



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Energikjedeanalyse av ammoniakk som drivstoff i bulkskip

Energy Chain Analysis of Ammonia as Fuel in Bulk
Carriers

Hannah Luise Folchert

Fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutningsoppgave på en mastergrad i Fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Først vil jeg gi en stor takk til masterveileder Erling Holden for fantastisk god oppfølging, motivasjon, raske og meget behjelpelige svar og hjelp til struktur gjennom hele prosessen. Jeg vil videre takke alle mine medstudenter og venner fra tiden min på høyskolen ved Vestlandet avdeling Sogndal, og tiden her på Ås.

Videre ønsker jeg å gi en spesiell takk til min venninne Julie Berg Melfald for fantastisk hjelp med korrektur i innspurten. Helt til slutt vil jeg gi den varmeste takken til familien min som alltid har vært der for meg og heiet.

Ås, 15. januar 2023

Hannah Luise Folchert

Sammendrag

Sjøfarten i dag står for rundt 3 prosent av totale klimagassutslipp i verden. Gjennom Parisavtalen har Norge forpliktet seg til å følge en nasjonal plan for hvordan vi som nasjon skal kutte klimagassutslippene. I dag går de fleste sjøfartøy enten på tung fyringsolje eller diesel. For å redusere klimagassutslippene er det avgjørende å legge alternative løsninger for drivstoff på bordet. Ammoniakk og hydrogen brukt som drivstoff er utgangspunktet karbonfrie fordi de ikke slipper ut CO₂-e under bruk. Av den grunn blir disse to drivstoffene sett på som to løsninger til å redusere klimagassutslipp sett at produksjonen av drivstoffene baserer seg på fornybare energikilder.

Videre viser prognoser at ammoniakk blir sett på som fremtidens drivstoff innenfor skipsfart. Grunnen er at ammoniakk har høyere energitetthet enn hydrogen, og er derfor lettere å lagre samt transportere enn hydrogen når det er flytende. I tillegg kan ammoniakk bli brukt i en forbrenningsmotor og kan bidra til å redusere behovet for å bytte ut hele fartøyet.

Problemstillingen i denne oppgaven lyder følgende:

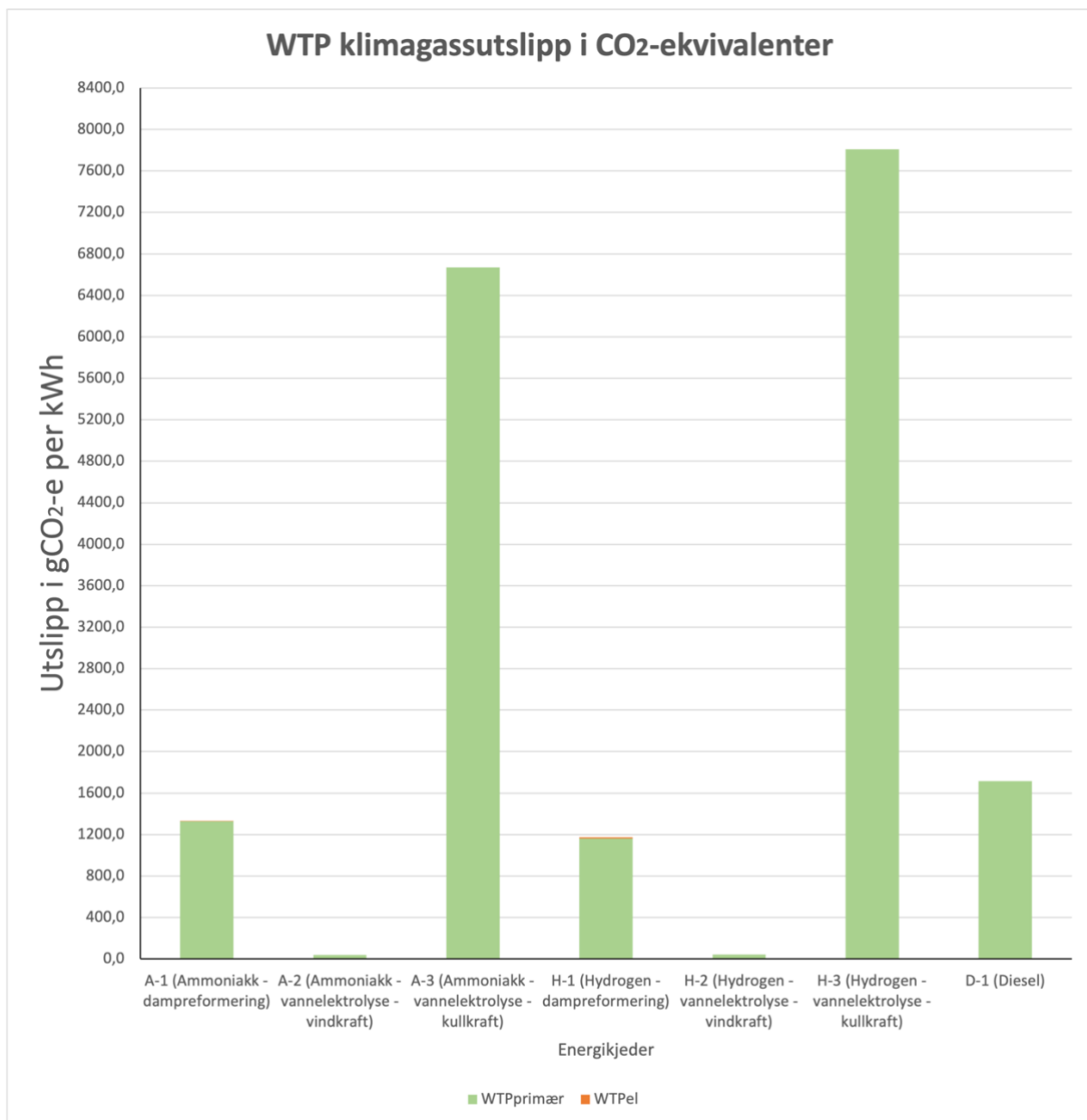
Kan ammoniakk som drivstoff i skip bidra til å redusere klimagassutslipp? Hvilken produksjonsmetode av ammoniakk fører til minst klimagassutslipp? Er ammoniakk som drivstoff et bedre alternativ enn hydrogen sett i lyset av klimagassutslipp? Vil ammoniakk slippe ut mindre klimagasser i forhold til diesel?

For å svare på problemstillingen er energikjedeanalyse benyttet. Dette er en metode som gjør det mulig å beregne det totale energiforbruket gjennom ulike delprosesser til en energikjede. På denne måten er det mulig å finne det totale energibruket fra energikjeden fra eksempelvis utvinning av energikilde til bruk i skip. Metodetilnærmingen for det totale energibruket kalles også WTP, som står for well-to-propeller. Ved å beregne energibruken kan man videre beregne klimagassutslippet for energikjedene, som er hovedfokuset i denne oppgaven. Videre er det syv forskjellige energikjeder som blir analysert.

Tre av energikjedene benytter seg av ammoniakk som drivstoff i en forbrenningsmotor, tre benytter seg av hydrogen som drivstoff i en brenselcelle og en benytter seg av diesel i en forbrenningsmotor. To av både ammoniakk, - og hydrogenkjedene baserer seg på vannelektrolyse som benytter seg av strøm fra enten vindkraft eller kullkraft. I tillegg er det

en ammoniakk, - og hydrogenkjede som tar utgangspunkt i dampreforming av naturgass. De to sistnevnte energikjedene har i tillegg tilført energi i form av norsk strømmiks. Energikjedene har derfor WTP delt i to, hvor tilført energi heter WTP_{el}. WTP_{primær} menes med utslippet fra den primære energikilden. På bakgrunn av at det er lite kunnskap om ammoniakk, er drivstofforbruket for alle drivstoffene basert på estimerer for samme type bulkskip.

Resultatene fra denne oppgaven viser at ammoniakk og hydrogen produsert gjennom vannelektrolyse drevet av vindkraft kan bidra med å redusere klimagassutslippene betraktelig sammenlignet med diesel. Videre er ammoniakk det drivstoffet av de sistnevnte alternativene som har lavest utslipp. Hvis ammoniakk, - og hydrogen produserer gjennom dampreforming av naturgass vil det ikke ha en betydelig reduksjon på utslippene i forhold til diesel. På den annen side har både diesel og dampreforming av naturgass betraktelig mindre utslipp enn vannelektrolyse drevet av kullkraft. Dette forteller oss at den tilførte strømmen til vannelektrolyse er avgjørende om produksjonsmetoden til ammoniakk og hydrogen er utslippsvennlig i henhold til utslipp målt i CO₂-e.



Figur 1: Resultater for totale utslipp

Figuren viser utslipp målt i gCO₂-e per kilowatttime levert til akslingen på motoren ett bulkskip.

Abstract

Shipping today accounts for around 3 percent of total greenhouse gas emissions in the world. Through the Paris Agreement, Norway has committed to follow a national plan for how we as a nation will reduce greenhouse gas emissions. Today, most seagoing vessels run on either heavy fuel oil or diesel. In order to reduce greenhouse gas emissions, it is crucial to put alternative solutions for fuel on the table. Ammonia and hydrogen used as fuel are basically carbon-free because they do not emit CO₂ while driving. For that reason, these two fuels are seen as two solutions to reduce greenhouse gas emissions given that the production of the fuels is based on renewable energy sources.

Furthermore, forecasts show that ammonia is viewed as the fuel of the future within shipping. The reason for this is that ammonia has a higher energy density than hydrogen and is therefore easier to store and transport than hydrogen when it is liquid. In addition, ammonia can be used in an internal combustion engine and can help reduce the need to replace the entire ship.

The objectives for this assignment reads as follows:

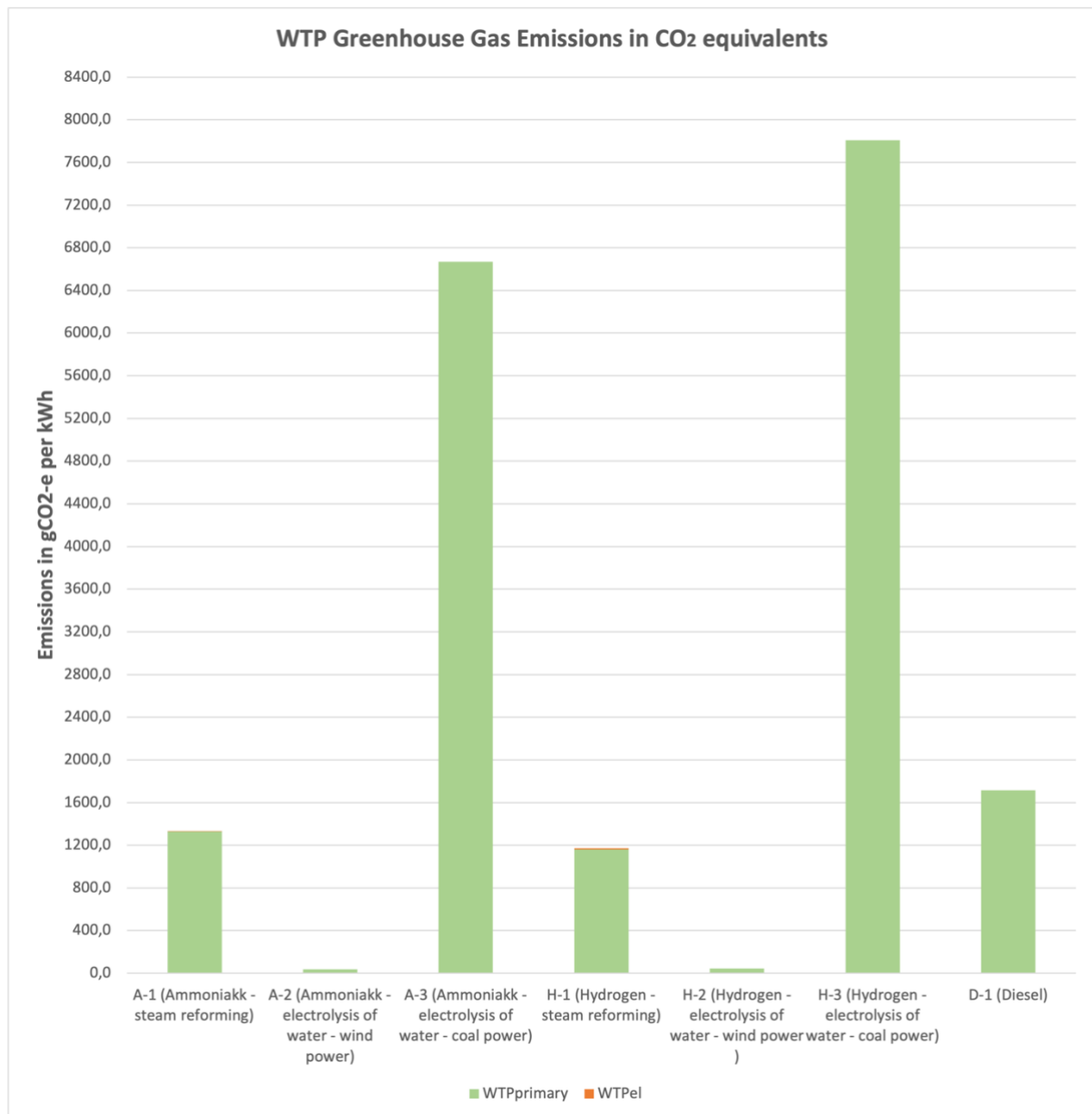
Can ammonia as fuel in ships help reduce greenhouse gas emissions? Which production method of ammonia leads to the least greenhouse gas emissions? Is ammonia as a fuel a better alternative than hydrogen in the light of greenhouse gas emissions? Will ammonia emit less greenhouse gasses compared to diesel?

To answer the objectives, energy chain analysis is used. This is a method that makes it possible to calculate the total energy consumption through various sub-processes of an energy chain. In this way, it is possible to find the total energy use from the energy chain from, for example, the extraction of energy sources used in ships. The method approach for the total energy use is also called WTP, which stands for well-to-propeller. By calculating the energy use, one can further calculate the greenhouse gas emissions for the energy chains, which is the main focus of this thesis. In this assignment, there are seven different energy chains considered.

Three of the energy chains use ammonia as fuel in an internal combustion engine, three use hydrogen as fuel in a fuel cell and one uses diesel in an internal combustion engine. Two of

both the ammonia and hydrogen chains are based on electrolysis of water generated by either wind power or coal power. In addition, there is an ammonia and hydrogen chain based on steam reforming of natural gas. The last two energy chains have also added energy in the form of a Norwegian electricity mix. The energy chains therefore have WTP divided in two, where added energy is called WTP_{el} . $WTP_{primary}$ means the emissions from the primary energy source. On the basis that there is little knowledge about ammonia, the fuel consumption for all fuels is based on estimates for the same type of bulk carrier.

The results from this thesis show that ammonia and hydrogen produced through electrolysis of water powered by wind power can contribute to significantly greenhouse gas emissions reduction compared to diesel. Furthermore, ammonia is the fuel with the lowest emissions. If ammonia and hydrogen are produced through steam reforming of natural gas, there will not be a significant reduction in emissions compared to diesel. On the other hand, both diesel and steam reforming of natural gas have considerably less emissions than water electrolysis powered by coal power. This shows that the current supplied to a water electrolysis is decisive if the production method of ammonia and hydrogen is emission friendly in terms of CO_2-e .



Figur 2: Results for total emissions

Figur 2 shows emissions measured in gCO₂-e per kilowatt hour delivered to the shaft of the engine on the bulk carrier.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag.....	ii
Abstract.....	v
Figurliste	xi
Tabelliste.....	xii
1. Introduksjon.....	1
1.1. Bakgrunn.....	1
1.2. Kunnskapsgrunnlag.....	5
1.2.1. Analyser av ammoniakk, - og hydrogenproduksjon	5
1.2.2. Livsløp- og energikjedeanalyser av ammoniakk og hydrogen	8
1.3. Oppsummering kunnskapsgrunnlag.....	12
1.4. Problemstilling.....	13
1.5. Valg av energikjedene.....	14
1.6. Oppbygging av oppgaven	15
2. Metode.....	16
2.1. Presentasjon av energikjedene	16
2.1.1. Energikjede A-1	16
2.1.2. Energikjede A-2	17
2.1.3. Energikjede A-3	17
2.1.4. Energikjede H-1	18
2.1.5. Energikjede H-2	18
2.1.6. Energikjede H-3	18
2.1.7. Energikjede D-1	19
2.2. Energikjedeanalyse	19
2.3. Well-to-propeller analyse (WTP)	20
2.3.1. Well-to-tank, WTT	21
2.3.2. Tank-to-propeller (TTP)	21
2.4. Beregningsmetode.....	22
2.4.1. Energibruk.....	22
2.4.2. Utslipp i CO ₂ -e.....	23
2.5. Følsomhetsanalyse	24
2.5.1. Følsomhetsanalyse, A-1	24
2.5.2. Følsomhetsanalyse H-2	24
2.6. Scenarioanalyse.....	25
2.6.1. Scenarioanalyse 1. Karbonfangst og -lagring	25
2.6.2. Scenarioanalyse 2. Endring i utslipp for fornybar, - og fossil strømmiks	26
2.6.3. Scenarioanalyse 3. Ulike strømmikser for hydrogen, - og ammoniakkproduksjon fra dampreforming	26
2.7. Avgrensninger i oppgaven	27
2.8. Datainnsamling	28
2.9. Forutsetninger og antakelser	29
3. Data	30
3.1. WTT.....	30
3.1.1. Utvinning av naturgass	30
3.1.2. Utvinning av kull	30
3.1.3. Transport av naturgass	31
3.1.4. Transport av kull	32
3.1.5. Lagring av kull.....	32
3.1.6. Norsk strømmiks	32

3.1.7. Dampreforming	34
3.1.7.1. Energibehov dampreforming	34
3.1.8. Haber-Bosch-prosessen	34
3.1.8.1. Energibehov Haber-Bosch-prosessen	36
3.1.9. Flytendegjøring av ammoniakk	36
3.1.9.1. Energibehov flytendegjøring av ammoniakk	36
3.1.10. Transport av ammoniakk	37
3.1.11. Vindkraft	37
3.1.12. Kullkraftverk	38
3.1.13. Distribusjon av strøm	38
3.1.13.1. Norsk strømmnett	38
3.1.13.2. Strømooverføring Tyskland – Norge	39
3.1.14. Vannelektrolyse	39
3.1.15. Flytendegjøring av hydrogen	40
3.1.15.1. Energibehov for flytendegjøring av hydrogen	41
3.1.16. Transport og lagring av hydrogen	41
3.1.17. Utvinning av råolje	42
3.1.18. Transport av råolje	43
3.1.19. Oljelagring ved raffineri	43
3.1.20. Produksjon av diesel	43
3.1.21. Transport av diesel	44
3.2. TTW	45
3.2.1. Drivstofforbruk	45
3.3. Utslippsfaktorer i CO ₂ -e	46
I denne delen av datainnhentingen blir utslippsfaktorer brukt i oppgaven gått igjennom. Som nevnt i metodekapittelet var det utfordringer vedrørende utslippsmålinger til noen kilder. De fleste kilder oppgir utslipp i CO ₂ -e, men noen oppgir utslipp kun målt i CO ₂ . Videre antas det at dette ikke være av stor betydning for resultatene og de samlede utslippsfaktorene brukt i denne oppgaven oppgis i CO ₂ -e.	
3.3.1. Utslipp fra naturgass	46
3.3.2. Utslipp fra norsk strømmiks	47
3.3.3. Utslipp fra vindkraft	47
3.3.4. Utslipp fra råolje	48
3.3.5. Utslipp fra kull	48
3.4. Oppsummering av data	49
4. Resultat og diskusjon	51
4.1. Resultat for energibruk	52
4.1.1. WTT-verdier	52
4.1.2. TTP-verdier	53
4.2. Resultater for klimagassutslipp	56
4.3. Resultater fra følsomhetsanalysene	60
4.3.1. Følsomhetsanalyse A-1	60
4.3.2. Følsomhetsanalyse H-2	61
4.4. Resultater fra scenarioanalysene	63
4.4.1. Scenarioanalyse 1. Økt karbonfangst og -lagring i dampreformeringsprosessen	63
4.4.2. Scenarioanalyse 2. Endring av utslipp for strømmiksen i energikjedene med vannelektrolyse	64
4.4.3. Scenarioanalyse 3. Endring av strømmiks for tilført energi til delprosesser	65
4.5. Datavalidering og datautfordringer	66
4.6. Videre arbeid	67

5. Konklusjon.....	69
Referanseliste.....	71

Figurliste

Figur 1: Resultater for totale utslipp	iv
Figur 2: Results for total emissions	vii
Figur 3: Illustrasjon av energikjede A-1	16
Figur 4: Illustrasjon av energikjede A-2	17
Figur 5: Illustrasjon av energikjede A-3	17
Figur 6: Illustrasjon av energikjede H-1	18
Figur 7: Illustrasjon av energikjede H-2	18
Figur 8: Illustrasjon av energikjede H-3	19
Figur 9: Illustrasjon av energikjede D-1	19
Figur 10: Resultat for total energibruk til de ulike energikjedene	52
Figur 11: Resultat for totalt klimagassutslipp for de ulike energikjedene	56
Figur 12: Følsomhetsanalyse for energikjede A-2	60
Figur 13: Følsomhetsanalyse for energikjede H-2	61
Figur 14: Scenarioanalyse med karbonfangst og -lagring	63
Figur 15: Scenarioanalyse med endring av utslipp fra strøm	64
Figur 16: Endring av tilført energi for energikjede A-1 og H-1	65

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over valgte energikjeder.....	15
Tabell 2: Virkningsgrad for utvinning av naturgass	30
Tabell 3: Virkningsgrad for utvinning av kull	30
Tabell 4: Oversikt over ulike energitap for transport av naturgass.....	31
Tabell 5: Energitap ved transport av kull.....	32
Tabell 6: Oversikt over prosentandel for ulike produksjonsteknologier og tilhørende virkningsgrader	33
Tabell 7: Oversikt over virkningsgrader for dampreforming	34
Tabell 8: Oversikt over virkningsgrader for Haber-Bosch-prosessen	35
Tabell 9: Oversikt over virkningsgrader for transport av ammoniakk	37
Tabell 10: Virkningsgrad for vindkraft.....	38
Tabell 11: Virkningsgrader for kullkraftverk	38
Tabell 12: Energitap for strøm under distribusjon via strømkabler i Norge.....	39
Tabell 13: Energitap ved strømovertøring Tyskland - Norge.....	39
Tabell 14: Oversikt over virkningsgrader for vannelektrolyse	40
Tabell 15: Oversikt over energitap ved flytendegjøring av hydrogen	41
Tabell 16: Ulike energikrav for flytendegjøring av hydrogen	41
Tabell 17: Oversikt over virkningsgrader for transport av hydrogen	42
Tabell 18: Oversikt over energitap for utvinning av råolje.....	42
Tabell 19: Oversikt over energitap for transport av råolje	43
Tabell 20: Energitap ved oljelagring ved raffineri.....	43
Tabell 21: Oversikt over energitap under raffinering	44
Tabell 22: Oversikt over energitap ved transport av diesel	44
Tabell 23: Oversikt over drivstofforbruk for ulike drivstoff	46
Tabell 24: Oversikt over ulike utslippsfaktorer	46
Tabell 25: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra vindkraft	47
Tabell 26: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra vindkraft	47
Tabell 27: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra råolje.....	48
Tabell 28: Oversikt over ulike utslippsfaktorer for kull	48
Tabell 29: Oversikt over alle virkningsgrader brukt i beregningene	49
Tabell 30: Oversikt over utslippsfaktorer	50
Tabell 31: Kort beskrivelse av energikjedene.....	51

Ammoniakk som drivstoff i skip kan bidra til å redusere klimagassutslippene fra skipsfart. Denne løsningen forutsetter midlertidig at produksjonen foregår på en mest mulig utslippsfri måte. Spørsmålet er hvordan skal ammoniakk produseres for å utgjøre en forskjell i den globale klimakampen.

1. Introduksjon

Introduksjonskapittelet er delt inn i tre deler. Første delen blir dagens utfordringer vedrørende klimakrisen beskrevet samt hvordan skipsfart som sektor bidrar til klimagassutslipp. Videre redegjøres det for mulige løsninger som kan bidra med å redusere utslipp. Etter dette presenteres kunnskapsgrunnlaget. Denne delen inneholder kunnskap som er relevant for tema og danner grunnlag for problemstillingen i oppgaven. Deretter beskrives de valgte energikjedene som skal være med i analysen. Til slutt kommer oppgavens oppbygging.

1.1. Bakgrunn

I 2015 ble Parisavtalen vedtatt under FNs klimatoppmøte. En avtale som i brede kretser ble ansett som en milepæl i den internasjonale innsatsen for å bekjempe klimakrisen. Parisavtalens fremste mål er å begrense global oppvarming til godt under 2 grader, helst 1,5 grader celsius. Samme år ble FNs bærekraftsmål vedtatt – et veikart bestående av 17 målsetninger som til sammen regnes som verdenssamfunnets felles dugnad for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030. Gjennom Parisavtalen har Norge forpliktet seg til å følge en nasjonal plan for hvordan vi som nasjon skal kutte klimagassutslippene. Resultatene skal rapporteres hvert femte år fra og med 2023. (FN-Sambandet, 2022b). Ifølge Klima- og miljødepartementet er Norges mål å redusere utslippet av klimagasser med 50 til 55 prosent innen 2030 (miljødepartementet, 2021).

Global oppvarming og klimagassutslipp er dagens store utfordringer for industriutvikling - både nasjonalt og globalt (Song et al., 2022). Skipsfart er et viktig nøkkelelement i industrikjeden da skipsfarten står for 90 prosent av internasjonalt transportbehov (Kystverket, 2021). Dette gjør at skipstrafikk er verdens viktigste handelsvei og kobler alle kontinenter sammen. For Norge er skipsfart ekstra viktig, da om lag 95% av alle varer som blir fraktet til Norge er fraktet med skip (Øystese, 2020). Skip er en av de mest energieffektive transportalternativene vi har ifølge Norsk Rederiforbund (u.å), men sektoren er ikke utslippsfri, og er det derfor viktig at nye løsninger kommer på banen.

Den internasjonale sjøfartsorganisasjonen, eller International Maritime Organization (IMO), er FNs organ for regulering av internasjonal sjøfart. Da IMO er en del av FN, arbeider organisasjonen aktivt med bærekraftsmålene, særlig nummer 14 og 13 som omhandler livet i havet og å stoppe klimaendringene. Ifølge IMO står skipsfarten for 3 prosent av verdens totale klimagassutslipp, hvorav transportsektoren til sammen står for rundt 15 prosent. (IPCC, 2022). Å utvikle tiltak er derfor avgjørende også for denne sektoren (FN-Sambandet, 2022a). IMOs mål er å redusere de totale årlige klimagassutslippene fra internasjonal skipsfart med minst 50 prosent innen 2050 sammenlignet med 2008. Ifølge IMO (u.å.) er det tydelig at alternative drivstoff som hydrogen, ammoniakk og andre energikilder for internasjonal skipsfart kan være alternative løsninger for å nå denne målsetningen. Både hydrogen og ammoniakk inneholder ingen karbonmolekyler, og vil ikke føre til utslipp ved bruk.

I dag går de fleste sjøfartøy på enten tung fyringsolje eller diesel innen transportsektoren. Samtidig anses hydrogen og ammoniakk som de mest plausible alternative drivstoffene for fossilt brensel så lenge produksjonen er grønn (Bicer & Dincer, 2018). For at ammoniakk og hydrogen skal være helt utslippsfritt er man avhengig av at opphavet til elektrisiteten til ammoniakk, - og hydrogenproduksjonen er fra fornybare energikilder (Ye et al., 2022). I dag blir 96 prosent av alt hydrogen produsert fra fossile energikilder, som for eksempel dampreforming av naturgass. Kun fire prosent av verdens hydrogenproduksjon produseres gjennom vannelektrolyse. Vannelektrolyse krever store energimengder for å drive prosessen. Hvis denne strømmen i midlertidig kommer fra fornybare energikilder vil produksjonen være et klimavennlig alternativ (Balat, 2008). Produksjon av ammoniakk er en lignende tilnærming som hydrogen med unntak av tilleggsprosessen; Haber-Bosch-prosessen. (Bicer & Dincer, 2018).

Haber-Bosch-prosessen er den mest vanlige metoden for å fremstille ammoniakk på i dag (Al-Breiki & Bicer, 2021). Metoden er over 100 år gammel og oppfunnet av Fritz Haber og Carl Bosch. I 2019 var den globale årlige ammoniakkproduksjonen på 150 millioner tonn. 80 prosent av den produserte ammoniakken brukes til gjødsel og er svært viktig i matindustrien. For å produsere ammoniakk trengs det hydrogen og nitrogen i prosessen, og hydrogengassen fremstilles for det meste i dag gjennom dampreforming av naturgass (72%) og kull (22%) (Inal et al., 2022). I 2006 stod det for 1.6 prosent av total bruk av fossilt brensel, noe som betyr at produksjonen bidrar til store klimagassutslipp (Morgan et al., 2014). Ved å bruke

vannelektrolyse som benytter seg av fornybare energikilde til å fremstille hydrogen til ammoniakkproduksjonen, vil dette kunne bidra til å redusere klimagassutslippene til prosessen (Bicer & Dincer, 2018).

Initiativet Zero Emission Distribution at Sea, også kalt Zeeds, jobber med å finne ulike løsninger for å kunne ta i bruk grønn ammoniakk som fremtidig drivstoff. En av de foreslåtte løsningene er å produsere ammoniakk i Berlevåg i Finnmark hvor energien kommer via vindkraft fra Raggovidda vindkraftverk. Det antas at ammoniakfabrikken skal klare å levere opptil 100.000 tonn grønn ammoniakk som kan brukes på drivstoff til skipsfart. Planen er å bruke overskuddskraft fra vindparken ved utføre produksjon av hydrogen via vannelektrolyse. (Hystad, 2020).

Høsten 2019 viste DNV GL (2019a) (nå kalt DNV), sine prognoser for skipsfart frem mot år 2050, også kalt Maritime Forecast. Disse indikerer at utslippene til skipsfarten går i feil retning. Fortsatt er ikke næringen i nærheten av å nå klimamålene satt av IMO. Videre sier prognosene at ammoniakk er den mest lovende utslippsfrie teknologien, mens hydrogen vil ha en liten betydning når det kommer til kutt av klimagassutslipp. Ammoniakk i væskeform krever en nedkjøling til -33 grader celsius i motsetning til hydrogen som krever -253 grader celsius. Det betyr at det å gjøre hydrogen flytende er en svært energikrevende prosess i motsetning til ammoniakk. Når ammoniakk er i væskeform har stoffet 1,5 ganger høyere energitetthet enn flytende hydrogen. Dette betyr at i tillegg til at ammoniakk krever mindre nedkjøling, er stoffet betydelig mye enklere å lagre, samt transportere enn hydrogen. Av den grunn er grønn ammoniakk ansett som det beste karbonfrie drivstoffalternativet til langdistanseshipping (YARA, 2021). I tillegg har vi god kjennskap til infrastruktur for transport av ammoniakk (DNV GL, 2019a).

Bruken av ammoniakk som drivstoff er imidlertid ikke uten risiko. Materialer som kobber og sink korroderer raskt når det kommer i kontakt med ammoniakk. I tillegg kan ammoniakk omdannes til lystgass og svevestøv ved utslipp, og er giftig selv i små mengder (Øystese, 2020). I tillegg til at ammoniakk er giftig for mennesker, vil søl av ammoniakk utgjøre en alvorlig risiko for dyr som lever i havet (Inal et al., 2022). En viktig dimensjon er imidlertid at selv om ammoniakk er klassifisert som et giftig stoff, er eksplosjonsfaren betydelig lavere enn for eksempel naturgass og hydrogen (Øystese, 2020).

I skrivende stund er det ingen skip som går på 100 prosent ammoniakk i følge Chararis et al. (2022). Her til lands har to båtmotorprodusenter som heter MAN og Wärtsilä som til nå har kommet ut med ammoniakk i en forbrenningsmotorer. I disse motorene blir ammoniakk brukt som *dual fuel* sammen med diesel. *Dual fuel* er et engelsk begrep og betyr en motor som kombinerer drivstoff. Wärtsiläs motor kjører på en blanding med opptil 70 prosent ammoniakk. Selskapets uttalte mål å ha fartøy som kjører på ren ammoniakk innen 2023 (Wärtsilä Corporation, 2022).

Når det gjelder utslipp fra skipsfart har skipenes størrelse svært stor betydning. Jo større skip, jo mer utslipp. De største skipene i verden står for 30% av den totale skipsbeholdningen, men utgjør 70-80 prosent av totale utslipp fra skipsfartsnæringen. Det betyr at det er behov for teknologi og alternative løsninger for olje og diesel som også egner seg til de aller største skipene, som tank-, container-, og bulkskip. (DNV GL, 2019a).

Det er flere grunner til at ulike selskaper satser på forbrenningsmotor og ikke brenselceller for ammoniakk. Den største fordelen sies å være at det kan redusere behovet for å bytte ut hele skipet eller gjennomføre store ombygninger (Øystese, 2020). Ulempen er at når ammoniakk brennes direkte i en forbrenningsmotor vil det gi utslipp av NO_x. Dette problemet kan imidlertid håndteres med en teknologi som heter SCR-teknologi (Selective Catalytic Reduction) som renser eksosen for NO_x. Andre fordeler er at en forbrenningsmotor har en effektiv mekanisme som gjør det mulig å skru motoren hurtig av og på i motsetning til brenselceller som krever lengre tid. I tillegg har brenselceller dyr livssyklus-kostnader fordi teknologien fortsatt er dyr og det kreves mye vedlikehold. (Chararis et al., 2022; Øystese, 2020)

Fortsatt hersker det midlertidig uenigheter om hva som bør satses på av ammoniakk og hydrogen. I 2022 signerte Torghatten Nord en kontrakt på 5 millioner kroner med Statens vegvesen. Denne avtalen skal få ferger i Lofoten over på hydrogen innen 2025. Fergene skal etter planen gå på 85% hydrogen og 25% bærekraftig biodrivstoff. (Danielsen et al., 2022). I tillegg til Torghatten Nord, satser fergeselskapet Norled på hydrogen. I 2021 lanserte de fergen «MF hydra» (Skipsrevyen, 2021). De siste årene har hydrogen som generelt drivstoff blitt lansert som satsingsområde både i det politiske Norge, samt i EU (Danielsen et al., 2022).

Men er dette en riktig vurdering av våre folkevalgte og av næringslivet? Er satsing på hydrogen den riktige allokeringen av ressursbruk eller er det energiformer som ammoniakk vi bør rette fokuset mot? Det skal denne oppgaven utforske. I tillegg skal vi se på forskjellene fra dagens dieseldrevne skip og hvor markant et skifte i energiform vil utgjøre innen skipsfart.

1.2. Kunnskapsgrunnlag

I kunnskapsgrunnlaget blir eksisterende forskning innenfor feltet beskrevet. Videre er det valgt å dele kunnskapsgrunnlaget i to deler. Første delen tar for seg kunnskap om ulike produksjonsmetoder av ammoniakk og hydrogen. Det er ikke valgt å ta med produksjonsmetoder av diesel da det anses som en velkjent teknologi. Videre vil andre del se på tidligere livsløpsanalyser av ammoniakk, hydrogen og diesel, som er relevante for denne oppgaven.

De relevante studiene er hentet fra søkemotorene Elvieser, Springer, Web of Science og Frontiers. Kunnskapsgrunnlaget vil gi et bilde av hvilke fagkunnskap som allerede finnes innenfor ammoniakk, - og hydrogenproduksjon samt de representative drivstoffene i skipsfart. Dette kapittelet vil også brukes for å sammenligne resultatene denne oppgaven kommer frem til.

1.2.1. Analyser av ammoniakk, - og hydrogenproduksjon

I 2018 fullførte Singh et al. (2018) en livsløpsanalyse av fem forskjellige metoder for å produsere ammoniakk. Alle metodene bruker Haber-Bosch som produksjonsmetode for ammoniakk samt samme type nitrogenproduksjon. I denne analysen varierer hydrogenproduksjonen. I tillegg er produksjonsmetodene for hydrogen dampreforming av naturgass, underjordisk kullgassifisering, gassifisering av biomasse og elektrolyse av vann med elektrisitet fra vindkraft og solceller. Underjordisk kullgassifisering analyseres både med og uten karbonlagring. Hovedfokuset i studien var å se på kategoriene global oppvarming (CO₂-e), forsuring, økotoksisitet, human toksisitet, kreftfremkallende stoffer og abiotisk utvarming.

Den produksjonsmetoden som hadde høyest klimagassutslipp var underjordisk kullgassifisering uten karbonlagring, etterfulgt av dampreforming av naturgass. Utslippene her var på henholdsvis 4 og 3 kgCO₂-e per kilogram ammoniakk produsert. Metodene som ga

lavest utslipp var gassifisering av biomasse og elektrolyse av vann med elektrisitet fra vindkraft. Her lå utslippet på henholdsvis 0,9 og 0,5 kg CO₂-e.

I studien til Chararis et al. (2022) var målet å finne ut om ammoniakk kunne bidra til å redusere klimagassutslippene i maritim transport. Studien er en livsløpsanalyse og tok utgangspunkt i datasett fra 2061 bulkskip og åtte forskjellige produksjonsmetoder av ammoniakk. Well-to-tank er beregnet på utslippene fra produksjonsmetodene fra Singh et al. (2018) sin studie. I tillegg har de inkludert produksjon av ammoniakk fra 3-trinns Cu-Cl-syklus fra et studie av Karaca (2019). For tank-to- well er Fremdriftssystemet basert på ME-LI, som er den mest potente typen ammoniakkdrevne forbrenningsmotor, hvorav forbruket er antagelser fra MAN CEAS sitt motorberegningsprogram. Det betyr at forbruket er basert på estimer. Resultatene i analysen viser at skip som går på ammoniakk fra 3-trinns Cu-Cl-syklus har minst utslipp, etterfulgt av gassifisering av biomasse og elektrolyse drevet av vindkraft. Ammoniakk fra underjordisk kullgassifisering uten karbonlagring og ammoniakk fra dampreforming viser seg å ha høyest klimagassutslipp, etterfulgt av marin gassolje også kalt MGO som er en form for diesel. Videre konkluderer studien med at klimagasseffekten til et bulkskip i et well-to-weel (propeller)-perspektiv avhenger av produksjonsmetoden av ammoniakk.

I Bicer et al. (2016) sin studie, er fire forskjellige metoder på å produsere ammoniakk sammenlignet ved bruk av livssyklusanalyse. Produksjonsmetodene består av hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse av vann og Haber-Bosch-prosessen. Elektrisiteten som systemene krever, kommer fra vannkraft, kjernekraft, bioenergi og kommunalt avfall. Ved å bruke metoden for livsløpsanalyse undersøker studien hvilke produksjonssystem som gir minst klimagassutslipp i løpet av systemets livssyklus. Andre kategorier som blir identifisert er menneskelig toksisitet og abiotisk uttømming. De laveste utslippene i denne analysen viste seg å være bruk av vannkraft og kommunalt avfall til å drive elektrolyse av vann for å fremstille hydrogen.

Målet med studien til Ghavam et al. (2021) var å undersøke tidligere studier på konvensjonelle og nye metoder for bærekraftig ammoniakkproduksjon. For å besvare forskningsspørsmålet tok studien utgangspunkt i tre hovedkategorier. Den første var å finne de mest bærekraftige metodene for hydrogenproduksjon som kreves for

ammoniakkproduksjon. Videre skulle forskerne finne nye bærekraftige ammoniakkproduksjonsteknologier. Deretter ønsket de å se på utfordringene knyttet til bærekraftig hydrogen, - og ammoniakkproduksjon. Siden produksjon av grønn ammoniakk er avhengig av hvordan hydrogen blir fremstilt, var søkelyset på bærekraftige produksjonsveier for hydrogen. Videre ble de mest brukte teknologiene vurdert for ammoniakkproduksjon; dampreforming og vannelektrolyse kombinert med Haber-Bosch-prosess.

Resultatene i litterærstudien viser at nøkkelen ligger hvor bærekraftig hydrogenproduksjonen er, da hydrogen er hovedkomponenten i ammoniakksyntesen. Videre viser det seg at dampreforming er den produksjonsteknologien som bruker minst vann, hvorav elektrolyse av vann bruker mest. Sett i lyset av klimagassutslipp er dampreforming teknologien som slipper ut mest. Elektrolyse av vann drevet av fornybare energikilder slipper på sin side ut minst. Lokasjonen til ammoniakkproduksjonen er også en viktig faktor når det gjelder tilgjengelighet på råstoff og bærekraft.

Suleman et al. (2015) gjennomførte en analyse for å undersøke hvor mye utslipp ulike hydrogenproduksjonsmetoder bidro med. For å anslå miljøpåvirkningene til de forskjellige produksjonsmetodene gjennomførte de livsløpsanalyser av alle produksjonsmetodene. Metodene de tar for seg i studien er dampreforming av naturgass, vannelektrolyse ved bruk av ulike celler og elektrolyse av vann med vind og solceller som strømforsyning til prosessen. Ut i fra resultatene til Suleman et al. (2015) viser det seg at dampreforming av naturgass er den produksjonsmetoden som slipper ut mest i alle miljøpåvirkningene, klimagassutslipp inkludert. Metodene som slipper ut minst klimagasser i form av gCO₂-e er elektrolyse av vann drevet av vannenergi og solenergi henholdsvis.

Song et al. (2022) undersøkes energieffektiviteten til forskjellige maritime drivstoffer. Drivstoffene de ser på er hydrogen, ammoniakk, metanol og flytende naturgass også kalt LNG. Delprosessene som er med i analysen er; produksjon, lagring, lasting, transport og lossing. I tillegg er en følsomhetsanalyse av temperatur, lagringstid, rørlengde og transporttid tatt med i studien. Analysen viser at ammoniakk og metanol har mye mindre energitap i energikjedene enn naturgass og hydrogen. En av grunnene er at den kan transporteres effektivt over lange avstander. Sensitivitetsanalysen viser at flytende hydrogen var mest sensitivt for alle parameterne etterfulgt av flytende naturgass, ammoniakk og metanol.

1.2.2. Livsløp- og energikjedeanalyser av ammoniakk og hydrogen

Al-Breiki og Bicer (2021) har utført en komparativ livsløpsanalyse av fem ulike energibærere; flytende naturgass, metanol, dimetyleter, flytende hydrogen og flytende ammoniakk som produserer fra dampreforming av naturgass eller fornybare energikilder. Målet med analysen er å undersøke klimagassutslippene fra hele livssyklusen til drivstoffene. Analysen har og tatt for seg lekkasjer og «boil-off-gas» som er utslipp i form av damp fra lagerbeholderen til drivstoffet. Energikjeden i denne analysen består av produksjon, lagring, transport via en tankbåt til forskjellige avstander, bruk i en forbrenningsmotor til kjøretøy i form av en bil.

I studien undersøkes klimagassutslipp fra ulike produksjonsmetoder for flytende ammoniakk. Alle produksjonsmetodene inkluderer Haber-Bosch-prosessen. Følgende metoder av hydrogenproduksjon var; vannelektrolyse med vindenergi, vannelektrolyse med solceller og dampreforming av naturgass med og uten karbonlagring. I denne studien undersøker de i tillegg to ulike strømkilder for å kjøle ned hydrogenet på, den ene er strøm fra naturgass og den andre er strøm fra fornybar energikilde. Resultatene viser at dampreforming av naturgass er den metoden som slipper ut mest utslipp ved både hydrogen, - og ammoniakkproduksjon. Vis dampreforming foregår med karbonfangst og-lagring vil utslippene reduserer betraktelig for begge drivstoffene. Utover var produksjon av hydrogen og ammoniakk med vannelektrolyse drevet av vindkraft den metoden som slapp ut minst klimagasser. Videre viser resultatene at opprinnelsen til energikilden til flytendegjøringen av hydrogen er avgjørende på hvor store utslippene vil bli.

I studien til Bicer og Dincer (2018) er det gjennomført en livssyklusanalyse hvor det er tatt hensyn til produksjonen av transoceaniske fraktskip og tankskip, produksjon og transport av hydrogen og ammoniakk i gassform, samt utnyttelse av drivstoffene i de representative maritime kjøretøyene. De maritime kjøretøyene går på ammoniakk, hydrogen og tung fyringsolje.

I tillegg analyserer begge drivstoffene som *duel fuel* med tung fyringsolje, samt både hydrogen og ammoniakk (50/50). Hensikten med analysen er å redusere miljøpåvirkningene forårsaket av marine transportsystemer. Flere produksjonsmetoder av hydrogen og ammoniakk er og tatt i betraktning, hvorav de alternative drivstoffene produseres ved bruk av fornybare ressurser, nemlig; biomasse, avfall og geotermisk energi. Videre blir ammoniakk

produsert med Haber-Bosch-prosessen. I denne studien er nitrogenproduksjonen i tatt hensyn til i livsløpsanalysen. Parallelt er elektrisitet for prosessen, kjølevann og overskuddsvarme samt grunnarbeid for luftseperasjonsanlegg er med i beregningene. I tillegg er transporten av ammoniakk og hydrogen fra produksjonsstedet til havnen tatt med i analysen. For å definere drivstofforbruk og utslippsfaktor brukes GREET 16-programvaren, hvor energiforbruket ble beregnet for tankskipene i MJ/mil-tonn. I tillegg til produksjonen av båten, er det tatt med havnfasiliteter samt vedlikehold og drift av havnen.

Resultatene i studien viser at hydrogen fra geotermal energi ga minst utslipp etterfulgt av ammoniakk fra geotermal energi for både fraktskip og tankskip. Det høyeste utslippet er fra tung fyringsolje (diesel) hvor utslippet lå på over 5 ganger mer enn det utslippet hydrogendrevne skip hadde.

I Perčić et al. (2022) sin studie ble det gjennomført en livssyklusanalyse, samt en livssyklus kostnadsvurdering av hydrogen, ammoniakk og diesel som drivstoff. Livssyklus kostnadsvurdering ser på de økonomiske aspektet. Hydrogen og ammoniakk antas å forbrenne i brenselceller, og diesel i en konvensjonell dieselmotor (forbrenningsmotor). Videre vurderes følgende drivstoffopprinnelse; fossilt brensel (grått drivstoff), fossilt brensel med CO₂-fangst og drivstoff som produseres fra fornybare energikilder (grønt drivstoff). I analysen er det valgt ut ferger som operer på korte, middels og relativt lange ruter.

Livsløpsanalysen av dieseldrevne skipene inkluderte produksjonsprosessen av dieselmotoren, prosessen til well-to-propeller (utvinning av råolje, transport til raffineriet, dieselraffinering og distribusjon til pumpen), og forbrenning av diesel i motoren (tank-to-propeller. Det blir antatt at råoljen kommer fra Midtøsten og transportert på lastebil til Kroatia. For å beregne drivstofforbruk per distanse for dieseldrevne båten, har de multiplisert energiforbruk per distanse (kWh/nm) med spesifikt drivstofforbruk (kg/kWh). Videre har de beregnet utslipp ved å multiplisere forskjellige utslippsfaktorer med drivstofforbruk per distanse (kg/nm).

I Livsløpsanalysen av de brenselcelledrevne skipene inkluderes produksjonen av elektrisk motor, batteri og brenselcelle, prosessen i well-to-propeller (råstoffutvinning, hydrogen, - og ammoniakkproduksjon med flytendegjøring, distribusjon og strømbruk) og tank-to-propeller (skipsdrift). Råstoffutvinningen betyr naturgass for brun ammoniakk og hydrogen. For grønn ammoniakk og hydrogen er det elektrisitet generert fra sol, - vind, - og vannenergi. Disse

prosessene er hentet fra GREET 2020-databasen. For å starte brenselcellen er det antatt at det brukes elektrisitet fra europeisk strømmiks hentet fra GREET 2020.

Det er to ulike brenselceller tatt med i analysen; SOFC- og PEMFC-drevet skip. For å beregne drivstofforbruket til hydrogen i begge typer brenselceller dividerer man energiforbruket (kWh/nm) med virkningsgraden til brenselcellen (%) og netto brennverdi (kWh/kg). På ammoniakk PEMFC-drevne skip blir energiforbruket i tillegg til faktorene nevnt ovenfor, dividert med virkningsgraden til crackeren (80 prosent) og renseren (90 prosent). Årsaken til dette er nedbrytingen av nitrogen og hydrogen må skje i en separat enhet før den kommer inn i brenselcellen. Det vil si at ammoniakk brukt i en PEMFC har flere delprosesser og mindre virkningsgrad. Videre har de med oppstartsperioden i analysen, det vil si tidspunktet for å nå driftstemperaturen til brenselcellesystemet for å starte prosessen med elektrisitetsproduksjon. Her ser artikkelforfatterne på to metoder; å varme systemet med landstrøm når skipet ligger til kai, og å varme systemet med batteristrøm mens skipet er i drift. PEMFC med ammoniakk som drivstoff krever i denne prosessen mer energi enn brenselcellene som går på hydrogen.

Resultatene basert på livsløpsanalysen indikerer på at grønt hydrogen gir det laveste utslippet i CO₂-e tett etterfulgt av grønn ammoniakk og blå hydrogen. I forhold til livssyklus kostnadsvurdering er grønt hydrogen det dyreste av de alternative drivstoffene, hvorav blå ammoniakk kommer best ut av den totale analysen kostnads- og utslippsmessig.

Noh et al. (2022) utførte en miljø- og energikjedeanalyse av komprimert hydrogen, flytende hydrogen, organisk flytende hydrogen og ammoniakk. Kjeden inkluderer alle stadier fra produksjon på en offshore-plattform til transport på et landanlegg og lagring som hydrogen i gassform. Strømforsyningen kommer enten fra elektrisitet fra nasjonalt nett i kombinasjon med vindkraft eller fra strømforsyning med kun vindkraft. Det viser seg at klimagassutslippene fra de alternative drivstoffene har et høyere utslipp med nasjonalt strømnett kombinert med vindkraft enn når kun elektrisitet fra vindkraft blir benyttet. Kjeden med høyest virkningsgrad (effektivitet) var hydrogen i gassform etterfulgt av ammoniakk, organisk hydrogen og flytende hydrogen. Effektiviteten avtok jo lengre drivstoffet måtte bli fraktet med båt.

I henhold til klimagassutslipp når strømproduksjonen er basert på nasjonalt strømmnett kombinert med vindkraft, i tillegg til kort transport av drivstoff, har hydrogen i gassform lavest utslipp. Deretter følger flytende hydrogen, ammoniakk og organisk hydrogen. Hvis transporten er lang og strømforsyningen stammer fra vindkraft, hadde ammoniakk lavest utslipp etterfulgt av flytende hydrogen, hydrogen i gassform og organisk hydrogen. Dette tilsier at transporten av drivstoffet og opphavet til elektrisiteten hadde stor påvirkning på resultatene.

Ye et al. (2022) har sammenlignet flytende ammoniakk, komprimert og flytende hydrogen som brensel i brenselceller i lasteskip og vanntaxi. Videre har de sammenlignet de alternative drivstoffene med diesel i en forbrenningsmotor. Målet med studien var å finne hvor mye mindre klimagassutslipp hydrogen og ammoniakk kunne spare i forhold til diesel i et livsløp. I tillegg til klimagassutslippene, så de på kostnadene for hele livsløpet. Systemene for vanntaxi som var med i analysen var flytende ammoniakk og hydrogen i gassform i PEMFC brenselceller, ammoniakk som dual fuel i forbrenningsmotor og diesel i forbrenningsmotor. For lasteskipet var systemene hydrogen i gassform og flytende ammoniakk i brenselceller, ammoniakk som dual fuel med diesel i forbrenningsmotor og diesel i forbrenningsmotor. I analysen kommer det frem at grønn ammoniakk har lavest klimagassutslipp ($\text{kgCO}_2\text{-e/kg-drivstoff}$) i et livsløpsperspektiv. Tett på har hydrogen nest lavest utslipp. Diesel derimot er drivstoffet som bidrar til det desidert største utslippet. Både hydrogen og ammoniakk er fremstilt med vannelektrolyse drevet av fornybar energi i denne analysen.

Resultatene i analysen viser at hydrogen i gassform er den mest effektive av alle systemene for vanntaxi etterfulgt av flytende ammoniakk. Flytende ammoniakk i brenselcellen har lavere effektivitet fordi systemet krever en ekstra cracking enn systemet med hydrogen som drivstoff. Dette er kun hvis belastningsfaktoren er under 48 prosent. Hvis den er høyere, er diesel det systemet som er mest effektivt. For lasteskipet var flytende ammoniakk i brenselcelle det minst effektive alternativet. Videre viser resultatene at hydrogen (både gass og flytende) er det systemet som slipper ut minst klimagassutslipp for vanntaxi, etterfulgt av ammoniakk og ammoniakk som dual fuel. I motsetning til diesel kan disse drivstoffene redusere livssyklusen av drivhusgasser med henholdsvis 91 prosent, 88 prosent og 72 prosent. For lasteskipet spares utslippene for henholdsvis 91 prosent, 88 prosent og 80 prosent sammenlignet med diesel.

1.3. Oppsummering kunnskapsgrunnlag

Det kommer frem i kunnskapsgrunnlaget at hydrogen- og ammoniakkproduksjon fra fornybare energikilder er den metoden som bidrar til minst klimagassutslipp. Videre er det avgjørende i ammoniakkproduksjonen at hydrogenproduksjonen kommer fra fornybare energikilder da ammoniakk består hovedsakelig av hydrogen. Hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse av vann drevet av vindkraft er den metoden som bidrar til minst utslipp målt i CO₂-e i de fleste studiene beskrevet ovenfor. Elektrolyse er derimot avhengig av at energikilden kommer fra fornybare energikilder for at den skal ha lite miljøpåvirkningen. Biomasse til hydrogenproduksjon kommer også godt ut i studiene. Nedsiden er imidlertid at trengs ekstreme mengder biomasse for at det skal dekke det fremtidige behovet for utslippsfri drivstoff i fremtiden.

Størstedelen av studiene konkluderer med at båter som går på diesel/bunkers olje slipper ut mest klimagassutslipp, men noen studier viser at hydrogenproduksjon fra dampreforming av fossilt brensel er den metoden som bidrar til størstedelen av klimagassutslipp. Videre viser studiene at grønt hydrogen slipper ut minst klimagassutslipp i Well-to-propell. I kunnskapsgrunnlaget er hydrogen og ammoniakk i brenselceller som er tatt i betraktning, og det kommer frem at hydrogen har bedre effektivitet enn ammoniakk i brenselceller. Ammoniakk som *dual fuel* viser seg å redusere utslippene i forhold til diesel. Det er videre mangel på analyser og studier der ammoniakk blir brukt i en forbrenningsmotor alene.

Når det gjelder Well-to-tank er det noe varierende resultater. Noen studier viser til at hydrogen i gassform er produksjonen som slipper ut minst klimagasser gjennom hele produksjonskjeden, Når det gjelder flytende ammoniakk og flytende hydrogen, viser de fleste resultatene – med visse unntak - at flytende ammoniakk er den som slipper ut minst. Det vil si at flytende ammoniakk og hydrogen ligger relativt likt i forhold til utslipp for drivstoffproduksjon. Videre viser noen studier at ammoniakk som *dual fuel* reduserer utslippene i forhold til diesel.

1.4. Problemstilling

Basert på den ovenstående introduksjonen krystalliseres denne oppgavens problemstilling. I denne analysen skal energibruk og klimagassutslipp for skip som går på ammoniakk, hydrogen og diesel undersøkes nærmere. Videre er det valgt en overordnet problemstilling, samt tre underordnede problemstillinger. Følgende overordnet problemstilling skal undersøkes i denne oppgaven:

Kan ammoniakk som drivstoff i skip bidra til å redusere klimagassutslipp?

De underordnede problemstillingene lyder følgende:

1. *Hvilken produksjonsmetode av ammoniakk fører til minst klimagassutslipp?*
2. *Er ammoniakk som drivstoff et bedre alternativ enn hydrogen sett i lyset av klimagassutslipp?*
3. *Vil ammoniakk slippe ut mindre klimagasser i forhold til diesel?*

Problemstillingen bli besvart ved å beregne den totale energibruken og utslippet for båter som går på ammoniakk, hydrogen og diesel. Metoden som er blitt brukt kommer fra Blok og Nieuwlaar (2021) og heter *second-order Energy Chain Analysis*, på norsk; andregradsenergikjedeanalyse, livsløpsenergikjedeanalyse eller energikjedeanalyse. Dette er en metode som tilhører LCA-familien. Den går ut på å finne energibruk og utslipp i en well-to-wheel eller i denne oppgaven well-to-propeller sammenheng, hvor beregningene består av to deler:

1. Energibruk og utslipp for produksjon av drivstoff
2. Energibruk og utslipp av drivstoff ved bruk i båt

Utslippene blir målt i CO₂-ekvivalenter, videre forkortet CO₂-e i resten av oppgaven.

1.5. Valg av energikjedene

De valgte energikjedene blir presentert i dette delkapittelet. I denne oppgaven er det valgt å se på syv energikjeder for å besvare problemstillingen. De valgte energikjedene baserer seg på informasjonen som kommer frem i introduksjonen og kunnskapsgrunnlaget. Se Tabell 1 for kort oversikt over energikjedene. Metodekapittelet beskriver energikjedene mer detaljert.

Kunnskapsgrunnlaget viser at det er flere metoder å produsere ammoniakk på, og at hydrogenproduksjonen er avgjørende for ammoniakkproduksjonens energibruk og utslipp. Utover dette, har vannelektrolyse med strøm vist seg å være en metode som bidrar til lave utslipp gitt at strømmen kommer fra fornybar strømproduksjon. Derfor er det fire energikjeder som har vannelektrolyse som delprosess, hvorav to energikjeder produserer ammoniakk og to produserer hydrogen. For ammoniakkproduksjon er Haber-Bosch-prosessen valgt, da det er den mest brukte metoden globalt. Videre er det valgt å ta med hydrogenproduksjon gjennom vannelektrolyse med strøm fra en fornybar og en fossil energikilde, da det er interessant å se hvordan de ulike energikildene påvirker utslippene i vannelektrolyse.

Den fornybare strømmen er antatt å komme fra vindkraft, da det kommer frem i introduksjonen at dette er en fremtidig energikilde til grønn ammoniakk- og hydrogenproduksjon. Til sammenligning er den fossile strømmiksen bestemt å være strøm fra kullkraft. Den mest brukte metoden for å produsere hydrogen globalt er gjennom dampreforming av naturgass. Det er derfor sett på som hensiktsmessig å inkludere denne type produksjon i analysen til sammenligning. Derfor er det en energikjede for ammoniakk og hydrogen der hydrogen er produsert ved dampreforming av naturgass. I disse to energikjedene er strøm fra norsk strømmiks tilført noen av delprosessene.

Siden størrelsene på skipet har stor betydning for utslippene, er det valgt å se på et mellomstort bulkskip. I tillegg er det behov for teknologier og løsninger til olje og diesel for båter med langdistanse, som tank-container og bulkskip. Derfor er både ammoniakk og hydrogen flytende. Dette er fordi det er lettere å lagre og håndtere. Videre er ammoniakk brukt i forbrenningsmotor ansett som en fremtidig løsning, og er derfor valgt som motortype for ammoniakk i denne oppgaven. I tillegg er det stort kunnskapshull på ammoniakk brukt i forbrenningsmotor. Det vil derfor være interessant å se hvordan resultatene blir ettersom ammoniakk bruk i forbrenningsmotor er antatt som den fremtidige løsningen.

For å ha noe å sammenligne med, er det besluttet å ha med en båt som går på diesel, da de fleste av dagens sjøfartøy går på enten tung fyringsolje eller marine gassolje, som er en type diesel. Det ble bestemt å ikke ta med norsk strømmiks som energiforsyning for vannelektrolyse og Haber-Bosch-prosessen. Grunnen til det er fordi utslippene regnes å være relativt lik vindkraft.

Tabell 1: Oversikt over valgte energikjeder

Navn	Type drivstoff	Produksjonsmetode	Energikilde	Motortype
A-1	Ammoniakk	Dampreforming + Haber-Bosch-prosess	Naturgass	Forbrenningsmotor
A-2	Ammoniakk	Elektrolyse + Haber-Bosch-prosess	Vindkraft	Forbrenningsmotor
A-3	Ammoniakk	Elektrolyse + Haber-Bosch-prosess	Kullkraft	Forbrenningsmotor
H-1	Hydrogen	Dampreforming	Naturgass	Brenselcelle
H-2	Hydrogen	Elektrolyse	Vindkraft	Brenselcelle
H-3	Hydrogen	Elektrolyse	Kullkraft	Brenselcelle
D-1	Diesel	Raffinering	Råolje	Forbrenningsmotor

1.6. Oppbygging av oppgaven

Denne oppgaven består av fem deler inkludert introduksjonen. Etter introduksjonen er oppgaven er bygget opp følgende: i kapittel 2 presenteres oppgavens metodekapittel. Her blir selve metoden og fremgangsmåten presentert. Kapittel 3 vil all data brukt i beregningene i oppgaven bli beskrevet, og denne delen er på mange måter oppgavens hoveddel. Det er helt avgjørende at oppgaven består av godt etablert datagrunnlag for å svare på problemstillingen. I kapittel 4 presenteres og diskuteres oppgavens resultater for energibruk, klimagassutslipp, følsomhetsanalyser og scenarioanalyser. Videre vil dette kapittelet inneholde datavalidering og datautfordringer hvor ulike utfordringer og usikkerheter blir beskrevet. Til slutt i kapittel 4 vil videre arbeid innenfor tema nevnes punktvis. Helt til slutt i kapittel 5 presenteres konklusjonen.

2. Metode

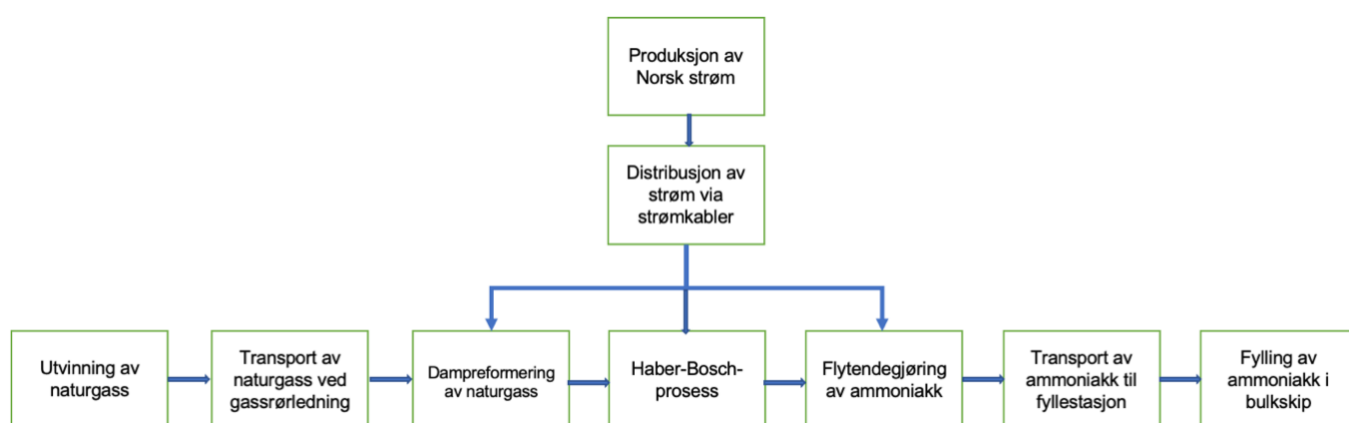
I metodekapittelet skal metodene som blir brukt for å besvare problemstillingen bli presentert. Videre er kapittel delt inn i tre deler. Første del presenterer de syv energikjedene med detaljert beskrivelse og illustrasjon. Del to presenterer de ulike analysemetodene som er blitt brukt i oppgaven; energikjedeanalyse, beregningsmetode, følsomhetsanalyse og scenarioanalyse. Siste del av kapittelet presenterer avgrensninger i oppgaven, hvordan datainnsamlingen er blitt gjort og til slutt forutsetninger og antakelser

2.1. Presentasjon av energikjedene

I dette delkapittelet er de valgte energikjedene fra Figur 3 beskrevet videre i detalj. I tillegg til en beskrivelse av energikjedene og delprosessene, er hver energikjede illustrert.

2.1.1. Energikjede A-1

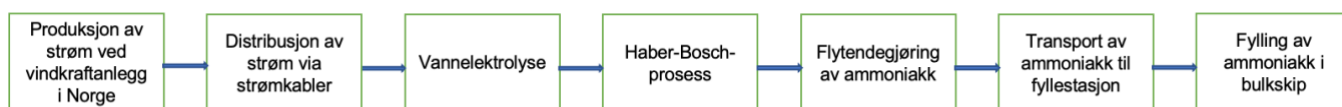
I energikjede A-1 (Figur 3) blir ammoniakk fremstilt fra hydrogen som igjen er fremstilt av naturgass ved dampreforming. Naturgassen blir utvunnet i Nordsjøen og fraktet via gassrørledninger til et raffineri på fastlands-Norge. Videre fra land blir naturgassen fraktet til produksjonsanlegget. Ved anlegget vil det bli produsert hydrogen ved dampreforming av naturgass. Ved samme produksjonsanlegg blir ammoniakk fremstilt etter Haber-Bosch-prosessen og flytendegjort. Deretter blir ammoniakken fraktet til en fyllestasjon (havn), hvor den så blir tanket i båten. Dampreforming, Haber-Bosch-prosessen og flytendegjøringen benytter seg av tilført energi som i denne oppgaven er fra norsk strømmiks.



Figur 3: Illustrasjon av energikjede A-1

2.1.2. Energikjede A-2

I energikjede A-2 (Figur 4) er det grønn ammoniakk som blir fremstilt. Det vil si at det er kun fornybar strømproduksjon i alle delprosessene i energikjeden. Den valgte fornybare energikilden er vindkraft som er produsert i Norge. Strømmen vil bli distribuert gjennom kabler fra vindkraftanlegget til der ammoniakken blir produsert. I denne energikjeden blir hydrogen fremstilt ved vannelektrolyse. Videre blir ammoniakk produsert ved Haber-Bosch prosessen og flytendegjort. Deretter blir ammoniakk fraktet til en fyllestasjon for å så bli tanket i båten.



Figur 4: Illustrasjon av energikjede A-2

2.1.3. Energikjede A-3

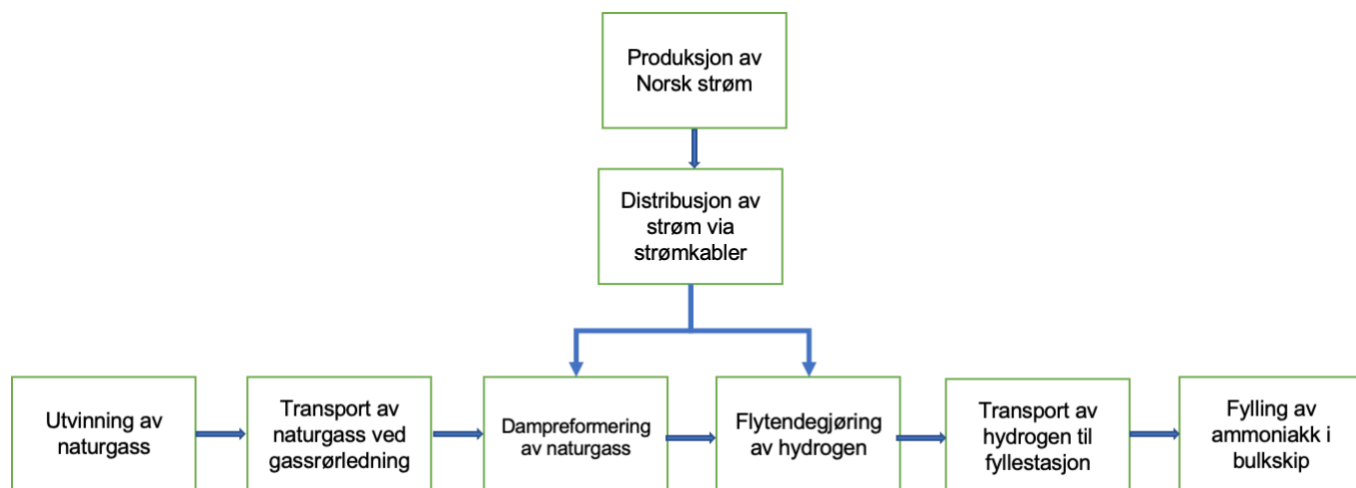
Energikjede A-3 (Figur 5) bruker fullstendig fossilbasert strømproduksjon til å drive prosessene i energikjeden. Det er valgt å bruke strøm fra kullkraftverk i Tyskland. Etter at kullet er utvunnet og blitt brukt til å produsere strøm i et kullkraftverk, distribueres strømmen gjennom strømkabler fra Tyskland til et produksjonsanlegg i Norge. Ved produksjonsanlegget blir det produsert hydrogen ved vannelektrolyse og deretter blir hydrogenet tilført i Haber-Bosch-prosessen hvor ammoniakk blir fremstilt. Deretter blir ammoniakken flytendegjort og fraktet til en fyllestasjon før den blir tanket i en båt.



Figur 5: Illustrasjon av energikjede A-3

2.1.4. Energikjede H-1

I Energikjede H-1 (Figur 6) er hydrogen fremstilt ved dampreforming av naturgass. Samme som i energikjede A-1, er naturgassen utvunnet i Nordsjøen og transportert via gassrørledninger under vann til et raffineri på land i Norge. Fra raffineriet blir naturgassen fraktet til produksjonsanlegget der naturgassen blir fremstilt til hydrogen ved dampreforming. Videre blir hydrogenet nedkjølt og fraktet til en fyllestasjon før den tankes i en båt.



Figur 6: Illustrasjon av energikjede H-1

2.1.5. Energikjede H-2

Samme som Energikjede A-2 er energikjede H-2 (Figur 7) basert på 100% fornybar strømproduksjon. I denne energikjeden blir hydrogen produsert ved vannelektrolyse. I likhet med energikjede H-2 er strøm fra vindkraft i Norge valgt som primærkilde. Det vil si at strømmen blir produsert i et vindkraftanlegg og deretter distribuert via kabler frem til produksjonsanlegget. Hydrogen blir så produsert ved vannelektrolyse. Videre blir hydrogenet flytendegjort og fraktet til en fyllestasjon ved en havn før den fylles på en båt.



Figur 7: Illustrasjon av energikjede H-2

2.1.6. Energikjede H-3

Samme som i Energikjede A-3, bruker energikjede H-3 (Figur 8) fullstendig fossilbasert strømproduksjon til å drive alle prosessene i energikjeden. Strømmen kommer fra

kullkraftverk i Tyskland hvor den videre blir distribuert via strømkabler til produksjonsanlegget, hvor strømmen blir brukt til å utføre vannelektrolyse for produksjon av hydrogen. Videre blir hydrogenet flytendegjort og fraktet til en fyllestasjon nær en havn hvor den så blir tanket på en båt.



Figur 8: Illustrasjon av energikjede H-3

2.1.7. Energikjede D-1

Energikjede D-1 (Figur 9) er en fullstendige fossil energikjede. Primærenergikilden i denne kjeden er råolje. Utvinningen av råoljen antas å finne sted på en oljeplattform i Nordsjøen, hvor den deretter blir fraktet via tankskip eller oljerørledninger under vann til et raffineri på land. Videre blir råoljen lagret før den blir omdannet og behandlet til diesel ved raffineriet. Til slutt blir dieselen fraktet med en tankbil til en fyllestasjon ved en havn før den blir tanket på en båt.



Figur 9: Illustrasjon av energikjede D-1

2.2. Energikjedeanalyse

For å besvare problemstillingen i denne oppgaven er det i hovedsak gjennomført energikjedeanalyser av de ulike energikjedene. Energikjedeanalyse er i utgangspunktet en livsløpsanalyse. Livsløpsanalyse er en metode for å analysere samt kartlegge både energibruk og miljøbelastninger et produkt eller en tjeneste har i løpet av deres levetid. Dette inkluderer utvinning og prosessering av råstoff, samt produksjonen, bruk og etterbruk av varen eller tjenesten. Transporten av råstoff og delproduktene i alle prosessene kommer i tillegg. (Holden, 2003).

Livsløpsanalyse er ofte forkortet LCA. Forkortelsen kommer etter Life Cycle Assessment eller Life Cycle Analysis som metoden heter på engelsk. International Organization for Standardization, også kalt IOS, har utviklet flere internasjonale standarder for å dekke LCA i

en mer global forstand. For eksempel ISO 14040 (LCA-Principals and Guidelines) og ISO 14041 (LCA-Life Inventory Analysis). (El Hagggar, 2005).

Forskjellen på livsløpsanalyse og energikjedeanalyse er at livsløpsanalyser som regel tar for seg flere miljøpåvirkninger, som sett i kunnskapsstatusen. Energikjedeanalyser derimot kartlegger mengden primærenergi som kreves for å oppfylle en gitt funksjon. Målet med en energikjedeanalyse er å beregne den totale mengden primærenergi som kreves for å levere en gitt mengde energi. Det vil si mengde primærenergi som kreves for å produsere drivstoffet. I følge Blok og Nieuwlaar (2021) heter dette på engelsk; Energy Requirement for Energy. Forkortet heter det ERE, oversettes til norsk; energibruk, energikrav eller energibehov. ERE er derfor mengde primærenergi som trengs for levere en bestemt mengde energi. Utover vil man kunne beregne utslippet til hver energikjede ved å bruke mengden primærenergi. (Blok & Nieuwlaar, 2021). Som nevnt tidligere i oppgaven blir utslipp målt i CO₂-e.

Analysen er hovedsakelig delt i to deler i denne oppgaven. Første delen tar for seg de ulike drivstoffenes livsløp, som i denne oppgaven er hydrogen, ammoniakk og diesel. Denne delen innebærer alle delprosesser som kreves for å produsere drivstoffet til det er klar til bruk. Andre delen tar for seg bruken av drivstoffet i ett bulkskip. Videre begrensninger og forutsetninger blir presentert i delkapitlene under.

2.3. Well-to-propeller analyse (WTP)

For å gjennomføre energikjedeanalysen blir en well-to-propeller analyse benyttet, videre i oppgaven kalt WTP-analyse. Dette begrepet blir ofte brukt når man skal utføre en livsløpsanalyse i den marine sektoren. I transportsektoren bruker man som regel begrepet well-to-wheel (WTW-analyse) når man gjennomfører en livsløpsanalyse, men siden denne oppgaven ser på drivstoff for den marine transportsektoren anses WTP-analyse som riktig begrep for denne oppgaven. WTP står for well-to-propeller.

Videre deler man WTP-analyser i to deler. Den første delen kalles well-to-tank, forkortet kalt WTT. I denne delen foregår analysen av drivstoffet, det vil si alle delprosessene fra utvinning av råstoff til drivstoffet er klar til å brukes i skip. Den andre delen heter tank-to-propeller, forkortet kalt TTP. Denne delen tar for seg bruken av drivstoffet når skipet går/kjør.

2.3.1. Well-to-tank, WTT

I en WTT-analyse er det vanlig å dele opp analysen inn i forskjellige delprosesser (Holden, 2003). De ulike energikjedene har ulike delprosesser samt antall delprosesser i energikjeden.

Følgende delprosesser er med i denne oppgaven:

- Utvinning av energikilde (primærenergi)
- Transport av energikilde til produksjonsstedet til drivstoffet
- Lagring av energikilden
- Strømproduksjon fra vindkraft eller kullkraft
- Distribusjon av strøm til produksjonsstedet til drivstoffet
- Alkalisk elektrolyse for hydrogenproduksjon
- Dampreforming av naturgass
- Haber-Bosch-prosess for ammoniakkproduksjon
- Kjøling av hydrogen og ammoniakk
- Produksjon av diesel i raffineri
- Transport av drivstoff fra produksjonssted til forbruker (havn)

2.3.2. Tank-to-propeller (TTP)

TTP er den andre delen i en WTP-analyse. TTP er når drivstoffet i tanken på båten blir brukt til å kjøre båten, det vil si at energien i drivstoffet brukes til å oppfylle funksjonen til båten, nemlig transportere. Dette oppfylles ved at drivstoffet får en kjemisk reaksjon i en brenselcelle eller forbrenningsmotor som skaper energi slik at båten går fremover. I denne delen skal man finne ut hvor mye primærenergi som kreves for å få båten til å gå fremover i en gitt enhet. Nærmere bestemt levert energi til akslingen på motoren til skipet.

2.4. Beregningsmetode

Målet med oppgaven er å finne det totale energibruket for hver energikilde samt å finne utslippet i målt CO₂-e. Både energibruken og klimagassutslippet blir målt per kilowatttime i denne analysen. Det vil si energi levert til akslingen til motoren. Ofte måler man energibruk og klimagassutslipp for skip i tonn per kilometer, men dette var ikke mulig på grunn av den begrensende dataen for drivstofforbruket.

2.4.1. Energibruk

Først er ERE_{primær} til alle energikjedene beregnet. For å beregne ERE_{primær} er følgende formel benyttet:

$$ERE_{\text{primær}} = \frac{1}{\sum \eta}$$

Hvor,

er ERE_{primær} = mengden primærenergi som skal til for å levere en MJ med energi.
(MJ_{primær}/MJ levert)

$\sum \eta$ = produktet av alle virkningsgradene til delprosessene. Se Tabell 30 for delprosessene med tilhørende virkningsgrad for hver energikjede.

I noen av energikjedene er det tilført energi i noen av delprosessene, som i denne oppgaven kalles ERE_{el}. For å beregne ERE_{el}, er følgende formel benyttet:

$$ERE_{\text{el}} = \frac{EK * LHV}{\sum \eta}$$

Hvor,

EK = energibruket til delprosessen i MJ/kg-drivstoff produsert

LHV = nedre brennverdi for drivstoff i MJ/kg

$\sum \eta$ = produktet av alle virkningsgradene for delprosessene oppstrøms.

For å beregne total ERE, er følgende formel benyttet:

$$ERE_{\text{total}} = ERE_{\text{primær}} + ERE_{\text{el}}$$

Hvor,

ERE_{total} = Total ERE. (MJ_{primær}+MJ_{el}/MJ levert)

Videre for å beregne WTT, er følgende formel benyttet:

$$WTT = (ERE_{\text{total}} - 1) * TTP$$

Hvor

TTP = drivstofforbruket i bulkskipet i MJ/kWh.

For å finne totale energibruket i WTP, er følgende formel benyttet:

$$WTP = WTT + TTP$$

2.4.2. Utslipp i CO₂-e

For å finne utslippet til energikjedene er energimengden multiplisert med en utslippsfaktor i CO₂-e. På denne måten blir det totale utslippet målt i gCO₂-e/kWh. For å finne det totale utslippet til energikjedene er følgende formel brukt:

$$Total_{CO_2-e} = (ERE_{primær} * U_{primær} + ERE_{el} * U_{el}) * TTP$$

Hvor,

$U_{primær}$ = utslipp fra primærkilde (gCO₂-e/MJ_{primær})

U_{el} = Utslipp fra energikilden til tilført energi (gCO₂-e/MJ)

2.5. Følsomhetsanalyse

Datainnsamlingen til denne oppgaven inneholder usikkerheter. Grunnen til det er at datasettet har store sprik i noen av kildene og det er gjort en del antakelser. Ved å gjennomføre en følsomhetsanalyse er det mulig å se hvor sensitiv, robust eller følsom analysen er ovenfor endringer i parameterne, det vil si valgt datagrunnlag til modellen. For å gjennomføre en følsomhetsanalyse endrer man en parameter, og lar resten av parameterne være uendret. Virkningen av hvordan endringene påvirker resultatene kan illustreres i en følsomhetstabell eller som i denne oppgaven, i et stjernediagram. Ved å bruke stjernediagram er det mulig å studere hvilke forutsetninger eller parametere som er mest sensitiv eller robust overfor endringene ved å se på vinkelen til grafen. Den grafen med størst vinkel er mest sensitiv og den grafen med minst vinkel blir ansett som mest robust. Det er valgt å gjennomføre følsomhetsanalyse for energikjede A-1 og H-2, for å inkludere alle de viktige delprosessene i energikjedene. Disse delprosessene er dampreforming av naturgass, Haber-Bosch-prosessen, vannelektrolyse og flytendegjøring av hydrogen. Følgende delprosesser har lave virkningsgrader, og vil derfor være av interesse å se på.

Videre vil de valgte parameterne få et intervall fra en økning på 20% til en reduksjon på 20% for å illustrere hvor sensitiv modellen er for endringer. Viktig å bemerke seg at følsomhetsanalysen kan kun vise virkningen fra ett avvik om gangen, og viser ikke endringer for flere parametere samtidig (Finansleksikon, u.å). Det er derfor viktig å vurdere endringen skjønnsmessig.

2.5.1. Følsomhetsanalyse, A-1

I energikjede A-1 er det valgt to ulike parametere til følsomhetsanalysen: Virkningsgraden til Haber-Bosch-prosessen, virkningsgraden til dampreforming og drivstofforbruket. Haber-Bosch og dampreforming er to svært sentrale prosesser i energikjeden hvor det samtidig forekommer store sprik i kildene. Det vil derfor være interessant å se hvor sensitiv dataen er for endringer i de gitte forutsetningene. I tillegg er drivstofforbruket som nevnt ovenfor kun et estimat, og det forekommer store usikkerheter i dataen, og følsomhetsanalysen vil gi en indikasjon på hvorvidt denne usikkerheten har å si på resultatet.

2.5.2. Følsomhetsanalyse H-2

Energikjede H-2 endrer disse tre parameterne i følsomhetsanalysen: elektrolyse av vann, flytendegjøring av hydrogen samt drivstofforbruk. Grunnen til at elektrolyse av vann og

flytendegjøring av hydrogen er valgt til følsomhetsanalysen er fordi de er to sentrale delprosesser i energikjeden hvor det og foreligger gap i kildene. Det vil derfor være interessant å se på om disse to parameterne vil være sensitive for en endring. Drivstofforbruket sees på av samme grunn som energikjede A-1.

2.6. Scenarioanalyse

På grunn av usikkerheten rundt hvordan og hvilken retning klima og klimaendringer utvikler seg, kan scenarioanalyse være et nyttig verktøy for å drøfte ulike scenarioer som eventuelt ville kunne forekomme i fremtiden. Ofte blir scenarioanalyse brukt til å undersøke mulige utfall for fremtidig utvikling av for eksempel teknologi og marked. (revisorforeningen, u.å). På denne måten kan man utforske forskjellige utfall for potensielle scenarioer. Viktig å bemerke at de valgte scenarioene er kun hypotetiske, men blir ansett til å være relevante samt realistiske i et fremtidig perspektiv. Forskjellen mellom følsomhetsanalyse og scenarioanalyse er at scenarioanalyser har mulighet til å undersøke endringer på flere energikjeder samtidig. Dette gjør det mulig å sammenligne samme scenario på flere ulike energikjeder

2.6.1. Scenarioanalyse 1. Karbonfangst og -lagring

I denne oppgaven er det to energikjeder som benytter seg av naturgass som primærenergikilde. En teknologi som er under utvikling samt tilgjengelig, er karbonfangst og -lagring. Det betyr at en skiller ut karbondioksid fra en gasstrøm for så å oppbevare karbondioksidet på en permanent måte. På denne måten vil karbonfangst og -lagring kunne redusere utslipp av karbondioksid til atmosfæren. Ved dampreforming kan man danne karbonmonoksid og hydrogen, hvor det i neste trinn blir endret til karbondioksid og mer hydrogen. Deretter kan karbondioksidet bli fanget fra gasstrømmen og hydrogenet kan gå videre. (Hofstad, 2021b). Hvis dampreforming foregår med karbonfangst og -lagring, kalles hydrogenet som blir produsert for blått hydrogen og videre blir ammoniakken kalt for blå ammoniakk.

Opptil 90% av karbondioksidet kan bli fanget ved dampreforming. Hvis man inkluderer hele energikjeden fra utvinningen av naturgassen for å beregne de reduserte utslippene for kombinert dampreforming og karbonfangst og -lagring, vil livssyklusen for blå, - hydrogen ammoniakk ha en utslippsreduksjon på 60-85%. (The Royal Society, 2020). I denne scenarioanalysen vil det bli estimert hva utslippene blir for energikjedene A-1 og H-1 hvis

utslippene fra naturgass blir redusert med 60% (lav reduksjon) og 85% (høy reduksjon). Viktig å bemerke at resultatene i denne oppgaven baserer seg på CO₂-e, og ved karbonfangst og -lagring er det kun CO₂ som blir fjernet, og utslipp i CO₂-e vil med stor sannsynlighet være høyere. Dette gjør at det ikke er 100% sammenlignbart med opprinnelig resultater, men kun ment som en innsikt.

2.6.2. Scenarioanalyse 2. Endring i utslipp for fornybar, - og fossil strømmiks

I oppgaven er det fire energikjeder som benytter seg av strøm for å utføre delprosessene. A-1 og H-1 benytter seg av strøm fra vindkraft og til sammenligning benytter A-3 og H-3 strøm fra kullkraft. Spesielt vil den fossile strømmiksen kunne redusere utslipp over tid ved for eksempel karbonfangst og -lagring samt teknologiutvikling. Denne scenarioanalysen gjør det interessant å se på hvordan utslippet fra strømproduksjonen til energikjedene vil påvirke resultatene ved en økning og en reduksjon av utslippene.

2.6.3. Scenarioanalyse 3. Ulike strømmikser for hydrogen, - og ammoniakkproduksjon fra dampreforming

I energikjede A-1 og H-1 krever delprosessene; flytendegjøringen av drivstoffet, dampreforming og Haber-Bosch tilført energi. Den tilførte energien i oppgaven er bestemt å være strøm fra norsk strømmiks. I denne scenarioanalysen skal de nevnte energikjedene få tilført energi fra den fossile strømmiksen. Grunnen til det er for å undersøke hvor store utslippene blir når den tilførte norske strømmiksen til delprosessene blir byttet ut med strøm fra kullkraft. Utslippene til den norske strømmiksen er veldig lav, så det blir interessant å se om den tilførte energien har større påvirkning på resultatet hvis strømmen blir erstattet med en fossil strømmiks. Strøm fra norsk vindkraft er ikke tatt med som et mulig scenario fordi utslippet fra vindkraft er veldig likt norsk strømmiks. Begge strømmiksene har i tillegg like mange delprosesser med omtrent samme estimerte virkningsgrad, og derfor nesten like mye energitap. Av disse grunnene vil nok ikke norsk vindkraft som energitilførsel ha betydelig innvirkning på resultatet.

2.7. Avgrensninger i oppgaven

For at en livsløpsanalyse ikke skal bli for omfattende er det viktig å definere hvilke elementer som skal inkluderes og ekskluderes i analysen. På denne måten vil en også unngå å ta med prosesser som har lite eller ingen betydning for sluttresultatet.

I følge Holden (2003) kan transportsektoren deles opp i tre ulike livsløpsanalyser.

1. Produksjon og vedlikehold av kjøretøy
2. Produksjon og vedlikehold av infrastruktur
3. Drivstoffets livsløp som inkluderer alle ledd fra utvinning av råstoff til sluttbruk i kjøretøyet.

I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i analyse av drivstoffets livsløp. Dette gjøres som nevnt ovenfor, ved å gjennomføre en energikjedeanalyse. Det betyr at produksjon og vedlikehold av kjøretøy, - og infrastruktur ikke er inkludert i analysen. Grunnen til at infrastrukturen er ekskludert i analysen, er at det antas det vil være likt for alle alternativene.

For at analysen av de ulike drivstoffene skal være sammenlignbar, er det tatt utgangspunkt i samme type båt. Eneste forskjellen er motorene til båtene, siden de går på forskjellig drivstoff. Motoren til et skip er en veldig liten prosentandel i forhold til hele båten. En motor er rundt 1% eller mindre av totalvekten til hele båten. Det skal sies at brenselceller krever mer vedlikehold samt erstatning av ulike deler enn forbrenningsmotor. I følge Bøhmer (2022) krever brenselcelle å bytte ut 30% av motoren hvert 3-5 år. Ifølge Statistisk sentralbyrå (u.å) er levetiden til et skip gjennomsnittlig rundt 20 år. Det vil si at brenselceller må bytte deler rundt 4-6 ganger i løpet av levetiden. Etter beregningene vil det fortsatt være under 1% av materialer til det totale skipet. På bakgrunn av dette er ikke produksjonen av båten eller motoren med i analysen da forskjellen vil være marginal og ikke ha noen uttelling på svaret på problemstillingen.

Slutten av livsløpet til båten er heller ikke med analysen. Grunnen til det er at det er lite kunnskap for utslipp samt hvor mye energi det kreves for å eventuelt resirkulere brenselceller. Et annet argument er at det er for tidkrevende å sette seg inn i et tema med stort kunnskapshull.

2.8. Datainnsamling

I denne oppgaven er alle delprosessene i produksjonen av drivstoffet med i analysen. Det vil si fra utvinningen av selve primærenergikilden til drivstoffet blir brukt i båten. Det ville vært svært energikrevende samt tidkrevende å gjøre primære målinger av alle delprosessene i energikjedene på egenhånd. Derfor bruker denne oppgaven kun sekundærdata da det gjenspeiler tidsrammen denne oppgaven har tildelt. Av den grunn er det foretatt mye arbeid i kritisk gjennomgang av kildene, siden innholdet er basert på andres studier, undersøkelser og forskning. Det vil si at ulike kilder kan gi svært varierende data på de samme prosessene. Som en del av den kritiske gjennomgangen av data er triangulering benyttet. I følge Holden (2003) skal man ved triangulering basere dataen på minst to ulike kilder. På denne måten blir dataen så robust som mulig. Det skal sies at hvis en kilde er anerkjent som en svært pålitelig kilde vil en kilde være tilstrekkelig. Én kilde vil og være ansett som tilfredsstillende hvis det er få kilder.

Videre er det viktig å ta høyde for feilkilder og mangler i oppgaven. Når det gjelder forbrenningsmotorteknologi for ammoniakk er det en teknologi som er helt i startfasen, og er ikke testet ut på samme måte som brenselceller og vanlig dieselmotor. Dette resulterer i at flere elementer er utilgjengelig samt at data fra leverandører er konfidensielle i skrivende stund. På grunn av dette har det vært utfordrende å hente inn relevant data. Videre medfører det at noe data er kun estimer, noe som kan føre til uoverensstemmelse og avvik i beregningene. Dette er data det ikke har vært mulighet til å triangulere med andre kilder. Disse svakhetene poengteres i datakapittelet og drøftes i kapittel resultater og diskusjon.

Dataen brukt i oppgaven er primært innhentet fra søkemotorene Elsvier, Google Scholar, Springer, Frontsier og Web of Science. Det er lagt vekt på at artiklene som er hentet fra de nevnte søkemotorene er fagfellevurderte. Videre er informasjon og data hentet fra offisielle nettsider som statistisk sentralbyrå og avisartikler, nettsider, dokumenter, store norske leksikon, personlig kommunikasjon, fysiske og elektroniske bøker og rapporter.

2.9. Forutsetninger og antakelser

For å bestemme hvilken virkningsgrad som skal brukes i beregningene i oppgaven er prinsippet «Best Available Technology» anvendt. På norsk kan det bli oversatt til «beste tilgjengelige teknologi». Videre i oppgaven er forkortelsen BAT brukt. Begrepet mener at man går ut ifra det siste utviklingstrinnet av prosesser eller for eksempel driftsmetoder for å begrense utslipp. I denne oppgaven blir det derfor å velge den fremste teknologien for delprosessene, eller den kilden som viser høyest virkningsgrad. Grunnen til at denne metoden blir benyttet, er at teknologier er under stadig utvikling og sannsynligheten for at virkningsgradene vil øke er relativt høy. Viktig å bemerke at noen kilder til noen av delprosessene har store sprik, og den kilden med høyest virkningsgrad kan være betydelig høyere enn den med minst virkningsgrad. Det er derfor viktig å påpeke at dataen brukt i denne oppgaven ikke er noen form for fasit, men er ment å svare på problemstillingen. Videre er det gjennomført en følsomhetsanalyse for viktige delprosesser der det forekommer store sprik i kildene.

Utslippene fra energikjedene i denne oppgaven er målt i CO₂-e. Videre er det innhentet utslippsfaktorer for de ulike energikildene fra sekundærdata. Det var til en viss grad utfordrende å finne utslippsfaktorer oppgitt i CO₂-e, da noen kilder oppgir utslipp kun i CO₂. Av den grunn er enkelte utslippsfaktorer i datagrunnlaget kun målt i CO₂. Utslippsfaktorer med nevnte utfordringer vil gjøres oppmerksom på i datakapittelet. Videre er det antatt at eventuelle forskjeller dette kan medføre, ikke vil ha en bemerkelsesverdig innflytelse på resultatet.

3. Data

I dette kapittelet blir datagrunnlaget for denne analysen presentert. Kapittelet er delt inn i tre hoveddeler; WTT, TTP og utslippsfaktorene. I delkapittel i WTT blir datagrunnlaget for alle virkningsgradene presentert, samt aktuelle energikrav og utregninger. Deretter blir datagrunnlaget for TTW presentert. I dette kapittelet blir drøfting og valg av type skip og drivstofforbruk beskrevet og presentert. Videre blir datagrunnlaget til utslippsfaktorene fremstilt og drøftet. På slutten av kapittelet presenteres det en oppsummering av alle delprosessene og deres virkningsgrader, samt resultater fra utregningene som ble gjennomført i denne analysen.

3.1. WTT

3.1.1. Utvinning av naturgass

Energikjedene A-1 og H-1 benytter seg av naturgass som primærenergikilde. I denne analysen antas det at naturgassen utvinnes i Nordsjøen og fraktes i land via gassrørledninger. Ved utvinning av naturgassen vil det være et energitap. Blok og Nieuwlaar (2021) oppgir et energitap mellom 0,7-4%. Siden denne oppgaven følger BAT-prinsippet, settes virkningsgraden på utvinning av naturgass på 99,3%. Se Tabell 2.

Tabell 2: Virkningsgrad for utvinning av naturgass

Virkningsgrad (%)	Kilde
99,3 - 96	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

3.1.2. Utvinning av kull

Energikjede A-3 og H-3 benytter seg av strøm fra kullkraftverk. Første delprosess i energikjedene er utvinning av kull. Ved utvinningen vil det foregå energitap, og i følge Blok og Nieuwlaar (2021) er energitapet på et estimat fra 1%-3% (se Tabell 3) . Her følges BAT-prinsippet og virkningsgraden blir satt til 99%.

Tabell 3: Virkningsgrad for utvinning av kull

Virkningsgrad (%)	Kilde
97-99	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

3.1.3. Transport av naturgass

Ifølge Norsk Petroleum (2022) blir norsk gass produsert i Nordsjøen og deretter transportert via gassrørledninger under vann, mens resten av gassen som blir produsert, blir eksportert via skip som flytende naturgass (LNG). I denne oppgaven tar vi høyde for at gassen blir transportert via gassrørledninger til et landanlegg for gass i Norge. For å finne en distanse for rørtransporten av naturgassen til raffineriet på land, er det anslått en gjennomsnittlig avstand basert på gassrørledningene på norsk kontinentalsokkel. Her er ledningene til utlandet ikke tatt med i beregningen. Beregningene gir en gjennomsnittlig avstand på gassrørledningene på 240 km.

Det vil oppstå energitap ved distribusjon via gassrørledninger, hvorav kildene under er ganske sprikende. Ifølge Blok og Nieuwlaar (2021) er energitapet avhengig av transportavstanden, som tilsier at det vil være en lineær sammenheng mellom avstand i gassrørledninger og energitap. Obara og Li (2020) anslår et tap på 2,8% per 3000 km. Som nevnt ovenfor er avstanden satt til 240km, og med Obara og Li (2020) sin antagelse vil tapet være på 2,24% med gitt transportavstand. Dette er ikke så langt unna Vandenbussche et al. (2021) sine tall, hvor tapet ligger mellom 2,3%-6% som er tap basert på norske gassrør. Se Tabell 4 for oversikt over de ulike energitapene.

Ifølge BAT-prinsippet vil det være naturlig å sette energitapet på 0%, som Blok og Nieuwlaar (2021) oppgir. Tapet er som nevnt beregnet på transportavstand, og et energitap på 0% vil være usannsynlig i denne sammenhengen, og videre nevnes det ikke distansen disse tapene er beregnet på. På bakgrunn av dette settes tapet på 2,24 %.

Tabell 4: Oversikt over ulike energitap for transport av naturgass

Ulike energitap i gassrørledning (%)	Notat	Kilde
2,8	Per 3000km	(Obara & Li, 2020)
0 - 20		(Blok & Nieuwlaar, 2021)
2,3 – 6		(Vandenbussche et al., 2021)
3		(Wang & H.-S., 1999)
5		(Hedenus et al., 2010)

3.1.4. Transport av kull

Kull blir som regel utvinnet et annet sted enn der kullkraftanlegget ligger. Det vil si at kullet må transporteres, og det vil foregå tap under transporten. Blok og Nieuwlaar (2021) gir et estimat på energitap mellom 0%-10%. Dette estimatet er ikke teknologiavhengig men derimot distanseavhengig. BAT-prinsippet vil derfor ikke gjelde. Videre viser ikke estimatet distanselengden tallene går ut på. En kan sådan tenke at 0% er svært liten avstand, 5% er middels lang avstand og 10% er lang avstand til kullkraftverket. Derfor er energitapet avhengig av hvilke antakelser som blir tatt i henhold til transportdistanse. I denne oppgaven antas det at det er en mellomdistanse fra utvinningsstedet til kullkraftverk og energitapet blir satt på 5%.

Tabell 5: Energitap ved transport av kull

Energitap (%)	Kilde
1-10	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

3.1.5. Lagring av kull

I følge Blok og Nieuwlaar (2021) vil kullet lagres ved kullkraftverket før det forbrennes. Ved lagringen vil det foregå energitap og dette tapet vil ligge mellom 1% og 2% (Blok & Nieuwlaar, 2021) Videre står det ikke hva estimatet går ut på, og energitapet blir satt etter BAT-prinsippet nærmere bestemt 1%.

Tabell 6: Energitap ved lagring av kull

Energitap (%)	Kilde
1-2	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

3.1.6. Norsk strømmiks

Den norske strømmiksen blir ikke brukt som primærkilde i noen av energikjedene. I Energikjedene A-1 og H-1, blir derimot norsk strømmiks brukt som energikilde til flytendegjøring av ammoniakk og hydrogen, dampreforming og Haber-Bosch. Begrunnelsen for at det er brukt Norsk strømmiks i disse delprosessene, er fordi det antas at drivstoffene blir lagd i Norge. Det er derfor lite sannsynlig at naturgass, som er primærkilde, er energikilde i delprosessene.

Ifølge NVE (2022a) står norsk kraftproduksjon seg godt, når det gjelder andel fornybar strøm i Europa. Prosentandelen som sett i Tabell 7 kommer fra fysisk levert strøm fra år 2021 (NVE, 2022a). Største delen av kraftproduksjonen kommer fra vannkraft, som står for hele 88% av levert strøm i 2021. I tillegg øker andelen vindkraft i landet, hvorav vindkraft stod for nesten 9% av levert strøm samme år. Siden Norge har et samarbeid med det europeiske kraftsystemet vil strømmen som brukes i landet være produsert et annet sted og derav fra en annen produksjonsteknologi. For å finne virkningsgraden for den norske strømmiksen er det nødvendig å ha oppgitt prosentandelen de ulike produksjonsteknologiene utgjør for den totale leverte strømmen, samt virkningsgraden til de ulike teknologiene. Se Tabell 7 for oversikt.

Tabell 7: Oversikt over prosentandel for ulike produksjonsteknologier og tilhørende virkningsgrader

Teknologi	Prosentandel (%)	Virkningsgrad teknologi (%)	Kilde (virkningsgrad)
Vannkraft	87,65	95	(Henriksen et al., 2020)
Vindkraft	8,52	100	(IRENA, 2017)
Annen fornybar	0,77	100	Egne antakelser
Annen fossil	1,00	40	Egne antakelser
Kjernekraft	1,23	38	(Rosvold & Hofstad, 2022)
Gass	0,32	55	(Krogvold et al., 2019)
Kull	0,52	40	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

Ved å beregne virkningsgraden for den norske strømmiksen ble denne formelen brukt:

$$\sum_{Kull}^{Vannkraft} (\% \times \eta) = 93,8\%$$

Hvor,

% = prosentandel til teknologien

η = virkningsgraden for teknologien

Viktig å påpeke at det er tatt egne antagelser for annen fornybar og annen fossil sin virkningsgrad for teknologi. Antakelsene er tatt etter hva virkningsgradene for vindkraft og kullkraft er i oppgaven. Begge prosentandelene er 1% eller mindre, og vil med sannsynlighet ikke ha noen særlig påvirkning på resultatet.

3.1.7. Dampreforming

I denne analysen er det energikjeder med to ulike produksjonsmetoder av hydrogen.

Dampreforming er metoden brukt i energikjede A-1 og H-1, hvor hydrogen blir produsert ved bruk av dampreforming av råstoffet naturgass. Dampreforming er hovedprosessen for hydrogenproduksjon og står for 50% av verdens totale produksjon. Grunnen til at metoden er så populær er grunnet konvertering, - og kostnadseffektivitet i forhold til andre produksjonsmetoder. (Braga et al., 2016). Prosessen utføres i to trinn. Først reagerer hydrokarbonene med vanndamp ved rundt 800 grader i nærvær av en nikkelkatalysator, og man vil få karbonmonoksid og hydrogen. I trinn to vil ytterligere hydrogen bli dannet ved at karbonmonoksidet reagerer med vanndamp med en temperatur på 500 grader over enten kobber, - eller jernkatalysator. (Hofstad, 2022).

Tabell 8: Oversikt over virkningsgrader for dampreforming

Virkningsgrad (%)	Kilde
66	(Danebergs & Aarskog, 2011)
70-80	(Hofstad, 2022)
74-85	(Shiva Kumar & Himabindu, 2019)

Ettersom denne oppgaven følger BAT-prinsippet, er virkningsgraden for dampreforming satt til 85%.

3.1.7.1. Energibehov dampreforming

Dampreformeringsprosessen i denne oppgaven har tilførsel av energi, og i denne oppgaven er det strøm fra norsk strømmiks. Energibehovet til dampreforming er satt til 0,4 MJ per kilogram hydrogen produsert. (Budsberg et al., 2015).

3.1.8. Haber-Bosch-prosessen

I denne oppgaven er det tre energikjeder som krever Haber-Bosch-prosessen, A-1, A-2 og A-3. Metoden fremstiller ammoniakk ved at nitrogen i luft reagerer med hydrogen og danner

ammoniakk. I denne oppgaven kommer hydrogengassen enten fra dampreforming av naturgass eller elektrolyse av vann. Siden reaksjonen foregår under varmeutvikling og volumkontraksjon blir gevinsten bedre desto høyere trykk og lavere temperatur prosessen foregår ved. Reksjonstemperaturen ligger vanlig mellom 350-600 grader og ved 150-300 atm trykk. Jernbasert katalysator blir som regel brukt for å sikre tilstrekkelig reaksjonsfart ved angitt temperatur. (Pedersen, 2022).

Tabell 9: Oversikt over virkningsgrader for Haber-Bosch-prosessen

Virkningsgrad Haber-Bosch-prosess (%)	Notat	Kilde
70	H.-B inkl. luftseperasjon	(Ozin, 2020)
53-63	Inkl. vannelektrolyse	(Rouwenhorst et al., 2019)
66,4	Inkl. flytendegjøring	(Bartels, 2008)
76,4	H.-B inkl. luftseperasjon	(Dias et al., 2020)

Tabellforklaring til Tabell 9:

- H.-B er forkortelse for Haber-Bosch-prosessen
- Inkl. Er forkortelse for inklusive

Tabell 9 viser ulike virkningsgrader for Haber-Bosch-prosessen. Det var arbeidskrevende å finne god data på selve Haber-Bosch-prosessen. De fleste kildene inkluderte andre delprosesser som for eksempel vannelektrolyse eller dampreforming i virkningsgraden. Dias et al. (2020); Ozin (2020) oppgir virkningsgraden for Haber-Bosch med luftseperasjon, hvorav begge virkningsgradene ligger på 70%. Hvis man skulle tatt samlet virkningsgrad for Haber-Bosch-prosessen og elektrolyse av vann, vil energieffektiviteten samstemme med virkningsgraden Rouwenhorst et al. (2019) oppgir. Denne oppgaven følger som nevnt BAT-prinsippet og en virkningsgrad på 76,4% vil bli brukt videre i analysen. Luftseperasjon blir derfor ikke egen virkningsgrad i analysen, men en del av virkningsgraden til Haber-Bosch-prosessen

3.1.8.1. Energibehov Haber-Bosch-prosessen

I denne oppgaven vil Haber-Bosch-prosessen ha tilførsel av energi i energikjede A-1.

Energibehovet til Haber-Bosch-prosessen er satt etter hva Bicer et al. (2016) oppgir som er 2,6 MJ per kilogram ammoniakk produsert. Energien kommer som nevnt før fra norsk strømmiks. I energikjede A-2 og H-2 vil derimot energien komme fra norsk vindkraft, og kullkraft for energikjede A-3 og H-3.

3.1.9. Flytendegjøring av ammoniakk

Båtene som går på ammoniakk, bruker flytende ammoniakk som drivstoff. Fra Haber-Bosch-prosessen blir ammoniakken overført til neste ledd i energikjeden, som vil være omdannelse fra gass til væske. Videre kalt flytendegjøring. I følg Dias et al. (2020) vil væskeform oppnås med atmosfærisk trykk og -33 grader. Det er og mulig ved trykk på 8 bar og omgivelsestemperatur. Ifølge Dias et al. (2020) er energikravet til ammoniakk på 0,1% for omdannelse fra gass til væske. Teoretisk sett vil derfor virkningsgraden for flytendegjøringen av ammoniakk være 99,9%, ettersom 0,1% av energiinnholdet av ammoniakken kreves for å omdanne ammoniakk fra gass til væske. Dias et al. (2020) nevner imidlertid at virkningsgraden for flytendegjøring av ammoniakk er 99,3%.

3.1.9.1. Energibehov flytendegjøring av ammoniakk

For å få ammoniakk over til væskeform kreves det energi til prosessen. I følge Bartels (2008) kreves det 0,188 MJ for å avkjøle 1kg ammoniakk. I energikjedene A-1 og H-1 vil energien som kreves, komme fra den norske strømmiksen og mengden elektrisitet som kreves vil bli beregnet i forhold til energiinnholdet til ammoniakk. I energikjede A-2 og H-2 vil derimot energien komme fra norsk vindkraft, og kullkraft for energikjede A-3 og H-3.

3.1.10. Transport av ammoniakk

Etter at ammoniakken er fremstilt og flytendegjort, vil det gå over til neste prosess; transport. Før drivstoffet blir fylt opp i en båt, må det transporteres til en fyllestasjon. Siden det er antatt at ammoniakkproduksjonen foregår ved havnen, vil ammoniakken ikke ha en lang transportrute, men noe energitap vil forekomme.

Tabell 10: Oversikt over virkningsgrader for transport av ammoniakk

Virkningsgrad (%)	Notat	Kilde
98		(Aziz, 2018)
94	1,610 km gjennom rør	(Bartels, 2008)

BAT-prinsippet avgjør virkningsgraden, og virkningsgraden blir satt til å være 98%. Se Tabell 10.

3.1.11. Vindkraft

I denne analysen er det valgt to energikjeder (A-2 og H-2) hvor ammoniakk og hydrogen blir fremstilt av fornybar energi. Siden oppgaven antar at begge drivstoffene blir produsert i Norge, er det besluttet at strømmen kommer fra norsk vindkraft. Selv om vannkraft utgjør den største delen av norsk strømproduksjon, ser man en økende trend for vindkraft. Produksjonslokasjonen til både ammoniakk og hydrogen er antatt å finne sted ved kysten. Det er derfor større sannsynlighet at vindkraft vil være en løsning for fornybar strømproduksjon i fremtiden for alternative drivstoff enn vannkraft. I tillegg, som nevnt i introduksjonen, er det planlagt ammoniakkproduksjon med strøm fra vindkraft i Nord-Norge.

Ifølge IRENA (2017) regner man med 100% energieffektivitet i internasjonal energi statistikk når det kommer til fornybare energikilder. Dette kommer fra primær energiregnskapsmetode brukt av IEA. Årsaken er at det har en effektivitet som er høyere enn de ikke-fornybare teknologiene de erstatter. På bakgrunn av dette vil derfor den fornybare energikilden ha en virkningsgrad på 100% i denne oppgaven. Se Tabell 11.

Tabell 11: Virkningsgrad for vindkraft

Virkningsgrad (%)	Kilde
100	(IRENA, 2017)

3.1.12. Kullkraftverk

I denne oppgaven er det bestemt at to energikjeder skal få tilført energi fra fossil energikilde, nærmere bestemt fra kull. Ifølge Sætnes (2019) har et moderne kullkraftverk en virkningsgrad på 40%, hvor resten av energien forsvinner i konverteringen fra kull til strøm.

Tabell 12: Virkningsgrader for kullkraftverk

Virkningsgrad (%)	Kilde
40	(Sætnes, 2019)
40	(Rosvold & Hofstad, 2021)

Siden begge kildene (se Tabell 12) viser til en virkningsgrad på 40%, blir det den satte virkningsgraden for kullkraftverk i oppgaven.

3.1.13. Distribusjon av strøm

I oppgaven brukes det norsk strømmiks, strøm fra norsk vindkraft og strøm fra kullkraft. Strømmen overføres fra produksjonssted til produksjonsanlegget via kabler, og under distribusjonen vil det foregå overføringstap. Årsaken er at det kreves energi å transportere strøm gjennom kabler.

3.1.13.1. Norsk strømnnett

Ifølge Brunborg (u.å) er det årlig tap i det norske strømnettet rundt hele 10%. I dette inngår tap i det regionale nettet, transformatorer, høyspentnettet og lokale distribusjonsnett. Tapet i det lokale distribusjonsnettet ligger på rundt 5-7% og tapet i nettet øker med avstanden. Derimot mener Statistisk sentralbyrå (2015) at tapet ligger på rundt 6 %, hvor tapet er beregnet på tapsandelen i forhold til produksjon basert på tapet i sentral, regional og distribusjonsnett. Som nevnt følger denne analysen BAT-prinsippet og nettapet blir satt til å være 6% i Norge, og vil gjelde for energikjede A-1, A-2, H-1 og H-2. Se Tabell 13.

Tabell 13: Energitap for strøm under distribusjon via strømkabler i Norge

Strømtap under distribusjon i Norge (%)	Kilde
6	(Statistisk sentralbyrå, 2015)
10	(Brunborg, u.å)

3.1.13.2. Strømovertøring Tyskland – Norge

Energikjede A-3 og H-3 benytter seg av strøm fra kullkraftverk i Tyskland. For å beregne energitapet fra Tyskland til Norge trenger man energitapet fra strømkablene innad i Tyskland, mellom Tyskland og Norge og innad i Norge. Mellom Norge og Tyskland distribueres strøm gjennom en undersjøisk kabel som kobler norsk og tysk kraftmarked sammen (Stortinget, 2022), denne kabelen heter NordLink. Se Tabell 14 for energitap.

Tabell 14: Energitap ved strømovertøring Tyskland - Norge

Overføringstap (%)	Strekning	Kilde
5,72	Tyskland – Tyskland	(Pfalzwerke Netz, 2022)
3,1	Tyskland – Norge (NordLink)	(Stortinget, 2022)

Videre antas det at distribusjonen i Tyskland, mellom Tyskland og Norge og distribusjonen innad i Norge står for like lang ditribusjonsdistanse, det vil si en tredjedel hver. For å regne det totale tapet slik at distribusjonstapet blir en delprosess, er denne formelen brukt:

$$\text{Total tap} = \frac{5,72\% (\text{Tap i tysk strømnnett})}{3} + \frac{3,1\% (\text{Tap i NordLink})}{3} + \frac{6\% (\text{tap i Norsk strømnnett})}{3} = 6,46\%$$

Distribusjonstapet i Energikjede A-3 og H-3 er satt til å være 6,46%.

3.1.14. Vannelektrolyse

Elektrolyse av vann er en av to metoder hydrogen blir produsert på i denne oppgaven, og er produksjonsmetoden i energikjede A-2 og H-2. Det finnes flere ulike teknologier for elektrolyse av vann, men i følge Bjartnes et al. (2021) er alkalisk elektrolyse den metoden som har blitt utnyttet kommersielt lengst i Norge, samt metoden som kan produsere hydrogen i større mengder (Zeng & Zhang, 2010). På bakgrunn av dette er det tatt utgangspunkt i alkalisk elektrolyse i denne analysen. I denne produksjonsmetoden av hydrogen mister

katoden elektroner til en alkalisk vannløsning som vil splitte vannmolekyl. Videre beveger det ladede hydroksid kompleksjonen mot anoden hvor elektronene blir absorbert og hydroksidionene oksideres og danner vann og oksygen (DNV GL, 2019b).

Tabell 15: Oversikt over virkningsgrader for vannelektrolyse

Virkningsgrad (%)	Kilde
73	(Bartels, 2008)
63-70	(Alfa Laval et al., 2020)
70-82	(Braga et al., 2016)
70	(Bjartnes et al., 2021)
55-69	(DNV GL, 2019b)
59-70	(Zeng & Zhang, 2010)
70-80	(Shiva Kumar & Himabindu, 2019)

Elektrolyse av vann er en av de viktigste prosessene i energikjedene A-2, A-3, H-2 og A-3. Virkningsgradene i alkalisk elektrolyse varierer stort fra kildene (se Tabell 15), med laveste virkningsgrad på 55% og høyeste på 82%. Som nevnt tidligere følger oppgaven BAT-prinsippet og 82% blir den satte virkningsgraden til analysen.

3.1.15. Flytendegjøring av hydrogen

I energikjede H-1 vil flytendegjøringen av hydrogenet være neste ledd etter dampreformeringsprosessen, og i energikjede H-2 og H-3 er nedkjølingen leddet etter elektrolysen. For å kunne lagre hydrogen er det viktig at hydrogenet fortettes. Samme som ammoniakk så må hydrogen gå fra gassform til flytende form i denne analysen, dette er fordi den skal kunne transporteres på en volummessig hensiktsmessig måte. For å flytendegjøre hydrogenet ved atmosfærisk trykk, er den nødt til å kjøles ned fra 25 grader til -252,87 grader. Det vil si at det er svært energikrevende å kjøle ned hydrogen, men det gir en konsentrert form for hydrogen. Andre måter å lagre hydrogen på er å omsette komprimert hydrogen i trykktanker satt til 35 MPa (350 bar) eller 70 MPa (700 bar) (Hofstad, 2021a).

Tabell 16: Oversikt over energitap ved flytendegjøring av hydrogen

Energimengden for flytendegjøring av opprinnelig energiinnhold (%)	Kilde
36–45	(Reuß et al., 2017)
47	(Dias et al., 2020)
25-35	(DNV GL, 2019b)

I energikjedene H-2 antes det at strømmen som kreves for å flytendegjøre hydrogenet kommer fra vindkraft og for energikjede H-3 kullkraft. Siden det er så energikrevende å kjøle ned hydrogenet, foregår det relativt store tap i prosessen. Ifølge Tabell 16 vil dette utgjøre alt fra 25-47% av det totale energiinnholdet av hydrogenet. Analysen følger BAT-prinsippet og det laveste tapet på 25% blir tatt med i energikjede H-2 og H-3.

3.1.15.1. Energibehov for flytendegjøring av hydrogen

Som nevnt ovenfor er flytendegjøringen neste ledd etter dampreforming for energikjede H-1. Tilsvarende med dampreforming, vil strømmen som brukes i denne delprosessen komme fra den norske strømmiksen. Ettersom primærkilden i denne energikjeden er naturgass og ikke blir benyttet i flytendegjøringsprosessen, vil flytendegjøringen ha en virkningsgrad på 100% i energikjede H-1 og H-3.

Tabell 17: Ulike energikrav for flytendegjøring av hydrogen

Energi som kreves for å kjøle ned 1kg hydrogen (kWh/kg)	Kilde
10	(Bartels, 2008)
12-15	(Reuß et al., 2017)
13,58	(Yang et al., 2019)

Tabell 17 gir en oversikt på hvor mye energi i kilowattimer som kreves for å kjøle ned 1kg med hydrogen fra ulike kilder. Laveste energikravet er på 10 kWh/kg hydrogen og høyeste er på 15 kWh/kg hydrogen. Siden analysen følges BAT-prinsippet, vil energikravet på flytendegjøringen av hydrogen være 10 kWh/kg hydrogen.

3.1.16. Transport og lagring av hydrogen

Etter at hydrogenet er fremstilt og gjort om til flytende, vil stoffet gå over til neste prosess; transport. Samme som ammoniakken, må drivstoffet transporteres til en fyllestasjon. Siden

det er antatt at hydrogenproduksjonen foregår ikke langt unna havnen hvor båten tankes, vil hydrogenet ha en relativt kort transport. Her vil det foregå noe energitap. Dette er siste ledd i delprosessene i energikjedene H-1 og H-2.

Tabell 18: Oversikt over virkningsgrader for transport av hydrogen

Virkningsgrad (%)	Notat	Kilde
95		(Aziz, 2018)
86,9	1,610 km gjennom rør	(Bartels, 2008)

Igjen følges BAT-prinsippet, og lest fra Tabell 18 blir en virkningsgrad på 95% brukt videre i analysen. Ifølge DNV GL (2019b) vil det foregå 0,2-0,5% tap per dag hydrogenet er lagret eller transportert. Siden det ikke er lagt med et tidsrom i denne analysen, vil denne type tap ikke bli tatt med i analysen. Viktig å bemerke at det er relativt store tap hvis hydrogenet skal lagres lenge.

3.1.17. Utvinning av råolje

Råolje er primærkilden i energikjede D-1, hvor sluttproduktet er diesel. Siden det antas at drivstoffene blir produsert i Norge, er det videre antatt at råoljen blir utvunnet i Nordsjøen i Norge. Ved utvinningen av oljen vil noe av energien gå tapt. Dette tapet må tas med i beregningene i energikjede D-1.

Tabell 19: Oversikt over energitap for utvinning av råolje

Energitap (%)	Kilde
1-3	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
3	(Holden, 2003)
7	(Wang et al., 2015)

Som vist i Tabell 19 er energitapet til utvinning av råolje relativt lav ifølge kildene, med unntak av energitapet på 7%. Her blir BAT-prinsippet fulgt, og det laveste tapet som er 1% blir fastslått. Det bør bemerkes at energitapet kan være mye høyere enn det som blir beregnet i denne analysen.

3.1.18. Transport av råolje

Fra oljefeltet i Nordsjøen fraktes oljen via skip eller rørledninger. Nevnt tidligere i oppgaven er det antatt at oljen fraktes med skip til endelig leveringssted på fastlands Norge. Under transporten av oljen foregår det noe energitap som må være med i beregningene i analysen. Se Tabell 20.

Tabell 20: Oversikt over energitap for transport av råolje

Energitap (%)	Kilde
1-5	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
0,5	(Holden, 2003)
0,2	(Niermann et al., 2021)

I følge Blok og Nieuwlaar (2021) har de gitt et estimat på energitap på 1%-5%. I henhold til BAT-prinsippet blir tapet satt til å være 0,2% i analysen.

3.1.19. Oljelagring ved raffineri

Etter at råoljen har blitt utvinnet fra oljefeltet og sendt til et raffineri, vil den bli lagret og ifølge Blok og Nieuwlaar (2021) vil det foregå tap ved lagring. Dette tapet oppgir de til å være 2%, og vil bli tatt med i analysen.

Tabell 21: Energitap ved oljelagring ved raffineri

Energitap (%)	Kilde
2	(Blok & Nieuwlaar, 2021)

Sett i Tabell 21 er det bare er en kilde i denne delprosessen.

3.1.20. Produksjon av diesel

Etter at råoljen har blitt transportert til et raffineri og blitt lagret, vil hydrokarbonene i råoljen bli separert, behandlet og omdannet til forskjellige oljeprodukter (Norsk Petroleum, 2022). Komponentene til hydrokarbonene fordampes og skilles ved ulike temperaturer. Kokepunktene avhenger derfor av hvor mange karbonatomer og hvor komplekst strukturen er. Diesel har et kokepunkt på 180-250 grader hvor bensin for eksempel krever et lavere kokepunkt; 70-140 grader celsius. (Lundberg, 2022).

Tabell 22: Oversikt over energitap under raffinering

Energitap under raffinering (%)	Merknad	Kilde
5-15		(Blok & Nieuwlaar, 2021)
7-15		(Barthe et al., 2015)
14		(Holden, 2003)
8,1-12	Kun diesel	(Forman et al., 2014)

Tabell 22 viser til energitapet til raffinering av råolje. I følge Blok og Nieuwlaar (2021) er det mer energikrevende å produsere lette oljeprodukter enn tunge oljeprodukter. Som nevnt ovenfor er diesel et relativt tungt oljeprodukt, og ifølge intervallet til Blok og Nieuwlaar (2021) vil energitapet befinne seg på det nedre sjiktet av estimatet. Forman et al. (2014) har beregnet effektiviteten på 43 raffinerier rundt om i USA, som tilsvarer 70% av total kapasitet i landet. Resultatene viser at raffinerieffektivitet ved dieselproduksjonen varierte fra 88% til 91,9%. Ifølge BAT-prinsippet skal en sette et energitap på det laveste estimatet til Blok og Nieuwlaar (2021), men diesel er ikke en av de tyngste oljeproduktene et raffineri produserer i følge Norsk Petroleum (2022). Energitapet settes på 8,1% da dette estimatet er basert på dieselproduksjon. Energitapet på 8,1% befinner seg også i intervallene til Blok og Nieuwlaar (2021) samt Barthe et al. (2015).

3.1.21. Transport av diesel

Etter at dieselen er produsert ved raffineriet vil den bli transportert til en havn hvor den så skal tankes til båten. Dette er siste ledd i energikjede D-1.

Tabell 23: Oversikt over energitap ved transport av diesel

Energitap (%)	Kilde
1-5	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
1	(Holden, 2003)
0	(Hedenus et al., 2010)

Tabell 23 viser en oversikt over energitap ved transport av diesel. Kilde tre bruker et energitap på 0% i sine analyser. Følge BAT-prinsippet burde energitapet settes ved 0%, men det er utenfor de to andre intervallene og det er svært lite sannsynlig at det vil foregå null

energitap. Med denne begrunnelsen settes energitapet til 1%, som både er innenfor Holden (2003) og Blok og Nieuwlaar (2021) sitt estimat.

3.2. TTW

3.2.1. Drivstofforbruk

Hver energikjede bruker en referansebåt. I denne oppgaven er det samme referansebåt i alle energikjedene. Kriteriet for referansebåten er at den skal kunne være sammenlignbar for alle energikjedene, det vil si samme dødvekttonn. Dødvekttonn er en måleenhet som forteller hvor mye et skip totalt kan bære. Den totale vekten med selve lasten, drivstoff, ferskvannstanker, ballast, passasjerer og mannskap for eksempel. (Osnes, 2020). Det var problematisk å finne data for dette, da ingen båter per dags dato går på 100% ammoniakk. Det skal sies at teknologien blir fullt satset på, og Wärtsila lanserte høsten 2022 en ammoniakkmotor som går på 80% ammoniakk og 20% MDO (diesel) i Norge. I denne analysen skal det sees på skip som går på 100% ammoniakk, 100% hydrogen og 100% diesel. På denne måten svarer oppgaven bedre på problemstillingen.

Bicer og Dincer gjennomførte en livsløpsanalyse der hydrogen, - og ammoniakkdrevne båtmotorer var inkludert i analysen. Hvordan de regnet ut drivstofforbruket var ikke transparent i artikkelen, så forfatterne ble kontaktet via e-post. Der oppga de at de hadde kalkulert forbruket ved å bruke GREET. Ved å bruke GREET brukte de samme energiforbruk for alle båtene, men drivstofforbruket var annerledes på grunn av brennverdiene til de forskjellige drivstoffene (ammoniakk, tungolje og hydrogen). Det vil si at de brukte de lave brennverdi-verdiene og energiforbruket til båtene og konverterte det fra MJ/tkm til kg fuel/tkm. Denne metoden var og en mulighet i denne analysen hvis ingen annen data var tilgjengelig.

Videre ble DNV kontaktet. De sitter på drivstofforbruk hvor motorene går på 100% ammoniakk, hydrogen og diesel, men dette er kun beregnet på estimer. Disse tallene er knyttet til et bulkskip som heter MV Slettringen i størrelsen 8000 dødvekttonn. Bulkskip er skip som brukes til å transportere bulklast. (Rabbevåg, 2022). Siden referansebåten har et dødvekttonn på 8000 klassifiseres den som en mini bulk. Denne type båt brukes i skipsfart samt nærskipsfart, det vil si langs norskekysten, men også mellom Norge og kontinentene. Skipet anvendes for transport av stein, sand, grus, tømmer, korn, kunstgjødsel og diverse råvarer til industrien (Rabbevåg, 2022).

Tabell 24: Oversikt over drivstofforbruk for ulike drivstoff

	Ammoniakk	Hydrogen	Diesel	Enhet	Kilde
Forbruk	400	70	200	g/kWh	(Bøhmer, 2022)

I Tabell 24 viser det drivstofforbruket til MS Slettringen for de tre ulike drivstoffene som blir sett på i denne analysen. Videre ble nedre brennverdi til ammoniakk, hydrogen og diesel anvendt for å beregne forbruket i MJ/kWh.

3.3. Utslippsfaktorer i CO₂-e

I denne delen av datainnhenting blir utslippsfaktorer brukt i oppgaven gått igjennom. Som nevnt i metodekapittelet var det utfordringer vedrørende utslippsmålinger til noen kilder. De fleste kilder oppgir utslipp i CO₂-e, men noen oppgir utslipp kun målt i CO₂. Videre antas det at dette ikke være av stor betydning for resultatene og de samlede utslippsfaktorene brukt i denne oppgaven oppgis i CO₂-e.

3.3.1. Utslipp fra naturgass

I energikjede A-1 og H-1 er ammoniakken og hydrogenet produsert fra naturgass. Det vil si at naturgass er primærenergikilden i disse to energikjedene. Noen av utslippene i energikjede A-1 og H-1 har tilført energi som kommer fra norske strømmiks i noen av delprosessene.

Tabell 25: Oversikt over ulike utslippsfaktorer

Mengde utslipp	Enhet	Kilde
168,6	gCO ₂ -e/MJ	(Al-Breiki & Bicer, 2021)
56	gCO ₂ -e/MJ	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
101	gCO ₂ -e/MJ	(NVE, 2022a)

Vist i Tabell 25, er utslippene fra de forskjellige kildene svært varierende. Utslippene til Al-Breiki og Bicer (2021) er over tre ganger så mye enn hva Blok og Nieuwlaar (2021) oppgir. Gjennomsnittet av alle utslippene er på 109 gCO₂-e per MJ. Viktig å bemerke seg at NVE (2022a) er eneste kilde som oppgir et utslipp med CO₂-e, hvorav utslippet de oppgir er litt i underkant av gjennomsnittet. På bakgrunn av dette blir utslippet for naturgass gjennomsnittet.

3.3.2. Utslipp fra norsk strømmiks

For å beregne virkningsgraden til den norske strømmiksen er det gått ut ifra NVE sine beregninger for fysisk levert strøm for år 2021. NVE beregner klimadeklarasjonen hvert år for den leverte strømmen. (NVE, 2022a). I Tabell 26 er det en oversikt over de beregnede utslippene fra år 2019 til år 2021.

Tabell 26: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra vindkraft

Mengde utslipp	Enhet	År
17	gCO ₂ -e/kWh	2019
8	gCO ₂ -e/kWh	2020
11	gCO ₂ -e/kWh	2021

Ut ifra NVE (2022a) sine beregninger varierer utslippene fra år til år. Grunnen til det er at mengde produsert energi fra ulike teknologier samt importen fra andre land varierer fra hvert år. Dette er noe NVE tar med i beregningene for klimagassutslippene. For å finne en representativ utslippsfaktor til denne analysen er det tatt et gjennomsnitt av utslippene fra de tidligere årene, og utslippsfaktor er satt til å være 12 gCO₂-e/kWh. Omregnet vil det bli 3,33 g CO₂-e/MJ. Viktig å bemerke seg at NVE har brukt en utslippsfaktor på 0 gCO₂-e/kWh for fornybare energikilder samt kjernekraft. Utslippsfaktoren for norsk strømmiks kan av den grunn være lavere enn realiteten.

3.3.3. Utslipp fra vindkraft

Vindkraft er primærenergikilden i energikjede A-2 og H-2. Det vil si at det kun er brukt vindkraft til produksjonen av ammoniakk og hydrogen. I følge NVE (2022b) NVE står vindturbinene med tilhørende fundament for det meste av klimagassutslippene til vindkraft. I tillegg kommer utslipp fra arealinngrepet, og med en levetid på 25 år vil arealbruken ligge på rundt 1,0-3,0 gCO₂-e/kWh.

Tabell 27: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra vindkraft

Mengde utslipp	Enhet	Kilde
9-14	gCO ₂ -e/kWh	(NVE, 2022a)
8,0-20,0	gCO ₂ /kWh	(Arvesen & Hertwich, 2012)
2,8 – 7,4	gCO ₂ -e/kWh	(Jacobsen, 2009)

Tabell 27 viser til forskjellige utslippsfaktorer. Det er viktig å merke seg at en kilde viser kun utslipp i CO₂ og ikke CO₂-e. For å finne utslippsfaktoren til denne analysen er det tatt gjennomsnitt fra de forskjellige intervallene for så å ta gjennomsnittet av det igjen. Dette ga en utslippsfaktor på 10,0 gCO₂-e/kWh, og omregnet 2,8 gCO₂-e/MJ. Det vil si at utslippet ligger på det nedre skiftet på estimatet til NVE som baserer seg på norske forhold, og vil av den grunn være en relevant utslippsfaktor.

3.3.4. Utslipp fra råolje

I energikjede D-1 er råoljen primærenergikilden hvor diesel er sluttproduktet.

Tabell 28: Oversikt over ulike utslippsfaktorer fra råolje

Mengde utslipp	Enhet	Kilde
215, 3	gCO ₂ -e/MJ	(NVE, 2022a)
73	gCO ₂ /MJ	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
206	gCO ₂ /MJ	(Al-Breiki & Bicer, 2021)

I Tabell 28 er utslippsfaktoren til NVE (2022a) og Al-Breiki og Bicer (2021) relativ lik. Blok og Nieuwlaar (2021) derimot har et veldig mye lavere utslippstall. Dette skaper stor variasjon og usikkerhet på hva som er en representativ utslippsfaktor for oppgaven. På bakgrunn av det er det valgt å ta gjennomsnittet til de tre utslippstallene. Utslippsfaktoren blir dermed 164,8 CO₂-e/MJ. Merk at her har Blok og Nieuwlaar (2021) og Al-Breiki og Bicer (2021) kun CO₂ og ikke CO₂-e som utslippsfaktor.

3.3.5. Utslipp fra kull

I energikjede A-3 og H-3 er kull primærenergikilde. Ved konvertering fra kull til strøm slippes det ut klimagassutslipp.

Tabell 29: Oversikt over ulike utslippsfaktorer for kull

Mengde utslipp	Enhet	Kilde
101	gCO ₂ /MJ	(Blok & Nieuwlaar, 2021)
277,8	gCO ₂ -e/MJ	(NVE, 2022a)

Sett i Tabell 29 er utslippsfaktoren fra NVE (2022a) nesten tre ganger så høyere enn det Blok og Nieuwlaar (2021) oppgir. Dette er noe som fører til stort sprik i dataen. Gjennomsnittet av disse to kildene er 189,4 gCO₂-e/MJ.

3.4. Oppsummering av data

Tabell 30 Tabell 30 viser en oppsummering av virkningsgradene brukt i oppgaven.

Tabell 30: Oversikt over alle virkningsgrader brukt i beregningene

Energikjede	A-1	A-2	A-3	H-1	H-2	H-3	D-1
Delprosesser med tilhørende virkningsgrad							
Utvinning råstoff	99,3%	IA	99,0%	99,3%	IA	99,0%	99,0%
Strømproduksjon	IA	100%	40%	IA	100%	40%	IA
Transport råstoff	97,8%	IA	95%	97,8%	IA	94%	99,5%
Lagring råstoff	IA	IA	99%	IA	IA	99%	98,0%
Produksjon raffineri	IA	IA	IA	IA	IA	IA	90,0%
Distribusjon strøm	IA	93,8%	93,5%	IA	93,8%	93,8%	IA
Dampreforming	85,0%	IA	IA	85,0%	IA	IA	IA
Vannelektrolyse	82,0%	82,0%	82,0%	82,0%	82,0%	82,0%	IA
Haber-Bosch	76,4%	76,4	76,4%	IA	IA	IA	IA
Flytendegjøring	99,3%	99,3%	99,3%	75,0%	75,0%	75,0%	IA
Transport drivstoff	98,0%	98,0%	98%	95,0%	95,0%	95,0%	97,0%

Tabellforklaring til Tabell 30:

- IA menes med ikke aktuelt for den aktuelle energikjeden
- «Utvinning råstoff» inkluderer utvinning av naturgass, kull og olje
- «Transport råstoff» inkluderer transporten fra utvinningslokasjonen til produksjonsstedet for naturgass, kull og olje
- «Lagring råstoff» er lagring av kull og olje ved kullkraftverk og raffineri

Tabell 31 viser en oppsummering av utslippsfaktorene brukt i oppgaven.

Tabell 31: Oversikt over utslippsfaktorer

Kilde	Verdi	Enhet
Naturgass	108,5	gCO ₂ -e/MJ
Kull	189,4	gCO ₂ -e/MJ
Vindkraft	2,8	gCO ₂ -e/MJ
Norsk strømmiks	3,3	gCO ₂ -e/MJ
Råolje	168,4	gCO ₂ -e/MJ

4. Resultat og diskusjon

I resultat, - og diskusjonskapittelet skal resultatene i oppgaven bli presentert. De syv energikjedene resultatene baserer seg på er kort beskrevet i Tabell 32. Tabell 32: Kort beskrivelse av energikjedene. For mer detaljert forklaring, se metodekapittel.

Tabell 32: Kort beskrivelse av energikjedene

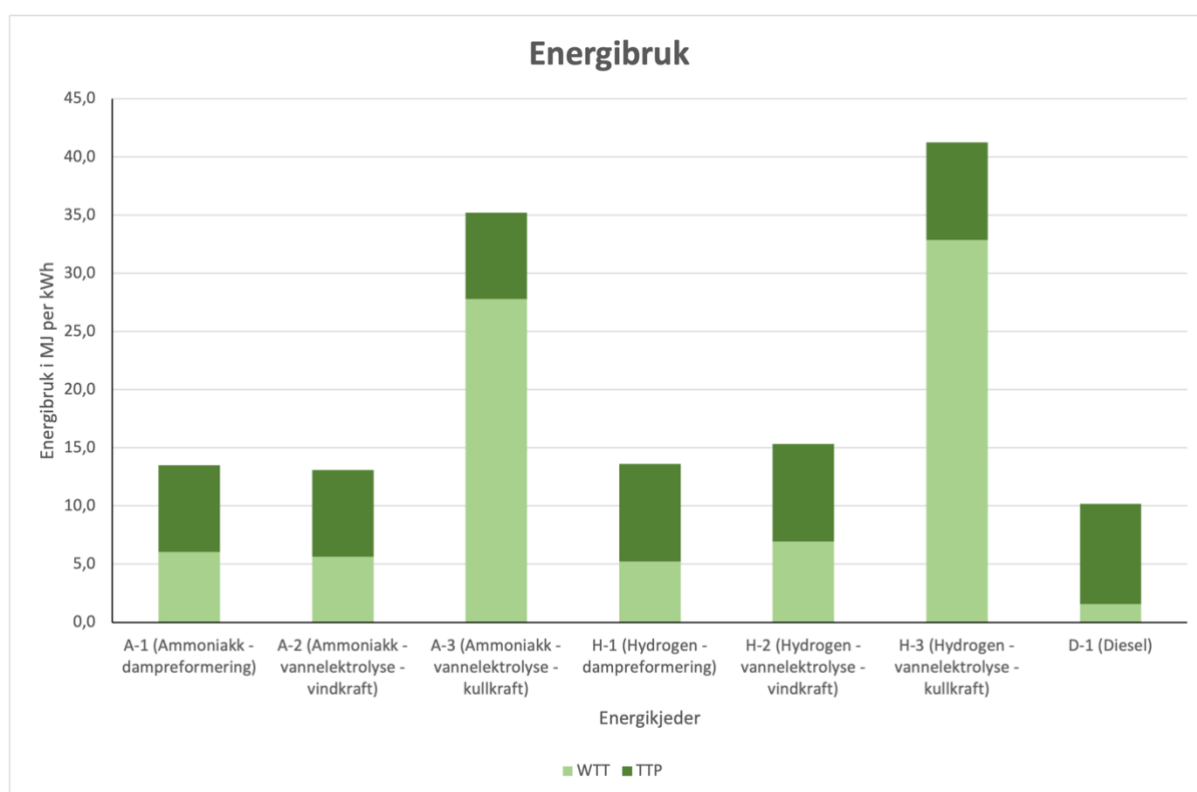
Energikjede	Kort beskrivelse
A-1	Forbrenningsmotor med ammoniakk produsert med hydrogen fra dampreforming av naturgass
A-2	Forbrenningsmotor med ammoniakk produsert med hydrogen fra vannelektrolyse drevet av vindkraft
A-3	Forbrenningsmotor med ammoniakk produsert med hydrogen fra vannelektrolyse drevet av kullkraft
H-1	Brenselcelle med hydrogen produsert fra dampreforming av naturgass
H-2	Brenselcelle med hydrogen produsert fra vannelektrolyse drevet av vindkraft
H-3	Brenselcelle med hydrogen produsert fra vannelektrolyse drevet av kullkraft
D-1	Forbrenningsmotor med diesel

Videre er resultatene presentert i fire deler. Først presenteres den totale energibruken til energikjedene, deretter presenteres de totale utslippene. Videre vil resultatene fra følsomhetsanalysene presenteres, i siste del blir resultatene fra scenarioanalysene presentert. Alle delene inneholder en oppsummering av det som blir ansett som viktige funn fra resultatene. Til slutt blir studiens kvalitet vurdert og tanker om videre arbeid blir beskrevet.

Videre deles WTP-analyser i to deler. Den første delen kalles well-to-tank (WTT). I denne delen foregår analysen av drivstoffet, det vil si alle delprosessene fra utvinning av råstoff, til drivstoffet er klar til å bruke i skipet. Den andre delen heter tank-to-propeller (TTP). Denne delen tar for seg bruken av drivstoffet når skipet er i bruk.

4.1. Resultat for energibruk

Den totale energibruken for hver energikjede er illustrert i Figur 10. Energibruken er delt opp i WTT og TTP. WTT inkluderer energibruken som skal til for å produsere drivstoffet, nærmere bestemt energibruken fra alle delprosessene. TTP tar for seg energibruken når drivstoffet blir brukt i skipet, det vil si drivstofforbruket. Total energibruk heter WTP og er summen av WTT og TTP. Total energibruk (WTP) er både bruk av primærenergi og eventuelt bruk av energitilførsel (el). Energikjedene med energitilførsel er A-1 og H-1, der energikilden er norsk strømmiks. Total energibruk er målt i MJ per kilowattime som betyr energi levert til akslingen på motoren på skipet.



Figur 10: Resultat for total energibruk til de ulike energikjedene

4.1.1. WTT-verdier

Det kommer tydelig frem i resultatene illustrert i Figur 10 at A-3 og H-3 er de to energikjedene som krever betydelig mer energi per kWh enn de andre energikjedene, hvorav H-3 er den som krever mest energi. Videre viser resultatene at det er i WTT-fasen den store energibruken ligger for energikjede A-3 og H-3. I WTT-fasen foregår selve drivstoffproduksjonen. Det er flere årsaker for at disse to energikjedene har mye høyere energibruk enn de andre energikjedene. Begge energikjedene har lengre kjeder på grunn av flere delprosesser i energikjeden enn de andre. Dette skaper mer energitap i energikjedene. I

tillegg til flere delprosesser, er virkningsgraden til strømproduksjonen fra kullkraftverk estimert til å være 40%, sammenlignet med energikjede A-2 og A-3 der virkningsgraden til vindkraft er estimert til å være 100%.

Den energikjeden med lavest energibruk i WTT-fasen er D-1. Produksjon av diesel er en teknologi som har utviklet seg over lang tid, og dermed hatt tid til effektivisering av alle prosessene og deres tilhørende teknologi. Alle de estimerte virkningsgradene til delprosessene i denne energikjeden ligger på over 90%. Samtidig er det færre delprosesser i denne energikjeden enn de andre, som igjen fører til mindre energitap i energikjeden.

Når det gjelder energikjede A-1, A-2, H-1 og H-2 ligger den estimerte energibruken for WTT relativt likt. Energifkjeden med lavest energibruk er H-1 etterfulgt av A-2, A-1 og H-2. Det vil si at hydrogenfremstilling ved dampreforming hadde lavest energibruk for hydrogenproduksjon, kontra produksjon av ammoniakk som hadde lavest energibruk med vannelektrolyse drevet av vindkraft.

For energikjede H-1 ble energibruken for flytendegjøringen av hydrogenet i denne oppgaven beregnet, til forskjell fra H-2, der en antar en virkningsgrad på flytendegjøringen av hydrogenet til å være 75%. Dette resulterte med at det oppsto mer tap i energikjede H-2 enn H-1. Videre har energikjedene A-1 og A-2 ytterligere en delprosess sammenlignet med H-1 og H-2, som er Haber-Bosch-prosessen. Likevel er energibruken til A-2 noe mindre enn H-2. En av grunnene til de resultatene, er at virkningsgraden til flytendegjøringen til hydrogen ble estimert til å være 75%, i motsetning til flytendegjøring av ammoniakk som kun har et tap på 1%, - det vil si virkningsgrad på 99%. Det skal sies at det er en marginal forskjell i energibruken på disse to energikjedene. Likevel viser det seg at å beregne energibruk til flytendegjøring har en uttelling på resultatene. Nærmere bestemt oppstår det mer tap i hydrogenkjeden når flytendegjøringen til hydrogenet er inkludert som en virkningsgrad.

4.1.2. TTP-verdier

Energikjedene som bruker samme drivstoff, vil ha samme energibruk for alle TTP-verdiene vist i Figur 10. TTP er drivstofforbruket til drivstoffet per kilowattime levert til akslingen til motoren på bulkskipet. Energifkjede A-1, A-2 og A-3 har derfor samme TTP-verdier fordi, og tilsvarende for energikjede H-1, H-2 og H-3. Årsaken er at A-1, A-2 og A-3 fremstiller ammoniakk i energikjeden og bruker de samme estimatene for drivstofforbruket til

bulkskipet. Det samme gjelder for energikjedene som fremstiller hydrogen (H-1, H-2 og H-3). Det er kun en energikjede som bruker diesel og det er D-1, og er derfor den eneste energikjeden som bruker estimatet for drivstofforbruket for diesel.

TTP-verdiene for alle energikjedene er relativt like. Energiikjeden med høyest TTP-verdi er energikjeden som bruker diesel, etterfulgt av hydrogen og ammoniakk. Selv om ammoniakk har høyest forbruk i 400g/kWh, har den lavest forbruk i MJ/kWh på grunn av lav nedre brennverdi (18,6 MJ/kg). Hydrogen på den andre siden er det drivstoffet med desidert lavest forbruk i 70 g/kWh, men siden hydrogen har det høyeste energiinnholdet (119,9 MJ/kg) vil forbruket være høyere enn drivstofforbruket for ammoniakk. Diesel derimot har et estimat mellom hydrogen og ammoniakk når det kommer til drivstofforbruk og med en middels lav brennverdi på 43 MJ/kWh, vil det ha størst drivstofforbruk i MJ/kWh av alle drivstoffene.

Viktige funn for den totale energibruken (WTP) i energikjedene oppsummeres følgende:

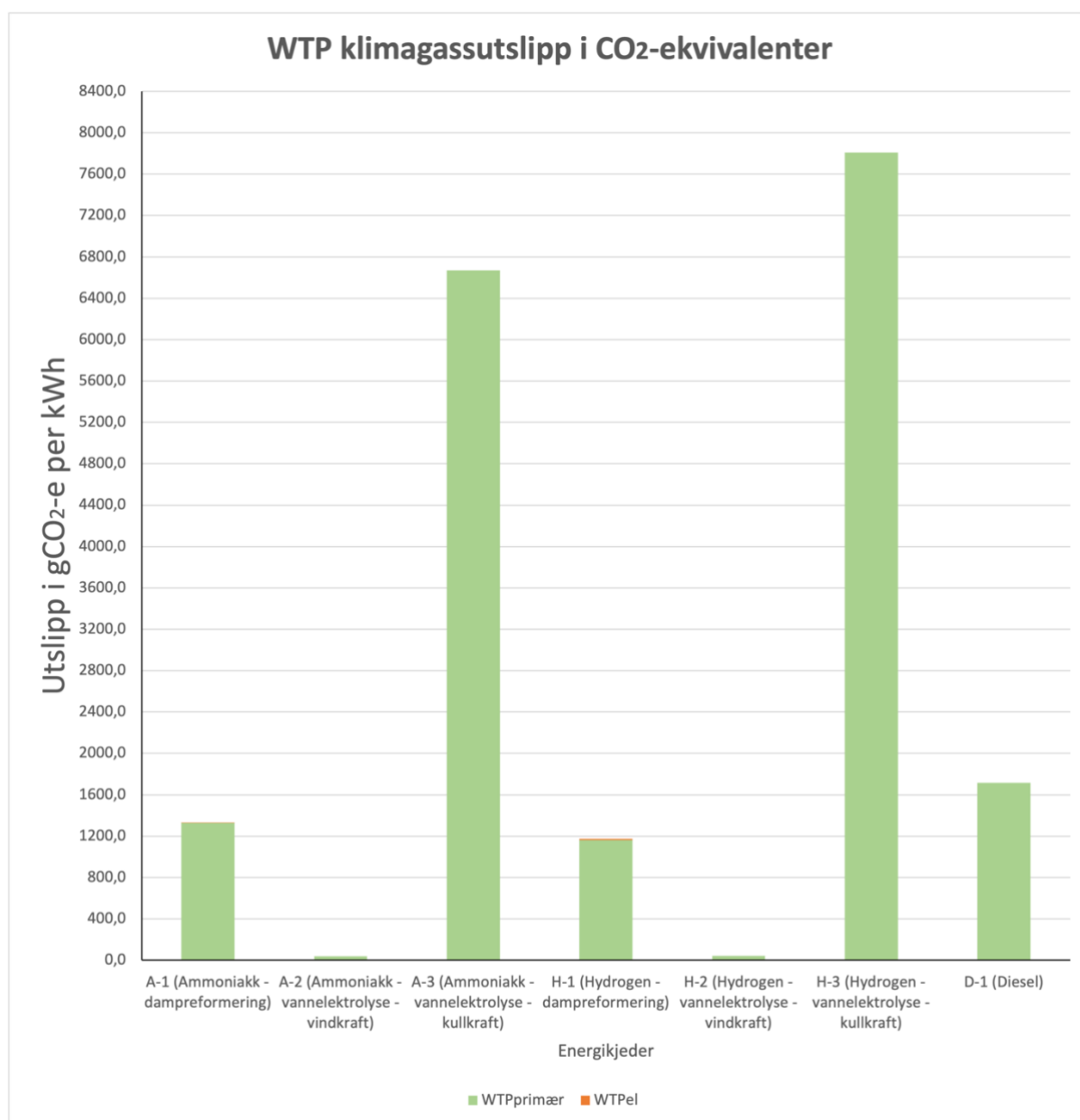
- Diesel har lavest total energibruk
- Ammoniakk har lavere energibruk enn hydrogen med unntak av energikjeden med dampreforming av naturgass
- Ammoniakk, - og hydrogenproduksjon ved vannelektrolyse drevet av fossil strøm har størst energibruk.

Resultatene til Song et al. (2022) viser at ammoniakk er det drivstoffet som krever minst energi i et WTT-perspektiv - både når det produseres gjennom dampreforming og gjennom elektrolyse med fornybare energikilder. Dette korrelerer delvis overens med resultatene i denne oppgaven, siden ammoniakk bruker minst energi med vannelektrolyse drevet av vindkraft, men krever litt mer enn hydrogen hvis produksjonsmetoden er dampreforming av naturgass. Det skal sies at i denne analysen er delprosessene noe annerledes enn de som er valgt å bruk i denne oppgaven. I tillegg er flytendegjøringen for hydrogen i energikjeden med dampreforming som nevnt tidligere beregnet etter energibehov og ikke virkningsgrad. Dette kan være grunnen til avviket fra resultatene i denne oppgaven og resultatene til Song et al. (2022).

På den andre siden konkluderer Noh et al. (2022) at hydrogen i gassform krever minst energi etterfulgt av flytende hydrogen og flytende ammoniakk i et WTT-perspektiv. I denne analysen er ikke hydrogen i gassform inkludert, men kun flytende hydrogen. Det vil si at i denne studien krever flytende hydrogen mindre energibruk enn flytende ammoniakk og avviker fra resultater i denne oppgaven. Viktig å påpeke at delprosessene er noe annerledes i Noh et al. (2022) sin studie enn i denne oppgaven.

4.2. Resultater for klimagassutslipp

For å bregne utslippene i gCO₂-e er WTP delt i WTP_{primær} og WTP_{el} (se Figur 11). Dette er viktig for beregningen av klimagassutslipp siden utslippene i energikjede A-1 og H-1 kommer fra to forskjellige energikilder. WTP_{primær} menes med utslippet fra den primære energikilden levert til en bestemt mengde energi i energikjeden, i dette tilfellet naturgass. WTP_{el} er utslippet til den tilførte energien til noen av delprosessene i energikjedene, i dette tilfellet norsk strømmiks. Resten av energikjedene viser kun WTP_{primær}, da de ikke har annen tilført energi i energikjeden.



Figur 11: Resultat for totalt klimagassutslipp for de ulike energikjedene

Vist i Figur 11, kommer det tydelig frem i resultatene at energikjede H-3 (7809 gCO₂-e/kWh) og A-3 (6669 gCO₂-e/kWh) har de største utslippene. Disse to energikjedene benytter seg av strøm fra strømproduksjon fra kullkraft til å drive vannelektrolyse. I motsetning til energikjede A-2 og H-2 som bruker strøm fra vindkraft til å drive vannelektrolyse. Dette fører til at energikjede A-2 og H-2 har de laveste utslippene av alle energikjedene. Det er ikke store forskjeller for utslipp mellom de to, hvor utslippene er på 36 og 43 gCO₂-e/kWh for A-2 og H-2 henholdsvis. Samme gjelder for energikjede A-1 og H-1, som benytter seg av dampreforming av naturgass til å produsere hydrogen. Utslippene for denne type produksjonsmetode er på 1331 og 1172 gCO₂-e/kWh for energikjede A-1 og H-1 henholdsvis. Videre viser resultatene knyttet til WTP_{el} at utslippene er litt høyere for energikjede H-1 sammenlignet med A-1. Tatt i betraktning av de totale utslippene er utslippene knyttet til WTP_{el} av lite betydning for resultatene for energikjedet A-1 og H-1. Energikjede D-1 ligger over energikjedene drevet av dampreforming av naturgass og har et utslipp på 1714 gCO₂-e/kWh.

Viktige funn for klimagassutslipp i energikjedene oppsummeres følgende:

- Energikjeder som benytter strøm fra fornybar energikilde, gir minst utslipp.
- Ammoniakk har lavere utslipp enn hydrogen, hvis strømforsyningen kommer fra vindkraft.
- Energikjeder med fossil strøm som energikilde slipper ut betydelig høyere utslipp enn de andre energikjedene.
- Energikjedene der hydrogen blir produsert fra dampreforming av naturgass bidrar lite til å redusere klimagassutslipp.

Energikjede A-2 er den energikjeden som har lavest utslipp. I denne energikjeden er hydrogen fremstilt av vannelektrolyse drevet av vindkraft. Disse resultatene stemmer godt overens med resultatene i analysen til Singh et al. (2018), hvor det konkluderes med at ammoniakkproduksjon der hydrogen er fremstilt ved vannelektrolyse drevet av vindkraft har lavest utslipp. Dette korresponderer i tillegg på Ghavam et al. (2021) fant ut av i deres studie; Fremstilling av hydrogen er helt avgjørende for utslippene ved ammoniakkproduksjon.

Tett etterfulgt har energikjede H-2 nest lavest utslipp. Disse resultatene stemmer overens med Suleman et al. (2015) sin studie hvor det konkluderes med at hydrogen produsert ved vannelektrolyse drevet av fornybar strømmiks vil gi lave klimagassutslipp.

Livsløpsanalysene til Bicer og Dincer (2018); Perčić et al. (2022); Ye et al. (2022) kommer det frem at hydrogen som drivstoff i forskjellige type båter og skip er det som har lavest klimagassutslipp gitt at hydrogenproduksjonen er ved vannelektrolyse drevet av vindkraft. Videre konkluderes studiene med at ammoniakk har og veldig lave utslipp og kan bidra betraktelig med utslippsreduksjon i forhold til dieseldrevne båter. Dette er noe avvik fra resultatene i denne oppgaven siden ammoniakk kommer best ut av hydrogen og ammoniakk ved fremstilling av vannelektrolyse, men ikke av stor betydelig grad. En av grunnene til det, er at alle de nevnte studiene er ammoniakk og hydrogen brukt i brenselceller.

I brenselceller har ammoniakk har mye høyere energitap enn hydrogen i disse type motorer på grunn av ekstra cracking og ekstra energibehov ved oppvarming av systemet. I denne oppgaven er ammoniakk som nevnt brukt i forbrenningsmotor og ikke brenselcelle, og vil derfor kunne bidra til andre resultater. En annen grunn er at i denne oppgaven har flytendegjøring av hydrogen en virkningsgrad på 75% i energikjede A-2 og H-2, samt A-3 og H-3. I motsetning til energikjede H-1 der flytendegjøringen har blitt beregnet i forhold til energibehov. Viktigheten av virkningsgraden kan være av betydning siden H-1 har lavere utslipp en A-1.

Viktig å bemerke at både hydrogen og ammoniakk fremstilt med vannelektrolyse drevet av fornybare energikilder har vesentlig lavere utslipp enn diesel i studiene fra Bicer og Dincer (2018); Perčić et al. (2022); Ye et al. (2022), noe som også er tilfellet i denne oppgaven da energikjede D-1 står for de største utslippene etterfulgt av A-3 og H-3.

I denne oppgaven har energikjede A-1 og H-1 høye utslipp i forhold til A-2 og H-3. Til sammenligning til D-1, har A-1 og H-1 lavere utslipp, men vil ikke bidra vesentlig med utslippsreduksjon. Dette funnet støttes av studien til Perčić et al. (2022), som også konkluderer med at drivstoff fra dampreforming ikke bidrar noe særlig til lavere utslipp, selv om diesel er det som har størst utslipp. Dette viser at energikjedene med lavt energibruk per kilowatttime trenger ikke nødvendigvis å være den energikjeden med minst utslipp.

De energikjedene som har det høyeste klimagassutslippet er energikjede A-3 og H-3. Disse energikjedene ble inkludert for å se på viktigheten til strømforsyningen i energikjedene. Disse to energikjedene har desidert høyest utslipp, og forteller at strømforsyningen spiller en stor rolle.

Viktige funn for klimagassutslipp i energikjedene oppsummeres følgende:

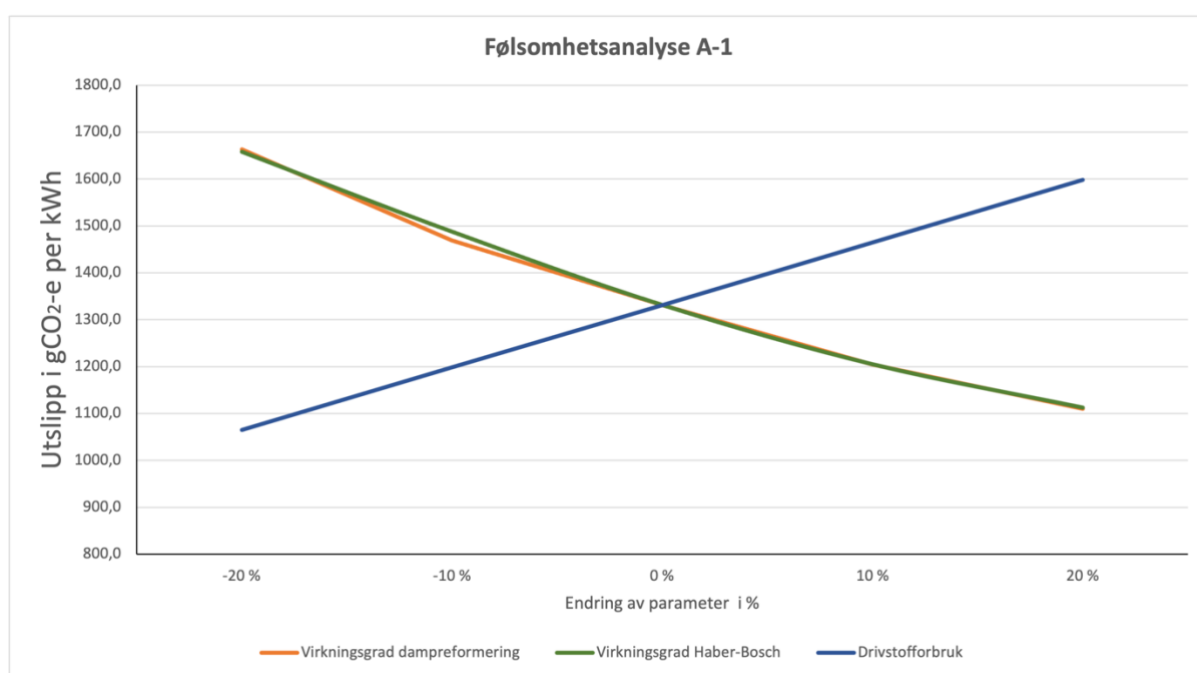
- Energikjeder som benytter strøm fra fornybar energikilde, gir minst utslipp.
- Ammoniakk har lavere utslipp enn hydrogen, hvis strømforsyningen kommer fra vindkraft.
- Energikjeder med fossil strøm som energikilde slipper ut betydelig høyere utslipp enn de andre energikjedene.
- Energikjedene der hydrogen blir produsert fra dampreforming av naturgass bidrar lite til å redusere klimagassutslipp.

4.3. Resultater fra følsomhetsanalysene

I dette delkapittelet skal resultatene fra følsomhetsanalysene bli presentert. Det er gjennomført følsomhetsanalyse for A-1 og H-2 for å inkludere alle de viktige delprosessene i energikjedene. Disse delprosessene er dampreforming av naturgass, Haber-Bosch-prosessen, vannelektrolyse og flytendegjøring av hydrogen. Følgende delprosesser har lave virkningsgrader, og vil derfor være av interesse å se på. Resultatene fra følsomhetsanalysene viser totale utslipp for energikjedene (WTP).

4.3.1. Følsomhetsanalyse A-1

I følsomhetsanalysen til A-1 er tre parametere valgt ut for å teste følsomheten for endringer. Det er virkningsgrad for dampreforming, virkningsgrad for Haber-Bosch-prosessen og drivstofforbruket.



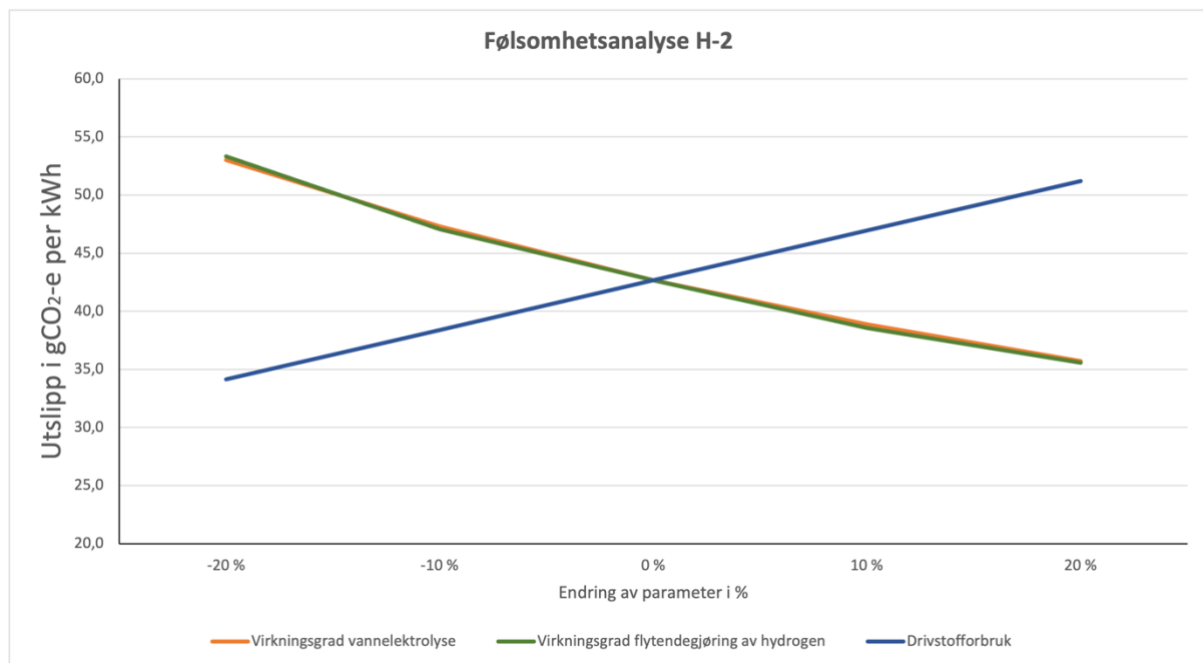
Figur 12: Følsomhetsanalyse for energikjede A-2

Følsomhetsanalysen sett i Figur 12 for energikjede A-1 viser at modellen er i stor grad følsom for endringer i alle de valgte parameterne. Endringer på virkningsgradene til dampreforming og Haber-Bosch-prosessen viser seg å ha nesten like store utslag. Begge delprosessene vil ha en økning på rundt 25% av utslippene ved en reduksjon på 20% av virkningsgraden (rundt 300 gCO₂-e/kWh). Ved økning av virkningsgradene vil det føre til en minking av utslippene på rundt 17% for begge delprosessene (200 gCO₂-e/kWh). Det vil si at delprosessen er mer følsom på en reduksjon av virkningsgraden fremfor en økning.

Når det gjelder drivstofforbruket, vil prosentendringen av parameteren med en reduksjon eller økning på 20%, resultere til at utslippet vil øke eller minke med 266 gCO₂-e per kilowattime levert til akslingen. Det vil si at drivstofforbruket har en endring på 20% av utslippene ved både øking og minking.

4.3.2. Følsomhetsanalyse H-2

I følsomhetsanalysen for energikjede H-2 er tre parametere valgt ut; virkningsgraden for vannelektrolyse, virkningsgraden for flytendegjøring og drivstofforbruk. Se Figur 13.



Figur 13: Følsomhetsanalyse for energikjede H-2

Det kommer frem i følsomhetsanalysen for H-2 at modellen er følsom for reduksjoner og økninger for alle de valgte parameterne. Akkurat som i følsomhetsanalysen for A-1, har virkningsgradene for delprosessene nesten like store utslag. Ved en reduksjon på 20% på virkningsgraden for vannelektrolyse og flytendegjøringen av hydrogen vil det forekomme en økning på rundt 10 gCO₂-e/kWh. For drivstofforbruket vil utslippene minke og øke med rundt 8 gCO₂-e/kWh når forbruket får en økning eller reduksjon på 20%.

Viktige funn fra følsomhetsanalysen oppsummeres følgende:

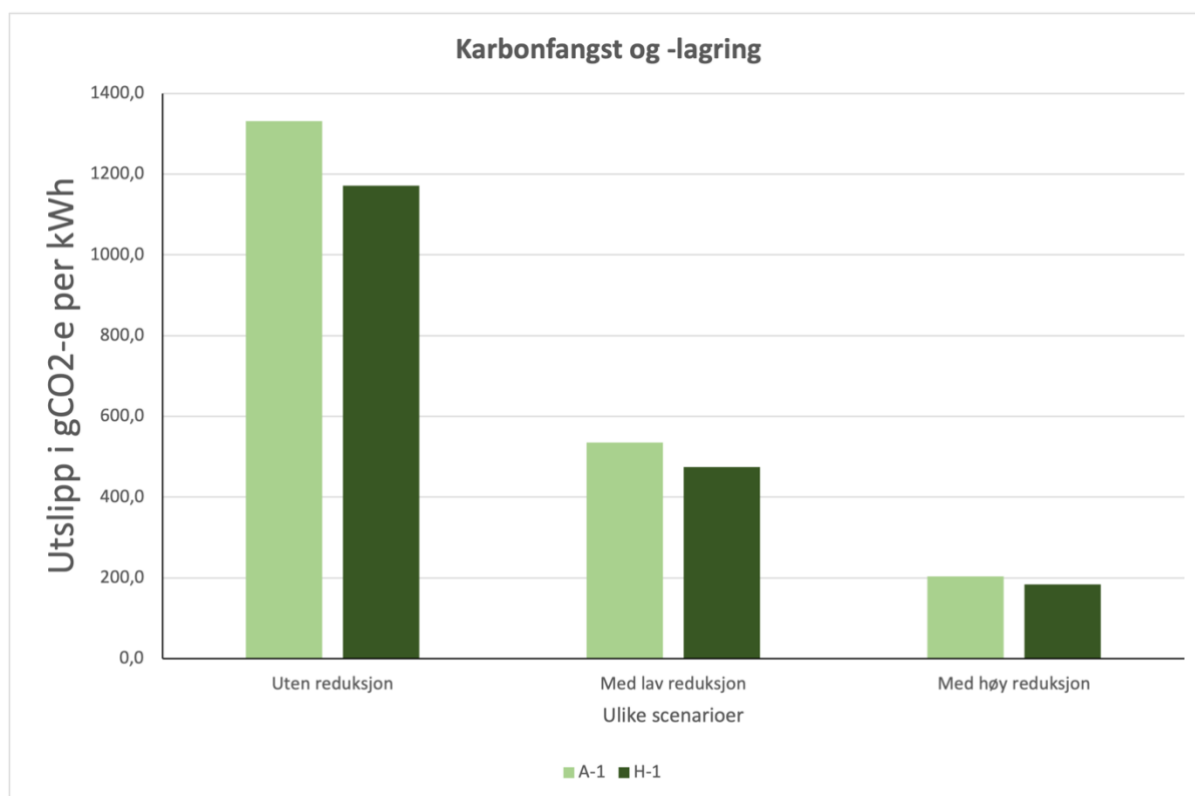
- Virkningsgrader for sentrale prosesser i både ammoniakk, - og hydrogenproduksjon er følsomme for endringer, spesielt hvis det forekommer en reduksjon. En endring kan derfor være av avgjørende betydning for resultatene.
- Drivstofforbruket er følsom for endringer i både energikjede A-1 og H-2.

4.4. Resultater fra scenarioanalysene

I dette delkapittelet skal resultatene fra scenarioanalysene bli presentert. På grunn av fremtidig teknologiutvikling og marked er det gjennomført scenarioanalyser for å undersøke ulike mulige fremtidige utfall. Det er valgt tre ulike scenarioanalyser i denne oppgaven, hvor hensikten er å undersøke hvordan energikjedene vil endre utslippene i gCO₂-e for forskjellige scenarioer. Resultatene fra scenarioanalysene viser totale utslipp for energikjeden (WTP).

4.4.1. Scenarioanalyse 1. Økt karbonfangst og -lagring i dampreformeringsprosessen

I denne scenarioanalysen estimeres hva utslippene vil bli hvis utslippene fra naturgass blir redusert med 60% (lav reduksjon) og 85% (høy reduksjon), det vil si to ulike scenarioer. Dette er på bakgrunn av The Royal Society (2020) sine estimeringer hvis dampreformeringen av naturgass foregår med karbonfangst og -lagring. Dette er som nevnt i metodekapittelet kun ment som en innsikt da karbonfangst- og lagring kun fjerner CO₂, og ikke CO₂-e.



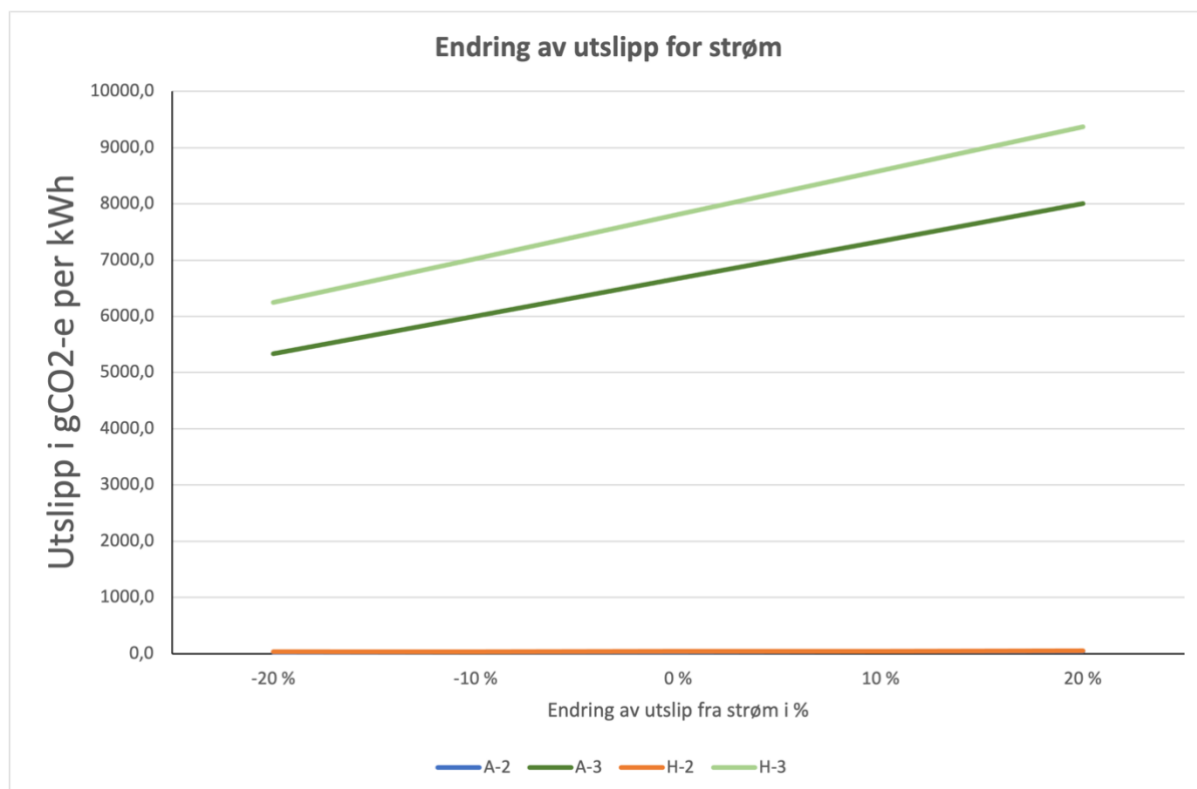
Figur 14: Scenarioanalyse med karbonfangst og -lagring

Resultatene for scenarioanalyse med karbonfangst og -lagring viser at utslippene reduseres betraktelig med følgende teknologi. Begge scenarioene for begge energikjedene vist i Figur 14, viser at utslippene reduseres betraktelig. På denne måten kan dampreformering av naturgass med karbonfangst og -lagring bidra til å redusere utslipp ved hydrogen, - og

ammoniakkproduksjon. Utslippstallene fra scenarioet med en reduksjon på 85%, er på 204 og 184 gCO₂-e/kWh for energikjede A-1 og H-1 henholdsvis.

4.4.2. Scenarioanalyse 2. Endring av utslipp for strømmiksen i energikjedene med vannelektrolyse

I denne scenarioanalysen er det endret på utslipp for energikjedene som bruker strøm (A-2, H-2, A-3, H-3). Endringen er en reduksjon og økning på 20%.

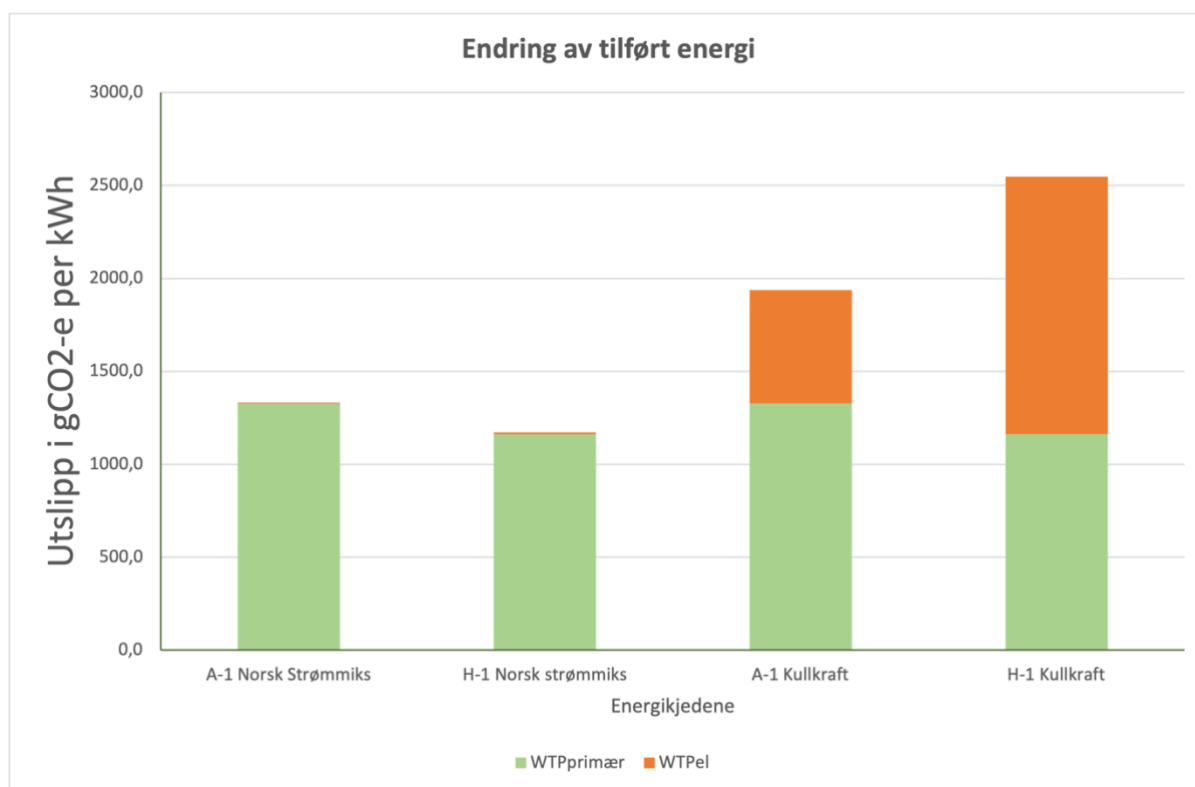


Figur 15: Scenarioanalyse med endring av utslipp fra strøm

Resultatene fra følsomhetsanalysen i Figur 15 viser at energikjedene som bruker strøm fra vindkraft blir i svært liten grad påvirket av endringer i utslippet enn de energikjedene som bruker strøm fra kullkraft. Dette kan skyldes at utslipp forbundet med vindkraft er svært lave i forhold til kullkraft. En prosentendring i utslippet til kullkraft vil dermed ha større påvirkning på resultatet enn det vindkraft vil ha.

4.4.3. Scenarioanalyse 3. Endring av strømmiks for tilført energi til delprosesser

I denne scenarioanalysen er den tilførte energien i energikjede A-1 og H-1, erstattet med strøm fra kullkraft i istedenfor opprinnelig strøm fra norsk strømmiks. Her er alle delprosessene til kullkraft inkludert.



Figur 16: Endring av tilført energi for energikjede A-1 og H-1

Resultatene fra scenarioanalysen vist i Figur 16, viser at å bruke strøm fra kullkraft fremfor norsk strømmiks har en stor og interessant innvirkning på resultatene. Begge energikjedene får høyere utslipp med strøm fra kullkraft. Dette kan forklares med at norsk strømmiks har mye lavere utslipp enn strøm fra kullkraft. Hvis norsk strømmiks blir brukt til å drive delprosessene i begge energikjedene, er det A-1 som har størst utslipp, men hvis strømmen kommer fra kullkraft er det H-1 som desidert har høyest utslipp. Energibruken til flytendegjøringen i H-1 er som nevnt beregnet, og virkningsgraden i energikjeden er satt til 100%. Dette er fordi flytendegjøringen krever mye energi og energibruken er stor. Dette ble gjort for å ikke forgreine energikjedene. Det viser seg at betydningen av hvor den tilførte energien kommer fra har stor effekt på resultatet. Siden norsk strømmiks har lite klimagassutslipp vil det ikke ha så stor betydning på utslippene selv om energibruken til flytendegjøringen er stor. Det vil dermed ha påvirkning hvis den tilførte energien kom fra fossil strømmiks, fordi utslippene er mye høyere.

Viktige funn fra scenarioanalysene oppsummeres følgende:

- En reduksjon eller økning av utslippene til energikjedene som benytter seg av strøm fra kullkraft vil ha betydning for utslippene, men ikke energikjedene som benytter seg av fornybar energi.
- Karbonfangst og-lagring kan bidra med å minske utslippene betraktelig i de energikjedene med dampreforming
- Valg av strømmiks for å drive flytendegjøringen av hydrogen har stor påvirkning på utslippene til energikjedene som benytter seg av tilført energi.

4.5. Datavalidering og datautfordringer

I dette delkapittelet skal kvaliteten av data valideres og utfordringer ved innhenting av data beskrives.

Den største utfordringen i denne oppgaven var å finne data for drivstofforbruk. Grunnen til det var at ingen båter går på skrivende stund kun på ammoniakk, men det blir kun brukt som *dual fuel*. Ved å bruke drivstofforbruk der ammoniakk blir brukt som *dual fuel* til å sammenligne med båter som går på hydrogen og diesel ville ført til resultater som ikke svarte på problemstillingen. Derfor ble det valgt å bruke tall fra DNV, til tross for at disse kun var basert på estimater. Disse estimatene var er som nevnt i datakapittelet basert på samme bulkskip, og er derfor drivstofforbruk som er sammenlignbar for de ulike drivstoffene. Drivstofforbruk er en viktig parameter i en well-to-propell-analyse, og siden drivstofforbruket er basert på estimater utgjør det en stor svakhet og usikkerhet i oppgaven.

Resten av datagrunnlaget i oppgaven baserer seg kun på sekundærdata. Av den grunn er det forsøkt å innhente flere kilder for samme prosess eller utslippsfaktor. Dette er fordi dataen er hentet fra forskjellige steder, og forskingen vil med stor sannsynlighet basere seg på ulike faktorer. Det vil derfor skape mer robusthet i dataen hvis flere kilder ble inkludert. Dette førte til at datainnsamlingen for samme virkningsgrad og utslippsfaktor hadde ulike verdier.

Videre ble BAT-prinsippet brukt for å fastsette virkningsgrad, som går ut på å velge de mest effektive virkningsgradene fordi de er ansett som mest reelle sett i et fremtidsperspektiv. Bakteppe med denne metoden er at de virkningsgradene med lavest verdi ikke ble tatt hensyn til, og vil nødvendigvis ikke gjenspeile virkeligheten. Følsomhetsanalysene viste at endring i

virkningsgradene til viktige delprosesser som dampreforming, flytendegjøring av hydrogen, vannelektrolyse og Haber-Bosch-prosessen har stor betydning for utslippene fra energikjedene. Derfor er det tilknyttet usikkerhet av virkningsgradene i datainnsamling i denne oppgaven.

Videre baserer noe av dataen på antakelser. Som for eksempel virkningsgrad for fornybar og fossil teknologi og distanse for transport av kull. Disse teknologiene som nevnt i datakapittelet utgjør en liten andel av den i den norske strømmiksen, og vil mest sannsynlig ikke ha betydelig utslag på resultatene. Likevel er det viktig å bemerke, fordi summen av flere små antakelser kan ha betydning for resultatene.

En annen utfordring med datainnsamlingen var innsamlingen av utslippsfaktorer. Noen kilder oppga utslipp kun i CO₂ og ikke CO₂-e, som denne analysen baserer utslippet på. Dette kan eventuelt føre til at utslippstallene avviker fra virkeligheten, men som nevnt var dette kun en liten andel av datagrunnlaget og vil mest sannsynlig ha en ubetydelig innvirkning på resultatene i oppgaven. Utfordringen bør likevel gjøre seg bemerket.

Utslippsfaktorene er basert seg på gjennomsnitt fra alle kildene. Det betyr at de laveste eller de høyeste verdiene ikke blir tatt hensyn til. Likevel ble det ansett som en tilfredsstillende tilnærming metode å fastsette en utslippsfaktor på. Det skaper likevel noe svakhet i oppgaven da virkeligheten kan være avvikende fra utslippsfaktorene valgt i oppgaven. Dette gjelder spesielt de fossile som kull, olje og gass. I disse kildene er det store variasjoner og den valgte utslippsfaktoren vil muligens ikke gjenspeile virkeligheten.

4.6. Videre arbeid

Gjennom arbeidet med oppgaven har det dukket opp utfordringer og spørsmål til gjeldende tema. Av den grunn skal dette delkapittelet nevne noen områder innenfor feltet det bør uføres videre arbeid på punktvis.

- For å beregne utslippene fra ammoniakk som maritimt drivstoff i et well-to-propell-perspektiv, vil det være viktig å sette søkelys på tank-to-propeller fasen. Nærmere bestemt få større tilgang på faktisk forbruksdata.

- Gjennomføre økonomiske analyser av ammoniakk og hydrogen som maritime drivstoff, nærmere bestemt en livssyklus kostnad av begge drivstoffene.
- Inkludere energibruk og utslipp fra transportmiddelet i livsløpsanalyser/energikjedeanalyser der ammoniakk fører til å redusere behovet for å bytte ut hele skipet eller gjennomføre store ombygninger.
- Inkludere flere typer utslipp som for eksempel NO_x og SO₂ i livsløpsanalyser/energikjedeanalyser, og eventuelt inkludere SCR-teknologi (Selective Catalytic Reduction) som renser eksosen for NO_x.
- Noen studier påpeker at transportavstand vil påvirke energieffektiviteten til drivstoffene. Derfor kunne videre arbeid se på hvordan transportavstand vil påvirke resultatene.
- Se på kompetanse og ressursbehov for å se om Norge er rustet til å ha storskala ammoniakkproduksjon.

5. Konklusjon

Denne oppgaven har illustrert at energikilders klimautslipp i skipsfart innebærer flere viktige nyanser. Overordnet kan vi likevel konkludere med at både ammoniakk og hydrogen kan bli svært viktige brikker i den globale klimakampen. Dette er i og for seg ikke overraskende gitt posisjonen disse energikildene har inntatt i den offentlige debatten, men forhåpentligvis kan denne oppgaven være et lite bidrag inn i diskusjonene hvor et solid og bredt kunnskapsgrunnlag er helt avgjørende når de politiske beslutningene tas.

Målet var å undersøke om ammoniakk som drivstoff i skip kan bidra til å redusere utslipp i skipstrafikken. Nedenfor følger en oppsummering av hovedfunnene. Gjennom energikjedeanalyse har denne oppgaven undersøkt spørsmålene som ble stilt innledningsvis.

1. Hvilken produksjonsmetode av ammoniakk fører til minst klimagassutslipp?

Resultatene viser overbevisende bevis for at ammoniakkproduksjon hvor hydrogen blir produsert gjennom vannelektrolyse som benytter seg av strøm fra vindkraft, er den produksjonsmetoden som fører til minst utslipp målt i CO₂-e.

2. Er ammoniakk som drivstoff et bedre alternativ enn hydrogen sett i lys av klimagassutslipp?

I denne oppgaven kommer ammoniakk bedre ut enn hydrogen når hydrogenproduksjonen tok i bruk vannelektrolyse med strøm fra vindkraft. Hvis hydrogenproduksjonen stammer fra dampreforming med norsk strømmiks som energitilførsel, indikerer resultatene at hydrogen er et bedre alternativ. Sett i scenarioanalysen er det viktig å bemerke at dette kun er tilfellet dersom at energitilførselen er relativt fornybar.

3. Vil ammoniakk slippe ut mindre klimagasser sammenlignet med diesel?

Hvis ammoniakk er produsert med fornybar energi vil ammoniakk slippe ut vesentlig mindre klimagasser målt i CO₂-e enn diesel per kilowattime levert til akslingen. Faktisk vil ammoniakk kunne redusere utslippene med hele 97 prosent sammenlignet med diesel. Dette er betydelig tall som vil utgjøre en stor forskjell i kampen mot utslipp.

Alt dette leder oss til problemstillingen i oppgaven «Kan ammoniakk som drivstoff i skip bidra til å redusere klimagassutslipp». Det korte svaret er i utgangspunktet bekreftende, men viktige betingelser må tas med i beregningen. Videre ser vi at hydrogen også kan være med å redusere utslipp, men også her må spesifikke betingelser oppfylles om stoffet skal oppnå den ønskelige klimaeffekten. Man ser også at sentrale delprosesser og drivstofforbruk kan være svært sensitive for endringer i gitte parametere. Dette er et klart mønster i følsomhetsanalysen. Det betyr at valg av virkningsgrader og drivstoffbruk kan ha betydelig innvirkning på denne oppgavens resultater - og også ha potensiell påvirkning på andre resultater i tilsvarende forsøk.

Referanseliste

- Al-Breiki, M. & Bicer, Y. (2021). Comparative life cycle assessment of sustainable energy carriers including production, storage, overseas transport and utilization. *Journal of Cleaner Production*, 279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123481>.
- Alfa Laval, Hafnia, Haldor Topsoe, Vestas & Siemens Gamesa. (2020). *Ammonfuel – an industrial view of ammonia as a marine fuel*. Tilgjengelig fra: <https://www.topsoe.com/hubfs/DOWNLOADS/DOWNLOADS%20-%20White%20papers/Ammonfuel%20Report%20Version%2009.9%20August%203update.pdf> (lest 01.09.2022).
- 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): 5994-6006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.023>.
- Aziz, M. (2018). Production, transportation, and utilization of carbon-free hydrogen. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5054405>.
- Balat, M. (2008). Potential Importance of Hydrogen as a Future Solution to Environmental and Transportation Problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 4013-4029. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>.
- Bartels, J. R. (2008). *A feasibility study of implementing an Ammonia Economy*. Masteroppgave. IOWA: Iowa State University. Tilgjengelig fra: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/0d44bb27-0317-4e6f-901c-3d709853a435> (lest 08.08.2022).
- Barthe, P., Chaugny, M., Roudier, S. & Sanchi, L. D. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas*. JRC Science and Policy Reports. Tilgjengelig fra: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/REF_BREF_2015.pdf (lest 20.11.2022).
- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G. & Raso, F. (2016). Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, 135: 1379-1395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.023>.
- Bicer, Y. & Dincer, I. (2018). Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (9): 4583-4596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.110>.
- Bjartnes, A., Hirth, M. L., Michelsen, L. P., Skaugen, H. & Ursin, L. (2021). *Hydrogen som klimaløsning*. Klimavitenskap og energiomstilling. Tilgjengelig fra: https://klimastiftelsen.no/wp-content/uploads/2021/03/2C_Temanotat_3_2021_Hydrogen.pdf (lest 30.10.2022).
- Blok, K. & Nieuwlaar, E. (2021). *Introduction to energy analysis*. 3. utg.: Routledge.
- Braga, L. B., da Silva, M. E., Colombaroli, T. S., Tuna, C. E., de Araujo, F. H. M., Vane, L. F., Pedroso, D. T. & Silveira, J. L. (2016). Hydrogen Production Processes. *Green Energy and Technology*: 5-76. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-41616-8_2.
- Brunborg, S. R. (u.å). *Tap i nettet*. Tilgjengelig fra: <http://energipolitisk.no/temasider/tap-i-nettet/> (lest 17.10.2022).
- Budsberg, E., Crawford, J., Gustafson, R., Bura, R. & Puettemann, M. E. (2015). Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways. *Biomass and Bioenergy*, 83: 23-31. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.019>.
- Bøhmer, C. (2022). *Drivstofforbruk* (e-post til Hannah Luise Folchert 10.11.2022).

- Chararis, I., Jeong, B. & Jang, H. (2022). Application of parametric trend life cycle assessment for investigating the carbon footprint of ammonia as marine fuel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27. doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02091-4>.
- Danebergs, J. & Aarskog, F. (2011). *Future compressed hydrogen infrastructure for the domestic maritime sector*. Tilgjengelig fra: <https://ife.brage.unit.no/ife-xmli/bitstream/handle/11250/2719412/IFE-E-2020-006.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (lest 22.09.2022).
- Danielsen, D. J., Martinsen, M. W. & Kristoffersen, K. J. (2022, 25. Januar). Først i verden: Milliardavtalen skal få Lofoten-ferger over på hydrogen. *NRK*. Tilgjengelig fra: <https://www.nrk.no/nordland/hydrogenferge-torghatten-og-vegvesenet-skriver-kontrakt-pa-5-milliarder-1.15826581> (lest 14.12.2022).
- Dias, V., Pochet, M., Contino, F. & Jeanmart, H. (2020). Energy and Economic Costs of Chemical Storage. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6. doi: <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00021>.
- DNV GL. (2019a). *MARITIME FORECAST TO 2050*. Energy Transition Outlook 2019. Tilgjengelig fra: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2022/download-the-report.html> (lest 09.09.2022).
- DNV GL. (2019b). *Produksjon og bruk av hydrogen i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf> (lest 01.12.2022).
- El Hagg, S. M. (2005). CHAPTER 13 - Rural and Developing Country Solutions. *Environmental Solutions*: 313-400. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012088441-4/50015-0>.
- Finansleksikon. (u.å). *Følsomhetsanalyse*. Tilgjengelig fra: <https://finansleksikon.no/regnskap/f/folsomhetsanalyse> (lest 25.12.2022).
- FN-Sambandet. (2022a). *Den internasjonale sjøfartsorganisasjonen (IMO)*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-organisasjoner-fond-og-programmer/den-internasjonale-sjoefartsorganisasjonen-imo> (lest 09.11.2022).
- FN-Sambandet. (2022b). *FNs bærekraftsmål*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (lest 10.11.2022).
- Forman, G. S., Divita, V. B., Han, J., Cai, H., Elgowainy, A. & Wang, M. (2014). U.S. Refinery Efficiency: Impacts Analysis and Implications for Fuel Carbon Policy Implementation. *Environmental Science & Technology*, 48 (13): 7625–7633. doi: <https://doi.org/10.1021/es501035a>.
- Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, G. I. A. & Styring, P. (2021). Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>.
- Hedenus, F., Karlsson, S., Azar, C. A. & Sprei, F. (2010). Cost-effective energy carriers for transport – The role of the energy supply system in a carbon-constrained world. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (10): 4638-4651. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.064.
- Henriksen, A. E., Wahl, N. M., Veie, C. A. & Arnesen, F. (2020). *Turbinopprustinger kan øke produksjonen i norske vannkraftverk med fire terawattimer*. Teknologianalyser 2020. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_03.pdf (lest 03.10.2022).
- Hofstad, K. (2021a). hydrogenlagring. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hydrogenlagring> (lest 03.11.2022).
- Hofstad, K. (2021b). karbonfangst og -lagring. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/karbonfangst-og-lagring> (lest 25.12.2022).

- Hofstad, K. (2022). dampreforming. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/dampreforming> (lest 23.10.2022).
- Holden, E. (2003). *Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer – år 2010* Vestlandsforskning. Tilgjengelig fra: https://www.vestforsk.no/sites/default/files/migrate_files/rapport-2-03.pdf (lest 02.10.2022).
- Hystad, E. (2020). *Intervju med daglig leder kraftsystemer i Wärtsila Egil Hystad* (17.09.2020).
- IMO. (u.å.). *Initial IMO GHG Strategy*. Tilgjengelig fra: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (lest 08.11.2022).
- Inal, O. B., Zincir, B. & Deniz, C. (2022). Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (45): 19888-19900. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189>.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*. Sixth Assessment Report (AR6). Tilgjengelig fra: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf (lest 10.01.2023).
- IRENA. (2017). *Synergies between renewable energy and energy efficiency*. Working paper based on REmap. Tilgjengelig fra: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA_REmap_Synergies_REE_E_2017.pdf?rev=f5f29f9f34374ca0b6be4d19b88863e1 (lest 23.09.2022).
- Jacobsen, M. Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*. doi: <https://doi.org/10.1039/B809990C>.
- Karaca, A. E. (2019). *LIFE CYCLE ASSESSMENT OF VARIOUS NUCLEAR-BASED HYDROGEN AND AMMONIA PRODUCTION METHODS* Ottawa: Carleton University. Tilgjengelig fra: <https://curve.carleton.ca/2916df01-cdb4-45a0-a98f-92cfb090cd6e> (lest 06.11.2022).
- Krogvold, J., Aabøe, A. M., Willumsen, V. & Arnesen, F. (2019). *Nasjonal ramme for vindkraft*. Norsk vindkraft og klimagassutslipp. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_18.pdf (lest 20.09.2022).
- Kystverket. (2021). *Skipstrafikk*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/hav-og-kyst/skipstrafikk/> (lest 10.12.2022).
- Lundberg, N. H. (2022). oljeraffinering. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/oljeraffinering> (lest 02.10.2022).
- miljødepartementet, K.-o. (2021). *Klimaendringer og norsk klimapolitikk*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/> (lest 11.11.2022).
- Morgan, E., Manwell, J. & McGowan, J. (2014). Wind-powered ammonia fuel production for remote islands: A case study. *Renewable Energy*, 72: 51-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.034>.
- Niermann, M., Timmerberg, S., Drünert, S. & Kaltschmitt, M. (2021). Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110171>.
- Noh, H., Kang, K. & Seo, Y. (2022). Environmental and energy efficiency assessments of offshore hydrogen supply chains utilizing compressed gaseous hydrogen, liquefied

- hydrogen, liquid organic hydrogen carriers and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.085>.
- Norsk Petroleum. (2022). *Eksport av olje og gass*. Tilgjengelig fra: <https://www.norskepetroleum.no/produksjon-og-eksport/eksport-av-olje-og-gass/> (lest 20.09.2022).
- Norsk Rederiforbund. (u.å). *Klima & miljø*. Tilgjengelig fra: <https://rederi.no/om-oss/fagomrader/naringspolitikk/rammebetingelser/> (lest 10.12.2022).
- NVE. (2022a). *Hvor kommer strømmen fra?* Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-strommen-fra/>.
- NVE. (2022b). *Klima*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kunnskapsgrunnlag-om-virkninger-av-vindkraft-paa-land/klima/> (lest 03.11.22).
- Obara, S. & 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.009>.
- Osnes, A. (2020). dødvekt. I: *Store norske leksikon*.
- Ozin, G. (2020). *Playing ball with the Haber–Bosch process*. Tilgjengelig fra: <https://www.advancedsciencenews.com/playing-ball-with-the-haber-bosch-process/>.
- Pedersen, B. (2022). Haber-Bosch-metoden. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Haber-Bosch-metoden> (lest 01.09.2022).
- Perčić, M., Vladimir, N., Jovanović, I. & Koričan, M. (2022). Application of fuel cells with zero-carbon fuels in short-sea shipping. *Applied Energy*, 309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118463>.
- Pfalzwerke Netz. (2022). *Netzverluste*. Tilgjengelig fra: <https://www.pfalzwerke-netz.de/unser-netz/netznutzung-strom/netzverluste#netzverluste> (lest 28.12.2022).
- Rabbevg, F. (2022). bulkskip. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/bulkskip> (lest 25.11.22).
- Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P. & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*, 200: 290–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.050>.
- revisorforeningen. (u.å). *Hvordan gjennomføre scenarioanalyse*. Tilgjengelig fra: <https://www.revisorforeningen.no/fag/barekraft/barekraft-for-revisor---kunnskapsportalen/klimarisiko/hvordan-gjennomfore-scenarioanalyse/> (lest 26.12.2022).
- Rosvold, K. A. & Hofstad, K. (2021). kullkraftverk. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kullkraftverk> (lest 28.12.2022).
- Rosvold, K. A. & Hofstad, K. (2022). kjernekraft. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kjernekraftverk> (lest 15.10.2022).
- Rouwenhorst, K. H. R., Van der Ham, A. G. J., Mul, G. & Kersten, S. R. A. (2019). Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109339>.
- Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2 (3): 442–454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.
- Singh, V., Dincer, I. & Rosen, M. A. (2018). Chapter 4.2 - Life Cycle Assessment of Ammonia Production Methods. *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*: 935–959. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00053-6>.

- Skipsrevyen. (2021, 4. oktober). MF «Hydra». *Skipsrevyen* (lest 14.12.2022).
- Song, Q., Tinoco, R. R., Yang, H., Yang, Q., Jiang, H., Chen, Y. & Chen, H. (2022). A comparative study on energy efficiency of the maritime supply chains for liquefied hydrogen, ammonia, methanol and natural gas. *Carbon Capture Science & Technology*, 4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100056>.
- Statistisk sentralbyrå. (2015). *Elektrisitet, 2014*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitet/aar/2015-12-22?fane=om#content> (lest 22.10.2022).
- Statistisk sentralbyrå. (u.å). *Tabell*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/184994/gjennomsnittlig-%C3%B8konomisk-levetid-antall-%C3%A5r> (lest 27.11.2022).
- Stortinget. (2022). *Norges behov for utenlandskabler og utbygging av kraftnettet*. Tilgjengelig fra: <https://www.stortinget.no/globalassets/pdf/utredningsseksjonen/utredningsnotater/2022/norges-behov-for-utenlandskabler-og-utbygging-av-kraftnettet-2021251.pdf> (lest 28.12.2022).
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>.
- Sætnes, H. (2019). *Klimadebatten må vise hele bildet*. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraft.no/nyheter/nyheter-og-pressemeddelinger/arkiv/2019/klimadebatten-ma-vise-hele-bildet/> (lest 25.12.2022).
- The Royal Society. (2020). *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. Tilgjengelig fra: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf> (lest 10.11.2022).
- Vandenbussche, V., Rambech, E. & Hohle, S. M. (2021). *BRUK AV GASS I EUROPA. RAPPORT TIL NORSK OLJE OG GASS*. Tilgjengelig fra: <https://offshorenorge.no/contentassets/4e950643dd0447d994b4673f5064bce8/endravra-rapport-bruk-av-gass-i-europa.pdf> (lest 12.09.2022).
- Wang, H., Zhang, X. & Ouyang, M. (2015). Energy and environmental life-cycle assessment of passenger car electrification based on Beijing driving patterns *Science China Technological Sciences*, 58 (4): 659–668 doi: [doi: 10.1007/s11431-015-5786-3](https://doi.org/10.1007/s11431-015-5786-3).
- Wang, M. Q. & H.-S., H. (1999). *A Full Fuel-Cycle Analysis of Energy and Emissions Impacts of Transportation Fuels Produced from Natural Gas*. Center for Transportation Research Argonne National Laboratory. Tilgjengelig fra: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2000/01/34988.pdf> (lest 25.10.2022).
- Wärtsilä Corporation. (2022). *Wärtsilä coordinates EU funded project to accelerate ammonia engine development*. Tilgjengelig fra: <https://www.wartsila.com/media/news/05-04-2022-wartsila-coordinates-eu-funded-project-to-accelerate-ammonia-engine-development-3079950> (lest 12.12.2022).
- Yang, J.-H., Yoon, Y., Ryu, M., An, S.-K., Shin, J. & Lee, C.-J. (2019). Integrated hydrogen liquefaction process with steam methane reforming by using liquefied natural gas cooling system. *Applied Energy*, 255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113840>.
- YARA. (2021). *Åpner for historisk satsing på grønt hydrogen og grønn ammoniakk i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.yara.com/corporate-releases/apner-for-historisk-satsing-pa-gront-hydrogen-og-gronn-ammoniakk-i-norge/> (lest 12.12.2022).
- Ye, M., Sharp, P., Brandon, N. & Kucernak, A. (2022). System-level comparison of ammonia, compressed and liquid hydrogen as fuels for polymer electrolyte fuel cell

- powered shipping. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (13): 8565-8584.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.164>.
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.
- Øystese, K. Å. (2020). *Grønn skipsfart: Utslippene må i null i 2050*. Norsk klimastiftelse - rapport nr. 01/2020. Tilgjengelig fra: https://klimastiftelsen.no/wp-content/uploads/2020/01/NK1_2020_gronn_skipsfart.pdf (lest 12.11.2022).



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway