fremtidige behovet for hydrogen til transportsektoren.

Bruk av dampreforming av naturgass er den mest utbredte produksjonsmetoden for hydrogen akkurat nå, og har muligheten til å levere store volum med hydrogen. Derimot kommer det frem at produksjon fra fossile kilder, slik som dampreforming av naturgass og forgassing av kull, fører til

betraktelig større utslipp målt i CO₂e enn de andre alternativene som har blitt diskutert i studiene i kunnskapsgrunnlaget. Dampreforming av naturgass vil derimot være den viktigste produksjonsmetoden i det korte løp ettersom det er en velutviklet teknologi som kan produsere store volum hydrogen.

Utslipp ved bruk av elbiler vil være svært avhengige av strømmiksen som brukes til å produsere strøm for elbilen. Elbiler og ladbare hybridbiler kommer svært godt ut sammenlignet med andre biltyper dersom strømmiksen som benyttes er fornybar, slik som Onat et al og Buberger et al. viser til i sine studier. Derimot vil verken elbiler eller hybridbiler være et mer miljøvennlig valg når strømmiksen som benyttes i stor grad er basert på fossile energikilder, slik som tilfellet er i Kina. Ved bruk av hydrogenbil vil utslippet være avhengig av energikilden som benyttes til å produsere hydrogen, der fornybare energikilder resulterer i et lavere utslipp for hydrogenbilen. Elbiler vil ha det største produksjonsutslippet grunnet de betydelige utslippene som blir til ved batteriproduksjonen. Det er mangelfull data for hydrogenbilproduksjonen ettersom teknologien er forholdsvis ny.

Det bør bemerkes at studiene som er presentert i kunnskapsgrunnlaget tar utgangspunkt i Nord-Amerika, Europa, Australia og Kina. Dette vil stå i motsetning til Norge som har en høy fornybar andel i strømmiksen. Selv om deler av resultatene og funnene i studiene er overførbare til norsk sammenheng, vil nødvendigvis ikke hele studien være det. Strømmiksen i de ulike landene det er tatt utgangspunkt i for de ulike regionene vil også kunne endre seg med tiden, slik at utslippstallene som er presentert i litteraturstudien ikke nødvendigvis forteller hva utslippet hadde vært i dag. I hvilken grad hydrogendrevne biler vil bli tatt i bruk i fremtiden er også usikkert, og i land med en høy fornybar andel i strømmiksen kommer elbiler også ut som et godt alternativ til hydrogenbiler.

Denne oppgaven er i større grad tilpasset norske forhold, noe de andre studiene ikke er ettersom de ikke tar utgangspunkt i Norge. Slik at det er et visst kunnskapshull for norske forhold.

1.4 Problemstilling

Problemstillingen i denne oppgaven dekker flere problemstillinger og aspekter rundt strøm og hydrogen produksjon. I denne studien tar jeg for meg klimagassutslipp og energibruk fra hydrogenbiler, elbiler og ladbare hybridbiler. Problemstillingene som skal undersøkes i denne oppgaven er:

Kan hydrogen som drivstoff til personbiler bidra til å redusere utslipp av klimagasser fra persontransport? Hvilken måte å produsere hydrogen på vil føre til de laveste utslippene og hvordan kommer hydrogen ut sammenliknet med elbiler og hybridbil?

For å besvare problemstillingene sammenlikner jeg det totale energibruken og utslipp fra hydrogenbiler, elbiler og hybridbil. Metoden for å beregne det totale energibruk og de totale utslippene er tredjeordens energikjedeanalyse, også kalt third-order energy chain analysis av Blok og Nieuwlaar (Blok & Nieuwlaar, 2021). Totalen består av to hovedledd:

- 1) Energi og utslipp i drivstoffets energikjede, også kalt for Well to Wheel, WTW.
- 2) Energi og utslipp for å produsere bil, fremdriftssystem og batterier.

Som nevnt er det ulike måter å produsere hydrogen og strøm på. Jeg har derfor definert 8 energikjeder og det er disse kjedene som sammenliknes i denne oppgaven. De 8 energikjedene er beskrevet i Tabell 4. Metode, energikjeder og data er nærmere beskrevet i de påfølgende kapitler.

1.5 Oppgavens oppbygging

Oppgaven består av fem deler. Etter denne introduksjonen presenterer jeg studiens metode i kapittel 2. Her vil selve metoden og fremgangsmåten i oppgaven bli forklart og utdypet. Kapittel 3 er datakapittelet. Der vil all dataen som er benyttet i oppgaven bli beskrevet og aktuelle utregninger vil bli gjennomført. Kapittel 3 er på mange måter selve hoveddelen av oppgaven, ettersom den vil inneholde datagrunnlaget som resultatene baserer seg på. I Kapittel 4 vil resultatene fra oppgaven bli presentert og sammenlignet med resultater fra lignende studier. Videre vil det bli utført følsomhetsanalyser for å få innsikt i den betydningen dataen og antakelsene vil ha for resultatet i oppgaven. Etterpå vil det bli utført flere scenarioanalyser for å estimere hva resultatet hadde blitt ved ulike forutsetninger. Ulike utfordringer knyttet til oppgaven blir tatt opp, anbefalinger til videre arbeid og betydning av resultatene. I Kapittel 5 er konklusjonen presentert.

2 Metode

I dette kapitlet vil jeg gå gjennom de ulike metodene som er benyttet for å svare på problemstillingen i oppgaven. Utgangspunktet for denne oppgaven er energikjedeanalyser der jeg tar for meg livsløpet til de ulike drivstoffene, samt deler av livsløpet til personbilene. Kapitlet tar for seg hva en energikjedeanalyse er, metodikken som er brukt i energikjedeanalysen, systemgrensene, en detaljert beskrivelse av de ulike energikjedene som vil bli analysert, og metodene bak følsomhetsanalyser og scenarioanalyser. Kapitlet vil i seg selv ikke inneholde noen beregninger, og kan derimot betraktes som "oppskriften" som er brukt til å gjennomføre oppgaven.

2.1 Energikjedeanalyse

Utgangspunktet for denne oppgaven er livsløpsanalyse. En livssyklusanalyse er en metode som brukes for å analysere de miljømessige konsekvensene et produkt eller tjeneste har i løpet av sin levetid. Dette kvantifiserer de ulike miljøpåvirkningene som da gir et grunnlag til å ta miljøorienterte valg. En sentral del i denne metodikken er at den inkluderer alle mulige miljømessige konsekvenser et produkt kan ha. Metoden er standardisert internasjonalt gjennom ISO, *International Organization for Standardization*, og er en metode som blir stadig oftere brukt over hele verden (Hauschild et al., 2018). Forkortelsen som brukes for livssyklusanalyse er LCA, og er kalt life cycle assessment på engelsk.

I denne oppgaven benyttes energikjedeanalyser. En energikjedeanalyse er i all hovedsak en livssyklusanalyse. Den største forskjellen er at livssyklusanalyser tar for seg flere miljøpåvirkninger samtidig, mens en i en energikjedeanalyse tar for seg mengden primærenergi som kreves for å utføre en funksjon. (Blok & Nieuwlaar, 2021). Videre blir mengden primærenergi som hver energikjede bruker bli benyttet til å beregne utslippet fra hver kjede i CO₂e.

Det *første* som jeg tar for i meg er selve drivstoffenes livsløp, dette vil da si bensinen, hydrogenet og strømmen som benyttes i personbilene. Denne livssyklusanalysen inkluderer da alle ledd fra produksjonen av råstoffene som kreves for å produsere drivstoffet helt frem til drivstoffet blir brukt under transporten til personbilene. Den *andre* delen vil være selve personbilens livsløp. Denne delen inkluderer produksjonen og bruksfasen til personbilene. Dette vil bli brukt som grunnlag til å sammenligne de ulike personbilene, som benytter seg av ulike drivstoff som er produsert på ulik vis.

2.2 WTW, Well-to-Wheels analyse

For å utføre energikjedeanalysen benytter jeg en WTW-analyse, som står for Well-to-Wheel analyse, som er et ofte brukt begrep når en utfører en energikjedeanalyse innenfor transportsektoren. Målet er å beregne den totale primærenergimengden som kreves for å levere en bestemt mengde energi i slutten av energikjeden som går til å utføre funksjonen til energikjeden. Dette er da primærenergimengden som kreves for å produsere drivstoff. På engelsk kalles dette for *energy requirement for energy*, forkortet til ERE (Blok & Nieuwlaar, 2021). ERE kan oversettes til energibehov for energibruk, altså mengden primærenergi som kreves for å kunne levere energi.

For å kunne utføre en slik analyse må en koble sammen alle delprosessene i produksjonen for drivstoffet personbilen benytter, dette vil da være hver eneste prosess fra utvinningen av primærenergikilden frem til forbruk av drivstoffet i bilen. Det er dette som er selve energikjeden, altså kjeden energien beveger seg i innenfor de oppsatte systemene og systemgrensene. Denne typen analyse er svært datakrevende. I denne studien er all data som er brukt sekundærdata. Fordelen med dette er at en sparer mye tid på å ikke måtte utføre primære målinger av delprosessene selv, derimot så er ulempen av denne tilnærmingen at ulike kilder kan legge ulike forutsetninger til grunn for dataen de kommer frem til og presenterer. Slik at en ikke har en like stor grad av "kontroll" over analysene som ble utført og resultatene fra dem (Holden, 2003).

WTW-analyser kan deles opp i to hoveddeler. Den første vil være WTT-analyse. WTT står for Well-to-Tank, som vil være selve analysen av drivstoffet fra utvinningen frem til drivstoffet er klar til å benyttes i personbilen. Den andre hoveddelen er TTW-analyse, som står for Tank-to-Wheel. Dette er den siste delen av energikjeden der selve drivstoffet blir brukt under kjøringen av personbilen.

2.2.1 WTT, Well-to-Tank analyse

For en WTT-analyse er det vanlig å bruke en delprosesstilnærming. Dette vil bety at en deler opp analysen inn i ulike delprosesser før drivstoffet brukes i personbilen (Holden, 2003). I denne studien har vi delt opp WWT prosessene opp i opptil 9 delprosesser avhengig av den enkelte energikjeden:

1. Utvinning av energikilden
2. Transport av energikilden til der produksjonen av drivstoffet foregår
3. Lagring av energikilden
4. Strømproduksjon ved bruk av ulike strømmikser
5. Distribusjon av strøm fra produksjonssted til forbruker
6. Elektrolyse, prosessen som benyttes for å produsere hydrogen
7. Kjøling av hydrogen

8. Dampreforming eller raffinering av naturgass og olje for å produsere henholdsvis hydrogen og bensin
9. Transport av fossilt drivstoff, som i dette tilfellet er bensin og hydrogen produsert fra dampreformeringsprosessen.

2.2.2 TTW, Tank-to-Wheels analyse

Den andre delen av en WTW-analysen, TTW, er når selve drivstoffet i tanken eller batteriet i personbilen blir brukt til å kjøre personbilen. Altså så bruker personbilen den kjemiske eller elektriske energien i drivstoffet til å utføre arbeid (Holden, 2003). Dette kan for eksempel gjøres gjennom bruk av brenselceller for hydrogen eller gjennom en forbrenningsmotor for bensin. Det som er til felles for disse er at energien i drivstoffet brukes til å oppfylle funksjonen til personbilen, som vil være transport.

2.3 Beregningsmetode

I oppgaven skal jeg beregne den totale energibruket og utslippet målt i CO₂e for hver energikjede. I dette delkapittelet skal jeg gå nærmere inn på hvordan jeg beregner det totale energibruket og utslippet målt i CO₂e. Energibruken og utslippet blir beregnet per kilometer kjørt med personbilen gjennom personbilens levetid. SSB opplyser at den gjennomsnittlige kjørelengden per personbil i 2020 er på 11 152 km per år (SSB, 2021c). Videre antas det en levetid på personbilene på 19,2 år (SSB, 2012). Dette gir en total avstand på 214 118,4 km kjørt over levetiden til personbilen.

For å beregne det totale energiforbruket i en energikjede har vi satt opp følgende formel:

$$E_{TOT,j} = (ERE_j * TTW_j) + (E_{PROD,j}) + (A_j)$$

Der,

j = energikjede j (j = 1 – 8)

$E_{TOT,j}$ = det totale energiforbruket i energikjede j [MJ primærenergi/km]

ERE_j = er ERE tallet for energikjede j, altså mengden primær energi som skal til for å levere en bestemt energimengde. [MJ primærenergi/MJ levert energi]

TTW_j = TTW, energiforbruket av den aktuelle personbilen i energikjede j [MJ/km]

Da vil $WTW_j = ERE_j * TTW_j$

$E_{PROD,j}$ = det totale energiforbruket for bil-, fremdriftssystem- og batteriproduksjon for energikjede j [MJ/km]

A_j = energiforbruket av andre prosesser som krever energi i energikjede j delt på antall kilometer kjørt gjennom levetiden til bilen, altså en annen energi enn det som er utgangspunkt for hver energikjede [MJ/km]

I disse beregningen er alle tap i energikjeden inkludert i beregningen. Slik at hvis det oppstår tap av energi under livsløpet til drivstoffet så vil tapet bli medregnet. Dette fører til at den totale mengden energi en putter inn i systemet vil være større enn det som brukes til å utføre funksjonen til systemet. Resten av energien vil gå tapt i energikjeden.

Følgende formel blir benyttet for å beregne ERE_j :

$$ERE_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \eta_{i,j}}$$

Der,

i = delprosess nummer i ($i = 1$ til $3 - 6$ avhengig av energikjeden)

$\eta_{i,j}$ = virkningsgraden for delprosess nummer i for energikjede j [%]

Se Tabell 21 for virkningsgradene.

Den andre delen av denne studien ser på det totale utslippet i CO_2e fra energikjedene. Dette gjøres ved å bruke energimengden som brukes i delprosessene ganget med en utslippsfaktor for CO_2e . De andre leddene i beregningen er for utslippet for bil- og batteriproduksjon og for utslipp fra andre energistrømmer inn i energikjedene. Dette resulterer da i følgende formel:

$$CO2_{TOTj} = (E_{WTWj} * U_j) + (CO2_{PRODj}) + (CO2_{Aj})$$

Der,

$CO2_{TOTj}$ = de totale utslippene i CO_2e for energikjede j [g/km]

E_{WTWj} = det totale energiforbruket av WTW prosessene for energikjede nummer j [MJprimær/km]

U_j = utslippsfaktoren i CO_2e for energikjede j [g/MJ]

$CO2_{PRODj}$ = utslippet i CO_2e av bil-, fremdriftssystem- og batteriproduksjon for energikjede j delt på total kjørelengde over levetiden til bilen [g/km]

$CO2_{Aj}$ = utslippet fra andre energistrømmer inn i energikjede j [g/km]

Utslippsfaktorene brukt i oppgaven er vist i Tabell 3. Disse utslippsfaktorene vil bli nærmere gjennomgått i Kapittel 3.

Tabell 3 Utslippsfaktorer

Kilde	Utslippsfaktor verdi	Enhet
EU strømmiks	76,2	g CO ₂ e/MJ
Fossil strømmiks	101	g CO ₂ e/MJ
Fornybar strømmiks	2,38	g CO ₂ e/MJ
Norsk strømmiks	4,72	g CO ₂ e/MJ
Naturgass	56	g CO ₂ /MJ
Råolje	73	g CO ₂ /MJ

2.4 Systemgrenser: definering av energikjedene

For å kunne utføre energikjedeanalysen må systemgrensene defineres. Systemgrensen dikterer hvilke prosesser som skal inkluderes og ekskluderes fra analysen. Dette gjøres for at analysen ikke skal bli for omfattende og at en ikke begynner å inkludere små prosesser som er nærmest ubetydelige eller helt ubetydelige for sluttresultatet. En overordnet systemgrense for alle energikjedene er illustrert i Figur 6. Merk at dette er en overordnet systemgrense, og antall og type delprosesser innenfor den enkelte energikjede er ulike.

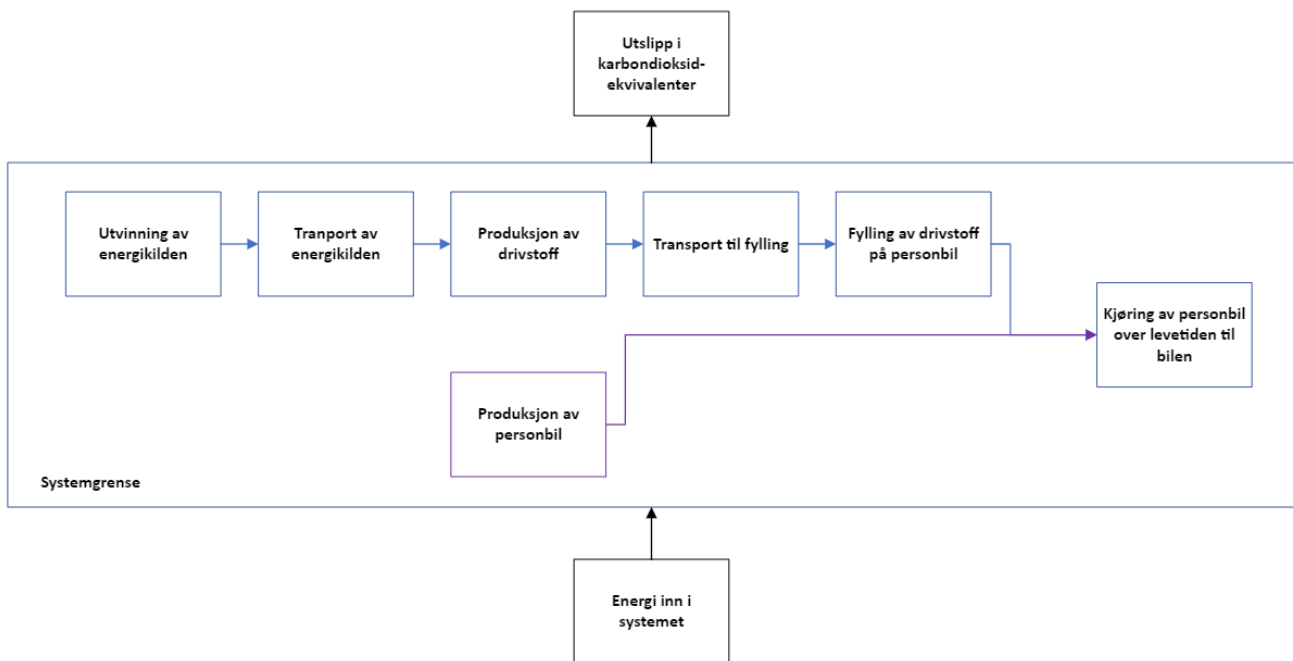
Systemene som jeg analyserer i denne studien inkluderer alle delprosesser som må til for å produsere drivstoffet frem til det blir brukt opp i personbilene, altså Well-to-Wheel. Videre inkluderer systemet prosessene som kreves for å produsere de ulike personbiltyperne. De eneste strømmene som krysser systemgrensene, er energi inn i systemet for å kunne drive de individuelle delprosessene i systemet og utslippene ut som blir til gjennom livsløpet til drivstoffene og personbilene.

Noen prosesser er ikke inkludert innenfor systemgrensene. Dette er prosesser knyttet til vedlikehold og bygging av infrastruktur slik som strømnettet, strømkabler, veier og produksjonsanlegg. Begrunnelsen for dette er at disse tingene blir brukt av flere aktører slik at det da må utføres en allokering for bygge- og vedlikeholdsprosessene og at disse prosessene vil bidra svært lite til det totale utslippet per personbilkilometer over personbilenes levetid. Det antas da at utslippene fra disse prosessene er neglisjerbare i energikjedene i denne studien.

Vedlikeholdsprosesser og erstatning av ulike deler av personbilene vil ikke bli inkludert i denne studien. Begrunnelsen for dette er at utslippene til produksjon av reservedeler og vedlikeholdsprosesser er lave, slik at over levetiden til personbilen vil disse utslippene bli ubetydelige (Buberger et al., 2022).

End-of-life, eller slutten av livet prosesser på norsk, for personbilene er heller ikke inkludert innenfor systemgrensene. Begrunnelsen for dette er at det er et stort kunnskapshull for utslipp og energimengder som kreves for å gjennomføre slike prosesser slik som gjenvinning og avfallsbehandling av hydrogenbiler.

Hvilke delprosesser som er inkludert i de ulike energikjedene i oppgaven vil variere, der noen energikjeder vil inneholde få delprosesser og andre energikjeder flere. Den illustrerte systemgrensen i Figur 6 er derfor ment til å være en overordnet og forenklet systemgrense og delprosessene innenfor systemgrensen vil variere med de ulike energikjedene.



Figur 6 Overordnet systemgrense

2.5 Allokering

I denne studien er det ikke utført allokering av energistrømmene. Begrunnelsen for dette er at flere av datakildene har utført egne allokeringer i sine studier, samtidig som delprosessene i energikjedene som er satt opp i denne studien ikke antas å gå til andre formål enn å produsere drivstoff til personbilene i den aktuelle energikjeden. Det bør påpekes at jeg er fullt klar over at allokering ofte brukes i slike studier og at bruk av allokering og ulike allokeringer metoder medfører egne utfordringer, selv om disse ikke er aktuelle i denne studien.

2.6 Datagrunnlag

Denne studien baserer seg utelukkende på sekundærdata og ingen primære målinger har blitt gjennomført. Dataene som har blitt samlet og brukt i denne studien kommer hovedsakelig fra

vitenskapelige forskningsartikler, relevante fagbøker, databaser slik som SSB og data fra bilprodusentene selv. Siden dette er sekundære data så må dataen vurderes før den brukes i denne studien, slik at formålet er at det helst skal foreligge mer enn en datakilde for tall og data som blir bruk i studien. Dette er begrunnet med at ulike kilder kan gi svært ulike data på ulike prosesser. Dersom en kilde er betraktet som svært pålitelig eller der det finnes få andre kilder vil en kilde være tilfredsstillende.

Litteratur- og datainnsamlingen i denne oppgaven ble gjennomført ved bruk av søkemotorer som Google Scholar, Web of Science og Elsevier. Videre er data og informasjon hentet fra nettsider, dokumenter og nettsider fra offentlige institusjoner slik som Miljødirektoratet og Statistisk Sentralbyrå, SSB. Data og informasjon om personbilene analysert i denne oppgaven er hentet fra bilprodusentens nettsider og ble eventuelt supplementært med artikler fra magasin slik som Teknisk Ukeblad. Andre viktige kilder i denne studien er fra elektroniske bøker, fysiske bøker og tall fra IEA, det Internasjonale energi byrået.

2.7 Forutsetninger

Målet i denne studien er å benytte utslippsdata som viser utslipp for de ulike delprosessene i energikjedene i CO₂e. Det har derimot vist seg å være vanskelig å finne utslippstall oppgitt i CO₂e for hver delprosess ettersom noen forfattere bare oppgir utslipp i CO₂, slik at enkelte utslippsfaktorer i datagrunnlaget kun er oppgitt i CO₂. Der utslipp er oppgitt i CO₂ istedenfor CO₂e vil dette bli nevnt. Det antas at dette ikke vil ha nevneverdig betydning for resultatene i denne oppgaven, og da at eventuelle forskjeller er neglisjerbare. Grunnet tidsmengden tilgjengelig for å skrive oppgaven vil det ikke være mulig å finne flere utslippsfaktorer som er oppgitt i CO₂e.

I denne oppgaven så bruker jeg *beste-tilgjengelige-teknologi* prinsippet for virkningsgradene på de ulike teknologiene i delprosessene. Prinsippet kalles for best available technology på engelsk, forkortet til BAT i denne oppgaven. Forutsetningen sier at hver delprosessen benytter seg av den beste tilgjengelige teknologien (OECD, 2005). Dette vil da for eksempel si at hvis de innsamlede dataene oppgir to virkningsgrader, en på 40% og en annen på 30%, da vil 40% bli brukt som en virkningsgrad. Begrunnelsen for dette er at teknologiutvikling forbedrer teknologier med tiden, slik at det kan forventes at virkningsgradene til ulike delprosesser vil kunne øke. Dette prinsippet er hovedsakelig brukt for å gjøre det lettere å bestemme hvilke data som brukes i energikjedeanalysen. Alternativt kan en beregne en gjennomsnittlig virkningsgrad fra flere kilder, men dette vil nødvendigvis ikke bli korrekt. Dette gjøres ettersom dataen som har blitt samlet inn kan inneholde store spriker i verdiene som blir oppgitt. I virkeligheten vil virkningsgrader kunne variere og det er

viktig å være klar over dette. Tallene som ble brukt i studien er ikke en fasit, men er ment til å gi innsikt i problemstillingen.

Merk at BAT prinsippet kun gjelder for teknologien som er brukt i de ulike delprosessene. BAT prinsippet blir ikke benyttet for utslippstall og utslippsfaktorer. Gjennomsnittet til de oppgitte utslippstallene og utslippsfaktorene vil bli benyttet til å beregne utslipp i denne oppgaven, hvis ikke annet er oppgitt.

2.8 Energikjedene

I dette delkapittelet blir de utvalgte energikjedene for studien presentert i detalj. Jeg valgte å begrense antallet til 8 ulike energikjeder. Det er mulig å øke antallet energikjeder, men dette ble ikke sett på som nødvendig for oppgaven. Dessuten er det en tidsbegrensning for denne oppgaven, slik at det er for tidskrevende å inkludere flere energikjeder. Dette er begrunnet med at ikke alle energikjeder er like aktuelle for den fremtidige bilparken og transportsektoren i Norge, eller at de ikke er veldig aktuelle i norsk sammenheng, for eksempel bilmodeller som bruker komprimert naturgass som drivstoff. En oversikt over energikjedene som blir analysert i denne studien er gitt i Tabell 4

Ut ifra kunnskapsgrunnlaget kommer det frem at det finnes flere måter å produsere hydrogen på, derfor er det inkludert 4 ulike hydrogenenergikjeder for å vise spennet av energibruk og utslipp fra hydrogen. Elektrolyse av vann med strøm produsert fra fornybare energikilder blir trukket frem som et alternativ med lave utslipp, slik at det vil være interessant å se hvordan ulike strømmikser påvirker utslipp fra elektrolyseprosessen. For de fire ulike strømmiksene som jeg valgte har jeg en helt fossil strømmiks basert på kullkraft, en helt fornybar strømmiks basert på vindkraft som er en fornybar energikilde, og strømmikser som benytter seg av både fossile og fornybare energikilder som i dette tilfellet vil være strømmiksen benyttet i EU og den norske strømmiksen. Dampreforming av naturgass er den mest brukte metoden for å produsere hydrogen på globalt, noe som gjør denne energikjeden er hensiktsmessig å sammenlikne med andre energikjeder.

I 2020 var det over 145 000 personbiler i Norge som var ladbare hybridbiler (SSB, 2021b). Dette utgjør ca. 5% av den norske bilparken. En av en energikjedene som blir analysert i denne studien vil være en ladbar hybrid energikjede. Ladbare hybridbiler benytter seg av både strøm og fossile drivstoff og utgjør en stadig større del av den norske bilparken. Dette gjør denne energikjeden interessant å sammenligne med de andre energikjedene. Den ladbare hybridbilen i denne studien benytter bensin og strøm som drivstoff.

De tre siste energikjedene jeg valgte å inkludere i denne oppgaven er for elbiler. Elbiler blir ofte løftet frem som et miljøvennlig alternativ til konvensjonelle fossile personbiler. Antall nye elbiler i Norge

øker for hvert år og vil derfor også bli viktigere i den fremtidige norske bilparken (Miljøstatus, 2021a). I Norge er over 90% av den leverte strømmen produsert fra fornybare energikilder som vil ha et lavt produksjonsutslipp sammenlignet med EU sin strømproduksjon (NVE, 2020a). Dette gjør det interessant å se hvordan utslippene til strømproduksjonen, og da også utslippene fra elbilen, endrer seg når jeg tar utgangspunkt i ulike strømmikser.

Det ble besluttet å ikke inkludere energikjeder som utelukkende benytter seg av fossile drivstoffer i denne oppgaven. Begrunnelsen for dette er at andelen fossile personbiler har minket de siste årene, og at det fra 2025 ikke lenger skal være mulig å kjøpe nye bilmodeller som utelukkende benytter fossile drivstoff i Norge. Disse bilmodellene og deres tilsvarende energikjeder vil derfor ha en avtagende betydning for den norske bilparken i fremtiden.

Tabell 4 Oversikt over energikjedene

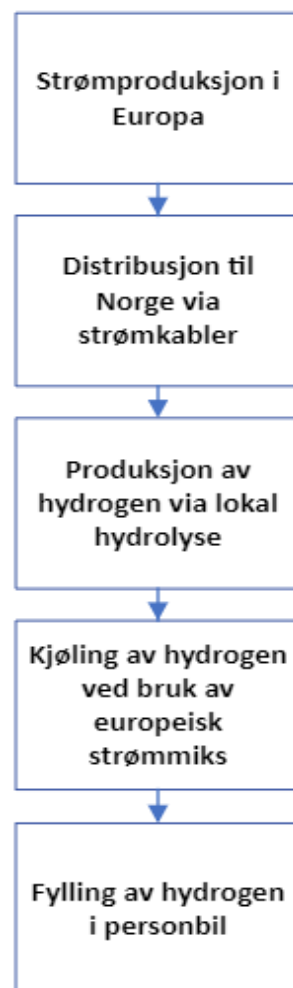
Navn	Energikilde	Produksjonsmetode	Drivstoff	Kjøretøy	Nummer
H-1	EU strømmiks	Elektrolyse	Hydrogen	Brenselcelle	1
H-2	Kullkraft strømmiks			Brenselcelle	2
H-3	Vindkraft strømmiks			Brenselcelle	3
H-4	Naturgass	Dampreforming		Brenselcelle	4
B-1	Råolje	Raffinering	Bensin	Ladbar hybrid	5
	Norsk strømmiks	Strømproduksjon	Strøm		
E-1	EU strømmiks	Strømproduksjon	Strøm	Elbil	6
E-2	Kullkraft strømmiks			Elbil	7
E-2	Vindkraft strømmiks			Elbil	8

2.8.1 Energikjede H-1

Energikjede H-1 er basert på at strøm produsert i EU blir distribuert til Norge via strømkabler og blir brukt til å drive lokal elektrolyse for å produsere hydrogen. Med lokal elektrolyse menes det at elektrolysen finner sted på samme plass som fyllingsstasjonen for hydrogen. Dette betyr at det ikke er noe transport av hydrogenet mellom produksjonsdelprosessen og fyllingsprosessen. Etter den lokale elektrolysen vil hydrogenet bli avkjølt før den fylles opp i personbilen.

EU strømmiksen består av flere energikilder slik som kjernekraft, kullkraft vindkraft, solkraft, vannkraft og gasskraft, bare for å nevne noen (IEA, 2022a). Selv om hver av disse energikildene representerer en energikjede i seg selv så vil jeg i denne oppgaven representere dette som en enkelt energikjede, der virkningsgradene og energiproduksjonen for hver enkelt av energikildene blir tatt for gitt. Dette gjøres for å begrense omfanget av oppgaven, hvis ikke vil energikjeden kunne bli svært kompliserte.

Figur 7 illustrerer energikjeden H-1.

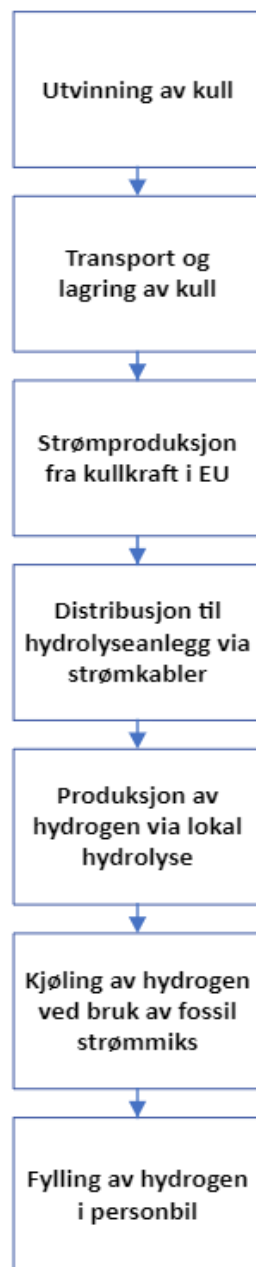


Figur 7 Energikjede H-1

2.8.2 Energikjede H-2

Energikjede H-2 tar utgangspunkt i en fullstendig fossilbasert strømproduksjon for å drive frem hydrolyseprosessen. Det antas at denne strømmen blir produsert i EU. Kull står fortsatt for en betydelig andel av strømproduksjonen i EU (IEA, 2020a), og vil dermed være aktuelt å se nærmere på. I denne energikjeden så vil kullkraft bli brukt til å produsere strøm som blir distribuert gjennom strømkabler til et anlegg som utfører lokal elektrolyse for å produsere hydrogen. Etter dette vil hydrogenet bli kjølt før den fylles på hydrogenpersonbilen.

Figur 8 illustrerer energikjeden H-2

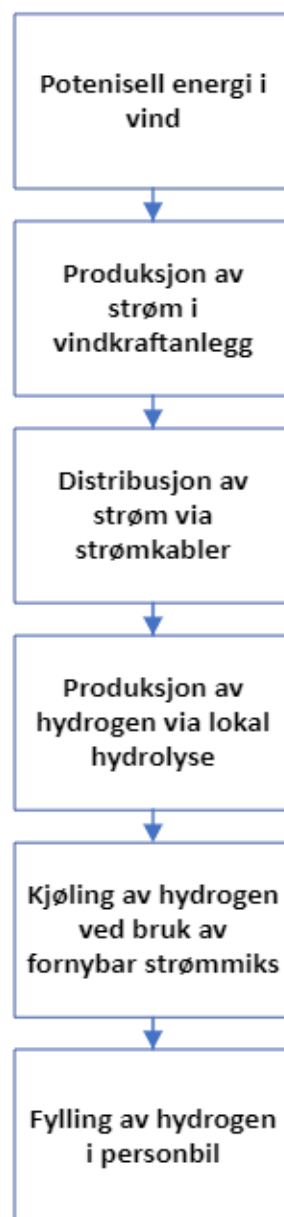


Figur 8 Energikjede H-2

2.8.3 Energikjede H-3

I energikjede H-3 har det blitt tatt utgangspunkt i en fullstendig fornybar strømproduksjon. For dette valgte jeg å bruke vindkraft som energikilden. Vindkraft står for en mindre del av strømproduksjonen i Norge (NVE, 2020a), men andelen vindkraft har økt betraktelig i Norge de siste ti årene. Strømmen vil bli produsert i et vindkraftanlegg i Norge før strømmen distribueres gjennom strømkabler frem til det lokale hydrolyseanlegget. Etter dette blir hydrogenet avkjølt før den fylles på personbilen. Det er den potensielle energien i vinden som blir utnyttet for å produsere strøm.

Figur 9 illustrerer energikjede H-3

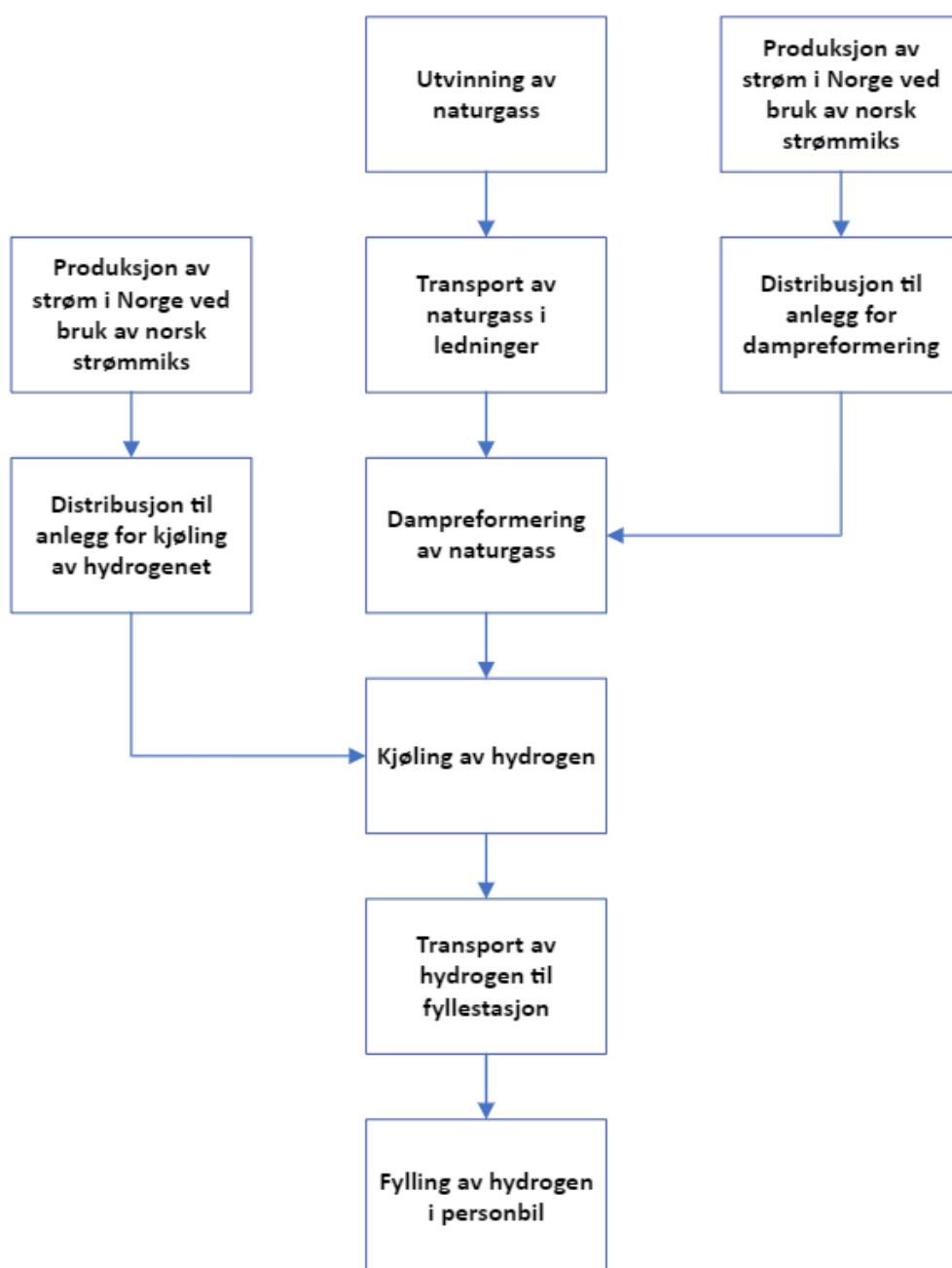


Figur 9 Energikjede H-3

2.8.4 Energikjede H-4

Energikjede H-4 er den neste energikjeden som ikke benytter seg av lokal elektrolyse for å produsere hydrogen. Istedenfor vil det bli brukt dampreforming av naturgass for å fremstille hydrogen til transport. Gassen blir utvunnet i Nordsjøen og blir transportert til produksjonsanlegget via rørledninger. Ved anlegget vil det bli utført dampreforming av naturgassen for å produsere hydrogen, samt en nedkjøling av hydrogenet. For å gjennomføre disse delprosessene benyttes strøm fra den norske strømmiksen. Til slutt vil hydrogenet bli transportert til en fyllestasjon og til slutt opp i tanken til hydrogenbilen.

Figur 10 illustrerer energikjede H-4

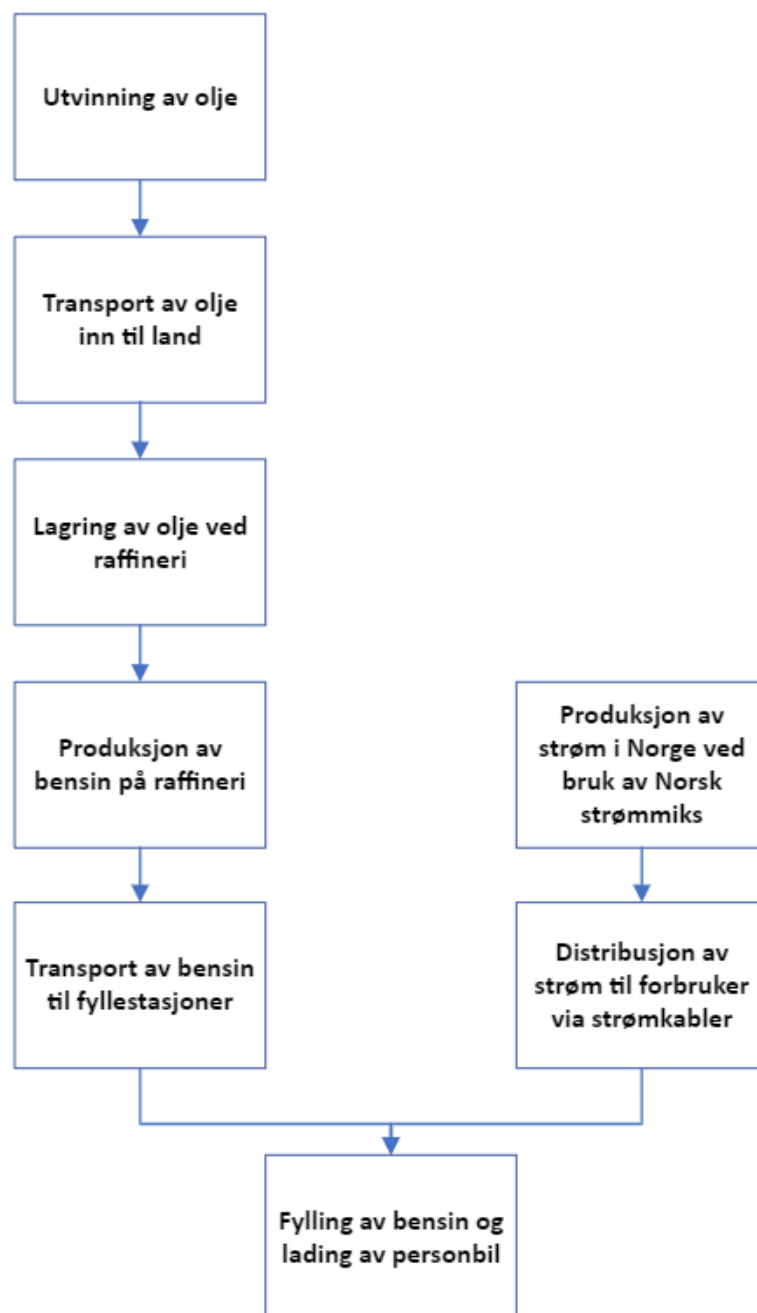


Figur 10 Energikjede H-4

2.8.5 Energikjede B-1

Energikjede B-1 er den eneste hybride energikjeden. Energikilden til bensinen som brukes i personbilen er råolje. Det antas at denne oljen utvinnes i Nordsjøen og blir transportert til land til et raffineri. Ved raffineriet så vil råoljen først bli lagret før den blir brukt til å produsere bensin. Bensinen vil etter dette bli distribuert med tankbil til fyllestasjonene for bensin. Strømmen som brukes av hybridbilen blir produsert i Norge med utgangspunkt i den norske strømmiksen. Strømmen blir da distribuert til sluttforbruker via strømnettet.

Figur 11 illustrerer energikjede B-1



Figur 11 Energikjede B-1

2.8.6 Energikjede E-1

I denne energikjeden tar jeg utgangspunkt i at strømmen som brukes til å lade og kjøre elbiler kommer fra EU. Slik som tidligere nevnt vil EU sin strømmiks bestå av både fornybare energikilder og fossile energikilder. Selv om hver av disse energikildene representerer en energikjede så vil jeg i denne oppgaven representere dette som en energikjede, der virkningsgradene og energiproduksjonen for hver enkelt av energikildene har blitt regnet ut. Strømmen vil bli produsert i EU og distribueres til Norge gjennom strømkabler direkte videre til sluttforbruker eller ladestasjon.

Figur 12 illustrerer energikjede E-1



Figur 12 Energikjede E-1

2.8.7 Energikjede E-2

Energikjede E-2 bruker en strømmiks basert utelukkende på fossile energikjeder, med utgangspunkt i kullkraft. Kullet blir først utvunnet i EU og da videre transportert til et kullkraftverk innad i EU. Ved kraftverket vil kullet også bli lagret før det brukes til strømproduksjon. Strømmen produsert fra kullkraft vil bli distribuert gjennom strømkabler til Norge og leveres direkte til sluttforbruker eller ladestasjon.

Figur 13 illustrerer energikjede E-2

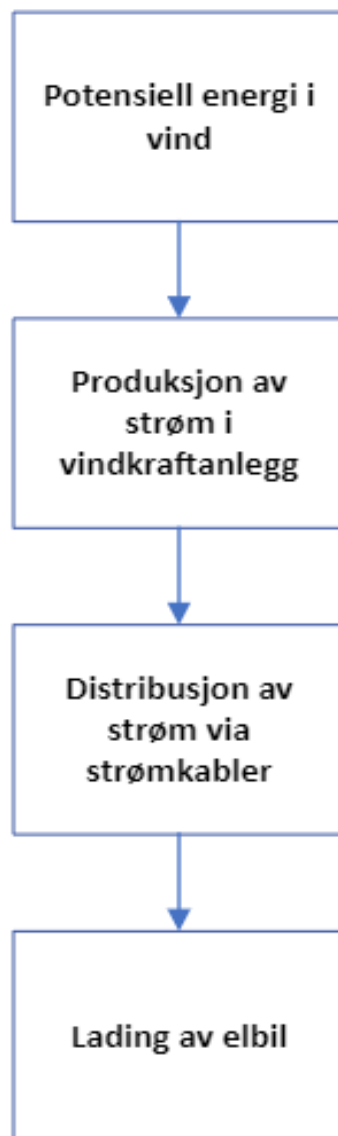


Figur 13 Energikjede E-2

2.8.8 Energikjede E-3

Den siste energikjeden som blir analysert i denne oppgaven bruker fullstendig fornybar strømmiks med utgangspunkt i strøm produsert fra vindkraft produsert i Norge. Strømmen vil bli produsert i et vindkraftanlegg før strømmen distribueres gjennom strømkabler frem til sluttforbruker eller ladestasjon.

Figur 14 illustrerer energikjede E-3



Figur 14 Energikjede E-3

2.9 Følsomhetsanalyse

Følsomhetsanalyse er en metode som benyttes for å teste hvor robuste resultatene fra en analyse eller modell er. Her vil en systematisk gå inn og endre en parameter i modellen, samtidig som alle andre parameterne holdes uendret, for å så observere effekten på resultatet den ene endringen har. Altså vil en da kunne se hvor følsom analysen er ovenfor endringer i datagrunnlaget (Pichery, 2014). Hver modell og analyse vil inneholde antakelser, dette gjør at ved å gjennomføre en følsomhetsanalyse, så vil en kunne se hvor stor effekt antakelsene har på resultatet av studien. Det er alltid usikkerheter knyttet til datagrunnlaget, dette kan blant annet være på grunn av spriker i datasettet, slik at en følsomhetsanalyse kan brukes for å observere hvor viktige disse usikkerhetene er.

I denne oppgaven vil følsomhetsanalyser bli utført på energikjedene H-1, H-4 og B-1 for å få en oversikt over hvor følsomme disse energikjedene er for endringer i datagrunnlaget. Ingen av energikjedene som bruker elbilen har blitt valgt ettersom de energikjedene består av få delprosesser. Energikjede E-1 ble valgt som representativ for energikjedene som benytter elektrolyse av vann for å produsere hydrogen. H-4 ble valgt ettersom det er den eneste kjeden som benytter seg av dampreforming. Den siste energikjeden, B-1, ble valgt ettersom det er den eneste hybrid energikjeden i oppgaven.

2.10 Scenarioanalyse

Studien inneholder flere scenarioanalyser. Dette blir gjort for å estimere utfallet for mulige scenarioer eller scenarioer som vil kunne inntreffe i fremtiden. Ulike faktorer og nøkkeltall vil bli endret eller byttet med andre for å observere effekten dette vil ha på energikjedene. Et eksempel vil være å estimere fremtidige utslipp fra strømmikser og hva dette vil ha å si for energikjedene om disse estimatene viser seg å være korrekte. I denne oppgaven vil det bli utført scenarioanalyser for følgende scenarioer:

- Økning og reduksjon av utslippet fra EU strømmiksen og den fossile strømmiksen.
- Bruk av det estimerte utslippene fra EU strømmiksen i 2030 ifølge European Environment Agency for energikjedene H-1 og E-1 som benytter EU strømmiksen.
- Erstatte den norske strømmiksen i energikjede H-4, som blir benyttet til dampreforming til hydrogen og kjøling av hydrogen, med den fornybare, EU og den fossile strømmiksen. Dette er for å observere betydningen strømmiksen har for utslippene i H-4.
- Erstatte den norske strømmiksen i energikjede B-1 med den fornybare, EU og den fossile strømmiksen for å observere betydningen strømmiksen har for utslippene fra hybridbilen.

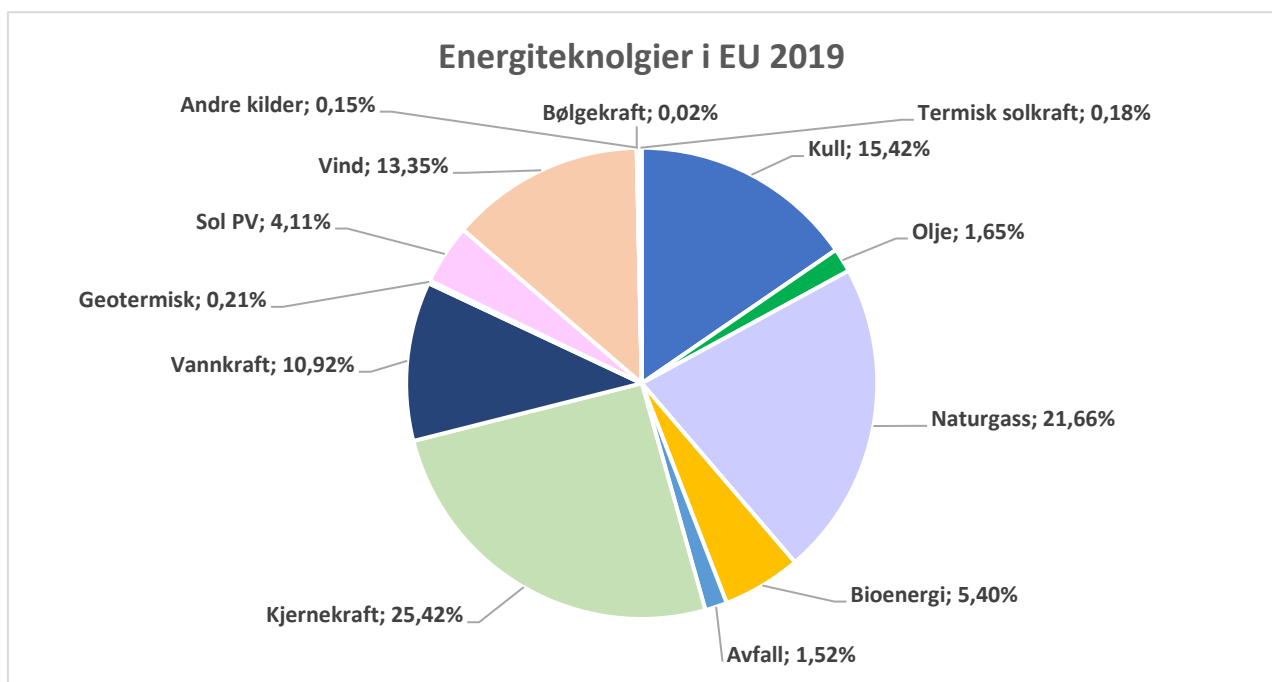
3 Data

I dette kapitlet presenterer jeg datagrunnlaget for oppgaven. Her vil data som blir brukt i oppgaven, samt aktuelle utregninger bli presentert. Dette kapitlet er delt inn i flere deler. Først vil beregningene for WWT, Well to Tank, bli presentert. Deretter presenteres datagrunnlaget og beregningene for TTW, Tank to Wheel. Dette inkluderer valg av referansebilmodellene brukt i oppgaven. Etter dette vil energibehovet for bilproduksjonen, utslippsfaktorer og utslipp fra bilproduksjonen bli presentert og drøftet. Kapitlet avsluttes med en oppsummering av alle prosessene i delkapitlet, samt resultatet av utregningene som ble gjennomført i denne oppgaven, dette er presentert i Tabell 18.

3.1 WTT

3.1.1 EU strømmiksen

EU strømmiksen er primærenergikilden til to av energikjedene, H-1 og E-1. Strømmiksen i EU består av flere ulike primærenergikilder, ulike teknologier som produserer strøm som igjen har hver sin virkningsgrad. Selv om fossilandelen i strømmiksen er betydelig vil det også være en betydelig fornybar andel som da reduserer utslippene til strømmiksen. Ifølge IEA består EU strømmiksen av 13 ulike teknologier, hvorav en av teknologiene er «Andre kilder». Figur 15 gir en visuell oversikt over andelen de ulike energiteknologiene utgjorde i EU strømmiksen i 2019. Det kommer tydelig frem at de dominerende teknologiene i all hovedsak er vindkraft, naturgass, kjernekraft, kullkraft og vannkraft (IEA, 2022a).



Figur 15 EU strømmiks i 2019

For å kunne utføre energikjedeanalysene må det fastsettes en virkningsgrad for strømproduksjon innenfor EU. I denne studien så brukes det generelle virkningsgrader for de ulike energiteknologiene som blir benyttet innenfor EU, som videre blir brukt til å beregne den samlede virkningsgraden for strømproduksjonen. Det er besluttet å ikke sette noen minimumsgrense for hvor stor andel en energikilde må utgjøre av den totale strømproduksjonen for å bli inkludert i utregningene, slik at alle energiteknologiene og energikildene blir vurdert. Tabell 5 viser en oversikt over virkningsgradene til hver enkel energiteknologi, samt den samlede virkningsgraden i den europeiske strømmiksen

Tabell 5 Virkningsgraden til EU strømmiksen

Teknologi	Mengde strøm [GWh]	Andel	Virkningsgrad	Samlet virkningsgrad	Kilde
Kull	498 337	15,42 %	40 %	6,17 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Olje	53 431	1,65 %	35 %	0,58 %	(Malla, 2009)
Naturgass	699 869	21,66 %	45 %	9,75 %	(EIA, 2020)
Bioenergi	174 375	5,40 %	35 %	1,89 %	(Electropedia, 2005)
Avfall	49 041	1,52 %	44 %	0,67 %	(Di Maria et al., 2016)
Kjernekraft	821 552	25,42 %	35 %	8,90 %	(Afewok et al., 2021)
Vannkraft	352 956	10,92 %	94 %	10,27 %	(NVE, 2020b)
Geotermisk	6 726	0,21 %	10 %	0,02 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Sol PV	132 953	4,11 %	18 %	0,72 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Vindkraft	431 450	13,35 %	48 %	6,41 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Bølgekraft	513	0,02 %	50 %	0,01 %	(Vinjar et al., 2022)
Andre kilder	4 921	0,15 %	100 %	0,15 %	Antakelse
Termisk solkraft	5 683	0,18 %	16 %	0,03 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Sum	3 231 807			45,55 %	

Den eneste energikilden som har en virkningsgrad på 100% er «Andre kilder». Begrunnelsen for dette er at denne kilden står for en svært liten del av den totale strømproduksjonen, slik at det antas at å sette virkningsgraden til 100% ikke vil påvirke resultatene i en betydelig grad. Den samlede virkningsgraden for EU strømmiksen er gitt ved følgende formel:

$$\text{Samlet virkningsgrad} = (a_{\text{kull}} * \eta_{\text{kull}}) + (a_{\text{olje}} * \eta_{\text{olje}}) + (a_{\text{naturgass}} * \eta_{\text{naturgass}}) + (a_{\text{bioenergi}} * \eta_{\text{bioenergi}}) + (a_{\text{avfall}} * \eta_{\text{avfall}}) + (a_{\text{kjernekraft}} * \eta_{\text{kjernekraft}}) + (a_{\text{vannkraft}} * \eta_{\text{vannkraft}}) + (a_{\text{geotermisk}} * \eta_{\text{geotermisk}}) + (a_{\text{sol PV}} * \eta_{\text{sol PV}}) + (a_{\text{vind}} * \eta_{\text{vind}}) + (a_{\text{bølgekraft}} * \eta_{\text{bølgekraft}}) + (a_{\text{andre kilder}} * \eta_{\text{andre kilder}}) + (a_{\text{termisk solkraft}} * \eta_{\text{termisk solkraft}})$$

Hvor,

a = andelen strøm produsert per teknologi [%].

η = virkningsgraden for den tilsvarende teknologien [%]

Ved å sette inn verdiene presentert i Tabell 2 blir formelen som følgende:

Samlet virkningsgrad = $(15,42\% * 40\%) + (1,65\% * 35\%) + (21,66\% * 45\%) + (5,4\% * 35\%) + (1,52\% * 44\%) + (25,42\% * 35\%) + (10,92\% * 94\%) + (0,21\% * 10\%) + (4,11\% * 18\%) + (13,35\% * 48\%) + (0,02\% * 50\%) + (0,15\% * 100\%) + (0,18\% * 16\%) = 45,55\%$

Formelen gir en samlet virkningsgrad på 45,55% for EU strømmiksen. Dette er et estimat og ikke nødvendigvis det nøyaktige tilfellet i virkeligheten, men ved å bruke estimatet er det mulig å oppnå mer innsikt i energikjedene. Andelen de ulike energiteknologiene utgjør av EU strømmiksen kan også endres fra år til år, for eksempel på grunn av lite vind i EU, som da vil redusere andelen vindkraft i EU strømmiksen. Flere av de dominerende energiteknologiene har en lav virkningsgrad, som da gjør at den samlede virkningsgraden til strømproduksjonen blir lavere enn det den kunne ha vært med mer effektive teknologier. Eventuelle sikkerhetsmarginer har ikke blitt vurdert i disse beregningene. Selv om det er mulig å beregne tap under lagring, transport og utvinning av energikilder, slik som for kull, olje og naturgass, har jeg valgt å ikke gjøre dette for denne strømmiksen. Begrunnelsen for dette er at dette vil gjøre strømmiksen mer uoversiktlig enn den trenger å være uten å få en antatt betydelig endring i sluttresultatet. Det antas at EU strømmiksen utelukkende brukes innenfor EU, utenom i tilfellene der energikjedene sier noe annet.

3.1.2 Fossil strømmiks

Den fossile strømmiksen ligger til grunn for energikjedene H-2 og E-2. Denne strømmiksen er som tidligere nevnt fullstendig fossil, som betyr at det ikke er noe innsalg av fornybare energikilder. I denne studien ble det bestemt at kullkraft skal bli brukt som den eneste fossile energiteknologien som blir benyttet i strømproduksjonen. Dette er da en strømmiks som er fullstendig basert på kullkraft. Valget er begrunnet med at kull spiller en betydelig rolle i den europeiske strømproduksjonen, slik som vist i Figur 15 og Tabell 2. Det finnes derimot flere ulike kulltyper som kan brukes til å produsere strøm. I denne studien ble det besluttet at lignitt, også kjent som brunkull, blir brukt som kulltypen som benyttes til å produsere strøm i den fossile strømmiksen. Dette er begrunnet med at 22,5% av den tyske strømmiksen i 2017 kom fra lignitt, samt at 90% av lignitten i Tyskland går til strømproduksjon (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, 2022; Hofstad, 2021). Virkningsgraden for kullkraftverkene er anslått til 40%, slik som den er for beregningene for den europeiske strømmiksen.

3.1.3 Utvinning av kull

Under utvinningen av brunkullet vil det oppstå energitap. Tapet av energi i denne delprosessen vil derimot være lavt. Blok og Nieuwlaar anslår at energitapet i utvinningsprosessen for kull vil ligge

mellom 1% til 3% (Blok & Nieuwlaar, 2021). I denne studien benyttes BAT prinsippet, slik som beskrevet i Kapittel 2, slik at energitapet under utvinningen av kullet vil bli estimert til 1% i denne oppgaven.

3.1.4 Distribusjon av kull

Etter utvinningen må kullet distribueres og lagres ved kullkraftanlegget. Blok og Nieuwlaar anslår energitapet under transporten av kullet til å være mellom 0% til 10%. Det nevnes at energitapet vil øke med avstanden mellom der utvinningen av kull foregår og kullkraftanlegget der kullet benyttes til å produsere strøm (Blok & Nieuwlaar, 2021). Jeg antar at utvinningen av kullet vil skje relativt nært kullkraftanlegget, slik at det blir lave energitap under distribusjonen av kull. Energitapet fra kull distribusjonen er satt til 1%. Selv om denne studien følger er BAT prinsipp så vil ikke energitapet her bli satt til 0%. Dette begrunnes med at energitapet under transporten er distanseavhengig og ikke teknologiavhengig, slik at det antas at det best tilgjengelige teknologien allerede er i bruk i denne delprosessen, slik at kun transportsavstanden fører til tap i energikjeden.

3.1.5 Lagring av kull

Før kullet brukes til strømproduksjon vil det bli lagret ved kullkraftanlegget før endelig bruk. Blok og Nieuwlaar anslår energitapet fra lagringen av kull til å være mellom 1% til 2% (Blok & Nieuwlaar, 2021). Ifølge BAT prinsippet i studien så er energitapet under lagringen av kullet satt til 1%.

3.1.6 Fornybar strømmiks

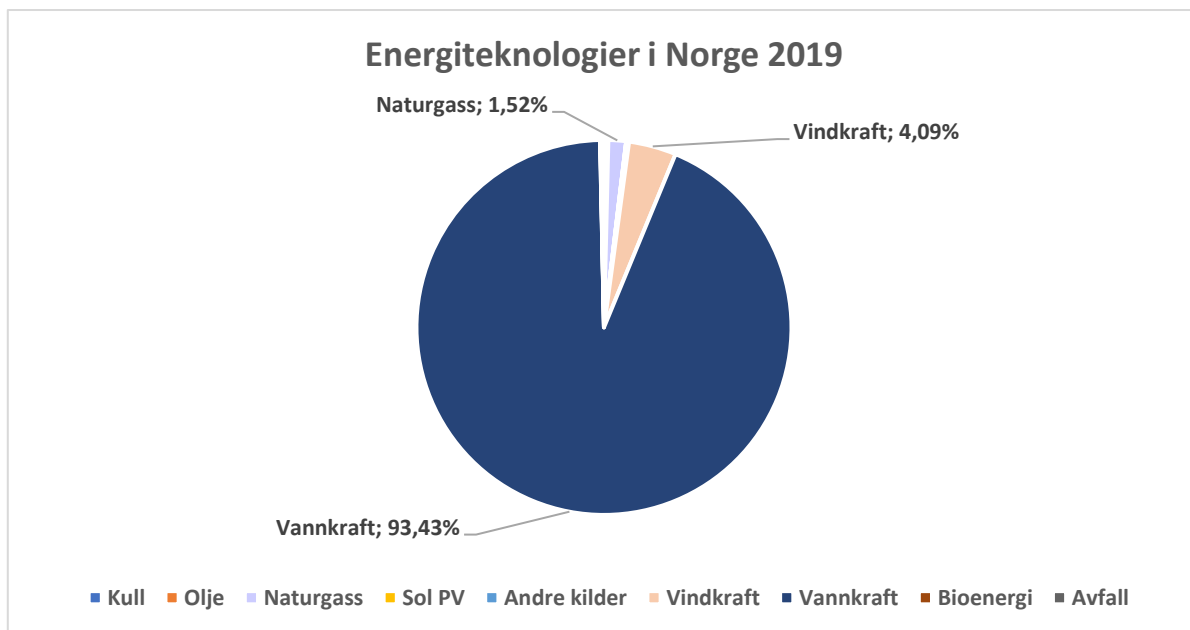
Den fornybare strømmiksen er strømmiksen som ligger til grunn for energikjede H-3 og E-3. Slik som navnet tilsier så er hele strømmiksen basert på fornybare energikilder. For denne strømmiksen ble det besluttet å utelukkende benytte norsk vindkraft som energikilden til strømproduksjonen. Begrunnelsen for dette er at selv om vindkraft ikke utgjør en dominerende rolle i det norske energisystemet så utgjør vindkraft en stadig større del av strømmiksen her til lands (IEA, 2022b). Virkningsgraden for vindkraftanleggene er anslått til 48%, slik som den er for beregningene for EU strømmiksen. Strømmen blir produsert i Norge.

Ifølge IRENA bruker de fleste internasjonale energistatistikkene en virkningsgrad på 100% for fornybare energiteknologier (IRENA, 2017). Begrunnelsen til at 100% ikke er brukt som virkningsgrad i denne studien er at ikke 100% av energien i vinden, altså selve vindenergien, vil bli omdannet til strøm i et vindkraftanlegg, ettersom det er teoretiske og praktiske begrensninger til hvor mye strøm

det er mulig å produsere fra vind. Denne teoretiske begrensningen er kalt for Betz-Joukowski limit (Blok & Nieuwlaar, 2021). De andre fornybare energiteknologiene som brukes heller ikke virkningsgrader på 100%. Dette vil gjøre resultatene mer sammenlignbare. Hvis en fornybar energiteknologi hadde fått en virkningsgrad på 100%, mens de andre ikke gjør det, vil energikjeder som benytter den teknologien få en urettferdig fordel sammenlignet med de andre energikjedene.

3.1.7 Norsk strømmiks

Den norske strømmiksen ligger ikke enestående til grunn for noen av energikjedene som blir analysert i denne oppgaven. Derimot vil den bli brukt i noen delprosesser i de ulike energikjedene. Den norske strømmiksen blir brukt som energikilde i dampreformeringsen og kjølingen av hydrogen i energikjede H-4. I energikjede B-1 blir den norske strømmiksen brukt som energikilden for hybridbilen når den kjører på strøm. Begrunnelsen for dette er at hybridbilen antas at blir brukt i Norge, slik at når den lades i Norge så vil den bli ladet opp med strøm fra den norske strømmiksen. Akkurat slik som EU strømmiksen så består den norske strømmiksen av flere ulike energiteknologier. Ifølge IEA sin oversikt så besto den norske strømmiksen i 2019 av til sammen 9 ulike energiteknologier. En av dem vil være «Andre kilder». Den største forskjellen mellom EU strømmiksen og den norske strømmiksen er at den norske strømmiksen har en betydelig fornybar andel på ca. 98%, der vannkraft er den dominerende energiteknologien i strømmiksen (IEA, 2022b). Figur 16 illustrasjon av hvor stor andel de ulike energiteknologiene utgjør i den norske strømmiksen. Tabell 6 viser en oversikt over de ulike energikildene, samt deres andel i den norske strømmiksen og deres virkningsgrad. Dette ble benyttet til å beregne den totale virkningsgraden for den norske strømproduksjon.



Figur 16 Norsk strømmiks i 2019

Merk at de andre energiteknologiene utgjør en såpass liten andel av den norske strømmiksen at de ikke er synlige i Figur 16.

Tabell 6 Virkningsgraden til den norske strømmiksen

Teknologi	Mengde strøm [GWh]	Andel	Virkningsgrad	Samlet virkningsgrad	Kilde
Kull	163	0,12 %	40 %	0,05 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Olje	341	0,25 %	36 %	0,09 %	(Malla, 2009)
Naturgass	2055	1,52 %	45 %	0,68 %	(EIA, 2020)
Sol PV	13	0,01 %	18 %	0,00 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Andre kilder	328	0,24 %	100 %	0,24 %	Antakelse
Vindkraft	5536	4,09 %	48 %	1,96 %	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
Vannkraft	126404	93,43 %	94 %	87,83 %	(NVE, 2020b)
Bioenergi	39	0,03 %	35 %	0,01 %	(Electropedia, 2005)
Avfall	412	0,30 %	44 %	0,13 %	(Di Maria et al., 2016)
Sum	135291			91,00 %	

I denne strømmiksen er det en energiteknologi som har en virkningsgrad på 100%, dette er for «Andre kilder». Begrunnelsen for dette er at denne kilden står for en svært liten del av den totale strømproduksjonen, slik at det å sette virkningsgraden til 100% ikke vil påvirke resultatene betydelig. Den samlede virkningsgraden for den norske strømmiksen er gitt ved følgende formel:

$$\text{Samlet virkningsgrad} = (a_{\text{kull}} * \eta_{\text{kull}}) + (a_{\text{naturgass}} * \eta_{\text{naturgass}}) + (a_{\text{olje}} * \eta_{\text{olje}}) + (a_{\text{sol PV}} * \eta_{\text{sol PV}}) + (a_{\text{andre kilder}} * \eta_{\text{andre kilder}}) + (a_{\text{vind}} * \eta_{\text{vind}}) + (a_{\text{vannkraft}} * \eta_{\text{vannkraft}}) + (a_{\text{bioenergi}} * \eta_{\text{bioenergi}}) + (a_{\text{avfall}} * \eta_{\text{avfall}})$$

Hvor,

a = andelen strøm produsert per teknologi [%].

η = virkningsgraden for den tilsvarende teknologien [%]

Ved å sette inn verdiene i Tabell 6 inn i formelen ovenfor vil formelen bli som følgende:

$$\text{Samlet virkningsgrad} = (0,12\% * 40\%) + (1,52\% * 45\%) + (0,25\% * 36\%) + (0,01\% * 18\%) + (0,24\% * 100\%) + (4,09\% * 48\%) + (93,43\% * 94\%) + (0,03\% * 35\%) + (0,30\% * 44\%) = 91\%$$

Den beregnende estimerte virkningsgraden til den norske strømmiksen er på 91%, som er betraktelig høyere enn virkningsgraden for EU strømmiksen på 45,55%.

3.1.8 Distribusjon av strøm

Når strømmen er produsert, enten i Norge eller i EU, må den distribueres videre til forbruker, som kan være ulike produksjonsanlegg for drivstoff eller direkte til en sluttforbruker som lader en elbil. EU- og den fossile strømmiksen blir produsert i EU, mens den fornybare- og norske strømmiksen blir produsert i Norge. Under selve distribusjonen vil noe av strømmen gå tapt, og av den grunn må en virkningsgrad beregnes for distribusjonen av strømmen i oppgaven (NordPool, 2020).

Tabell 7 Tap under distribusjon av strøm

Tap under distribusjon	Område	Kilde
6 %	Norge	(SSB, 2014)
3,10 %	Tyskland til Norge (NordLink)	(NordPool, 2020)
6,22 %	EU	(The World Bank, 2018b)
6,08 %	Norge	(The World Bank, 2018a)

Tabell 7 viser hvor store tap en kan forvente under strømdistribusjonen i ulike områder og ved bruk av NordLink kabelen som distribuerer strøm mellom Norge og Tyskland. I det norske strømnettet vil tapet ligge på mellom 6% til 6,08%. Ved å følge BAT prinsippet så vil strømtapet ved strømdistribusjonen innad i Norge være satt til 6% i denne oppgaven.

For strømmen som produseres i EU så antas det at spesifikke produksjonsstedet er Tyskland, der strømmen blir distribuert til NordLink strømkabelen som forbinder Norge til Tysland, før strømmen blir videre distribuert i Norge frem til forbrukeren. Det antas at distribusjonen i EU, Norge og mellom EU og Norge hver står for en tredjedel av den totale distribusjonsavstanden. Tapet i det norske strømnettet ble satt til 6% ovenfor.

Distribusjonstapet ved å transportere strøm fra EU til Norge blir regnet ut ved bruk av følgende formel:

$$\text{Totale tap} = \left(\frac{\text{Tap i det europeiske strømnettet}}{3} \right) + \left(\frac{\text{Tap i det norske strømnettet}}{3} \right) + \left(\frac{\text{Tap i NordLink}}{3} \right)$$

$$\text{Totale tap} = (6,22\%/3) + (6\%/3) + (3,1\%/3) = 5,11\%$$

Hver verdi deles på tre ettersom hver av de tre delene av strømdistribusjon står for en tredjedel av transportavstanden hver.

For distribusjonen av strøm produsert i EU og distribuert til Norge vil distribusjonstapet være estimert til 5,11%. Selv om strømdistribusjonen går gjennom flere strømdistribusjonsnettverk, så blir hele strømdistribusjonen sett på som en enkelt delprosess. Merk at dette er et estimat og at dette tapet kan reduseres over tid, for eksempel gjennom teknologisk innovasjon.

3.1.9 Elektrolyse

Prosessen som brukes til å produsere hydrogen i energikjede H-1, H-2 og H-3 er elektrolyse av vann. Elektrolysen er et alternativ til dampreforming av naturgass og utslippene vil variere med strømmiksen brukt for å gjennomføre reaksjonen. I energikjede H-1, H-2 og H-3 står det nevnt at hydrogenproduksjonen foregår ved lokalelektrolyse. Dette betyr at elektrolysen finner sted på samme sted som hydrogenet blir fylt på hydrogenbilene, som da betyr at det ikke er et transportprosess mellom produksjon og forbruk av hydrogen. Det finnes ulike typer elektrolyse som kan brukes for å fremstille ulike kjemiske produkter, men i denne oppgaven fokuserer jeg på elektrolyse av vann for hydrogenproduksjon. Elektrolyse av vann benytter strøm til å dele vannmolekyler til hydrogen og oksygen (Shiva Kumar & Himabindu, 2019), hvor hydrogenet blir brukt som drivstoff i hydrogenbilene. I denne studien tar jeg utgangspunkt i alkalisk elektrolyse. Begrunnelsen for dette er at alkalisk elektrolyse er en kommersiell teknologi og vil kunne produsere hydrogen i større mengder (Zeng & Zhang, 2010). I alkalisk elektrolyse så vil OH⁻ ioner bli transportert gjennom elektrolytten, væsken reaksjonen foregår i, fra katoden til anoden, hvor hydrogen blir dannet ved katoden (Energy, U.Å.).

Tabell 8 Effektivitet i elektrolyseprosessen

Effektivitet i alkalisk elektrolyse	Kilde
70-80%	(Shiva Kumar & Himabindu, 2019)
59-70%	(Zeng & Zhang, 2010)
70%-75%	(Dell et al., 2014)

For å gjennomføre energikjedeanalysen så må det fastsettes en virkningsgrad for elektrolyseprosessen. Ulike kilder oppgir ulike intervaller for virkningsgraden for elektrolyseprosessen. Det kommer frem i Tabell 8 at det er et stort sprik i virkningsgraden for

elektrolysen, der den laveste virkningsgraden for alkalisk elektrolyse er på 59% og den høyeste på 80%. Ettersom BAT prinsippet blir brukt i denne oppgaven vil virkningsgraden til elektrolysen bli satt til 80% i energikjedene som benytter seg av elektrolyse. Merk at dette er et høyt estimat, og ikke nødvendigvis representativ for virkeligheten. Dette er ment for å gi innsikt i problemstillingen.

3.1.10 Utvinning av naturgass

I oppgaven antas det at naturgassen som benyttes i energikjede H-4 blir utvunnet fra Nordsjøen før den transporteres til fastlands Norge for videre prosessering. Under selve utvinningen av naturgassen vil det oppstå energitap. Ifølge Blok & Nieuwlaar vil energitapet under utvinningen være mellom 0,7% til 4%. Denne oppgaven følger BAT prinsippet, slik at energitapet for utvinnings prosessen vil bli satt til 0,7%.

3.1.11 Transport av naturgass

Etter utvinningen av naturgassen i Nordsjøen skal gassen transporteres til fastlands Norge. For dette antas det i studien at denne transporten vil foregå gjennom gassledninger på bunnen av havet. Det antas at transportavstanden fra utvinningen av naturgassen til et raffineri på land, der hydrogenproduksjonen foregår, er på 300 km. Tabell 9 viser en oversikt over energitap som oppstår under transporten av naturgass fra ulike kilder.

Tabell 9 Tap under naturgass transport

Energitap i gassledning	Merknader	Kilde
2,80 %	Per 3000 km over land	(Obara & Li, 2020)
0% - 20%	Varier med transportavstanden	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
0,21 %	Teoretisk tap	(Xie et al., 2019)

Kildene i Tabell 9 presenterer ulike verdier for energitapet under transporten av naturgass. Obara og Li oppgir et tap i gassledningen på 2,8% per 3000 km. I denne studien antas det som nevnt at transportavstanden mellom utvinningen og anlegget på land er på 300 km. Jeg antar at det er en lineær sammenheng mellom energitap i gassledningene og transportavstanden. Slik at energitapet under distribusjonen er lik 0,28% per 300 km. Dette vil ikke være en urealistisk antakelse å ta, ettersom Blok og Nieuwlaar selv nevner at energitapet fra gass distribusjonen er avhengig av transportavstanden. Det bør nevnes at de derimot er et stort intervall på energitapet som oppstår under transporten av naturgass, som resulterer i et betydelig sprik i datasettet for denne prosessen. Xie et al. oppgir et tap på 0,21% for gassdistribusjonen. Dette tapet er relativt lik tapet jeg kom frem

til fra tapet oppgitt av Obara og Li. Det bør bemerkes at et tap på 0,21% er rent teoretisk og da ikke nødvendigvis tilfellet i praksis.

Som tidligere nevnt følger denne studien BAT prinsippet, og sådan hadde det være logisk å sette energitapet fra transportprosessen til 0% slik som Blok og Nieuwlaar oppgir. Derimot er det slik at tapet som Blok og Nieuwlaar oppgir er avhengig av transportavstanden og ikke teknologien, dette vil være det samme tilfellet som med distribusjonen av kullet. Energitapet er med andre ord distanseavhengig. Videre har ikke Blok og Nieuwlaar oppgitt over hvor store avstander dette tapet er gyldig. Dette er min begrunnelse for å sette energitapet til en verdi høyere enn 0%. I denne studien er det besluttet å sette energitapet lik 0,28% over en avstand på 300 km, slik Obara og Li oppgir. Tapet oppgitt av Xie et al. brukes ikke ettersom det antas at tapet av energi under transport er distanseavhengig, noe estimatet til Xie et al. ikke tar hensyn til.

3.1.12 Dampreforming

Etter at naturgassen har blitt transportert til land vil den ende opp på et hydrogenproduksjonsanlegg der det utføres en prosess som heter dampreforming. Hydrogenproduksjon ved bruk av dampreforming av naturgass er et alternativ til hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse, og er den sentrale prosessen i energikjede H-4. Under dampreformeringsprosessen vil naturgass bli omdannet til hydrogen samt andre biprodukter slik som propan. Selve prosessen foregår i to trinn, i det første trinnet reagerer vanndamp og metan sammen i nærheten av en nikkelkatalysator i nærvær av temperaturer rundt 800 grader celsius, som da resulterer i at karbonmonoksid og hydrogen dannes. I det neste trinnet så vil karbonmonoksidet som ble produsert fra det forrige trinnet reagere med tilført vanndamp over en ny katalysator i nærvær av temperaturer rundt 500 grader celsius. Denne reaksjonen resulterer da i dannelsen av hydrogen og karbondioksid. Ettersom det er to trinn i dampreforming hvor hydrogen produseres vil den andre delen av produksjonsprosessen resultere i et større utbytte av hydrogen (Hofstad, 2017).

Tabell 10 Effektivitet i dampreformeringsprosessen

Effektivitet i dampreforming	Kilde
74% - 85%	(Shiva Kumar & Himabindu, 2019)
70% -80%	(Hofstad, 2017)

Tabell 10 viser ulike intervaller for energieffektiviteten under dampreformeringsprosessen. Kildene oppgir intervaller som overlapper med hverandre i stor grad. Energieffektiviteten for denne prosessen er satt til 85%, slik som BAT prinsippet dikterer i denne oppgaven.

I dampreformeringsprosessen kreves det en tilførsel av energi for at reaksjonen skal kunne gå. Budsberg et al. oppgir at det kreves 0,407 MJ energi for å produsere 1 kg med hydrogen (Budsberg et al., 2015). Dette energikravet vil videre bli brukt i energikjedeanalysen. Energien som kreves for å gjennomføre dampreformeringsprosessen kommer som tidligere nevnt fra den norske strømmiksen som blir produsert i Norge, og strømmen distribueres innad i landet frem til anlegget der dampreformeringen foregår.

3.1.13 Kjøling av hydrogen

Fra dampreformeringen blir hydrogengassen overført til neste ledd i energikjeden som vil være kjøling av hydrogenet. Hydrogenbilen bruker flytende hydrogen som drivstoff slik at hydrogengassen fra dampreformeringen kjøles til den går over til væskeform. I denne prosessen antas det at det ikke oppstå noe tap av energi i hydrogenet for energikjede H-4, derimot må det tilføres energi for å kunne kjøle hydrogengassen. Hydrogengassen vil bli nedkjølt fra 25 grader celsius til – 253 grader celsius, som vil være temperaturen der hydrogen går over fra gassform til væskeform (Kofstad & Pedersen, 2022).

Tabell 11 Mengde energi som kreves for å kjøle ned 1 kg hydrogen

Mengde energi som kreves for å kjøle hydrogen i forhold til energiinnholdet i hydrogen	Kilde
15,83 kWh/kg H ₂	(Bossel & Eliasson, U.Å.)
10 – 13 kWh/kg H ₂	(Gardiner, 2009)

Tabell 11 viser hvor mye energi som kreves for å kjøle ned en kilo med hydrogen fra 25 grader til – 253 grader. Her følger jeg BAT prinsippet, slik at energimengden som kreves for å kjøle ned hydrogen vil være på 10 kWh/kg H₂ i denne studien. Slik som tilfellet er for dampreformeringsprosessen så vil strømmen som brukes i denne prosessen komme fra den norske strømmiksen som produseres i Norge og blir distribuert innad i Norge. Kjølingen i energikjede H-4 antas å ha en virkningsgrad på 100% ettersom hoved primærenergikilden i denne energikjeden, naturgass, ikke benyttes for å drive kjølingsprosessen. Derfor må norsk strøm tilføres, og mengden strøm som kreves beregnes.

I energikjedene H-1, H-2 og H-3 vil hydrogenet som produseres fra elektrolysen bli kjølt ned før den fylles på tank i hydrogenbilen. For disse kjedene antas det at strømmen som kreves for å kjøle hydrogenet kommer fra EU strømmiksen i H-1, fra den fossile strømmiksen i H-2 og den fornybare strømmiksen i H-3. I disse tre energikjedene antas det videre at kjølingen av hydrogen har en virkningsgrad på 70%, ettersom 30% av energiinnholdet i hydrogenet kreves for å kjøle ned hydrogen

til den ønskede temperaturen (Gardiner, 2009). Denne energimengden kommer fra de ulike strømmiksene.

3.1.14 Utvinning av råolje

Råolje blir bare benyttet i energikjede B-1, som er hybridbil energikjeden. Det antas i denne oppgaven at råoljen som brukes i denne energikjeden blir utvunnet i Nordsjøen. Under selve utvinningen av råoljen vil noe av energien gå tapt. Tabell 12 viser ulike estimater på energimengden som går tapt under utvinningen av råoljen.

Tabell 12 Energitap under oljeutvinning

Tap under utvinning av råolje	Kilde
1% - 3%	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
3 %	(Holden, 2003)

Slik som tallene i Tabell 9 viser så er energitapet under selve utvinningen av råoljen lavt. Begge kildene gir svært like estimater. Jeg forholder meg til BAT prinsippet og bruker derfor 1% som estimatet på energitapet under utvinningsprosessen av råolje.

3.1.15 Transport av råolje

I motsetning til naturgassen så antas det at råoljen fra Nordsjøen blir transport inn til land ved bruk av skip. Når skipet ankommer til raffineriet så antas det at det ikke kreves transport mellom skipet og raffineriet, slik at det er ikke er en egen prosess for transport av råoljen av skipet og inn i raffineriet i denne oppgaven. Begrunnelsen for dette er at det er dreier seg om avstander som antas å være svært korte, slik at energibruken og utslippene fra dette mellomleddet er neglisjerbare over levetiden til hybridbilen.

Tabell 13 Energitap for transport av råolje

Energitap under transport	Kilde
1% - 5%	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
0,50 %	(Holden, 2003)

Tabell 13 inneholder data på hvor stort energitap det er under transporten av råolje. I dette tilfellet vil kildene ikke overlappe og det vil være et sprik i datagrunnlaget. 0,5% blir brukt som estimatet for energitapet som oppstår under transporten av råolje. Dette følger BAT prinsippet som ligger til grunn i denne oppgaven. Det bør derimot bemerkes at det faktiske energitapet kan være vesentlig høyere

enn estimatet brukt i denne oppgaven, ettersom Blok og Nieuwlaar oppgir et estimat for energitapet på opptil 5%.

3.1.16 Lagring av råolje

Ved ankomst ved raffineriet blir oljen lagret før den går inn i selve raffineringsprosessen. Blok og Nieuwlaar har estimert energitapet fra lagringen av råolje til å være på 2% (Blok & Nieuwlaar, 2021), med bakgrunn i dette er energitapet under lagringen av råoljen ved raffineriet på 2%.

3.1.17 Produksjon av bensin ved raffineri

Under raffineringsprosessen vil råoljen bli omdannet til bensin som da videre brukes som drivstoff i hybridbilen. Selv om et raffineri vil kunne produsere flere ulike produkter antas det at dette spesifikke raffineriet kun produserer bensin, slik at problemer rundt allokering blir forhindret.

Tabell 14 Energitap under raffinering

Energitap under raffinering	Kilde
5% - 15%	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
14 %	(Holden, 2003)

I Tabell 14 er det oppgitt verdier for energitapet som oppstår under raffinering av råolje til bensin. Ifølge BAT prinsippet vil energitapet for raffineringsprosessen bli satt til 5%, men det vil ikke være tilfellet i denne oppgaven. Blok og Nieuwlaar nevner at lettere oljeprodukter slik som bensin i gjennomsnitt krever mer energi for å produseres enn tyngre oljeprodukter slik som tung fyringsolje (Blok & Nieuwlaar, 2021). Dette gjør det mindre realistisk å sette energitapet i denne prosessen på 5%, ettersom dette estimatet svært sannsynlig ikke er gyldig for bensinproduksjon. Med dette som begrunnelse blir energitapet i raffineringsprosessen satt til 14% i denne oppgaven. 14% er tallet på energitap som Holden har brukt som estimat og dette estimatet befinner seg også i intervallet oppgitt av Blok og Nieuwlaar.

3.1.18 Transport av drivstoff til fyllestasjon

Transport av drivstoffet til fyllestasjonen er det siste leddet for fossil delen av energikjede B-1 og for energikjede H-4. I H-4 vil det flytende hydrogenet bli transportert til en fyllestasjon fra produksjonsanlegget, mens i B-1 så vil bensinen bli transport til en fyllestasjon fra raffineriet. For transporten av bensin er det oppgitt at energitapet er på 1% (Holden, 2003), og dette vil legges til grunn i denne analysen. For transporten av hydrogen vil energitapet være større enn det er for bensin. Energitapet kommer gjennom blant annet avdamping av hydrogen fra tankbilen. Ifølge Aziz

vil energitapet av flytende hydrogen under transport være på 5% (Aziz, 2018). 5% er lagt til grunn for energitapet under transporten av hydrogen i energikjede H-4 i denne oppgaven.

3.2 TTW

3.2.1 Valg av personbilmodeller

Hver energikjede bruker en referansebil. I oppgaven er det tre ulike referansebiler, en som bruker hydrogen som drivstoff, en som er hybrid som bruker bensin og strøm som drivstoff, og en elbil som bruker strøm som drivstoff. Kriteriet som ble brukt til å velge referansebilene er at de skal være sammenlignbare med tanke på tenkt bruksområde, vekt og rekkevidde. En oversikt over biltypene, samt nøkkelinformasjon er presentert i Tabell 15.

For den hydrogendrevne bilmodellen valgte jeg Hyundai NEXO. Dette er en del av Hyundais satsning på mer miljøvennlige biler. NEXO er utstyrt med en brenselcelle, samt et lite batteri på 1,56 kWh. Personbilen benytter seg av flytende hydrogen som drivstoff (Hyundai, 2022b; Hyundai, U.Å.-b).

For den elektriske bilmodellen valgte jeg Hyundai IONIQ 5. Denne bilen har en batteristørrelse på 72,6 kWh og har den korteste rekkevidden av alle bilmodellene som blir brukt i denne studien. Batteriet har en vekt på 453 kg (Hyundai, U.Å.-a).

Bilmodellen som ble valgt for hybrid energikjeden er Hyundai TUCSON. Dette er en plug-in hybridbil, altså ladbar hybridbil, som benytter seg av bensin og strøm som drivstoff. Den har en rekkevidde på totalt 579 km, hvorav 62 km er elektrisk. Batteristørrelsen er på 9,36 kWh (Hyundai, 2022a).

Tabell 15 Oversikt over referansebilmodellene

Bilmodell	Hyundai NEXO	Hyundai IONIQ 5	Hyundai TUCSON
Drivstoff	Hydrogen	Elektrisk	Hybrid
Rekkevidde (km)	666	481	579
Hvorav elektrisk	-	481	62
Vekt (kg)	1889	1985	1893
Type motor	Brenselcelle	Elektrisk	Bensin-hybrid
Tankstørrelse (liter)	-	-	42
Tankstørrelse (kg)	6,3	-	-
Batteristørrelse (kWh)	1,56	72,60	9,36
Forbruk bensin (liter/km)	-	-	0,07
Forbruk strøm (kWh/km)	-	0,17	0,17
Forbruk hydrogen (kg/km)	0,01	-	-

For TUCSON ble det ikke oppgitt en batteristørrelse eller strømforbruk i kWh/km når bilen kjøres. Ettersom dette er forholdsvis nyere bilmodeller fra Hyundai antar jeg at strømforbruket, under elektrisk kjøring av TUCSON, er lik strømforbruket IONIQ 5 har under kjøring. For å estimere

batteristørrelsen til TUCSON antar jeg at det er lineær sammenheng mellom den elektriske rekkevidden til personbilene og batteristørrelsen. Ut ifra opplysningene fra IONIQ 5 så vil følgende formel brukes får å beregne hvor mange kWh batteri en trenger for å kjøre en kilometer:

Mengde batteri per km = batteristørrelse/rekkevidde = 72,6 kWh/481 km = 0,15 kWh per kilometer.

Denne faktoren brukes til å beregne den estimerte batteristørrelsen til TUCSON ved følgende formel:

Batteristørrelse = 0,15 kWh/km * 62 km = 9,36 kWh.

Den estimerte batteristørrelsen til TUCSON er på 9,36 kWh og bruker videre i oppgaven. Merk at dette er estimerer som gjøres for å gjøre det mulig å gjennomføre analysen, og vil nødvendigvis ikke komme helt overens med den reelle batteristørrelsen til TUCSON.

TUCSON presenterer en utfordring i denne energikjedeanalysen ettersom bilmodellen benytter seg av to ulike drivstoffer, bensin og strøm, slik at det må fastsettes hvor stor andel av tiden bilen kjører elektrisk og hvor stor andel av tiden den kjører på bensin. I denne oppgaven har jeg besluttet meg for å bruke den fossile og elektriske rekkevidden til TUCSON som grunnlag for hvor stor andel av tiden bilen kjører på bensin og på strøm. Den totale rekkevidden til TUCSON er på 579 km, hvorav 62 km elektrisk rekkevidde (Hyundai, 2022a). Dette betyr at ca. 11% av rekkevidden er kjørt på strøm og de resterende ca. 89% blir kjørt med bensin som drivstoff. Fra dette antas det at TUCSON bruker strøm 11% av brukstiden og bensin 89% av brukstiden. Det antas også at både batteriet og bensintanken er fullstendig utladet og tom når batteriet lades og bensintanken fylles opp igjen.

For å beregne tank-to-wheel, TTW, verdien trengs energiinnholdet til det respektive drivstoffet som benyttes i de ulike personbilene. 1 kWh strøm er lik 3,6 MJ/kWh strøm. Hydrogen vil ha et energiinnhold på 119,9 MJ/kg og bensin vil ha et energiinnhold på 32,5 MJ/liter (Hofstad, 2019). For å beregne TTW verdiene for hver biltype vil følgende formel bli brukt:

$TTW = \text{energibruk per kilometer [MJ/km]} * \text{energiinnhold til drivstoffet [MJ/enhet]}$

Der enhet kan være liter, kWh eller kilogram.

Resultatet av utregningene for alle referansebilene er presentert i Tabell 16

Tabell 16 TTW verdier

Bilmodell	NEXO	TUCSON	IONIQ 5
TTW [MJ/km]	1,14	0,60	2,17

3.2.2 Energibruk for produksjonen av kjøretøyproduksjon

Personbiler består av flere komponenter, slik som for eksempel batterier. For å kunne produsere alle de nødvendige komponentene kreves det bestemte mengder energi som må tilføres under produksjonen. Ulike bilmodeller består av ulike komponenter som krever ulike energimengder for å produseres, slik at ulike bilmodeller krever ulike energimengder i produksjonsprosessen.

3.2.2.1 Hydrogenbilen

Hydrogenbilmodellen brukt i denne oppgaven er Hyundai NEXO som benytter en brenselcelle som motor. Siden Hyundai NEXO er en bilmodell som nylig har blitt introdusert på markedet og ikke er i storskala produksjon så vil det ikke være produksjonsdata tilgjengelig for denne spesifikke bilmodellen. Dette betyr at andre studier som har tatt utgangspunkt i andre hydrogenbilmodeller vil bli brukt som grunnlag for å beregne energimengden som kreves for å produsere en Hyundai NEXO. Jeg antar at forholdet mellom energimengden som kreves for å produsere en hydrogenbil og vekten på hydrogenbilen er lineær. Dette gjøres ettersom hydrogenbilene som er analysert i andre studier vil ha en vekt som er ulik den til Hyundai NEXO, slik at energimengdene blir justert for å tilpasses til vekten av en Hyundai NEXO.

I en studie av Wang et al. ble det tatt utgangspunkt i en hydrogenbil som veier 1144 kg. Denne studien konkluderer frem til at det kreves 107 260 MJ for å produsere en hydrogenbil i Kina (Wang et al., 2013). NEXO har en totalvekt på 1889 kg, som betyr at den vil være ca. 1,65 ganger så tung som hydrogenbilen Wang et al. tok utgangspunkt i. For å finne den tilsvarende energimengden som kreves for å produsere en hydrogenbil med samme vekt som NEXO brukes følgende formel:

Total energibruk for bilproduksjon = energimengde * (vekt til referansebil i kg)/(vekt til bilen brukt i studien i kg).

$$\text{Total energibruk for bilproduksjonen} = 107\,260 \text{ MJ} * \left(\frac{1889 \text{ kg}}{1144 \text{ kg}} \right) = 177\,110 \text{ MJ}.$$

Basert på opplysningene oppgitt av Wang et al. vil energimengden som kreves for å produsere en Hyundai NEXO være på 177 110 MJ.

Ifølge boken *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market* skrevet av Pistora vil en hydrogenbil på 1300 kg kreve 81 000 MJ under produksjonsprosessen (Pistora, 2010). NEXO vil være ca. 1,45 ganger tyngre enn referansebilen brukt av Pistora. Formelen ovenfor blir brukt til å beregne energimengden som kreves for å produsere en hydrogenbil med en vekt tilsvarende den til NEXO:

Total energibruk for bilproduksjon = $81\,000\text{ MJ} * \left(\frac{1889\text{ kg}}{1300\text{ kg}} \right) = 117\,699\text{ MJ}$.

Ettersom denne studien benytter seg av BAT prinsippet så blir 117 699 MJ brukt som energimengden som kreves for å produsere en hydrogenbil. Det bør bemerkes at det er store sprik i datasettet for denne prosessen. Dette skyldes delvis at Wang et al. sin produksjon foregår i Kina og benytter en kinesisk strømmiks som gir et økt utslipp, men også at det er lite data tilgjengelig for energimengden som kreves for å produsere hydrogenbiler. De fleste studier fokuserer på utslipp knyttet til bilproduksjon og ikke energimengdene som kreves i en slik produksjon.

3.2.2.2 Hybrid bilen

Hybridbilen benytter seg av både strøm og bensin som drivstoff. Onat et al. publiserte i 2015 en studie der de analyserte energimengden som kreves for å produsere en hybridbil i USA. Det er oppgitt i studien at produksjonen vil ha et energikrav på 0,6 MJ/km kjørt over levetiden (Onat et al., 2015). Onat et al. brukte 240 000 km som avstanden en personbil kjører over levetiden, som da resulterer i et energikrav på 144 000 MJ for å produsere en Plug-in hybridbil (Onat et al., 2015). I denne oppgaven vil 144 000 MJ bli brukt energimengden som kreves for å produsere en Plug-in hybridbil. Slik som tilfellet er med energimengden som kreves å produsere en hydrogenbil er det lite data tilgjengelig for energimengden som kreves for å produsere en hybridbil. Fokuset for studier om bilproduksjon tar som oftest for seg utslippene fra bilproduksjonen og ikke energimengden som kreves.

3.2.2.3 Elbilen

Elbilen som er brukt som referansemødel i denne studien er Hyundai IONIQ 5, som har en totalvekt på 1985 kg. Wang et al. har i sin studie fra 2013 konkludert at det kreves 108 390 MJ for å produsere en elbil med en vekt på 1142 kg i Kina (Wang et al., 2013). Slik som ved hydrogenbilene så antas det at forholdet mellom energimengden som kreves for å produsere en elbil og vekten på elbilen er lineær. For å finne den tilsvarende energimengden som kreves for å produsere IONIQ 5 brukes følgende utregning:

Total energimengde for bilproduksjonen = $108\,390\text{ MJ} * \left(\frac{1985}{1142} \right) = 188\,401\text{ MJ}$

Ut ifra opplysningene i studien fra Wang et al. vil IONIQ 5 kreve 188 401 MJ i produksjonsprosessen. Onat et al. har i sin studie også beskrevet energimengden som kreves for å produsere en elbil. De tok utgangspunkt i at energimengden som kreves for å produsere en elbil er på 0,65 MJ/km. Slik som

tilfellet er med hybridbilen, antar forfatterne at en personbil kjører 240 000 km over levetiden sin (Onat et al., 2015). Dette resulterer da i et energibehov på 156 000 MJ for produksjonen av elbilen.

I studien fra Qiao et al. ble det konkludert at energimengden som kreves for å produsere en elbil med en vekt på 1692 kg og et NMC batteri på 171 kg er på 92 392 MJ. Referansebilen brukt i studien av Qiao et al. har da en totalvekt på 1863 kg (Qiao et al., 2017). IONIQ 5 er ca. 1,07 ganger så tung som referansebilen bruk i studien. Energimengden som da kreves for å produsere en elbil med en vekt tilsvarende vekten til IONIQ 5 vil være som følgende:

Total energimengde for bilproduksjonen: $92\,392\text{ MJ} * \left(\frac{1985}{1863}\right) = 98\,442\text{ MJ}$.

Ifølge opplysningene i studien fra Qiao et al. vil energimengden som kreves for å produsere en elbil med en vekt tilsvarende den til IONIQ 5 være på 98 442 MJ. Dette estimerte energibehovet utgjør et betydelig sprik i datasettet der de andre estimerte energibehovene alle er mer enn en tredjedel større en estimatet basert på opplysningene fra Qiao et al.. På grunnlag av dette så vil estimeringen basert på opplysningene i studien av Qiao et al. bli vurdert som uteligger, også kalt *outlier* på engelsk, i datasettet. Som følge av BAT prinsippet vil derfor 156 000 MJ bli brukt som energimengden som kreves for å produsere en elbil i denne studien.

3.2.2.4 Oppsummering av energi som kreves for bilproduksjon

Som nevnt i metodekapittelet i denne oppgaven så vil resultatene bli presentert i MJ/km og i CO₂e/km. Tabell 17 inneholder energimengden som kreves i bilproduksjonen for hver biltype, samt hvor stort energibehovet fra produksjonen er per kilometer kjørt over bilens levetid.

Tabell 17 Energibehovet i personbilproduksjonen

Bilmodell	Energimengde i bilproduksjonen [MJ]	Energimengde per kilometer kjørt [MJ/km]
Hyundai NEXO	117699	0,55
Hyundai TUCSON	144000	0,67
Hyundai IONIQ 5	156000	0,73

Energimengden som kreves for å produsere hydrogenbilen vil være den laveste av de tre, og elbilen vil kreve de største energimengdene. Dette kan delvis forklares med at batteriet krever en større mengde energi i produksjonen, som da fører til et økt energibehov i hybridbil- og elbilproduksjonen. Energibehovet for hydrogenbilproduksjonen er lavere enn de andre alternativene, dette kan skyldes blant annet et begrenset datagrunnlag, men også siden hydrogenbilene i studiene det ble tatt utgangspunkt i ikke inkluderer et batteri. NEXO vil ha et lite batteri med en størrelse på 1,56 kWh,

men ettersom batteriet er svært lite sammenlignet med de andre bilmodellene så antas det at energibehovet for produksjonen av batteriet i hydrogenbilen er neglisjerbart.

3.3 Beregning av utslipp i CO₂e

I denne delen av kapittelet går jeg gjennom utslipp målt i CO₂e som blir til gjennom drivstoffproduksjonen og personbilproduksjonen. Slik som tidligere nevnt i metodekapittelet så oppgir noen kilder utslipp kun i CO₂ og andre oppgir dem i CO₂-ekvivalenter. Det antas at dette ikke vil ha merkverdig betydning for resultatet av denne studien, og begrepene blir da brukt om hverandre. Der kun CO₂ utslipp er oppgitt og ikke CO₂e utslipp vil dette bli nevnt.

3.3.1 Utslipp EU strømmiksen

EU strømmiksen ligger til grunn for energikjede H-1 og E-1, og som vist i Figur 15 består den av flere ulike energikilder og teknologier. Ettersom denne strømmiksen består av flere teknologier vil utslippet fra denne strømmiksen kunne variere mellom perioder, for eksempel vil et år med mye vind kunne gi økt produksjon av vindkraft slik at utslippet i strømmiksen vil bli noe redusert. NVE opplyser at utslippet til EU strømmiksen har ligget på rundt 300 g CO₂e/kWh de siste årene (NVE, 2020a). Ifølge IEA er utslippet fra EU strømmiksen på ca. 270 g CO₂/kWh, som er lavt sammenlignet med andre moderne økonomier i verden (IEA, 2020b). Merk at IEA sitt utslippstall er oppgitt i CO₂ og ikke CO₂e. European Energy Agency oppgir at utslippsintensiteten fra EU strømmiksen var på 253 g CO₂e i 2019 (European Environment Agency, 2021). Utslippsfaktorene er oppsummert i Tabell 18.

Tabell 18 Utslipp fra EU strømmiksen

Utslipp fra EU strømmiks	Kilde
300 g CO ₂ e/kWh	(NVE, 2020a)
270 g CO ₂ /kWh	(IEA, 2020b)
253 g CO ₂ e/kWh	(European Environment Agency, 2021)

Slik som forklart i metodekapittelet vil gjennomsnittet av disse utslippstallene bli bruk som utslippet fra EU strømmiksen. Gjennomsnittet av disse tre kildene gir et gjennomsnittlig utslipp på 274,33 g CO₂e/kWh, som da er lik 76,20 g CO₂e/MJ. Denne utslippsfaktoren vil bli brukt for EU strømmiksen i denne oppgaven.

3.3.2 Utslipp fossil strømmiks

Den fossile strømmiksen er som tidligere nevnt basert på en strømmiks der 100% av strømmen kommer fra kullkraft. Kulltypen som brukes i kullkraftverkene antas å være lignitt, også kjent som brunkull. Blok og Nieuwlaar opplyser at utslippet fra lignitt er på 101 gram CO₂ per MJ, denne utslippsfaktoren er ikke oppgitt i CO₂e (Blok & Nieuwlaar, 2021). Den samme utslippsfaktoren er også oppgitt av Cleveland og Ayres (Cleveland & Ayres, 2004). Disse forfatterne oppgir også utslippet kun i CO₂ og ikke CO₂e. I denne studien vil 101 gram CO₂e/MJ bli brukt som utslippet fra kullkraft.

3.3.3 Utslipp fornybar strømmiks

Den fornybare strømmiksen som brukes i denne oppgaven tar utgangspunkt i vil utelukkende bestå av strøm produsert fra vindkraft. Vindkraft er en fornybar energikilde, men den er ikke helt uten utslipp. Utslippene fra vindkraft kommer hovedsakelig fra selve byggingen av vindkraftanlegget, kablingen og vedlikehold av vindkraftanlegget, og da ikke når vindturbinene i seg selv er i drift (NVE, 2022).

Tabell 19 oppsummerer ulike utslippstall for vindkraft per kWh produsert fra ulike kilder. Merk at Wang og Sun har oppgitt sitt intervall for utslipp i CO₂ og ikke CO₂e. Det eneste nevneverdige spriket i dataen som har blitt samlet inn for denne oppgaven er fra utslippstallene oppgitt av Arvesen og Hertwich, som oppgir de største utslippstallene fra vindkraftproduksjonen. Felles for utslippsfaktorene er at de er betydelig mindre enn utslippsfaktorene fra EU- og den fossile strømmiksen. Det gjennomsnittlige utslippet fra disse kildene er 8,57 g CO₂e/kWh, som er lik 2,38 CO₂e/MJ. Dette ble funnet ved å først ta gjennomsnittet fra den enkelte studie, og etter det å finne gjennomsnittet av alle gjennomsnittene. Utslippsfaktorverdien på 2,38 CO₂e/MJ blir brukt i denne oppgaven for den fornybare strømmiksen.

Tabell 19 Utslipp fra vindkraft

Utslipp fra vindkraftproduksjon [g CO ₂ e/kWh]	Kilde
8,0 - 20,0 g CO ₂ e/kWh	(Arvesen & Hertwich, 2012)
2,8 - 7,4 g CO ₂ e/kWh	(Jacobsen, 2009)
5 - 8,2 g CO ₂ /kWh	(Wang & Sun, 2012)

3.3.4 Utslipp norsk strømmiks

NVE oppgir at den norske strømmiksen i 2019 hadde et utslipp på 17 gram CO₂e per kWh (NVE, 2020a). Omregnet er dette lik 4,72 g CO₂e/MJ. Denne utslippsfaktoren vil bli brukt for den norske strømmiksen i denne studien.

3.3.5 Utslipp fra naturgass

Naturgass er energikilden som brukes for å produsere hydrogen i energikjede H-4, men bruken av naturgass vil medføre utslipp av drivhusgasser. Naturgass har en utslippsfaktor på 56 gram CO₂/MJ ifølge Blok og Nieuwlaar og Cleveland og Ayres (Blok & Nieuwlaar, 2021; Cleveland & Ayres, 2004). og denne verdien vil bli brukt videre i denne oppgaven. Merk at denne utslippsfaktoren er oppgitt i CO₂ og ikke CO₂e.

3.3.6 Utslipp dampreforming

Under dampreformeringsprosessen vil det oppstå utslipp av CO₂ og metan. Dette er på grunn av at noe naturgass ikke reagerer og derfor ikke blir omdannet, mens CO₂ er et biprodukt av dampreformeringsprosessen. NVE anslår utslippet fra dampreforming til å være på rundt 8 tonn CO₂ per tonn hydrogen produsert, som er lik 8 kg CO₂ per kg hydrogen (NVE, 2019). Budsberg et al. hevder derimot at utslippet fra dampreforming vil være på 10,8 kg CO₂e per kg hydrogen produsert (Budsberg et al., 2015). Jeg velger å bruke utslippet oppgitt av Budsberg et al. Begrunnelsen min for dette er at dette valget er at utslippstallet til Budsberg et al. er oppgitt i CO₂e og vil dermed ta hensyn til flere klimagasser enn verdien oppgitt fra NVE.

3.3.7 Utslipp fra råolje

Råolje blir bare benyttet i energikjede B-1, der råoljen brukes til å produsere bensin for hybridbilen. Utslippsfaktoren for råolje er på 73 g CO₂/MJ som beskrevet av Cleveland og Ayres (Cleveland & Ayres, 2004). Blok og Nieuwlaar beskriver også denne utslippsfaktoren til å være på 73 g CO₂/MJ, og dette vil da være utslippsfaktoren som benyttes for råolje i oppgaven (Blok & Nieuwlaar, 2021) Merk at denne utslippsfaktoren er oppgitt i CO₂ og ikke CO₂e.

3.3.8 Utslipp fra personbilproduksjonen

I dette delkapittelet går jeg gjennom utslipp fra personbilproduksjonen for de ulike personbilene i studien. Jeg antar at forholdet mellom utslippsmengden som blir til ved å produsere en personbil og vekten på personbilen er lineær. Dette gjøres ettersom de ulike bilmodellene og referansebilene analysert i andre studier vil ha en vekt som er ulik vekten til bilmodellene benyttet i denne oppgaven. Denne fremgangsmåten er lik den som ble benyttet for å finne energimengden som kreves for å produsere personbiler. Det gjør det nødvendig å justere utslippene fra personbilene for å få et mer realistisk bilde av utslippene når en antar en lineær sammenheng mellom bilvekt og utslipp.

3.3.8.1 Hydrogenbil

Pistoria har i sin bok fra 2010 analysert en hydrogenbil med en antatt vekt på 1300 kg, og konkludert med at det kreves et utslipp på 5390 kg CO₂ for å produsere en slik hydrogenbil (Pistoria, 2010). Derimot vil NEXO ha en totalvekt på 1889 kg, slik at dette utslippstallet må justeres før det brukes videre som data. Som tidligere nevnt er NEXO ca. 1,45 ganger så tung som referanse bilen brukt av Pistoria. Følgende formel brukes for å estimere utslippet fra produksjonen av Hyundai NEXO:

Totale utslipp fra produksjonen = utslipp fra produksjonen * (vekt til referansebil i kg)/(vekt til bilen brukt i studien i kg).

$$\text{Totale utslipp fra produksjonen} = 5390 \text{ kg CO}_2 * \left(\frac{1889 \text{ kg}}{1300 \text{ kg}} \right) = 7832 \text{ kg CO}_2$$

Wang et al. har i sin studie fra 2013 konkludert med at hydrogenbilproduksjonen for en hydrogenbil med en totalvekt på 1144 kg slipper totalt ut 2910 kg CO₂. Referanse bilen brukt i denne studien, Hyundai NEXO, vil veie ca. 1,65 ganger så mye som referanse bilen brukt i studien til Wang et al. Dette utslippet justeres ved følgende beregning:

$$\text{Totale utslipp fra produksjonen} = 2910 \text{ kg CO}_2 * \left(\frac{1889 \text{ kg}}{1144 \text{ kg}} \right) = 4805 \text{ kg CO}_2$$

I en artikkel fra 2022 skrevet av Buberger et al. har forfatterne vurdert 790 ulike bilmodeller for å finne utslippet i CO₂e fra bilmodellene over deres levetid. Forfatterne har i resultatet av forskningsartikkelen deres kommet frem til utslippstall fra bilproduksjonsprosessen, der utslippet fra bilproduksjonen er på 4,56 kg CO₂e per kg bil og 83,50 kg CO₂e per kWh batteri (Buberger et al., 2022). Ved å bruke disse utslippsfaktorene for NEXO vil beregningen av produksjonsutslippet ved bruk av følgende formel:

Produksjonsutslipp = Utslippsfaktor for bilproduksjon [kg CO₂e/kg] * vekt til bilen [kg] +
utslippsfaktoren for batteriproduksjonen [kg CO₂e/kWh] * batteristørrelsen [kWh]

$$\text{Produksjonsutslipp} = 4,56 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} * 1889 \text{ kg} + 83,5 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} * 1,56 \text{ kWh} = 8744,10 \text{ kg CO}_2\text{e}.$$

Det totale utslippet fra produksjonen av NEXO er estimert til å være 8744,1 kg CO₂e. Dette estimatet er nærme estimatet fra Pistoria, men nesten dobbelt så stort som Wang et al. sitt. I denne studien velger jeg å bruke det estimerte utslippet som ble beregnet med opplysningene gitt av Buberger et al. Begrunnelsen min for dette er at dette lar meg ta hensyn til den spesifikke batteristørrelsen i NEXO, noe som gir et mer realistisk estimat. Buberger et al. bruker også CO₂e i sine beregninger som vil gi et mer fullstendig tall på utslippene, noe de andre forfatterne ikke gjør. Modellen deres er også satt opp til å være lineær som kommer overens med antakelsen om at vekt og utslipp har en lineær sammenheng.

3.3.8.2 Hybridbil

Onat et al. har i sin artikkel sett på utslipp ved produksjonen av plug-in hybridbiler. I deres artikkel har de konkludert med at produksjonsutslippet fra en plug-in hybridbil vil være på 0,04046 kg CO₂e/km over bilens levetid. Det ble antatt at en personbil, uavhengig av dens drivstofftype, kjører 240 000 km totalt over levetiden. Videre er det antatt at utslippet fra batteriproduksjonen for en tilsvarende ladbar hybridbil vil være på 0,00568 kg CO₂e/km kjørt over levetiden (Onat et al., 2015). Produksjonsutslippet for en Hyundai TUCSON med de oppgitt verdiene finnes ved følgende formel:

Produksjonsutslipp = utslippsfaktor [kg CO₂e/km] * avstand kjørt over levetiden [km] + utslippsfaktor for batteri [kg CO₂e/km] * avstand kjørt over levetiden [km]

Produksjonsutslipp = 0,04046 kg CO₂e/km * 240 000 km + 0,00568 kg CO₂e/km * 240 000 km = 9710,45 kg CO₂e.

Dette resulterer i et estimert produksjonsutslipp på 9710,45 kg CO₂e, ved bruk av opplysningene fra studien fra Onat et al..

I en artikkel fra Shiau et al. har forfatterne også estimert utslippet fra produksjonen av en ladbar hybridbil. Forfatterne antar at alle biler, uavhengig av drivstofftype, vil ha et produksjonsutslipp på 8500 kg CO₂e. Derimot vil det bli beregnet ytterlige utslipp for batteriproduksjonen, der de bruker et utslipp på 120 kg CO₂e per kWh batteri som produseres (Shiau et al., 2009). Produksjonsutslippet til Hyundai NEXO estimeres ut ifra følgende formel:

Produksjonsutslipp = Standard utslipp [kg CO₂e] + utslippsfaktor batteriproduksjon [kg CO₂e/kWh] * batteristørrelse [kWh]

Produksjonsutslipp = 8500 kg CO₂e + 120 kg CO₂e/kWh * 1,56 kWh = 9622,96 kg CO₂e.

Ved å bruke Shiau et al. sine opplysninger vil TUCSON ha et totalt produksjonsutslipp på 9622,96 kg CO₂e. Disse verdiene er basert på den gjennomsnittlige utslippet fra livsløpet av personbiler i USA (Shiau et al., 2009).

Artikkelen fra Buberger et al. gir, som tidligere nevnt, muligheten til å beregne det estimerte utslippet fra selve bil- og batteriproduksjonen, ettersom de oppgir estimater på utslippet som blir til ved produksjonen (Buberger et al., 2022). Ved å bruke estimatene oppgitt i artikkelen fra Buberger et al. er det mulig å estimere utslippet fra produksjonen av TUCSON ved bruk av formelen nedenfor:

Produksjonsutslipp = Utslippsfaktor for bilproduksjon [kg CO₂e/kg] * vekt til bilen [kg] + utslippsfaktoren for batteriproduksjonen [kg CO₂e/kWh] * batteristørrelsen [kWh]

Totale utslipp fra produksjon = $4,56 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} * 1863 \text{ kg} + 83,5 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} * 9,36 \text{ kWh} = 9413,47 \text{ kg CO}_2\text{e}$.

De tre vitenskapelige artiklene som er benyttet til å estimere produksjonsutslippet fra hybridbilen har alle gitt estimer som ikke avviker fra hverandre i stor grad. Det høyeste utslippsestimatet er på 9710,45 kg CO₂e, og det laveste vil være på 9413,47 kg CO₂e. Jeg velger å bruke estimatet på 9413,47 kg CO₂e som utslippet som kommer fra hybridbilen, ettersom dataen i Buberger et al. lar oppgaven ta hensyn til bilens vekt og batterikapasitet i en større grad enn de andre kildene.

3.3.8.3 Elbil

De estimerte utslippene fra å produsere en elbil er ifølge Qiao et al. på 15005 kg CO₂e for en elbil som veier 1863 kg, inkludert batteri (Qiao et al., 2017). Elbilen brukt som referansebil i denne studien, Hyundai IONIQ 5, vil ha en totalvekt på 1985 kg, som vil være ca. 1,07 ganger så tung som referansebilen brukt i studien til Qiao et al.. For å estimere utslippet for en elbil tilsvarende IONIQ 5 brukes følgende utregning:

$$\text{Totale utslipp fra produksjonen} = 15\,005 \text{ kg CO}_2\text{e} * \left(\frac{1985 \text{ kg}}{1863 \text{ kg}} \right) = 15\,987,61 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Onat et al. har i sin artikkel også sett på produksjonsutslippene fra elbiler. I artikkel har forfatterne konkludert med at produksjonsutslippet fra en elbil vil være på 0,04383 kg CO₂/km over bilens levetid. Det ble antatt at en personbil, uavhengig av dens drivstofftype, kjører 240 000 km totalt over levetiden. Det er også antatt at utslippet fra batteriproduksjonen for den tilsvarende referanse elbilen vil være på 0,00559 kg CO₂e/km kjørt over levetiden (Onat et al., 2015). Produksjonsutslippet estimeres da gjennom følgende formel:

Produksjonsutslipp = utslippsfaktor [kg CO₂e/km] * avstand kjørt over levetiden [km] + utslippsfaktor for batteri [kg CO₂e/km] * avstand kjørt over levetiden [km]

$$\text{Produksjonsutslipp} = 0,04383 \text{ kg CO}_2\text{e/km} * 240\,000 \text{ km} + 0,00559 \text{ kg CO}_2\text{e/km} * 240\,000 \text{ km} = 10\,519,61 \text{ kg CO}_2\text{e}.$$

Dette resulterer i et estimert produksjonsutslipp på 10 519,61 kg CO₂e for IONIQ 5 ved bruk av Onat et al. sine verdier.

Shiau et al. sin artikkel benyttes til å beregne det estimerte produksjonsutslippet fra elbilproduksjonen. Som tidligere nevnt antar Shiau et al. at alle personbilene har et produksjonsutslipp på 8500 kg CO₂e pluss ytterligere 120 kg CO₂e for hver kWh-batteristørrelse i bilmodellen (Shiau et al., 2009). IONIQ 5 har en batteristørrelse på totalt 72,6 kWh. Dette medfører

at det estimerte produksjonsutslippet for IONIQ 5 med Shiau et al. sine opplysninger vil være estimert til 17 212 kg CO₂e. Denne estimeringen ble funnet gjennom bruk av følgende formel:

Produksjonsutslipp = Standard utslipp [kg CO₂e] + utslippsfaktor batteriproduksjon [kg CO₂e/kWh] * batteristørrelse [kWh]

Produksjonsutslipp = 8500 kg CO₂e + 120 kg CO₂e/kWh * 72,6 kWh = 17 212 kg CO₂e.

Til slutt benytter jeg meg av artikkelen til Buberger et al.. Den nevner at utslippet per kg personbil er estimert til 4,56 kg CO₂e, og utslippet fra batteriproduksjonen er estimert til å være på 83,50 kg CO₂e per kWh batteri (Buberger et al., 2022). For å beregne utslippet av å produsere en IONIQ 5 med disse estimatene vil formelen bli som følgende:

Produksjonsutslipp = Utslippsfaktor for bilproduksjon [kg CO₂e/kg] * vekt til bilen [kg] + utslippsfaktoren for batteriproduksjonen [kg CO₂e/kWh] * batteristørrelsen [kWh]

Produksjonsutslipp = 4,56 kg CO₂e/kg * 1985 kg + 83,5 kg CO₂e/kWh * 72,6 kWh = 15 113,70 kg CO₂e.

De ulike utslippsestimatene fra bilproduksjonen viser et intervall mellom 17 212 kg CO₂e ned til 10 519,62 kg CO₂e. Estimaten funnet ved å bruke opplysningene fra Buberger et al. og Qiao et al er derimot forholdsvis like. Ettersom to av estimatene peker i retningen av at produksjonsutslippet vil være rundt 15 tonn CO₂e vil en av disse benyttes som utslippsestimatet for produksjonen. Jeg velger i denne oppgaven å benytte meg av estimatet som ble beregnet med estimatene fra Buberger et al. Begrunnelsen min for dette er at opplysningene i denne artikkelen lar meg i større grad ta hensyn til utslippene fra batteriproduksjonen enn det artikkelen fra Qiao et al gjør.

3.3.8.4 Oppsummering over utslipp fra bilproduksjonen

Tabell 20 viser utslippet til de ulike bilmodellene, fordelt på produksjonen av selve personbilen og batteriproduksjonen, samt utslippet for den totale produksjonen over personbilens levetid.

Tabell 20 Oversikt over bilproduksjonsutslippene

Bilmodell	Utslipp fra bilproduksjon	Utslipp fra batteriproduksjon	Totale utslipp	Utslipp per km kjørt over levetiden
Hydrogen - NEXO	8613,84 kg CO ₂ e	130,26 kg CO ₂ e	8744,10 kg CO ₂ e	0,041 kg CO ₂ e/km
Hybrid - TUSCON	8615,24 kg CO ₂ e	798,24 kg CO ₂ e	9413,47 kg CO ₂ e	0,044 kg CO ₂ e/km
Elektrisk - IONIQ 5	9051,60 kg CO ₂ e	6062,1 kg CO ₂ e	15113,70 kg CO ₂ e	0,071 kg CO ₂ e/km

I denne oppgaven vil den hydrogendrevne bilen NEXO ha det laveste produksjonsutslippet målt i CO₂e, etterfulgt av hybridbilen og til slutt elbilen, som vil ha det høyeste produksjonsutslippet.

Tabellen viser at des større batteri bilmodellen har des større utslippene vil være. Utslipet fra batteriproduksjonen står for ca. 40% av det totale produksjonsutslippet til IONIQ 5. Produksjonen av hydrogenbilen NEXO har i seg selv har et lavt utslipp, dette er delvis ettersom dette er en forholdsvis ny teknologi som ikke er i storskalaproduksjon, samt at kun et begrenset utvalg av hydrogenbiler er tilgjengelige på markedet. Dette gjør at det er lite data tilgjengelig for produksjonen av hydrogenbiler som vil kunne gi utslag i denne studien ved å gi denne bilmodellen et høyere eller lavere utslipp enn den ville hatt i virkeligheten med storskala produksjon. Burberger et al. tar dette usikkerhetsmomentet opp i sin artikkel der de utelater produksjonen av brenselcellen i hydrogenbilen ettersom det er manglende data på dette området (Burberger et al., 2022).

3.4 Oppsummering av kapittel 3

Tabell 21 viser en oppsummering av kapittel 3. Her er dataen som inngår i de ulike energikjedene inkludert, samt resultatene av utregningene som er gjennomført i dette kapitlet.

Tabell 21 Oppsummering over data

Energikjede	H-1	H-2	H-3	H-4	B-1 El	B-1 Fossil	E-1	E-2	E-3
Delprosess									
- Utvinning	IA	0,99	IA	0,99	IA	0,99	IA	0,99	IA
- Transport	IA	0,97	IA	0,997	IA	0,995	IA	0,97	IA
- Lagring	IA	0,99	IA	IA	IA	0,98	IA	0,99	IA
- Strømproduksjon	0,46	0,40	0,48	IA	0,91	IA	0,46	0,40	0,48
- Distribusjon	0,95	0,95	0,94	IA	0,95	IA	0,95	0,95	0,94
- Elektrolyse	0,80	0,80	0,80	IA	IA	IA	IA	IA	IA
- Kjøling	0,70	0,70	0,70	1,00	IA	IA	IA	IA	IA
- Dampreforming eller raffineri	IA	IA	IA	0,85	IA	0,86	IA	IA	IA
- Transport av fossilt drivstoff	IA	IA	IA	0,95	IA	0,99	IA	IA	IA
Utrenginger energibruk									
- ERE [MJ produsert/MJ levert]	4,13	4,95	3,96	1,25	1,17	1,22	2,31	2,77	2,22
- TTW [MJ/km]	1,14	1,14	1,14	1,14	0,60	2,36	0,60	0,60	0,60
- WTT [MJ/km]	3,57	4,50	3,37	0,29	0,10	0,51	0,79	1,07	0,74
- Produksjon [MJ/km]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,67		0,73	0,73	0,73
- Energibruk fra andre delprosesser [MJ/km]	IA	IA	IA	0,40	IA	IA	IA	IA	IA
- WTW [MJ/km]	5,26	6,19	5,06	2,38	3,24		2,13	2,40	2,07
Utrenginger Utslipp									
- Utslipp WTW [g CO ₂ e/km]	358,57	569,29	10,73	194,83	0,36	186,82	106,62	169,27	3,19
- Utslipp bilproduksjon [g CO ₂ e/km]	40,84	40,84	40,84	40,84	43,96		70,59	70,59	70,59
- Totalt utslipp [g CO ₂ e/km]	399,41	610,13	51,57	235,63	231,14		177,20	239,86	73,78

Tabellforklaring til tabell 18:

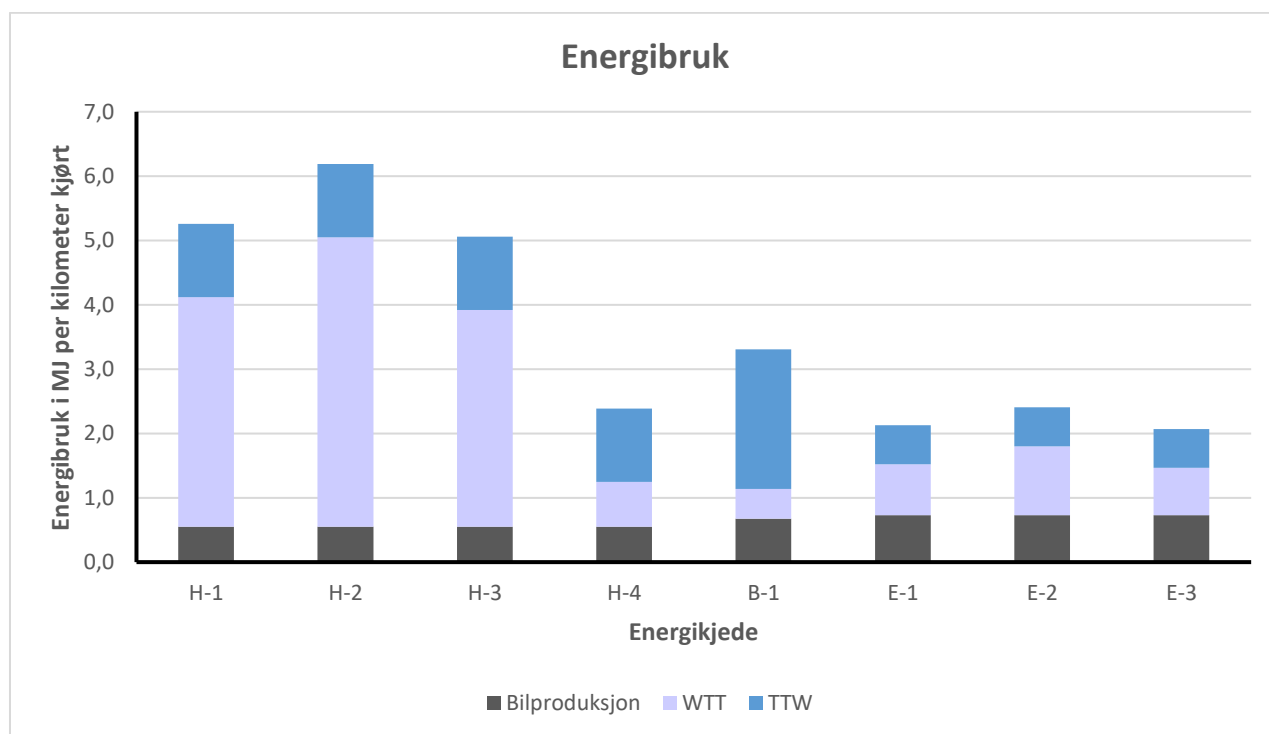
- Der IA er oppgitt er prosessen av ingen interesse, IA, for den aktuelle energikjeden. Disse utgjør ikke del i de aktuelle energikjedene.
- Begrepene WWT, TTW, WTW og ERE er forklart i kapittel 2.
- "Utslipp bilproduksjon [g CO₂e/km]" inkluderer produksjonen av bilen, batteri og fremdriftssystemet.
- "Transport av fossilt drivstoff" er virkningsgraden for transporten av bensin produsert på raffineri og hydrogengass produsert fra dampreforming frem til fyllestasjonen for de ulike personbilene.
- "Utvinning" inkluderer utvinning av kull, gass og olje.
- "Transport" inkluderer bare transport av energikilder, for eksempel kull.

- "Distribusjon " er utelukkende for distribusjon av strøm

4 Resultater og diskusjon

4.1 Resultatet for energibruk

Figur 17 illustrerer totalt energibruk for hver energikjede. Dette er gitt som summen av energibruken til bilproduksjonen, WWT og TTW. Merk at i WWT for energikjede H-4 inkluderer energibruken fra prosessene for dampreformingen av naturgass og kjølingen av hydrogenet.



Figur 17 Resultatet for totalt energibruk

WTT er totalt energibruk fra drivstoffproduksjonen. TTW er totalt energibruk fra drivstoffbruken. Bilproduksjon inkluderer produksjon av kjøretøy, batterier og fremdriftssystem. Se Tabell 4 for spesifisering av energikjedene.

Det kommer tydelig frem i resultatene at energikjede H-1, H-2 og H-3 bruker krever mest energi per kilometer kjørt, der energikjede H-2 har et ca. tre ganger så høyt energikrav som energikjede E-3.

Det er flere grunner til at energibruken i energikjedene H-1, H-2 og H-3 er mye høyere enn de andre energikjedene. Alle disse energikjedene antar en virkningsgrad på kjølingsprosessen på 70%. Dette ble gjort for å hindre en forgrening av energikjeden slik at den ville bli mindre kompleks, samtidig som den tar hensyn til energibruken som går til kjølingen. I motsetning til energikjede H-4, hvor energimengden som kreves for kjølingen har blitt beregnet. Resultatet av dette blir da at det oppstår mer tap i energikjeden. Videre så vil virkningsgraden til de ulike strømmiksene benyttet i de tre hydrogenenergikjedene være lave. Virkningsgraden til EU strømmiksen er estimert til å være 45,55%, den fossile strømmiksen estimert til 40% og den fornybare strømmiksen til 48%. Ettersom disse

virkningsgradene er så lave, vil de føre til en mer enn fordobling av estimatene til WTT verdien. Elektrolyseprosessen vil også være en kilde til tap i disse tre energikildene, som da vil øke energimengden som kreves i hver av disse energikjedene.

WTT energibruken for energikjedene H-4 og B-1 er de laveste av alle energikjedene. En grunn til dette kan være at det benyttes teknologier som er godt utviklet. Produksjon av bensin og dampreforming av naturgass er teknologier som har blitt bruk over lang tid, slik at det har vært mer tid for å effektivisere prosessene for å fremstille bensin og hydrogen fra dampreforming. Dette gjenspeiles i resultatet for energibruken for energikjede H-4 og B-1.

Energikjedene E-1, E-2 og E-3 har de laveste energibruken av alle energikjedene. Dette forklares med at disse tre energikjedene har få delprosesser sammenlignet med de andre energikjedene. Det er færre delprosesser der energitap kan oppstå i disse energikjedene, slik at den totale energimengden som kreves i energikjedene vil være lavere i forhold til de andre energikjedene.

Det bør bemerkes at TTW verdiene for alle energikjedene som bruker samme drivstoff vil være like. TTW er selve forbruket av personbilene per kilometer kjørt. Energikjedene E-1, E-2 og E-3 har samme TTW verdi, det samme gjelder for energikjedene H-1, H-2, H-3 og H-4. Dette er tilfellet ettersom disse energikjedene bruker samme personbil i denne oppgaven. TTW verdien for B-1 er betraktelig større enn TTW verdien for noen av de andre energikjedene. Dette forklares med at bensin har et høyt energiinnhold på 36,2 MJ/liter, sammenlignet med den andre drivstoffene. Resultatet av dette blir at estimeringen av TTW verdien for hybridbilen blir større enn for de andre personbilene i studien. Dette vil derimot ikke være tilfellet for hydrogenbilen, selv om hydrogen har et større energiinnhold enn bensin. Begrunnelsen for dette er at forbruket til hydrogen i NEXO er lavt, med et forbruk på ca. 0,01 kg hydrogen per kilometer kjørt.

Forskjellene mellom energibruken fra kjøretøyproduksjonen er forholdsvis små, men energibruken er størst for produksjonen av IONIQ 5 ettersom bilbatteriet krever en større mengde energi i produksjonen.

Hvis en energikjede har et større energibehov per kilometer enn en annen energikjede vil ikke dette bety at den energikjeden nødvendigvis er verre enn de andre energikjedene. Den vurderingen kan ikke bli tatt før en tar hensyn til utslippet til hver enkelt energikjede. For eksempel vil en energikjede kunne ha et høyt energiforbruk, samtidig som den vil kunne ha lave utslipp av klimagasser.

Resultatene stemmer godt overens med resultatene i studien fra Wang et al. der forfatterne konkluderte med at det å bruke kullkraft til å produsere hydrogen via elektrolyse vil ha et stort

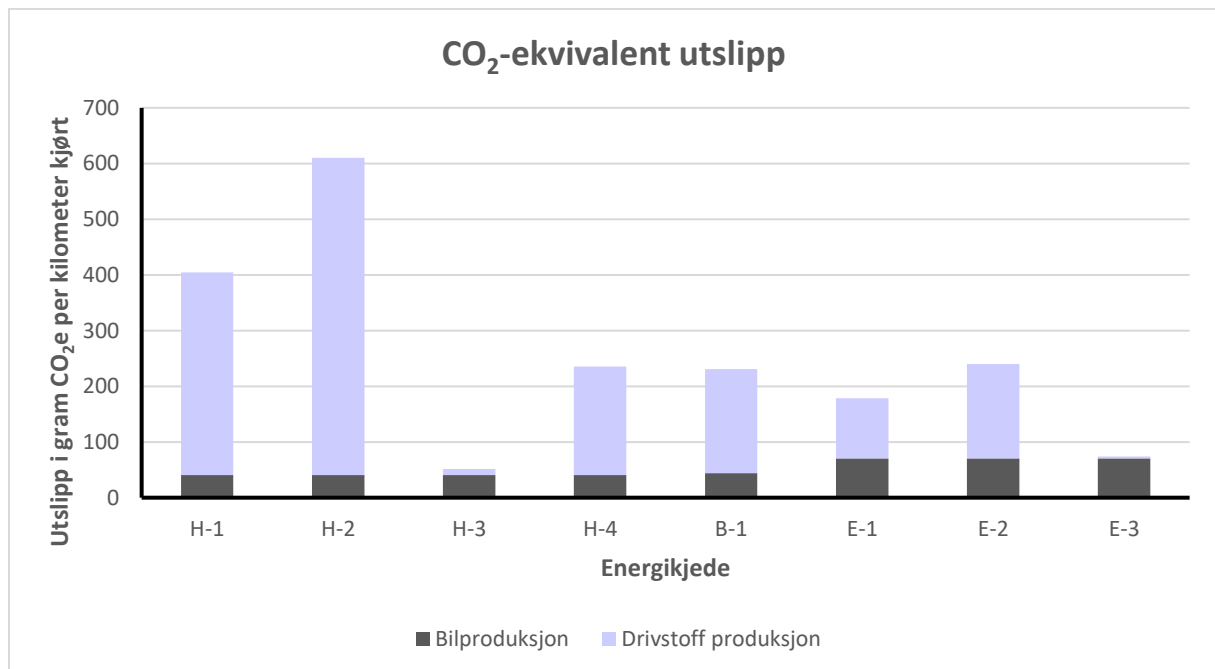
energibehov. Videre konkluderte de med at det å bruke strøm til å drive elektrolyse vil føre til et større energibehov enn det å bruke strøm til direkte bruk i elbiler (Wang et al., 2013).

Resultatet for energibehovet kan bli oppsummert i følgende punkt:

- Den totale energibruken er størst i hydrogenenergikjedene med unntak av energikjeden som bruker dampreforming av naturgass til å produsere hydrogen.
- Det største energikravet fra bilproduksjonen er fra den elektriske bilen, etterfulgt av hybridbilen og hydrogenbilen.
- Strømmenergikjedene som benytter seg av EU strømmiksen og den fornybare strømmiksen er de minst energikrevende per kilometer kjørt.
- Hybridbilen vil ha et stort energibruk fra TTW sammenliknet med de andre energikjedene.

4.2 Resultater for utslipp

Resultatet for utslippet målt i CO₂e er presentert i Figur 18. Resultatet er delt inn i to deler: utslippet fra bilproduksjonen og utslippet av drivstoffproduksjonen for den aktuelle energikjeden. Utslippet fra drivstoffproduksjonen er utslippet fra WTW prosessene.



Figur 18 Resultatet for utslipp

Bilproduksjon inkluderer utslipp fra produksjon av kjøretøy, batteri og fremtidssystem.

Drivstoffproduksjon inkluderer utslippene fra produksjonen av drivstoffet over kjøretøyets levetid. Se Tabell 4 for spesifisering av energikjedene.

Det kommer tydelig frem fra resultatene at energikjede H-2, som er energikjeden der hydrogen blir produsert gjennom elektrolyse ved bruk av strøm fra kullkraft, har det største utslippet per kilometer kjørt over levetiden til personbilen. Derimot vil energikjede H-3 og energikjede E-3 ha de laveste utslippene, dette er energikjedene som benytter seg av den fornybare strømmiksen til å produsere drivstoffene til personbilene. Utslipet fra energikjedene H-4, B-1 og E-2 skiller seg ikke fra hverandre i en betydelig grad. Energikjede H-3 vil ha det laveste utslippet, noe som kan forklares med det er et kunnskapshull rundt produksjonen av hydrogenbiler, samt at elbiler har et større produksjonsutslipp enn det hydrogenbiler har.

Utslipet fra personbilene som benytter samme drivstoff er like. For eksempel vil utslippet for bilproduksjonen for alle hydrogenenergikjedene være like ettersom samme referansebil blir brukt i alle energikjedene.

Energikjede H-2 har det største utslippet fra alle energikjedene. Dette stemmer overens med funnene til Wang et al. i deres studie fra 2013. I denne artikkelen konkluderte forfatterne med at kullkraftdrevet elektrolyse av vann for å produsere hydrogen vil ha et stort utslipp (Wang et al., 2013).

Utslipet fra hydrogenproduksjonen blir redusert betydelig når en fornybar strømmiks brukes til elektrolysen av vann. Dette funnet har også Wulf & Kaltschmitt kommet frem til, der de i sin studie konkluderer med at elektrolyse av vann for å produsere hydrogen vil ha svært lave utslipp sammenlignet med andre strømmikser og produksjonsmetoder for hydrogen (Wulf & Kaltschmitt, 2012).

Sammenlignet med utslippet fra hybrid energikjeden, B-1, vil utslippene til energikjedene H-4 og E-2 være svært like. Det samme nevner Wang et al., der det blir konkludert med at dampreforming ikke vil føre til utslippsreduksjoner sammenlignet med konvensjonelle fossile biler (Wang et al., 2013). Selv om hybridbilen benyttet i denne oppgaven bruker strøm som drivstoff 11% av tiden, så vil den da være tilnærmet lik en fullstendig bensindrevet bil.

Onat et al. konkluderer med at å bruke fornybare energikilder til å produsere strøm for bruk i elbiler, så vil utslippet fra disse bilene bli drastisk redusert sammenlignet med andre strømmikser (Onat et al., 2015). Dette er også tilfellet for resultatene i denne oppgaven, der bruken av en fornybar strømmiks for å produsere drivstoff til personbiler vil redusere utslippet fra drivstoffproduksjonen, sammenlignet med utslippet fra de andre energikjedene i oppgaven. Der den fornybare strømmiksen er benyttet vil drivstoffproduksjonen stå for en svært liten del av de totale utslippene i energikjedene. Wang et al. nevner at strømmiksen i stor grad tilsier hvor store utslippene blir (Wang et al., 2013). I resultatet for denne oppgaven kommer det samme frem. Å variere strømmiksen som

benyttes vil ha utslag for utslippene fra energikjedene, slik som mellom de tre elbil energikjedene, E-1, E-2 og E-3, der ulike strømmikser gir betydelig variasjon i utslippet per kilometer kjørt.

Energikjedene som benytter hydrogen som drivstoff har et større utslipp fra drivstoffproduksjonen enn energikjedene som benytter strøm som drivstoff og benytter de samme strømmiksene. Dette funnet støttes av Bartolozzi et al., som også bemerker at selve drivstoffproduksjonen til elbilene har et lavere utslipp enn produksjon av drivstoff til hydrogenbiler. Dette begrunnes med at det er flere ledd i hydrogenkjedene, slik at det er flere delprosesser der tap kan oppstå, som omsider fører til økte utslipp (Bartolozzi et al., 2013).

Produksjonsutslippene er størst for elbilen, hybridbiler har det nest største produksjonsutslippet og hydrogenbiler har det laveste produksjonsutslippet. Dette skyldes høye utslipp knyttet til batteriproduksjonen, slik at bilmodellene med større batterier vil ha et større utslipp. Men dette vil også være på grunn av mangelfull data for hydrogenbilproduksjon. Ingen hydrogenbiler blir produsert gjennom storskalaproduksjon, og utslippene for en storskalaproduksjon av hydrogenbiler er derfor usikre. Disse funnene er like de som Buberger et al. kom frem til i sin artikkel (Buberger et al., 2022).

Resultatet for utslipp fra energikjedene kan oppsummeres i følgende punkt:

- Større bilbatteri fører til større produksjonsutslipp for personbilene.
- Energikjedene som benytter seg av fornybare energikilder har det laveste utslippet.
- Utslippet for energikjede H-4, B-1 og E-2 varierer ikke fra hverandre i betydelig grad.
- Elektrolyse av vann for å produsere hydrogen ved bruk av strøm kullkraft fører til de største drivstoffproduksjon utslippene.
- Hydrogenenergikjedene vil ha et større utslipp fra drivstoffproduksjonen enn strømmenergikjedene som bruker de tilsvarende strømmiksene.
- Ved bruk av en fornybar strømmiks vil den største andelen av utslippene fra disse energikjedene komme fra bilproduksjonen.

4.3 Følsomhetsanalyse

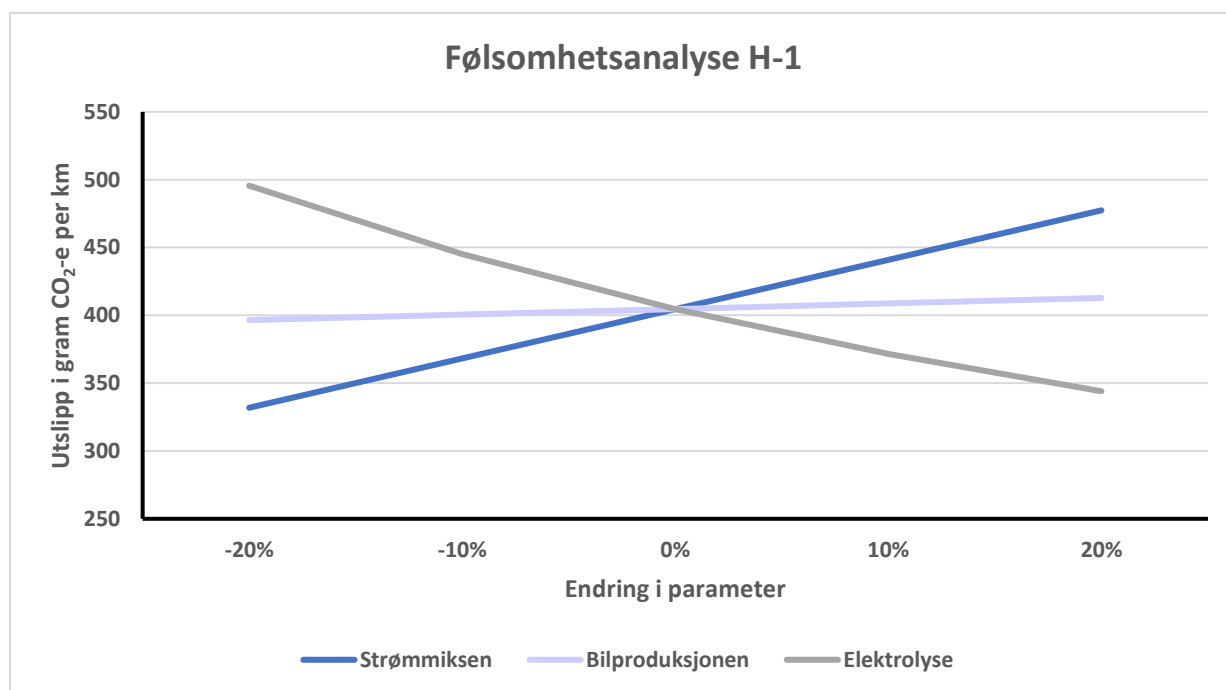
I metodekapittelet har selve konseptet rundt følsomhetsanalyse blitt forklart. Det vil alltid være en viss grad av usikkerhet knyttet til datagrunnlaget og denne usikkerheten vil kunne ha innvirkning på resultatene fra oppgaven. I dette delkapittelet har det blitt utført tre følsomhetsanalyser for å prøve ut robustheten til antakelsene og datagrunnlaget som har blitt lagt til grunn i denne oppgaven. Dette er følsomhetsanalyser for energikjedene H-1, H-4 og B-1. For hver følsomhetsanalyse blir det valgt ut

ulike parametere og data som det blir sett nærmere på. Parameterne som ble valgt er sentrale ledd i energikjedene. Verdien til hver og en av disse parameterne vil økes med opptil 20% og reduseres med opptil 20%. Dette gir da et intervall av verdier for de ulike delprosessene som vil illustrere hvor følsom modellen er for endringer i datagrunnlaget og hvor stor innvirkning dette har på resultatet i oppgaven.

Etter at alle de gjennomførte følsomhetsanalysene har blitt presentert vil det bli presentert en oppsummering av de mest betydningsfulle funnene. I hver følsomhetsanalyse vil det også resultatet som ble presentert i resultatkapittelet bli inkludert, dette er resultatet som vises under *0% endring*. Dette gir et slags referanse scenario som bidrar med å illustrere hvor store endringene potensielt kan bli. Merk at når følsomhetsanalysen utføres på en energikjede vil det inkludere hele energikjeden inkludert bilproduksjon.

4.3.1 Følsomhetsanalyse H-1

I følsomhetsanalysen for energikjede H-1 har tre parametere blitt valgt ut som vil bli sett nærmere på. Dette er parameterne for utslippet til strømmiksen som benyttes til å drive elektrolyseprosessen, utslippet fra bilproduksjonen, og virkningsgraden til elektrolyseprosessen. Følsomhetsanalysen for energikjede H-1 er presentert i Figur 19.



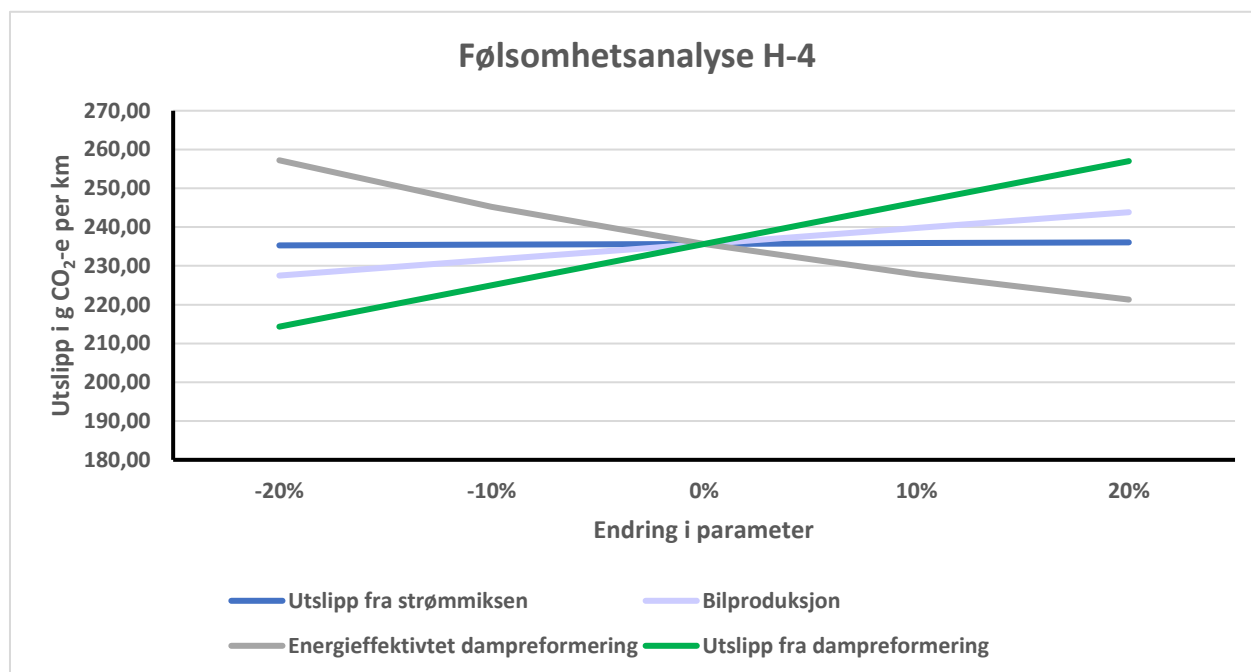
Figur 19 Følsomhetsanalyse H-1

Følsomhetsanalysen for energikjede H-1 viser at utslippene til energikjeden i liten grad blir påvirket av utslippet av hydrogenbilproduksjonen, der grafen for bilproduksjonen holdes tilnærmet vannrett.

Dette kan forklares med at hydrogenbilproduksjonen utgjør en liten del av de totale utslippene over bilens levetid. Derimot vil både utslippet fra EU strømmiksen og virkningsgraden til elektrolyseprosessen ha en betydelig innflytelse på utslippet per kilometer kjørt for energikjeden. Ved å redusere utslippet fra strømmiksen med 20% vil utslippet per kilometer kjørt reduseres med ca. 75 gram målt i CO₂e per kilometer kjørt. Derimot vil en reduksjon av virkningsgraden for elektrolyseprosessen føre til større utslipp ettersom de kreves mer energi for å produsere hydrogen. Modellen er følsom for endringer i datagrunnlaget for effektiviteten til elektrolyseprosessen og utslippet fra strømmiksen som benyttes.

4.3.2 Følsomhetsanalyse H-4

Følsomhetsanalysen for energikjede H-4 utføres på fire ulike parametere: utslipp fra strømmiksen, utslipp fra bilproduksjonen, energieffektiviteten i dampreformeringsprosessen og utslippet fra dampreformeringsprosessen. Dampreformeringsprosessen er en sentral prosess i energikilde H-4, som gjør den interessant å prøve ut i følsomhetsanalysen. Figur 20 viser resultatene fra følsomhetsanalysen for energikjede H-4.



Figur 20 Følsomhetsanalyse H-4

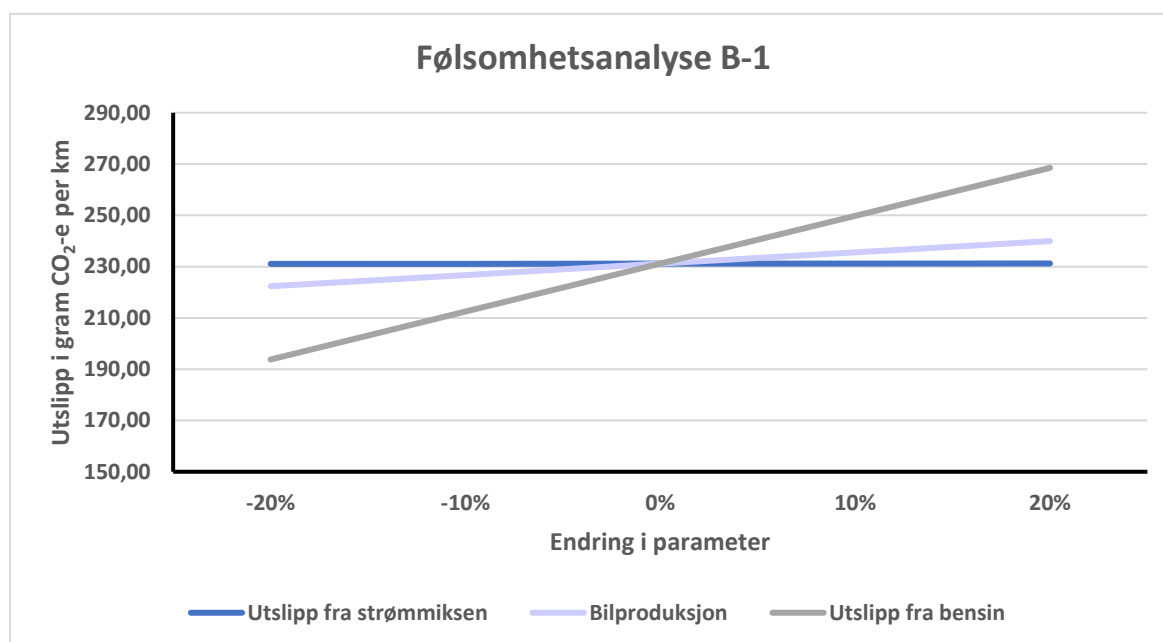
Resultatet for følsomhetsanalysen for energikjede H-4 viser til at modellen i svært liten grad er følsom for endringer i verdiene for utslipp fra bilproduksjonen samt utslipp fra den benyttende strømmiksen. Dette kan forklares med at utslippet fra den norske strømmiksen er lavt med ca. 17 gram målt i CO₂e sluppet ut per kWh produsert, slik at en økning på 20% vil resultere i et utslipp på

ca. 20,4 gram CO₂e per kWh. Dette er en endring på under 4 gram, som da ikke vil ha en betydelig innvirkning på resultatet.

Endringer i utslippet fra dampreformingen og energieffektiviteten til dampreformingen vil derimot ha relativt store utslag på resultatet. Med en minking eller økning på opptil 20% for hver av disse så vil utslippet fra energikjeden øke eller minke med ca. 20 gram CO₂e per kilometer kjørt.

4.3.3 Følsomhetsanalyse B-1

Den siste følsomhetsanalysen som er gjennomført i denne oppgaven er for energikjede B-1. Her ble det valgt ut tre parametere: utslipp fra strømmiksen, utslipp fra bilproduksjonen og utslipp fra bensinforbrenningen.



Figur 21 Følsomhetsanalyse B-1

Fra følsomhetsanalysen i Figur 21 kommer det frem at modellen ikke er følsom for økninger eller reduksjoner av utslippene fra strømmiksen og bilproduksjonen. Hybridbilen benytter strøm kun 11% av tiden under kjøringen, som betyr at økning eller reduksjon av utslippet av strømmiksen vil ha begrenset betydning for resultatet. Modellen er derimot svært følsom for endring av utslippet fra bensinen som blir brukt i hybridbilen. En økning av utslippet fra bensinforbrenningen på 20% vil resultere i en økning i utslippet på 40 gram CO₂e per kilometer kjørt. Modellen vil være mer følsom for utslippet fra bensinforbrenningen ettersom hybridbilen benytter bensin til transport 89% av tiden, slik at en endring i utslippet fra bensinutslippet ha en større innvirkning i modellen enn en endring i strømmiksen som blir brukt til transport.

De viktigste funnene fra følsomhetsanalysene kan oppsummeres i følgende punkt.

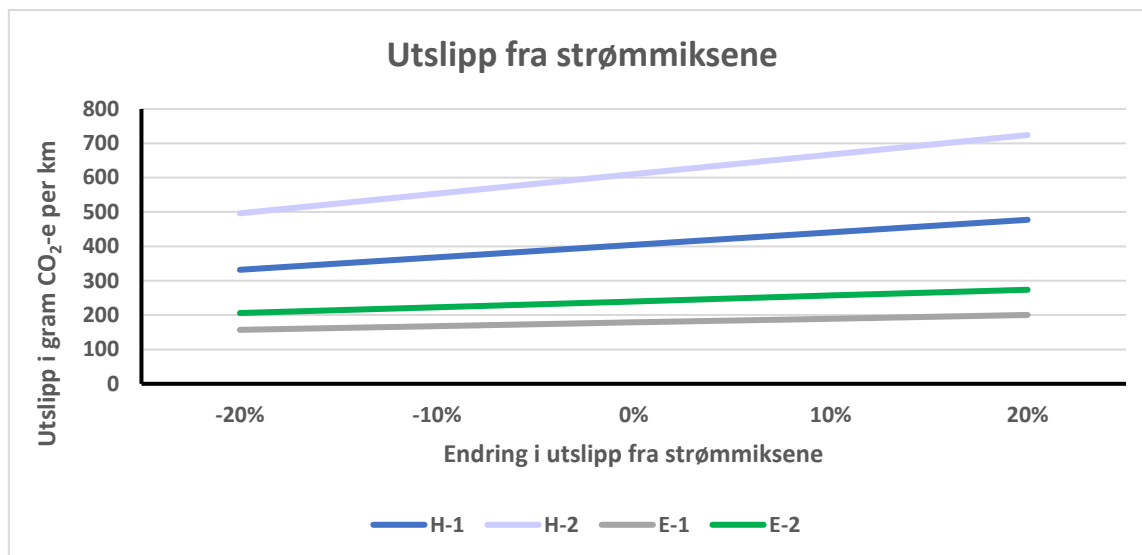
- Modellene er lite følsomme for endringer i utslippet fra bilproduksjonen.
- Utslipp fra strømmiksen vil ha betydelig betydning for resultatet av energikjedene som benytter seg av elektrolyse til å produsere hydrogen.
- Energifkjeden som benytter dampreformeringsprosessen, er lite følsom for endringer i utslipp fra strømmiksen.
- Energifkjedene H-4 er følsomme for endringer i energieffektiviteten og utslippet fra dampreformeringsprosessen.
- Energifkjedene B-1 er følsomme for endringer i utslipp fra bensinforbrenningen.

4.4 Scenarioanalyser

Scenarioanalysene utføres for å kunne estimere utfallet for ulike mulige fremtidige scenarioer for energikjedene. Dette er med andre ord en "hva skjer hvis" analyse. Scenarioanalyser har mye til felles med følsomhetsanalyser, men ved bruk av scenarioanalyse er det mulig å utføre en slik analyse på flere energikjeder samtidig. Merk at når scenarioanalysene utføres på en eller flere energikjeder vil dette inkludere hele energikjeden inkludert bilproduksjonen.

4.4.1 Endring i utslipp fra EU og den fossile strømmiksen

Energifkjedene H-1, H-2, E-1 og E-2 benytter enten EU eller den fossile strømmiksen. Disse strømmiksene kan endres over tid og da kunne redusere utslippene fra strømproduksjonen, for eksempel gjennom karbonfangst eller ved en større fornybarandel i strømmiksene. Dette gjør det interessant å sammenligne hvor mye endringer i utslippet fra de ulike strømmiksene vil påvirke resultatet i oppgaven. I denne scenarioanalysen vil utslippet fra disse to strømmiksene økes med opptil 20% og reduseres med opptil 20%, samtidig som disse energikjedene blir sammenlignet side om side. Altså vil utslippene fra både EU strømmiksen og den fossile strømmiksen endres. Resultatene fra analysen er illustrert i Figur 22.



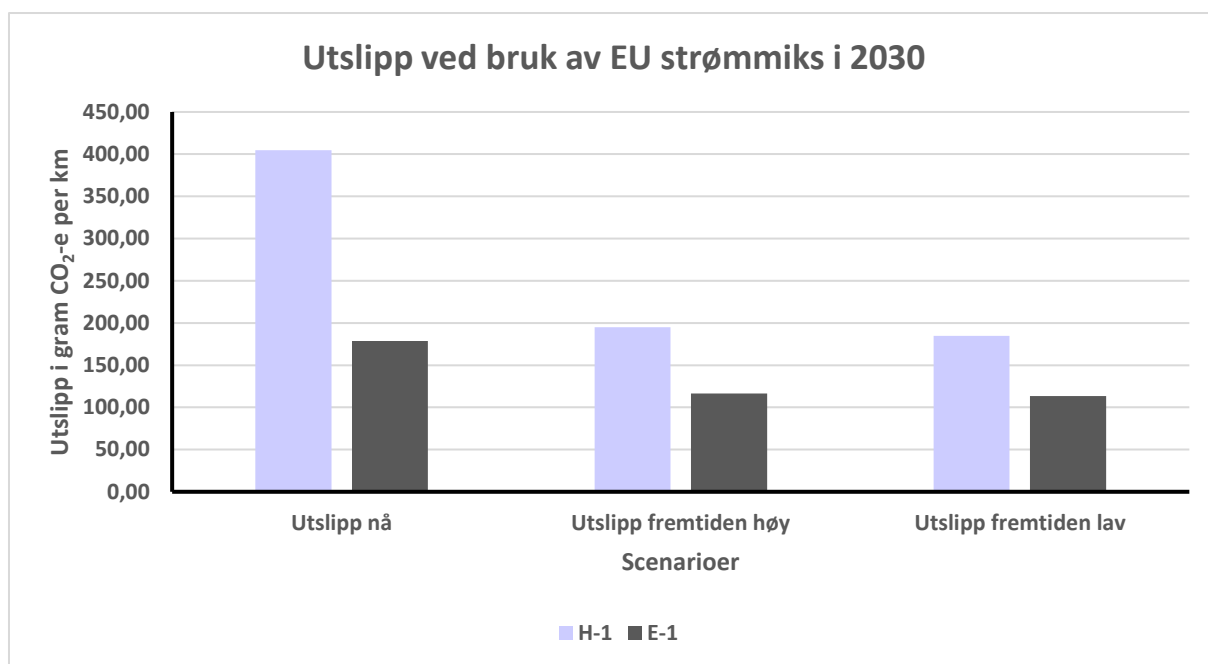
Figur 22 Scenarioanalyse for EU strømmiks og fossil strømmiks. Se Tabell 1 for spesifisering av energikjedene.

Fra scenarioanalysen kommer det tydelig frem at energikjedene som bruker strøm som drivstoff, E-1 og E-2, i mindre grad blir påvirket av endringer i utslippet fra strømmiksen enn de som bruker hydrogen som drivstoff, H-1 og H-2. Dette skyldes at energikjedene som benytter seg av strøm som drivstoff har færre ledd, og da færre prosesser der det oppstår tap. Derimot vil energikjedene som benytter seg av hydrogen som drivstoff inneholde flere delprosesser med flere ledd som medfører økt tap. Det må altså produseres større strømmengder i hydrogenkjedene for å kompensere for energitapet som oppstår i de ulike delprosessene.

4.4.2 Mer klimavennlig strømproduksjon i EU

I oppgaven er det to energikjeder som benytter seg av EU strømmiksen: H-1 og E-1. Ifølge estimatene oppgitt av European Environment Agency er det antatt at utslippet fra EU strømmiksen vil reduseres mot 2030. De anslår at utslippsfaktoren fra EU strømmiksen vil være mellom 110 til 118 gram CO₂e/kWh, som omregnet er lik 30,56 til 32,78 gram CO₂e/MJ (European Environment Agency, 2021). Dette vil være en reduksjon fra tallet brukt i denne studien på utslipp fra EU strømmiksen, som er på 274,33 g CO₂e/kWh. Reduksjonen av utslippet er da på mellom ca. 57 til 60%, avhengig av om utslippet til strømmiksen er 110 eller 118 gram CO₂e/kWh.

I denne scenarioanalysen vil det bli estimert hva utslippet fra energikjede H-1 og E-1 vil bli i 2030 hvis EEA får rett i sine estimater. Merk at denne scenarioanalysen ikke tar hensyn til teknologisk innovasjon innen teknologiene som er benyttet i EU strømmiksen, delprosessene i energikjedene eller for personbilproduksjonen. Dette betyr at det antas i denne analysen at virkningsgradene for delprosessene og strømproduksjonen holder seg uendret mot 2030.

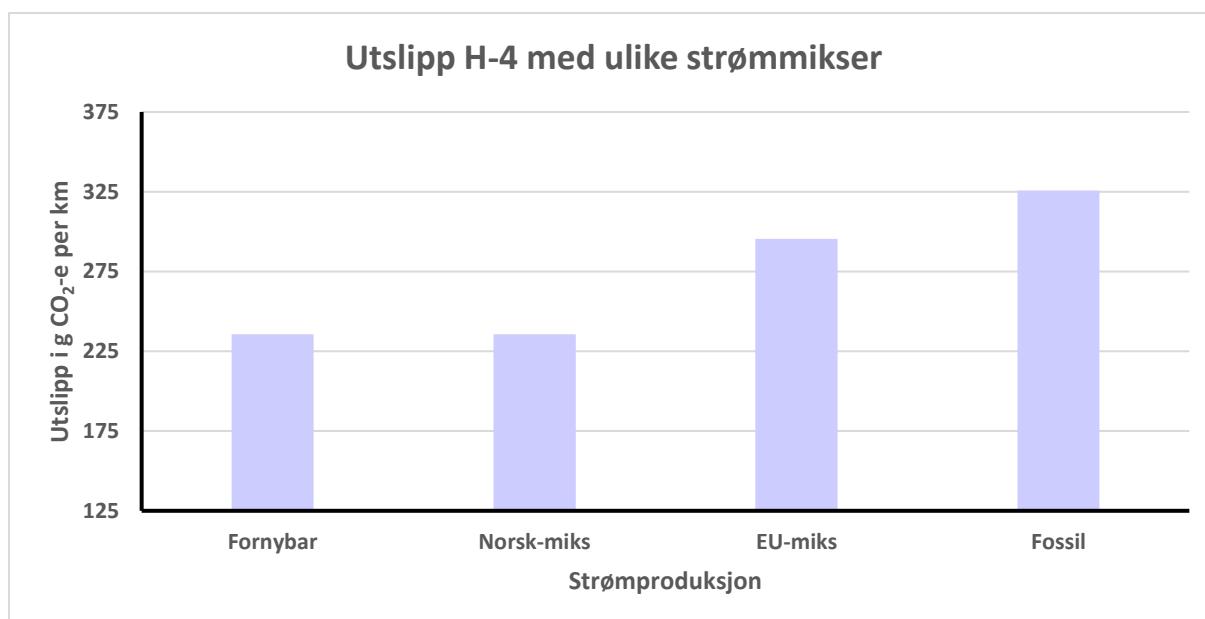


Figur 23 Scenarioanalyse mer klimavennlig strømproduksjon i EU

I Figur 23 er *Utslipp fremtiden høy* utslippet energikjedene vil ha hvis utslippsfaktoren blir 118 gram CO₂e/kWh og *Utslipp fremtiden lav* er utslippet til energikjedene hvis utslippsfaktoren blir 110 gram CO₂e/kWh. Fra Figur 23 kommer det tydelig frem at utslippene for energikjedene reduseres betydelig ved å bruke den estimerte utslippsfaktoren fra den fremtidige EU strømmiksen. Selv om det er forskjeller mellom scenariet med høyt og lavt fremtidig estimert utslipp, så vil de to fremtidige scenarioene utgjøre en betydelig utslippsreduksjon i forhold til situasjonen i dag. H-1 vil ha større utslipp enn E-1 ettersom den har flere tapsledd gjennom energikjeden, men utslippet vil reduseres betraktelig.

4.4.3 Ulike strømmikser for fossil hydrogenproduksjon

I energikjede H-4 blir naturgass benyttet til å produsere hydrogen som drivstoff til hydrogenbilen. Energikjeden inkluderer en prosess for dampreforming av naturgass og en annen for kjøling av den produserte hydrogengassen. For å kunne gjennomføre disse prosessene så kreves det en tilførsel av energi, som i denne oppgaven er antatt å bli levert gjennom strøm fra den norske strømmiksen. I denne scenarioanalysen vil de tre andre strømmiksene som har blitt benyttet i de andre energikjedene i oppgaven bli benyttet for å gjennomføre dampreforming og kjølingen. Dette gjøres for å observere hvor store de estimerte utslippene blir hvis den fornybare, den fossile eller EU strømmiksen benyttes de ulike prosessene, istedenfor den norske strømmiksen som benyttes i dag. Resultatene er illustrert i Figur 24.



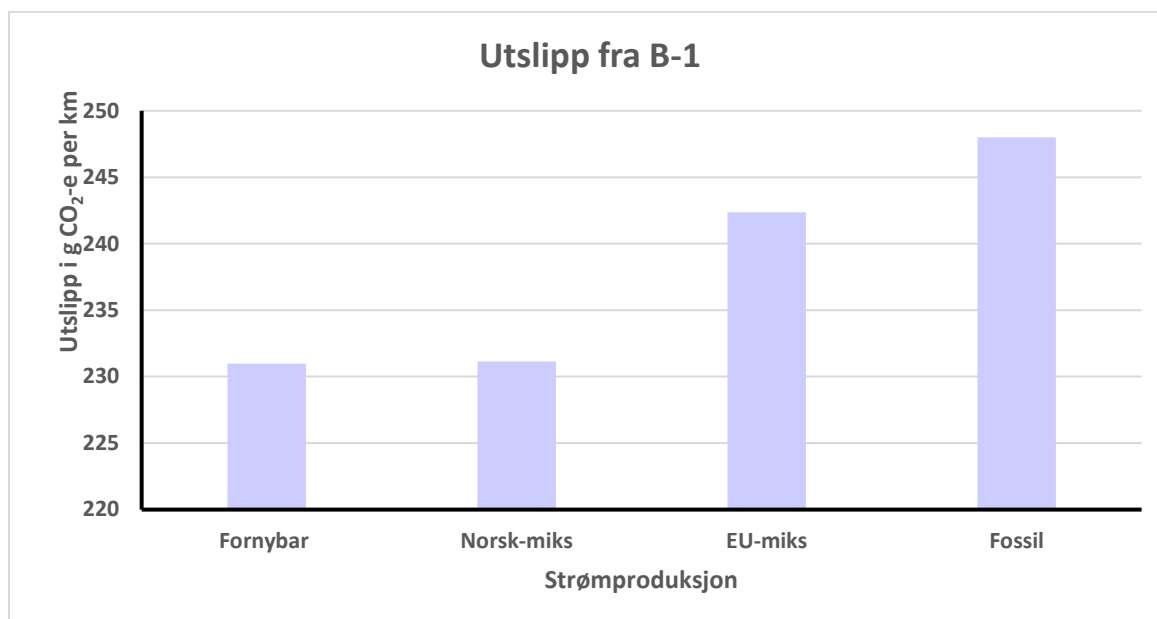
Figur 24 Scenarioanalyse ulike strømmikser i hydrogenproduksjon H-4

Resultatet fra scenarioanalysen viser at det er nesten ikke eksisterende forskjell i utslippet fra energikjede H-4 om en bruker den fornybare strømmiksen fremfor den norske strømmiksen. Dette forklares med at den norske strømmiksen har en høy fornybarandel på over 90%, slik at den er tilnærmer fornybar. Utslippene vil økes betraktelig om EU eller den fossile strømmiksen brukes til å drive dampreforming og kjøleprosessene. Ved bruk av den fossile strømmiksen vil utslippet fra energikjeden H-4 øke med nesten 100 g målt i CO₂e per kilometer kjørt. Dette er på grunn av at utslippet til den norske strømmiksen er mye lavere enn fra den fossile strømmiksen sine utslipp. Altså vil utslippene fra energikjede H-4 øke betydelig når den benytter seg av EU- eller den fossile strømmiksen sammenlignet med den norske strømmiksen som det ble tatt utgangspunkt i denne oppgaven.

4.4.4 Ulike strømmikser for hybridbilen

Den siste scenarioanalysen som utføres i denne oppgaven blir utført på energikjede B-1. Dette er energikjeden der det benytter en hybridbil, som 11% av tiden benytter strøm som drivstoff og den resterende andelen av tiden bensin. Fra følsomhetsanalysen som ble utført på energikjede B-1 kom det frem at en reduksjon eller økning av utslippet fra den norske strømmiksen ikke påvirker utslippet fra B-1 i noen betydelig grad. Derimot vil utslippene fra B-1 kunne endre seg betydelig hvis andre strømmikser benyttes i energikjeden istedenfor den norske. I denne scenarioanalysen erstattes den norske strømmiksen, som har ble brukt i denne energikjeden tidligere, med den fornybare, den fossile og EU strømmiksen for å estimere utslippene B-1 ville hatt om disse strømmiksene ble benyttet istedenfor den norske strømmiksen. Dette er en aktuell problemstilling ettersom mange

hybridbiler vil benytte EU strømmiksen når de brukes i EU. Figur 25 viser resultatet fra scenarioanalysen.



Figur 25 Scenarioanalyse ulike strømmikser i B-1

Resultatet fra scenarioanalysen viser at det ikke er en betydelig forskjell i utslipp om en bruker den fornybare strømmiksen fremfor den norske, ettersom den som tidligere nevnt er tilnærmet fornybar. Utslippene vil derimot øke med ca. 10 g CO₂e per kilometerkjørt ved bruk av EU strømmiksen og øke mer enn 15 g CO₂e per kilometer ved bruk av den fossile strømmiksen. Økningene blir ikke større enn dette ettersom hybridbilen bare benytter strøm som drivstoff 11% av tiden, og den resterende 89% av tiden benytter bensin. Slik at utslippet fra bensin i større grad dikterer hvor stort utslippet fra energikjede B-1 blir. Onat et al. har i sin publikasjon kommet frem til samme resultat, der de konkluderer med at en fornybar strømmiks resulterer i lavere utslipp for ladbare hybridbiler (Onat et al., 2015).

De sentrale funnene fra scenarioanalysene kan oppsummeres i følgende punkt:

- En økning eller reduksjon av utslippene fra strømmiksene vil ha stor betydning for utslippet per kilometer kjørt for energikjedene som benytter seg av elektrolyse til å produsere hydrogen enn energikjedene som benytter strøm som drivstoff.
- Ved bruk av de estimerte fremtidige utslippsfaktorene for EU strømmiksen vil utslippene fra energikjedene som benytter denne strømmiksen reduseres med mer enn 50% mot 2030.
- Valget av strømmiksen til dampreforming og kjølingsprosessene vil kunne endre det endelige utslippet fra energikjeden vesentlig.

- Valg av strømmiks for energikjeden som bruker hybridbilen vil i liten grad ha betydning for utslippet per kilometer kjørt ettersom strøm bare benyttes som drivstoff 11% av kjøretiden.

4.5 Vurdering av datakvalitet

I denne delen av resultat og diskusjonskapittelet skal jeg gå gjennom datakvaliteten i oppgaven, samt noen avgrensninger som er del av oppgaven.

Datagrunnlaget i denne oppgaven baserer seg utelukkende på sekundærdata, dette krever et godt datagrunnlag. Dataen er hentet fra ulike kilder, studier og analyser som har benyttet seg av ulike antakelser og fremgangsmåter. Dette vil føre til at ulike kilder oppgir ulike verdier for utslipp, virkningsgrader og andre data brukt i oppgaven. Noen kilder oppgir tall i ulike enheter, men disse har blitt regnet om til enhetene som er benyttet i oppgaven. For eksempel utslippsfaktorene for de ulike strømmiksene er oppgitt i g CO₂e/kWh, men ble omregnet til g CO₂e/MJ.

I oppgaven har tre relativt like personbiler blitt brukt som referansebiler i energikjedene. Det er ikke store avvik i vekt mellom dem og de er fra samme bilfabrikant, som gjør at oppgaven har et sammenligningsgrunnlag med relativt like personbiler. Det største avviket mellom dem er rekkevidden hver personbil har. Derimot mangler det spesifikke produksjonsdata for de valgte referansebilene i oppgaven. Dette er data som ikke er lett tilgjengelig og derfor ble andre kilder for personbilproduksjon benyttet for å estimere energibruken og utslippet for produksjonen av de ulike bilmodellene. Denne dataen er basert på generiske biler benyttet i ulike studier eller av bilmodeller som benytter seg av samme drivstoff som referansebilene i oppgaven. En slik tilnærming vil være en kilde til usikkerhet i oppgaven, slik at det er viktig å påpeke at de beregnede energi- og utslippsmengdene er estimerer som er ment for å gi innsikt inn i problemstillingen og ikke en fasit. Følsomhetsanalysene viser derimot til at energikjedene i liten grad er følsomme for endringer i utslippet fra bilproduksjonen, slik at en ending i utslippet innenfor dette intervallet mest sannsynlig ikke vil ha stor betydning for resultatet.

Som nevnt har BAT prinsippet blitt brukt som grunnlag til å bestemme hvilke data fra datagrunnlaget som inkluderes videre i utregningene foretatt i oppgaven. Dette har i hovedsak resultert i at de mest effektive virkningsgradene ble brukt i energikjedene i oppgaven. Derimot har lavere virkningsgrader ikke bli tatt hensyn til. Dette gjør at virkningsgradene for de ulike delprosessene kan være svært høye som ikke nødvendigvis samsvarer med virkeligheten og da utgjør en kilde til usikkerhet i oppgaven.

Ved beregningen av virkningsgradene for EU strømmiksen og den norske strømmiksen er det noen energiteknologier som har fått tildelt en virkningsgrad på 100%. Dette gjelder energiteknologiene

«Andre kilder» i EU strømmiksen, og «Andre kilder» i den norske strømmiksen. Disse energiteknologiene utgjør en liten andel av hver av disse strømmiksene. Ideelt burde alle energiteknologiene være oppgitt og ingen slike «andre» energiteknologier være inkludert, slik at den riktige virkningsgraden kan brukes i beregningen av produksjonseffektiviteten i strømmiksene. Dette vil gjøre at jeg muligens kunne ha fått et noe mer nøyaktig resultat, men ettersom disse energiteknologiene utgjør en svært liten del av sine respektive strømmikser er det antatt at dette ikke ville gitt et betydelig utslag på resultatene i oppgaven.

En begrensning som ble møtt på ved innsamling av data for denne oppgaven er at noen utslippstall bare er oppgitt i CO₂ og ikke i CO₂e. Dette gjelder bare for en liten andel av datagrunnlaget som har blitt samlet inn for denne oppgaven, slik at dette ikke ventes å ha betydelig innvirkning på resultatet i oppgaven. Det bør bemerkes at dette ikke betyr at det ikke ville gitt utslag i det hele tatt.

Følsomhetsanalysene som ble gjennomført i oppgaven benyttes til å teste følsomheten til modellen for endringer i datagrunnlaget. En svakhet ved bruken av følsomhetsanalysen derimot er at det kun er mulig å endre en variabel om gangen. Dette tar ikke hensyn til sannsynligheten for at den endringen faktisk vil inntreffe. Metoden antar at alle variablene i en modell er uavhengige av hverandre, noe som ikke alltid er tilfellet i virkeligheten. Det blir heller ikke tatt hensyn til at flere endringer kan inntre samtidig i en slik analyse. Verden er i stadig endring, slik at flere variabler kan endres samtidig. Dette gjør at følsomhetsanalysen benyttet i oppgaven gir begrenset med innsikt i modellene brukt og ikke er en fasit over endringer som vil skje i fremtiden. Scenarioanalysen nevner heller ikke sannsynligheten for at de ulike scenariene faktisk inntreffer, men estimerer bare resultatet som et slikt scenario vil kunne føre til.

4.6 Datautfordringer

Under skrivingen av denne oppgaven har det dukket opp noen utfordringer. De meste av disse er knyttet til manglende data for noen av delprosessene i oppgaven

Slik som Buberger et al. nevnte i sin forskningsartikkel så er det begrensede mengder med data tilgjengelig for utslippet og energibruken til produksjonen av hydrogenbiler. Dette begrunnes med at det den dag i dag ikke finnes storskala produksjon av hydrogenbiler, slik at utslippene og energibruken knyttet til storskala produksjon ikke finnes (Buberger et al., 2022). Jeg støtte på et lignende problem, der kilder på produksjon av hydrogenbiler er svært begrenset, og i flere tilfeller ble selve brenselcellen i hydrogenbilene ikke inkludert i studiene ettersom det er for lite data tilgjengelig på området. Dette er et kunnskapshull i studien, der det trengs mer data på produksjon av hydrogenbiler for å få et bedre datagrunnlag.

Det opplevdes også som utfordrende å finne tilstrekkelig med kilder på energibehovet under personbilproduksjonene. Dette er ettersom de fleste studier tar utgangspunkt i utslipp fra bilproduksjonen og ikke selve energimengden som kreves under denne prosessen.

En siste utfordring er som tidligere nevnt at ikke alle utslippsfaktorene og utslippstallene er oppgitt i CO₂e i datagrunnlaget, men istedenfor i CO₂. Eventuelle problemer denne utfordringen kunne føre til ble unngått ettersom det er antatt i oppgaven at resultatet ikke vil bli påvirket i betydelig grad selv om utslippsfaktorene og utslippstallene ble oppgitt i CO₂ istedenfor CO₂e.

4.7 Hydrogen og bærekraft

Innledningsvis nevnte jeg FNs bærekraftsmål. I denne oppgaven har jeg sett på energibruk og klima, hvor FNs bærekraftsmål 13 er å *stoppe klimaendringene* (FN, 2021b). Skal en vurdere bærekraften av hydrogen må en se på konsekvenser for flere mål og ikke bare klima, der bruken av hydrogen i transportsektoren vil kunne ha både positive og negative konsekvenser for andre bærekraftsmål enn mål nummer 13.

Positive punkt vil kunne være

- Hydrogenbiler krever små batterier. Dette reduserer bruken av barnearbeid og sjeldne metaller sammenlignet med elbiler og hybridbiler som hjelper med å oppfylle bærekraftsmål 12 *Ansvarlig forbruk og produksjon* (FN, 2022a) og bærekraftsmål 8 *Anstendig arbeid og økonomisk vekst* (FN, 2021a).
- Lokal hydrogenproduksjon ved bruk av fornybare energikilder vil sikre tilgang på hydrogen og da også energi, som bidrar med å oppfylle bærekraftsmål 7 *Ren energi til alle* (FN, 2022d).
- Ved å bygge opp en hydrogenindustri vil det kunne skapes nye arbeidsplasser som fører til at flere kommer seg ut i lønnet arbeid. Dette bidrar positivt med å oppfylle bærekraftsmål 1 *Utrydde fattigdom* (FN, 2022e).
- Hydrogen er et ikke giftig stoff og vil derfor ikke påføre økosystemet skader ved eventuelle ukontrollerte utslipp, i motsetning til bensin eller diesel. Dette hjelper med å oppnå bærekraftsmål 14 *Livet i havet* (FN, 2022b) og bærekraftsmål 15 *Livet på land* (FN, 2022c), gjennom å unngå at skadelige stoffer havner i naturen.

Negative punkt vil kunne være

- Utbyggingen av hydrogenanlegg og fornybar kraftproduksjon vil kunne ha negative virkninger på det biologiske mangfoldet. Arealendringer er den største trusselen mot biologisk

mangfold. Utbygginger av av hydrogenanlegg og lignende kunne ha negative virkninger for det biologiske mangfoldet. Dette er negativt for bærekraftsmål 15 *Livet på land* (FN, 2022c).

- I nærmeste fremtid vil det meste av hydrogenet bli produsert via dampreforming av naturgass, slik som Navas Anguita et al. nevner i artikkelen deres (Navas Anguita et al., 2020). Produksjon av hydrogen gjennom dampreforming av naturgass vil medføre større utslipp enn hydrogenproduksjon elektrolyse fra en fornybar strømmiks. Slik at en overgang til flere hydrogen personbiler ikke nødvendigvis fører til utslippsreduksjoner i det korte løp. I det korte løp har dette negative følger for bærekraftsmål 12 *Ansvarlig forbruk og produksjon* (FN, 2022a), ettersom selve påvirkningen av forbruket i samfunnet forblir relativt uendret.

4.8 Videre arbeid

Ut ifra resultatene i denne oppgaven er det flere områder det bør utføres videre arbeid på som bygger på denne oppgaven:

- Hvordan vil energibruken og utslippene utvikle seg dersom vi får storskala produksjon?
- Samle inn bedre data fra bruken av hydrogenbiler.
- Hvordan vil økt hydrogenproduksjon til transportsektoren påvirke de sosiale og økonomiske aspektene til bærekraftig utvikling i Norge?
- Hvor sannsynlig er det at hydrogenbiler vil kunne konkurrere med elbiler i Norge sett fra et økonomisk ståsted?
- Er brukt av karbonfangst og lagring en realistisk mulighet for å redusere utslipp dra drivstoffproduksjonen til de ulike energikjedene inkludert i denne oppgaven?
- Hvilke insentiver må introduseres for å øke andelen elbiler og hydrogenbiler i den norske bilparken, for å så kunne redusere utslippene fra transportsektoren?
- I hvor stor grad vil gjenvinning av bilbatterier og andre bildeler kunne redusere utslippet av personbilproduksjonene?
- Er det europeiske og norske strømnettet rustet for en overgang fra biler som bruker fossilt drivstoff til biler som benytter strøm som drivstoff?
- I hvor stor grad vil en overgang til lavutslippsbiler, slik som elbiler og hydrogenbiler, bidra med at Norge kan nå sine vedtatte utslippsreduksjonsmål?

5 Konklusjon

Målet med oppgaven er å bedømme hvorvidt hydrogenbiler kan bidra med å redusere utslippet fra persontransporten. I oppgaven blir energikjedeanalyse brukt til å beregne de totale energi- og utslippsmengdene som kreves for å produsere drivstoffet til personbilene og for å produsere selve personbilene. I oppgaven er det totalt åtte energikjeder. Fire av disse er hydrogenkjeder, ettersom hydrogen kan produseres fra flere kilder, tre er strømkjeder og en er en hybridkjede.

Problemstillingene i oppgaven er:

Kan hydrogen som drivstoff til personbiler bidra til å redusere utslipp av klimagasser fra persontransport? Hvilken måte å produsere hydrogen på vil føre til de laveste utslippene og hvordan kommer hydrogen ut sammenliknet med elbiler og hybridbil?

Oppgaven konkluderer med at hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse med strøm fra fornybare strømkilder vil ha det laveste utslippet av klimagasser målt i CO₂e. Hydrogenproduksjon gjennom bruk av elektrolyse med strøm fra fossile energikilder vil ha det høyeste utslippet. Disse funnene stemmer overens med litteraturen på dette området slik som diskutert i oppgaven.

Sammenliknet med elbiler og hybridbiler vil hydrogenbilen føre til det laveste utslippet av klimagasser hvis hydrogenet blir produsert med en strømmiks basert på fornybare energikilder. Hvis dette ikke er tilfellet vil elbiler som bruker strøm fra en fornybar strømmiks være det alternativet som fører til de laveste utslippet. Energikjedene som benytter elektrolyse til å produsere hydrogen vil derimot kreve større mengder energi for å produsere nok levert energi for å kjøre en kilometer sammenliknet med de andre energikjedene.

Følsomhetsanalysene viser til at utslippet fra strømmiksene benyttet i oppgaven vil ha stor innflytelse for det totale utslippet fra hver enkel energikjede i oppgave, med unntak av hybridkjeden. Endring i virkningsgraden til dampreformerings- og elektrolyseprosessene har stor innflytelse på det endelige utslippet fra energikjedene som benytter hydrogen. Scenarioanalysene viser at ved å bytte ut strømmiksene brukt i energikjedene med andre strømmikser i oppgaven vil utslippet fra kjedene reduseres eller økes, avhengig av valgt strømmiks.

Ettersom hydrogen produsert fra strøm fra fornybare energikilder har det laveste utslippet vil dette være det beste klimamessige valget, men denne energikjeden krever større mengder energi enn flere av de andre energikjedene i oppgaven. Valg av drivstoff er da avhengig av om en venter energibruk eller utslipp som mer betydningsfullt. Hvis energimengden brukt er av større betydning vil elbiler som benytter strøm fra fornybare energikjeder være det beste valget.

6 Kildeliste

- Afewok, B., Hanania, J., Stenhouse, K., Vargas Suarez, L. & Donev, J. (2021). *Nuclear power plant*: University of Calgary. Tilgjengelig fra: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_power_plant (lest 15.02.2022).
- Allen, M. P., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., et al. (2018). *Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*: IPCC.
- Amnesty. (2019). *Amnesty challenges industry leaders to clean up their batteries*. Tilgjengelig fra: <https://www.amnesty.org/en/latest/news/2019/03/amnesty-challenges-industry-leaders-to-clean-up-their-batteries/> (lest 08.02.2022).
- Arvesen, A. & Hertwich, E. G. (2012). Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (8).
- Aziz, M. (2018). *Production, transportation, and utilization of carbon-free hydrogen*. Tilgjengelig fra: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5054405> (lest 03.03.2022).
- Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 4014-4029.
- Bartolozzi, I., Rizzi, F. & Frey, M. (2013). Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. *Applied Energy*, 101: 103-111.
- 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.
- Blok, K. & Nieuwlaar, E. (2021). *Introduction to energy analysis*. Tredje utgave utg.: Routledge.
- Bossel, U. & Eliasson, B. (U.Å.). *Energy and the Hydrogen Economy*. Tilgjengelig fra: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf.
- Burger, J., Kersten, A., Kuder, M. & Eckerle, R. (2022). Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159.
- Budberg, E., Crawford, J., Gustafson, R. & Bura, R. (2015). Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways. *Biomass and Bioenergy*, 83 (12): 23-31.
- 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.
- Cleveland, C. J. & Ayres, R. U. (2004). *Encyclopedia of energy*: Elsevier Science.
- Dell, R. M., Moseley, P. T. & Rand, D. A. J. (2014). *Towards Sustainable Road Transport. Chapter 8 - Hydrogen, Fuel Cells and Fuel Cell Vehicles*: Academic Press.
- Di Maria, F., Contini, S., Bidini, G., Boncompagni, A., Lasagni, M. & Sisani, F. (2016). Energetic Efficiency of an Existing Waste to Energy Power Plant. *Energy Procedia*, 101: 1175 - 1182.
- EIA. (2020). *More than 60% of energy used for electricity generation is lost in conversion*. Tilgjengelig fra: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=44436> (lest 14.02.2022).
- Electropedia. (2005). *Electricity Generation from Biofuels*. Tilgjengelig fra: <https://www.mpoweruk.com/biofuels.htm> (lest 14.02.2022).
- Energy, U. S. D. o. (U.Å.). *Hydrogen Production: Electrolysis*. Tilgjengelig fra: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis> (lest 02.03.2022).
- European Environment Agency. (2021). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation by country*. Tilgjengelig fra: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-9#tab-googlechartid_googlechartid_googlechartid_googlechartid_chart_11111 (lest 28.02.2022).

- Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. (2022). *Coal*. Tilgjengelig fra: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/coal.html> (lest 22.02.2022).
- FN. (2020). *Parisavtalen*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen> (lest 20.04.2022).
- FN. (2021a). *Anstendig arbeid og økonomisk vekst*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/anstendig-arbeid-og-oekonomisk-vekst> (lest 08.02.2022).
- FN. (2021b). *Stoppe klimaendringene*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene> (lest 18.01.2022).
- FN. (2022a). *Ansvarlig forbruk og produksjon*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (lest 08.02.2022).
- FN. (2022b). *Livet i havet*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/livet-i-havet> (lest 29.04.2022).
- FN. (2022c). *Livet på land*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/livet-paa-land> (lest 26.04.2022).
- FN. (2022d). *Ren energi til alle*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle> (lest 26.04.2022).
- FN. (2022e). *Utrydde fattigdom*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/utrydde-fattigdom> (lest 26.04.2022).
- 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 20.01.2022).
- Gardiner, M. (2009). *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Recod*. I: America, D. o. E.-U. S. o. (red.). Tilgjengelig fra: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf.
- Granovskii, M., Dincer, I. & Rosen, M. A. (2006). Environmental and economic aspects of hydrogen production and utilization in fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources* (1): 411-421.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment - Theory and Practice*: Springer.
- Hofstad, K. (2017). *Dampreforming*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/dampreforming> (lest 03.03.2022).
- Hofstad, K. (2019). *Energivare*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energivare> (lest 20.02.2022).
- Hofstad, K. (2021). *Brunkull*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/brunkull> (lest 22.02.2022).
- Holden, E. (2003). *Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer – år 2010*: Vestlandsforskning.
- Hyundai. (2022a). *Hyundai TUCSON Plug-In Hybrid*. Tilgjengelig fra: https://s7g10.scene7.com/is/content/hyundaiautoever/TUCSON_Teknisk_10-21 (lest 24.01.2022).
- Hyundai. (2022b). *NEXO*. Tilgjengelig fra: <https://www.hyundai.com/no/bilmodeller/nexo.html>.
- Hyundai. (U.Å.-a). *Hyundai IONIQ 5*. Tilgjengelig fra: https://s7g10.scene7.com/is/content/hyundaiautoever/IONIQ-5+Teknisk_11-21pdf (lest 24.01.2022).
- Hyundai. (U.Å.-b). *NEXO*. Tilgjengelig fra: https://s7g10.scene7.com/is/content/hyundaiautoever/NEXO_Teknisk_10-21pdf (lest 18.01.2022).
- IEA. (2020a). *Electricity mix in the European Union, Q1 2020*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-mix-in-the-european-union-q1-2020> (lest 26.01.2022).
- IEA. (2020b). *European union 2020*. *iea.org*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/reports/european-union-2020>.
- IEA. (2022a). *Europe*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/regions/europe> (lest 14.02.2022).

- IEA. (2022b). *Norway*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/countries/norway> (lest 02.03.2022).
- IRENA. (2017). *Synergies between renewable energy and energy efficiency, a working paper based on REmap*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).
- Jacobsen, M. Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science* (2).
- Kofstad, P. K. & Pedersen, B. (2022). *Hydrogen*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hydrogen> (lest 03.03.2022).
- 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.
- Malla, S. (2009). CO2 emissions from electricity generation in seven Asia-Pacific and North American countries: A decomposition analysis. *Energy Policy*, 37 (1): 1-9.
- Miljøstatus. (2021a). *Klimagassutslipp fra veitrafikk i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/klimagassutslipp-fra-veitrafikk/> (lest 19.01.2022).
- Miljøstatus. (2021b). *Miljømål 5.2*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.2/> (lest 19.01.2022).
- Miljøstatus. (2021c). *Norske utslipp og opptak av klimagasser*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/> (lest 18.01.2022).
- Navas Anguita, Z., Garcia-Gusano, D., Dufour, J. & Iribarren, D. (2020). Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport. *Applied Energy*, 259.
- NordPool. (2020). *Loss functionality*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolgroup.com/trading/Day-ahead-trading/loss-functionality/> (lest 16.02.2022).
- Nowotny, J. (2011). Impact of hydrogen on the environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (20): 13218-13224.
- NRK. (2021). *Eksplasjon ved hydrogenstasjon*: NRK. Tilgjengelig fra: <https://www.nrk.no/nyheter/eksplasjon-ved-hydrogenstasjon-1.14582944> (lest 20.04.2022).
- NVE. (2019). *Hydrogen i det moderne energisystemet*. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_12.pdf.
- NVE. (2020a). *Strømforbruk i Norge har lavt klimagassutslipp*: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/> (lest 17.01.2022).
- NVE. (2020b). *Turbinopprustinger kan øke produksjonen i norske vannkraftverk med fire terawattimer*. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_03.pdf (lest 14.02.2022).
- NVE. (2022). *Klima*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kunnskapsgrunnlag-om-virkninger-av-vindkraft-paa-land/klima/> (lest 05.05.2022).
- Obara, S. y. & Li, J. (2020). Evaluation of the introduction of a hydrogen supply chain using a conventional gas pipeline—A case study of the Qinghai–Shanghai hydrogen supply chain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (58): 33846-33859.
- OECD. (2005). *Best Available technology*. Tilgjengelig fra: <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=6358>.
- Onat, N. C., Kucukvar, M. & Tatari, O. (2015). Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Applied Energy*, 150: 36-49.
- Pichery, C. (2014). *Encyclopedia of Toxicology*. I: Academic Press. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864543004310> (lest 30.01.2022).

- Pistoria, G. (2010). *Electric and Hybrid Vehicles. Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. 1 utg.
- 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.
- Ravndal, E. J. & Halleraker, J. H. (2021). *FNs bærekraftsmål*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/FNs_b%C3%A6rekraftsm%C3%A5l (lest 20.04.2022).
- Regjeringen. (2017). *En grønnere transporthverdag*: Samferdselsdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/regjeringen-solberg/aktuelt-regjeringen-solberg/sd/pressemeldinger/2017/en-gronnere-transporthverdag/id2548633/>.
- Shiau, C.-S. N., Samaras, C., Hauffe, R. & Michalek, J. J. (2009). Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles. *Energy Policy*, 37 (7): 2655-2663.
- Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2 (3): 442 - 454.
- SSB. (2012). *Bilparken, 2011*. ssb.no: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/bilreg/arkiv/2012-04-26> (lest 18.01.2022).
- SSB. (2014). *Elektrisitet, 2014*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitet/aar/2015-12-22?fane=om> (lest 19.02.2022).
- SSB. (2021a). 11823: Registrerte kjøretøy, etter region, drivstofftype, statistikkvariabel og år. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/statbank/table/11823/tableViewLayout1/> (lest 31.01.2022).
- SSB. (2021b). *Bilparken*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken> (lest 25.01.2022).
- SSB. (2021c). *Kjørelengder*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/kjorelengder> (lest 17.01.2022).
- Statista. (2021). Major countries based on cobalt reserves 2020. Tilgjengelig fra: <https://www.statista.com/statistics/264930/global-cobalt-reserves/> (lest 08.02.2022).
- Suleman, F., Dincer, I. & Agelin-Chaab, M. (2015). Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (21): 6976-6987.
- The World Bank. (2018a). 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 22.02.2022).
- The World Bank. (2018b). Electric power transmission and distribution losses (% of putput) - European Union. Tilgjengelig fra: https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=EU&most_recent_value_desc=false (lest 20.02.2022).
- Toyota. (U.Å.). *Hydrogenbilen - Nye Toyota Mirai*. Tilgjengelig fra: https://www.toyota.no/world-of-toyota/beyondzero/mirai/index?gclid=Cj0KCQjAraSPBhDuARIsAM3Js4ooXITJ76dLWSf3T-2c6UYR_jkRJLAXkR0s0vJJp4cvUryIC-edEe8aAv7eEALw_wcB&gclsrc=aw.ds (lest 20.01.2022).
- Ulleberg, Ø., Nakken, T. & Ete, A. (2010). The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 1841-1852.
- Vik, S. (2022). Distriktskommuner vil gå fra elbil til hydrogenbil. *NRK*. Tilgjengelig fra: <https://www.nrk.no/tromsogfinnmark/distriktskommuner-satser-gront-vil-ga-fra-elbil-til-hydrogenbil-1.15839723> (lest 14.02.2022).
- Vinjar, A., Heggstad, R. & Rosvold, K. A. (2022). *Bølgekraft*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/b%C3%B8lgekraftverk> (lest 14.02.2022).

- Wang, D., Zamel, N., Jiao, K., Zhou, Y., Yu, S., Du, Q. & Tin, Y. (2013). Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China. *Energy*, 59: 402-412.
- Wang, Y. & Sun, T. (2012). Life cycle assessment of CO₂ emissions from wind power plants: Methodology and case studies. *Renewable Energy*, 43: 30-36.
- Wulf, C. & Kaltschmitt, M. (2012). Life cycle assessment of hydrogen supply chain with special attention on hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (21): 16711 - 16721.
- Xie, Y., Wang, X. & Mai, F. (2019). Calculation of theoretical transmission loss in trunk gas pipeline. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Zeng, K. & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (3): 307-326.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway