



Høgskulen  
på Vestlandet

# BACHELOROPPGAVE

Hydrogen og samspillet mellom teknologi,  
organisasjon, og diskurs

Hydrogen and the interplay between  
technology, organization, and discourse

Irina Knapstad Rust, Johanne Sofie Iversen, Trym Jarle  
Sætherbø Vårdal

FE403 Bacheloroppgave i Fornybar Energi

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap/ Institutt for miljø-  
og naturvitenskap / Fornybar Energi

Hovedveileder: Svein Gunnar Sjøtun

Medveileder: Geoffrey Sean Gilpin

02.06.2023

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1

## Forord

Oppgaven markerer avslutningen på studietiden ved Høgskulen på Vestlandet i Sogndal. Tre interessante, lærerike, og innholdsrike år har passert, hvor interessen for fornybar energiteknologi, miljø og klima, og politikken rundt er forsterket. Hvor klima og miljø og har et moment av ærefrykt. Vi retter en stor takk til Svein Gunnar Sjøtun og Geoffrey Sean Gilpin for gode tilbakemeldinger, konstruktiv kritikk, og veiledning gjennom tykt og tynt.

Lange dager, sene kvelder, diskusjoner innad i gruppen, med forelesere, med venner og familie har kumulert i denne oppgaven. Tematikken og teorigrunnlaget i oppgaven har gjort skriveprosessen både givende, og frustrerende. Forståelsen for fysikk og kjemi har styrket seg som resultat av å anvende TOD, og forståelsen for innovasjonsteori sitter dypere. Kristin Sæterdal introduserte tidlig i studieforløpet at det å «hate litt» er viktig i en læringsprosess, noe som kom til overflaten gjentatte ganger gjennom oppgaveskrivingen. Vi vil og merke oss Rune Njøs som, sammen med Svein Gunnar Sjøtun, introduserte oss til TOD som et analytisk rammeverk i innovasjonsteorien. Gode innspill og motiverende ord har betrygget oss i vår utforskning og anvendelse av rammeverket.

[Hyperlink til innholdsfortegnelse](#)



## Akronymliste

AFC	Alkalisk Brenselcelle
ATR	Autothermal Reforming (autotermisk reformere)
CCS	Carbon capture and storage (karbonfangst og lagring)
FoU	Forskning og utvikling
GHG	Greenhouse Gases (klimagasser)
GWP	Global Warming Potential
HBNG	Hydrogenblandet naturgass
KLD	Klima- og miljødepartementet
LCA	Life-Cycle Assessment (livsløpsvurdering)
LCOH	Levelized Cost of Hydrogen
MCFC	Smeltet karbonat brenselcelle
NHF	Norsk hydrogenforum
NFD	Nærings- og fiskeridepartementet
NOU	Norges offentlige utredninger
OED	Olje- og energidepartementet
PAFC	Fosforsyre brenselcelle
PEM	Proton elektrolytt membran
POX	Partial oxidation (partiell oksidasjon)
ppm.	Parts per million
PSA	Pressure Swing Adsorption (trykksvingadsorpsjon)
SD	Samferdselsdepartementet
SMR	Steam Methane Reforming
TIS	Teknologiske innovasjonssystemer
TOD	Teknologi, Organisasjon og Diskurs
WGS	Water-Gas Shift Reaction (vann-gass skiftreaksjon)



## Sammendrag

Verden står ovenfor en akselererende klima- og naturkrise, hvor mulighetsvinduet for å forhindre katastrofale konsekvenser er i ferd med å lukke seg. Norge forpliktet seg juridisk til Parisavtalen, og har følgelig mål om å redusere utslipp med 50-55% innen 2030, og netto null innen 2050. Hydrogen presenteres som en del av løsningen til utslippskutt. Innovasjon innen energiteknologier har vært en sentral driver for sosiale og miljømessige endringer siste 200 årene. Norge må omstille fra et fossilt, til et fornybart energiregime, hvor teknologiutvikling vil stå sentralt. Herunder er systembygging for å støtte opp under kommersialisering av ny teknologi en sentral utfordring. Vellykket teknologiutvikling kjennetegnes ved formasjon av et teknologisk innovasjonssystem rundt teknologien (TIS). Funksjonene til et TIS identifiserer nøkkelprosesser som har påvirkning på systemets ytelse. Funksjonene overlapper, og eksisterer i samspill. Samspillet muliggjør kategorisering inn i tre dimensjoner; teknologi, organisasjon, og diskurs (TOD). Vi anvender TOD som analytisk rammeverk, ved hjelp av TIS som teoretisk grunnlag, for å belyse systemet hydrogen utvikles i. Grunnet omfanget av eksisterende forskning og uttalelser benytter vi litteraturstudie for datainnsamling. Oppgaven avdekker en skjevhet i samspillet mellom dimensjonene. Hvor dimensjonene diskurs og organisasjon ikke samspiller med teknologidimensjonen. Oppgavens intensjon er å mane frem et realistisk syn på de teknologiske barrierene tilknyttet de ulike leddene i verdikjeden til hydrogen, se dette i tidsperspektivet IPCC fremlegger, og tilskrive den teknologiske dimensjonen mer tyngde i innovasjonsteori.

**Nøkkelord: Innovasjonsteori, TOD, TIS, blått hydrogen, grønt hydrogen, verdikjede til hydrogen, klimaomstilling.**

Antall figurer/tabeller/formler: 8/5/5

Antall vedlegg: 5



## Abstract

The global community faces an accelerating climate and natural crisis, where the window of opportunity to mitigate catastrophic consequences rapidly closes. Norway is juridically obliged through the Paris Agreement, with the goal of emission reduction of 50-55% by 2030, and net zero within 2050. Hydrogen is presented as a part of the solution. Innovation within energy technology has played a central role in social and environmental changes the past 200 years. Norway must readjust from a fossil to a renewable energy regime, where technology development is at its core. In addition, system building to support the commercialisation of a new technology is a central barrier. Successful technological development is characterized by the formation of a technological innovation system around the technology (TIS). The functions in TIS identifies key processes that affects the systems performance. These functions overlap and interacts. This enables classification into three dimensions; technology, organization, and discourse (TOD). We apply TOD as an analytical framework, with TIS as the theoretical basis, to illuminate the system in which hydrogen is developing. Because of existing research and information, we conduct a literature review. The thesis uncovers a mismatch in the interaction between the dimensions. Where the discursive and organizational dimension interacts poorly with the technology dimension. The thesis intends to bring forth a realistic view of the technical barriers surrounding hydrogens value chain, consider this in the timeframe presented by IPCC, and acknowledging the technological dimensions weight regarding innovation theory.

**Keywords: Innovation theory, TOD, TIS, blue hydrogen, green hydrogen, hydrogen value chain, climate change.**

Number of figures/tables/formulas: 8/5/5

Number of appendix: 5



# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>AKRONYMLISTE</b> .....	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>INNHOLDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>V</b>
<b>1.0 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0 TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 INNOVASJONSTEORI .....	3
2.2 TEKNOLOGISK REGIME .....	3
2.3 INNOVASJONSSYSTEM .....	4
2.4 STIAVHENGIGHET OG INNLÅSINGSMEKANISMER .....	4
2.5 TEKNOLOGISK INNOVASJONSSYSTEM .....	5
2.6 FUNKSJONER I TIS .....	7
2.7 TOD – TEKNOLOGI, ORGANISASJON, DISKURS .....	9
<b>3.0 METODE</b> .....	<b>11</b>
3.1 HVA ER METODE? .....	11
3.2 VALG AV FORSKNINGSDESIGN .....	12
3.3 FEILKILDER .....	14
<b>4.0 KONTEKST</b> .....	<b>15</b>
4.1 HVA ER HYDROGEN? .....	15
4.2 HYDROGENUTVIKLING I NORGE .....	15
4.3 ENERGIFORSTÅELSE .....	16
4.4 ØKONOMIFORSTÅELSE .....	17
<b>5.0 RESULTAT</b> .....	<b>18</b>
<b>5.1 TEKNOLOGI</b> .....	<b>18</b>
5.1.1 BLÅ PRODUKSJON .....	19
5.1.2 GRØNN PRODUKSJON.....	28
5.1.3 LAGRING .....	31
5.1.4 DISTRIBUTJON .....	33
5.1.5 FYLLING.....	35
5.1.6 APPLIKASJONER .....	35
5.1.7 RISIKOVURDERING AV HYDROGEN .....	37
5.1.8 UTREGNINGER .....	37
5.1.9 SAMMENDRAG .....	40
<b>5.2 ORGANISASJON</b> .....	<b>41</b>
5.2.1 NASJONALT – NETTVERK .....	41
5.2.2 REGIONALT – KLYNGER .....	43
5.2.3 LOKALT – PROSJEKTER .....	48
<b>5.3 DISKURS</b> .....	<b>49</b>
5.3.1 PRODUKSJON .....	49
5.3.2 LAGRING OG DISTRIBUTJON .....	51
5.3.3 APPLIKASJON.....	53
<b>6.0 DISKUSJON</b> .....	<b>55</b>
6.1 DISKURS .....	55
6.2 ORGANISASJON.....	57



6.3 TEKNOLOGI .....	59
6.4 SAMSPILLET TEKNOLOGI, ORGANISASJON OG DISKURS .....	64
<b>7.0 KONKLUSJON .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERANSELISTE.....</b>	<b>72</b>
<b>VEDLEGG.....</b>	<b>91</b>
VEDLEGG 1 .....	91
ARK (1) EFFEKTIVITETSGRAD .....	91
ARK (2) UTSLIPP BLÅTT HYDROGEN .....	91
ARK (3) GRØNN PRODUKSJON.....	91
ARK (4) BLÅ PRODUKSJON .....	92
VEDLEGG 2 .....	92
VEDLEGG 3 .....	93
VEDLEGG 4.....	93
VEDLEGG 5 .....	93
LYSBILDE 1 – VERDIKJEDE GRØNT HYDROGEN .....	93
LYSBILDE 2 – VERDIKJEDE BLÅTT HYDROGEN .....	93

## Figur- og tabelloversikt

Figur 1: Energimiks i Norge (Rosvold, 2022).....	1
Figur 2: Verdikjede til blått og grønt hydrogen.....	2
Figur 3: Verdikjedene for blått og grønt hydrogen (Thema Consulting Group, 2019, s. 13).....	18
Figur 4: CO <sub>2</sub> fangstpunkt i SMR-prosess (Antonini et al, 2018, s. 8) .....	20
Figur 5: Effektivitetsgrad til verdikjedene for blått og grønt hydrogen (Vedlegg 1 – (1) Effektivitetsgrad) 38	
Figur 6: Verdikjede for grønt hydrogen (Vedlegg 5). Se vedlegg for referanser. ....	39
Figur 7: Verdikjede for blått hydrogen (Vedlegg 5). Se vedlegg for referanser.....	39
Figur 8: Prosjektoversikt fra NHF (Vedlegg 4 – FoU og prosjektaktivitet). ....	49
Tabell 1: Prosjektaktivitet NHF (NHF, u.å.-c).....	41
Tabell 2: Prosjektaktivitet Ocean Hyway Cluster (Ocean Hyway Cluster, u.å-b).....	44
Tabell 3: Prosjektaktivitet Renergy (Renergy,u.å.-b) .....	45
Tabell 4: Prosjektaktivitet GCE Node (GCE Node,u.å.-b) .....	46
Tabell 5: Prosjektaktivitet NCE Maritime CleanTech (Maritime CleanTech, u.å.-e) .....	47

## Formeloversikt

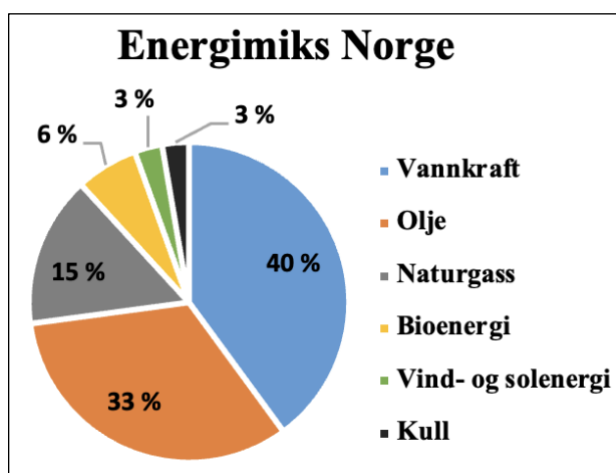
Formel 1: Gassreformering og produksjon av syntesegass, (Bukholm,2021.s.6).....	19
Formel 2: Vann-gass skiftreaksjon, (Bukholm,2021.s.8).....	20
Formel 3: Reaksjon Anode (Kumar & Himabindu, 2019).....	28
Formel 4: Reaksjon Katode (Kumar & Himabindu, 2019).....	28
Formel 5: Reaksjonslikning elektrolyse (Kumar & Himabindu, 2019).....	28



## 1.0 Innledning

«We are on a highway to climate hell with our foot still on the accelerator» – António Guterres (Guterres, 2022).

FNs generalsekretær, António Guterres, stadfester den kritiske klimasituasjonen Norge og verden opplever i sin åpningstale til klimatoppmøtet i november 2022. FNs klimapanel beskriver et mulighetsvindu på syv år for å unngå katastrofal oppvarming (IPCC, 2023, s. 53). Klima- og naturkrisen gir grunnlaget for den omfattende energiomstillingen som kreves av Norge, og verden for øvrig, de kommende årene. Norges energimiks kan sees i figur 1. De største klimagassutslippene i Norge er forårsaket av transportsektoren (33%) og olje- og gassutvinning (25%), samtidig står olje og gass for 73,4 % av Norges totale eksport i 2022 (Miljødirektoratet, 2022b). I 2021 var eksportverdien beregnet til 879,1 milliarder kroner (SSB, 2022). Tallene gir et bakteppe for den vanskelige energiomstillingen i et land innlåst i et fossilt energiregime.



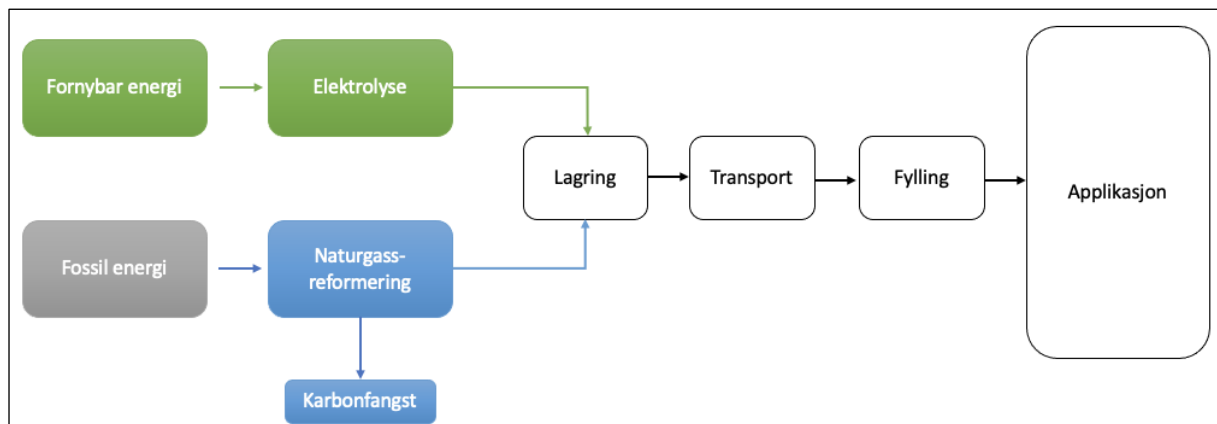
Figur 1: Energimiks i Norge (Rosvold, 2022).

Norge har forpliktet seg til den juridisk bindende Parisavtalen opprettet i 2015. Avtalens mål er å begrense temperaturstigningen på jorden til 1,5°C (Lahn, 2021). Derfor har Norge satt mål om å redusere klimagassutslipp med minst 50% og opp mot 55% innen 2030, og netto null innen 2050, sammenlignet med 1990-nivå. Gjennom samarbeidsavtaler om klimakutt og EØS-avtalen er Norge tett knyttet til EUs klimapolitikk (KLD, 2021a). EU og regjeringen beskriver utvikling av verdikjeder til hydrogen som en viktig del av å nå målene om utslippskutt. EUs hydrogensatsing beskriver et ønske om å anvende blått hydrogen i en overgangsfase til grønt hydrogen. På bakgrunn av dette har regjeringen lagt frem flere strategier for å bygge opp en sammenhengende verdikjede for hydrogen (OED & KLD, 2020, s. 5; EU, u.å.).

Hydrogen blir omtalt av EU som en nullutslipps-energibærer. Det eksisterer forskjellige måter å fremstille hydrogen på. Grått hydrogen er den dominerende standarden i dag, og står for 96% av hydrogenproduksjon. Grått hydrogen framstilles av kull, olje eller naturgass.



Produksjonsmetoden resulterer i utslipp av CO<sub>2</sub>. Blått hydrogen fremstilles på lik måte, men CO<sub>2</sub>-gassen blir fanget og lagret. Grønt hydrogen fremstilles gjennom elektrolyse hvor elektrisiteten kommer fra fornybare energikilder (Erbach & Jensen, 2021; Egge, 2020). En enkel illustrasjon av verdikjedene til blått og grønt hydrogen er vist i figur 2. Det er kun produksjonsmetoden som er ulik i de to verdikjedene.



Figur 2: Verdikjede til blått og grønt hydrogen

Prosesen knyttet til teknologisk innovasjon i verdikjedene til hydrogen kan forstås gjennom samspillet mellom teknologi, organisasjon og diskurs. På bakgrunn av dette benytter vi innovasjonsteori for å belyse utviklingstrekk i verdikjedene til blått og grønt hydrogen.

Vi har følgende problemstilling:

*Hvordan samspiller teknologi, organisasjon og diskurs i det norske teknologiske innovasjonssystemet tilknyttet hydrogen?*

## 2.0 Teori

I dette kapitlet beskrives det teoretiske rammeverket for oppgaven. Kapitlet forklarer innovasjonsteori, teknologisk regime, innovasjonssystemer, barrierer for regimeendring, og teknologisk innovasjonssystem. Til slutt vil TOD bli beskrevet. Vi vil bruke begrepene «teknologisk utvikling» og «innovasjon» om hverandre. Dette begrunner vi med at prosessene og utfallet av dem kan være like og derfor vanskelige å skille fra hverandre.

### 2.1 Innovasjonsteori

Oppfinnelse og innovasjon blir ofte brukt om hverandre, dette er misvisende. Hvor oppfinnelse kan oppstå hvor som helst, er innovasjon tett knyttet til bedrifter og organisasjoner (Fagerberg et al., 2006, s. 5). Joseph Schumpeter definerte innovasjon som nye kombinasjoner av eksisterende ressurser (Fagerberg et al., 2006, s. 6). Schumpeter fokuserte på enkeltindivid som entreprenører som drivkrefter for innovasjon. I denne oppgaven fremheves samhandling mellom ulike aktører og kunnskap i systemene sentralt for innovasjonsprosessen. Vi bruker en systemorientert tilnærming og oppfatter innovasjon som en kompleks, mangesidig og systemisk prosess (Njøs & Sjøtun, 2016).

Innovasjon beskrives å være en driver for økonomisk vekst (Pece et al., 2015). Økonomisk vekst er et uttalt viktig politisk mål for å øke velferden i Norge (Finansdepartementet, 2022). Innovasjon i energiteknologier har vært en viktig driver for sosiale og miljømessige endringer siste 200 år (Gallagher et al., 2012). Knyttet til dette må Norge gå fra et fossilt til et fornybart energiregime. Teknologisk utvikling er derfor viktig, men å sikre at teknologien blir tatt i bruk er en minst like viktig utfordring. Sistnevnte kategoriseres som systembygging. Dette er ikke en rent teknisk prosess, men en prosess bestående av sosiale, kulturelle og politiske dimensjoner nødvendige for utvikling og bruk av nye teknologier i samfunnet (Hanson et al., 2011, s. 15).

### 2.2 Teknologisk regime

Teknologisk utvikling og samfunn er tett koblet og kan derfor ikke forstås separat. Innovasjonsprosessen er dynamisk og er flettet sammen gjennom ulike mekanismer som fører tilbake til hverandre (Njøs & Sjøtun, 2016). Hanson et al. foreslår å bruke begrepet teknologisk regime for å forstå kompleksiteten av evolusjonsprosessen for en teknologi (Hanson et al., 2011, s. 26). Teknologisk utvikling må forstås som et samspill mellom vitenskapelige, teknologiske, organisatoriske, og økonomiske elementer. Dette innebærer at et teknologisk regime dannes

gjennom utviklingen av relasjonene mellom disse elementene. Den systemiske kompleksiteten til et regime gjør at det bare er mulig å gjennomføre innovasjoner som følger regimes struktur. Denne teknologiske banen setter begrensninger for innovasjon og bestemmer retningen på teknologiutviklingen. Dette betyr at regime låser teknologisk utvikling i en bestemt retning. Herfra kan innovasjonsprosesser klassifiseres i tre deler. Inkrementell, disruptiv og radikal innovasjon. Graden av sosial endring vil speiles i omfanget av innovasjonen (Hanson et al., 2011, s. 27; Hagen, 2004, s. 7).

### 2.3 Innovasjonssystem

Innad i et teknologisk regime eksisterer det flere innovasjonssystemer. Innovasjonssystem beskriver alle faktorene som bestemmer innovasjonsprosessen, og innretning av disse bestemmer videre innovasjonsprosessen og hvilke innovasjoner som er mulig å gjennomføre. Disse faktorene er økonomiske, organisatoriske, sosiale, politiske, og institusjonelle forhold. Dette vil påvirke utvikling, spredning, og bruk av innovasjonen. Forholdene kan virke positivt og negativ for en bedrifts innovasjonsprosess (Isaksen & Ørstavik, 2022; Hanson et al., 2011, s. 31). Andre sosiale forhold som påvirker innovasjon, er infrastruktur. Dette innebærer både fysisk infrastruktur, som energiforsyning, og kunnskapsmessig infrastruktur, som universiteter. Infrastrukturene påvirker hvilke innovasjoner som er sannsynlige eller mulig å gjennomføre (Hanson et al., 2011, s. 31). I denne strukturen påvirker også næringslivsstrukturen og den teknologiske spesialiseringen, retning på innovasjonene.

Det systemiske perspektivet beskriver hvordan vellykket innovasjon ikke bare er et resultat av en enkelt bedrift (Hanson et al., 2011, s. 32). Dette er en bred forståelse av innovasjonssystemer, hvor en smal forståelse vektlegger samspillet mellom bedrifter og industrier. Innovasjonssystemer kan videre beskrives på flere nivå. Følgelig globale innovasjonssystem, nasjonale innovasjonssystem, regionale innovasjonssystem, sektorielle innovasjonssystem, organisasjonelle innovasjonssystem, og teknologiske innovasjonssystem. (Asheim et al., 2011; Van Lancker et al., 2016). Det å definere grenser for de ulike innovasjonssystemene er vanskelig da de i stor grad overlapper hverandre (Asheim et al., 2011).

### 2.4 Stiavhengighet og innlåsningsmekanismer

Regimeendring påvirkes av stiavhengighet og innlåsningsmekanismer. Stiavhengighet forklarer hvordan gamle teknologier følger etablerte spor og bygger på eksisterende fortrinn.

Teknologien har gjennomgått perioder med læring og utvikling innenfor en gitt teknologisk bane som gir den en fordel ovenfor nye teknologier som fører til at konkurranseevnen er stivhengig (Hanson et al., 2011, s. 32; Spjelkavik & Klitkou, 2022; Solbrekken & Standal, 2021) Forskjellige innlåsningsmekanismer opprettholder og forsterker stivhengigheten (Spjelkavik & Klitkou, 2022).

Både tidsfaktor og systemiske forhold må forstås for å beskrive hvorfor ny teknologi sliter med å bli tatt i bruk. Gjennom tid kan en teknologi gjennomgå flere inkrementelle innovasjoner som fører til en gradvis forbedring og en kontinuerlig reduksjon av kostnadene (Hanson et al., 2011, s. 33). Det systemiske perspektivet forklarer hvordan det kan være vanskelig å endre den enkelte teknologien, uten å endre det tilhørende systemet. Å endre et system er mer krevende enn å endre en teknologi (Hanson et al., 2011, s. 34). Overgangen til et nytt energiregime påvirkes av stivhengighet og innlåsningsmekanismene. Fremveksten av nye teknologiske innovasjonssystemer er kjerneprosessen for hvordan dagens fossile energiregime kan transformeres til et fornybart energiregime. Det kreves at det bygges systemiske relasjoner til andre deler av samfunnet for at innovasjoner skal få innpass og utbredelse i økonomi og samfunn (Hanson et al., 2011, s. 45).

## 2.5 Teknologisk innovasjonssystem

Et kjennetegn av en vellykket utvikling av ny teknologi er at det formes et teknologisk innovasjonssystem rundt teknologien. Et teknologisk innovasjonssystem (TIS) defineres som «et nettverk av aktører på et begrenset teknologiområde som samspiller innenfor en spesifikk institusjonell infrastruktur med å sikte på å skape, spre og bruke en teknologi» (Hanson et al., 2011, s. 45; Carlsson, 1991). TIS-teorien beskriver teknologiutvikling som en prosess bestående av samspillet mellom en gitt teknologi og systemet teknologien utvikles i (Oskarsen, 2009, s. 25) Dette er en teknologispesifikk systemisk tilnærming. Hvert TIS er unikt og varierer i muligheten til å utvikle og spre ny teknologi (Jacobsson & Johnson, 2000).

De tre komponentene i et TIS er bedrifter og andre organisasjoner, nettverk, og institusjoner. Oppgaven setter søkelys på teknologi, vi anser derfor og teknologi som en del av komponentene, i tråd med tidligere litteratur (Bergek et al., 2008b; Suurs, 2009, s. 45). Fremveksten av et nytt TIS vil involvere tre forskjellige strukturelle prosesser; inntreden av nye organisasjoner og bedrifter, etablering av nettverk, og institusjonell tilpasning (Hanson et al., 2011, s. 47).

### 2.5.1 Aktørene

Bedriftene og organisasjonene eksisterer langs hele verdiskapningskjeden (Hanson et al., 2011, s. 46). Dette er aktører som bidrar med kunnskap, kapital, og ressurser i det fremvoksende teknologiske innovasjonssystemet. Gjennom valg og handlinger utvikler, sprer og utnytter aktører teknologier. Utviklingen av et TIS avhenger derfor av kunnskap og ønske fra aktører til å handle (Suurs, 2009, s. 42). Akkumulert kunnskap og økt spesialisering vil igjen føre til ytterligere kunnskapsutvikling (Hanson et al., 2011, s. 46). Hvorfor noen aktører handler eller ikke handler slik de gjør kan forklares gjennom begrepet «prime mover» (Suurs, 2009, s. 43). Begrepet betegner en aktør som har teknologisk, finansiell, og politisk mulighet og vilje til å selv iverksette teknologiutvikling (Suurs, 2009, s. 43; Jacobsson & Johnson, 2000).

### 2.5.2 Nettverk

Det finnes ulike typer nettverk. Nettverk som trekkes frem som viktige er læringsnettverk, og nettverk som forsøker å påvirke den politiske dagsordenen. Innad i læringsnettverkene eksisterer det forskjellige metoder for overføring av eksplisitt og taus kunnskap. Nettverket vil påvirke synet på hva som er mulig og ønskelig i framtiden. Dette kan påvirke investeringsbeslutninger (Jacobsson & Johnson, 2000; Bergek et al., 2008b; Hanson et al., 2011, s. 46). Samtidig kan nettverk begrense den enkelte bedrift, og sette grenser for teknologivalg (Jacobsson & Johnson, 2000). Nettverk som forsøker å påvirke den politiske dagsordenen innebærer flere aktører med lik oppfatning som konkurrerer om å få innflytelse i tråd med sin egen oppfatning (Hanson et al., 2011, s. 46; Bergek et al., 2008b; Jacobssons & Johnson, 2000). Begge nettverk er viktig å skape når bedrifter og organisasjoner blir en del av et TIS. Nettverkene vil styrke ressursgrunnet for den enkelte bedrift, og gir alle tilhørende nettverket en stemme på den politiske arenaen (Hanson et al., 2011, s. 47).

### 2.5.3 Institusjonene

Institusjoner innebærer både lover og formelle reguleringer, og normer og kognitive regler styrt av sosiale systemer (Hanson et al., 2011, s. 47; Bergek et al., 2008b). Institusjonene påvirker sterkt hvilken retning en teknologi tar (Jacobsson & Johnson, 2000). Dette gjennom kunnskap som danner rammeverk (paradigmer) som strukturerer læringsprosessen (Bergek et al., 2008b). Institusjonell endring er en avgjørende faktor for at ny teknologi skal få fotfeste (Hanson et al., 2011, s. 47; Suurs, 2009, s. 44). Dette innebærer en dreining av vitenskaps- og teknologipolitikk, fremme markedsregulering, skattepolitikk, holdninger, og virkelighetsoppfatninger. Bedrifter konkurrerer dermed ikke bare mot konkurrerende TIS om

varer og tjenester, men og for å vinne innflytelse over institusjonene (Hanson et al., 2011, s. 47).

#### *2.5.4 Teknologien*

Teknologi innebærer både gjenstander, kunnskap og teknologisk infrastruktur (Bergek et al., 2008b; Suurs, 2009, s. 45). Teknoøkonomiske forhold er viktige for å forstå utviklingen av teknologi. Dette innebærer blant annet kostnadsstrukturer, trygghet, pålitelighet, og effekter ved oppskalering av gjenstanden. Teknologi, lik institusjonene, tvinger aktører innenfor visse rammer som både begrenser og muliggjøres deres handlinger. Forskjellen fra de institusjonelle rammene er at en i mindre grad danner reglene selv (Suurs, 2009, s. 45).

Disse grunnelementene til et TIS etableres i systemets formative fase (Hanson et al., 2011, s.48; Bergek et al., 2008b). Fasen er karakterisert av høy usikkerhet knyttet til teknologiske valg, markedsutvikling, og regulering. Den formative fasen er en kumulativ prosess bestående av mange små endringer som kan vare i flere tiår. Endringene vil forme et nytt TIS. Denne fasen karakteriseres ved oppbyggingen av en embryostruktur (Hanson et al., 2011,s. 48).

Når embryostrukturen er dannet vil TIS oppleve en vekstfase. Grunnelementene videreføres og vil i større grad være et sammenvevd system hvor institusjonene er mer tilpasset den nye teknologien (Hanson et al., 2011, s. 49). Kjennetegn for vekstfasen er positive ringvirkninger. Her har endringer i systemet mulighet til å utløse kjedereaksjoner som driver systemet fremover. Det er fortsatt mye usikkerhet i denne fasen når det gjelder teknologi, marked, og institusjoner. Fremvoksende TIS står og i fare for å bli motarbeidet av eldre teknologier gjennom reguleringer som fremmer den gamle teknologien og hindrer gjennombrudd (Hanson et al., 2011, s. 50). Gjennom videre positive virkninger vil et TIS til slutt bli modent. Dette karakteriseres av en stabil struktur (Bergek et al., 2008b).

## 2.6 Funksjoner i TIS

For å analysere ytelsen i et TIS kan en analysere innovasjonssystemets funksjoner (Hanson et al., 2011, s. 50). Analysen skiller mellom struktur og innhold, og setter søkelys på nøkkelprosser som har en direkte påvirkning på ytelsen til systemet. Eksakt antall funksjoner er noe vilkårlig, og varierer (Bergek et al.,2008b). Funksjonene har som mål å si noe om effektiviteten til det teknologiske innovasjonssystemet (Oskarsen, 2009, s. 25)

### *2.6.1 Entreprenørskapsaktivitet*

Essensielt for et velfungerende innovasjonssystem er entreprenører. Deres rolle er å bruke ny kunnskap, marked, og nettverk for å skape nye forretningsmuligheter (Hekkert et al., 2007). Et TIS vil kun utvikle seg hvis det finnes entreprenører som eksperimenterer (Hanson et al., 2011, s. 51). Gjennom eksperimentering vil ny kunnskap akkumuleres om teknologien i ulike omstendigheter, i tillegg vil en kunne få bukt med usikkerheten knyttet til eksperimentering av ny teknologi og markeder. En slik læringsprosess er essensiell for enhver innovasjonsprosess (Hekkert et al., 2007).

### *2.6.2 Kunnskapsutvikling og -spredning*

Denne funksjonen viser ytelsen til kunnskapsbasen til et TIS og dens utvikling (Hanson et al., 2011, s. 51). Indikatorer som måler denne funksjonen er prosjekter i forskning og utvikling (FoU), patenter, og investeringer i FoU. For at kunnskap skal bli tatt i bruk må den spres, dette skjer gjennom nettverk. Dette er viktig for blant annet politiske beslutninger, da disse bør være konsekvent med siste teknologiske innsikt (Hekkert et al., 2007).

### *2.6.3 Påvirkning på retning av innovasjon*

Funksjonen handler om seleksjonsprosessen for hvilken teknologi som videreutvikles. Denne prosessen skjer gjennom fremveksten av et dominant design gjennom forskjellige systemkomponenter, industri, myndigheter, og marked. Systemkomponenter som har størst påvirkning vil variere ved ulik teknologi. Samfunnsholdninger vil og påvirker retningen. Dette gjennom påvirkning på FoU, og dermed hvilken retning den teknologiske utviklingen tar (Hekkert et al., 2007; Hanson et al., 2011, s. 51). Retning vil og påvirkes av insentiver eller press.

### *2.6.4 Markedsetablering*

Fremvoksende TIS preges ofte av manglende eller underutviklede markeder. Ny teknologi har og ofte manglende konkurranseevne mot etablert teknologi, dette grunnet en iboende treghet i markedet for å akseptere nye løsninger. Samtidig prises ny teknologi høyere enn etablert teknologi grunnet nye produksjonsmetoder og manglende produksjonskunnskap. I tillegg er ny teknologi mindre pålitelig enn etablert teknologi. Derfor kan det være nødvendig å beskytte den nye teknologien i startfasen (Hekkert et al., 2007; Hanson et al., 2011, s. 51).

### 2.6.5 Legitimering

Den nye teknologien trenger koalisjoner av støttespillere for at den skal bli ønsket og akseptert av relevante aktører. Dette for å lykkes med ressursmobilisering, dannelse av marked, og for at deltakerne i TIS skal få politisk innflytelse. Legitimering er en bevisst prosess som krever tiltak fra flere organisasjoner og enkeltpersoner. Dette for at et TIS skal overvinne belastningen ved å være ny. Prosessen kan vanskeliggjøres ved at det er konkurranse fra forkjempere av andre TIS (Hanson et al., 2011, s. 52).

### 2.6.6 Ressursmobilisering

Ulike faser av et TIS krever mobilisering av ulike ressurser. Hvordan et TIS har mulighet til å mobilisere menneskelig kapital, finansiell kapital, og tilhørende aktiva er derfor en forutsetning (Hanson et al., 2011, s. 52). Lokalisering av ressurser vil være nødvendig for kunnskapsutvikling (Hekkert et al., 2007).

### 2.6.7 Utvikling av positive eksternaliteter

Nye bedrifter og organisasjoner har muligheten til å øke legitimiteten og redusere usikkerhet, og dermed bidra til positive eksternaliteter for andre bedrifter i systemet. Samlokalisering av bedrifter har mulighet til å gi ytterlige eksternaliteter. Dette er en funksjon som antyder at mange funksjoner styrkes gjennom systemets egendynamikk. Øking i antall aktører er derfor viktig i et fremvoksende TIS (Hanson et al., 2011, s. 53; Bergek et al., 2008a).

## 2.7 TOD – Teknologi, organisasjon, diskurs

Den innovasjonsteoretiske TIS benytter syv funksjoner til å identifisere og klassifisere innovasjonsprosesser i et system. De syv funksjonene overlapper og eksisterer i samspill med hverandre, og utviklingen av ny teknologi er avhengig av disse funksjonene. Graden av påvirkning en funksjon har på en annen er ulik mellom ulike TIS (Bergek et al., 2008a). Sameksistensen til funksjonene gjør det mulig å kategorisere dem i tre dimensjoner, teknologi, organisasjon og diskurs (TOD). I TOD defineres dimensjonene som den teknologiske dimensjonen, representert av materialiteten til innovasjon, den organisatoriske dimensjonen, representert av utførelsen av innovasjon, og den diskursive dimensjonen, representert av narrativene knyttet til innovasjon. Dimensjonene samspiller med hverandre som betyr at de påvirker og blir påvirket av hverandre. Hvordan dynamikken utvikler seg varierer mellom kontekster (Sjøtun & Njøs, 2019).



Vårt teoretiske grunnlag baserer seg på TIS som et samspill mellom en gitt teknologi og systemet denne teknologien utvikles i (Oskarsen, 2009, s. 25). For å belyse denne prosessen benytter vi TOD for å se på samspillet mellom de ulike dimensjonene, og hva det betyr for teknologisk utvikling. Vi vil ikke utføre en standard funksjonsanalyse, men undersøke hvordan funksjonene operer i samspill med dimensjonene i TOD.



## 3.0 Metode

Kapitlet beskriver teorien bak, valg av, og begrunnelse for metode. Vesentlige forhold rundt, viktige moment, samt utfordringene for å gjennomføre metoden belyses.

### 3.1 Hva er metode?

«Å være vitenskapelig er å være metodisk» beskriver Tranøy (1986, s. 127). Metode er både fremgangsmåten og redskapet for å oppdrive og kontrollere kunnskap. Argumentasjon skal overholde og benytte standarder i tråd med vitenskapelig metodikk. Dette krever systematiske tanker, og rettskaffenhet. Diversitet er viktig for å fremdrive kunnskap og utfordre sannferdighet (Dalland, 2020, s. 53). Nøyaktig bruk og systematisk utvalg muliggjør oppfylning av krav og normer som eksempelvis hvorvidt resultatene stemmer med virkeligheten. Forskningsvirksomhet bør bygge på eksisterende forskning, forståelsen til forskeren skal belyses, og resultatene skal være etterprøvbare (Dalland, 2020, s. 58). Metode har et skille ved det kvalitative, og det kvantitative.

#### 3.1.1 Kvantitativ og kvalitativ metode

Kvantitativ metode betegnes med data fra målbare enheter. En går i bredden og undersøker det som er felles og representativt. Forskeren vil se utenifra og inn, og forholde seg nøytral til fenomenet (Dalland, 2020, s. 55). Vi benytter kvalitativ metode. Metoden skaper dybde og fleksibilitet. Her sees fenomenet fra innsiden, hvor forskeren har direkte kontakt og nærhet til feltet. Fordelen er å identifisere avvik, og få fram noe konkret med undersøkelsen, og å inkludere faktorer som ikke kan tallfestes (Dalland, 2020, s. 55). Ulempen er at forskeren selv bedømmer hva som er relevant, og hvordan det tolkes. Subjektive meninger kan påvirke forskningen, og resultatet kan bli mindre pålitelig.

#### 3.1.2 Objektivitet og subjektivitet

Objektivitet er et ideal som forskere prøver å oppnå, for å sikre pålitelige og gyldige forskningsresultat. Subjektive oppfatninger om hvordan resultatene burde se ut kan medføre feilaktig forskning, og svekke forskerens pålitelighet og legitimitet. Objektiviteten kan styrkes ved å involvere flere forskere, som kan kontrollere og supplere perspektiv på resultatene. Standardiserte forskningsdesign medfører og en forsterket objektivitet. Det er viktig å erkjenne vedvarende tilstedeværelse av subjektivitet i forskning, i tråd med menneskelig psykologi. Komplet eliminering av subjektivitet er vanskelig, og krever kontinuerlig innsats for å

undertrykkes (Tranøy, 2022). Intersubjektivitet betegner enigheten mellom to eller flere forskere. Ved gjentatte resultat vil forskningen ansees som intersubjektiv, som gir grunnlag til å forkaste krav om objektivitet (Tranøy, 2022).

## 3.2 Valg av forskningsdesign

Forskningsdesign er selve fremgangsmåten i vitenskapelig forskning. Identifisering av nødvendig data for å besvare problemstillingen står sentralt i valg av forskningsdesign. Samtidig kan ulike design krysses og justeres for å tilpasse formålet med undersøkelsen. Kvalitativ og kvantitativ tilnærming kan og være flytende, og utfylle hverandre ved behov. En dyktig forsker er derfor fleksibel og tilpasningsdyktig. Oppgavens formål, og medførende omfang, samt eksisterende litteratur legger til rette for at vi kan gjennomføre en litteraturstudie.

### 3.2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie betegnes med planmessig og systematisk innhenting av informasjon for å etablere kunnskap og drive forskning. Samfunnsvitenskapen studerer mennesker og sosiale interaksjoner, mens naturvitenskapen studerer det realfaglige (Grønmo, 2021; Sletnes, 2019). Litteraturvitenskap omfatter studie av tekster og tilleggsmateriell nødvendig for forståelse og utforskning av litteraturen. Det går et skille mellom å forholde seg til konkrete tekster, og å tolke de i konteksten de er skrevet i (Skei, 2021).

For å gjennomføre litteraturstudie må formålet klart defineres, og søkeprosessen beskrives. En må definere inklusjons- og eksklusjonskriteriene, og hente data systematisk fra utvalgt litteratur. Dette skal sammenfattes og presenteres konsist. Litteraturen legger to typer litteraturstudie til grunn, 1) systematisk oversikt som baseres på publisert forskning, og 2) samfunnsrelatert oversikt som baseres på publisert forskning og annen litteratur (UiO, u.å.).

### 3.2.2 Begrunnelse for metode

Vi benytter en samfunnsrelatert oversikt. Dette fordi oppgaven vår vil omhandle både natur- og samfunnsvitenskap. Fagfellevurdert forskning vektlegges i den teknologiske dimensjonen, mens aktørenes egne uttalelser, rapporter, strategier, samarbeidsavtaler, samt anerkjente nyhetskanaler og bransjeaviser benyttes for å belyse diskurs- og organisasjonsdimensjonen. Problemstillingen er av en kvalitativ grad, som samtidig krever bred informasjon for å belyses.

Informasjonen kan kvantifiseres, men en slik løsning ville brakt oss inn på et forskningsnivå langt over det vi skal produsere.

Ved å benytte litteratursøk kan vi samle inn relevant informasjon fra flere forskningsinstitutt og relevante aktører, og dykke dypere inn i tematikken. Vi kan belyse den pågående utviklingen av verdikjedene, og samtidig se det hele i et romlig, og historisk perspektiv, både fra det teknologiske aspektet, men og gjennom aktørene og fortellingene i samfunnet. Ved å benytte TOD, ønsker vi å belyse samspillet mellom dimensjonene, og belyse viktigheten av den teknologiske dimensjonen i teknologisk utvikling.

### *3.2.3 Utdringer med metoden*

Hovedutfordringen er selektiv informasjonsinnhenting, som begrenser dannelsen av et realistisk bilde av landskapet. Solide krav til prosessen er derfor sentralt. Oppgavens omfang krever avdekking av både for- og motargumenter, og samtidig kritisk holdning til informasjonskildene. Kahneman (2011) påpeker bekræftelsestendens; å søke etter informasjon som bekrefter subjektive holdninger, og avviser informasjon som motstrider med subjektive holdninger (Kahneman, 2011, s. 80). Kildekritikk, både til forskere, og interessentene bak forskningen er derfor viktig. Dette danner likevel ikke en komplett objektivitet, som vi må vise hensyn til gjennom hele oppgaven.

Videre er det rom for feiltolkning av teori og resultat, som skaper feilaktige grunnlag for argument i enhver litteratur – ikke unntatt vår oppgave. En kritisk tilnærming til litteratur og informasjon vi inkluderer, så vel som den vi ekskluderer, er derfor viktig. Publisere av, og interessenter som har bestilt eller betalt for forskning er viktig å være oppmerksom på. Samtidig er kunnskapsnivået vårt på et lavere nivå enn mye av litteraturen vi anvender, noe som spesielt åpner for feiltolkning fra vår side. Vi har og begrenset tid, som resulterer i utfordringer for hvor dypt vi kan analysere og verifisere dataen vi henter inn.

### *3.2.4 Gjennomføring av metoden*

Tematikken er omfattende, og krever et bredt informasjonsgrunnlag for å besvares. Med formål om å kartlegge den teknologiske dimensjonen, organisasjonsdimensjonen i et romlig aspekt, samt diskursdimensjonen. Ved å studere litteratur tilknyttet det teknologiske danner vi et grunnlag av forståelse for eksisterende teknologi, og avdekker fordeler og ulemper. Her

vektlegges relevante anerkjente tidsskrifter. Deretter innhentes informasjon fra utvalgte aktører. Her vektlegges hvordan de opererer, strategiske beslutninger, offentlig støtte, samarbeid mellom aktører, samt tidligere og pågående aktivitet. Dette for å danne en bredde i forståelsen av hvordan aktører organiserer seg i nettverk og klynger og for å kartlegge diskursen og narrativ ført.

### 3.3 Feilkilder

Alle forskningsdesign har iboende svakheter, og de aller fleste forskere vil fremstille svakheter og feil ved produsert forskning. Derfor belyser vi de feilkilder og svakheter vi selv identifiserer ved forskningsdesignet, gjennomførelsen av forskningen, og vår egen kompetanse.

Litteraturstudien vår har som ulempe å belage seg på offentlig tilgjengelig litteratur og andre offentlige kilder. Vi har ikke innsyn i den nyeste forskningen eller de nyeste fremskrittene innenfor hydrogenteknologi. Samtidig kan en del forskning relevant til vår oppgave være låst bak betalingsmur. Dette medfører en usikkerhet i hvor presis dataen vi samler inn er, sett opp mot dagsaktuell standard. Videre kan forskingsaktører selv velge hva de vil publisere, og hvordan de vil presentere funnene sine. På denne måten kan andres uetiske forskning påvirke vår egen forskingsprosess negativt.

Samtidig har vi manglende kompetanse og tid, som kan medføre misforståelser og feiltolkning av litteraturen. Avanserte fysikk- og kjemidetaljer preger mye av litteraturen benyttet for å belyse teknologidelen i resultatkapittelet. Her er det rom for at vi har gjort feil. Tidspresset er og en faktor som kan påvirke denne prosessen negativt. Dette kan og resultere i feil ved utregninger, som gir følgefeil gjennom hele oppgaven. På denne måten kan argumentasjon og konklusjon bli feil.

Til slutt påpeker vi at vi har valgt aktører som er aktive i norsk kontekst, til tross for at EU på et overordnet nivå påvirker alle europeiske land til å bidra i arbeidet med å utvikle hydrogenteknologi for fremtiden. Resultatet er eksklusjon av aktører som aktivt arbeider med teknologiutvikling utenfor Norges grenser, som kan gi ett skjevt bilde på hvor aktiviteten langs verdikjeden foregår, og hvor mye aktivitet det er i utviklingsprosessen.

## 4.0 Kontekst

Kapittelet beskriver hydrogens driftstid i Norge. Dette for å få en forståelse for hydrogenhistorien i en norsk kontekst. Da dette er ment for å male et bakteppe for resultat, diskusjon og konklusjon. Til slutt presenteres energi- og økonomiforståelse relevant for oppgaven.

### 4.1 Hva er hydrogen?

Hydrogen utgjør om lag 74% av alle atomer i universet. Til tross for den store tilstedeværelsen i stjerner og gassplaneter, forekommer det veldig lite rent hydrogen på jorden (Kofstad & Pedersen, 2023). Dette fordi hydrogen er reaktivt, og søker å binde seg med andre atomer. Hydrogen må derfor fremstilles industrielt. Hydrogen ble påvist som en egen gass i 1766. Hydrogen ble brukt i luftskip fra slutten av 1800-tallet og ut på 1900-tallet. Grunnet Hindenburg-eksplosjonen ble det imidlertid slutt på luftskipsepoken. Allerede i 1839 ble brenselcelleteknologien patentert og demonstrert, men det var ikke før teknologien ble brukt innen romfart på 1960-tallet at det ble ansett som noe annet enn en kuriositet. Grunnet hydrogens energiinnhold har det vært et foretrukket drivstoff i romfarten. De første forbrenningsmotorene ble laget for bruk av hydrogen som brensel og på 1930-tallet var det flere kjøretøymodeller som ble drevet av hydrogen. Oljealderen førte imidlertid til nye drivstoff som var enklere og etter hvert billigere å håndtere (NOU 2004: 11, s. 30).

### 4.2 Hydrogenutvikling i Norge

Norge har lang erfaring med produksjon av hydrogen. Alkalisk elektrolyse ble først anvendt av Norsk Hydro, nå Yara, i 1926 for produksjon av ammoniakk (Norsk Hydro, 2013). I 1966 ble alkalisk elektrolyse utfordret av PEM med en marginal effektivitetsøkning og kostnadsreduksjon (Aarnes et al., 2019). Fram til 1990-tallet var elektrolyse med energi fra vannkraft mest utbredt. Etter 1990 ble elektrolyse erstattet med dampreformering av naturgass (NOU 2004: 11, s. 28). Dette har siden blitt den mest utbredte formen for hydrogenproduksjon. Hydrogen brukes også i dag, først og fremst i industriprosesser (Horne & Hole, 2019), men ønsket om bredere anvendelse startet allerede på 70-tallet.

Fra 70-tallet frem til i dag ser vi en utvikling fra regjeringens side om bruksområder for hydrogen. NOU 1974: 55 nevner hydrogen som en lovende energibærer som kan distribueres like billig som naturgass, og kan dekke de fleste energibehovsområdene (NOU 1974: 55, s.



100). Hydrogen som drivmiddel for fly blir spesielt nevnt (NOU 1974: 55, s. 195). Dette kan sees i sammenheng med oljekrisen i 1973 og ønske om alternative energikilder (Reed, 2021). Samtidig ble ideen om «hydrogenøkonomien» og «hydrogensamfunnet» introdusert.

På 90-tallet øker klimafokuset og en forventning om økende klimabekymringer i samfunnet. Dette gjør at regjeringen beskriver i «gassmeldingen» et ønske om en økt satsing på hydrogen som energibærer, spesielt som drivstoff, og legger til rette for et nasjonalt hydrogenprogram (St. Meld. Nr. 9 2002-2003, s. 6 & 16.). Sikring av petroleumsformuen ved hydrogenproduksjon av naturgass og CCS er en sentral del av fortellingen på dette tidspunktet (Kårstein, 2008, s. 12)

Gassmeldingen og økt klimafokus fører til en økt omtale og satsning på hydrogen fra tidlig 2000-tallet. Hydrogen får sin egen NOU publisert i 2004, regjeringen med OED og SD følger opp dette med lanseringen av et eget strategidokument for satsing på hydrogen i Norge. Strategien vektlegger hydrogen i transportsektoren, hydrogen i gasskraftverk, samt hydrogen som lagringsmedium (OED & KLD, 2020, s. 12). Flere demonstrasjonsprosjekter lanseres, blant annet HyNor hvor en skulle danne et sammenhengende nettverk med fyllestasjoner fra Oslo til Stavanger (Kårstein, 2008, s. 11). Dette ble aldri realisert, og kun et fåtall stasjoner ble opprettet. Hydrogenbilen blir kommersialisert, men utbredelsen er fortsatt lav. Utover 2000-tallet minsker omtalen knyttet til hydrogen.

Hydrogen får en ny økning i omtale fra 2020-tallet med EU i spissen, og samme år lanserer regjeringen en hydrogenstrategi (EU, 2020; OED & KLD, 2020). Hydrogen blir omtalt av EU og regjeringen som en nullutslippsteknologi som skal bidra til å nå målene om 50-55% utslippskutt i 2030 og nettonull i 2050 (OED & KLD, 2020, s. 5; EU, u.å.). «Grønn vekst», verdiskaping og klimafokus er sentrale begrep. Anvendelsesområdene er brede, men bruk av hydrogen i maritim sektor blir spesielt poengtert. I 2022 blir veikart for grønt industriløft lansert, og viderefører entusiasmen for hydrogen fra tidligere hydrogenstrategi og konkretiserer visjoner med konkrete mål (NFD, 2022). Fortellingen om hydrogen som virkemiddel for å nå utslippsmålene mot 2030 og 2050 blir videreført (KLD, 2021b).

#### 4.3 Energiforståelse

Energi kan ikke skapes eller ødelegges, bare omsettes. Da hydrogen er en energibærer er det viktig med en forståelse av størrelsesordenen til de forskjellige enhetene. Standardenheten for



energi er Joule (J), hvor energi måles i effekt (W), som er Joule per tidsenhet, (J/s). For eksempel bruker en vaskemaskin 2000 W per time, som da utgjør 2 kWt.  $1\,000\,000\,000\text{ kWt} = 1\,000\,000\text{ MWt} = 1\,000\text{ GWt} = 1\text{ TWt}$ . I 2021 brukte Norge samlet 137 TWt med elektrisitet, mens NVE estimerer et forbruk i 2030 mellom 159 og 193 TWt (Buvik et al., u.å., s.26). Dette fører til et forventet kommende kraftunderskudd frem mot 2030 (Wilhelms et al., 2023). Dette legger føringer for utbygging og oppgradering av mer fornybar kraft. For at utbygging skal skje bærekraftig er sosial aksept et premiss. Sosial aksept ved utbygging av fornybar kraft har vist seg å være problematisk i nyere tid (OED, 2022).

Energi kan videre deles inn to kategorier, potensiell eller kinetisk energi, henholdsvis stillingsenergi og bevegelsesenergi. Førstnevnte omfavner kjemisk energi, mens sistnevnte omfavner termisk energi. Kjemisk energi beskriver energien i molekylbindingene, mens termisk energi beskriver energien tilknyttet temperaturen (Bøe, 2022).

#### 4.4 Økonomiforståelse

De fleste prisestimerer er gjort i utenlandsk valuta (EUR & USD). For å danne et korrekt prisbilde i norsk kontekst oversetter vi disse utrekningene til norske kroner. Valutakurs er volatil og endres kontinuerlig. Grunnet dette vil tidligere kostnader bli omregnet i daværende valutakurs, og fremtidige kostnader vil bli omregnet basert på et historisk gjennomsnitt. Det tas forbehold om at ingen kan forutsi fremtidig prising med sikkerhet, og derfor at gjennomsnittet kan være ukorrekt. Gjennomsnittskurs for dollar de siste fem årene er 9,5, mens gjennomsnittskurs for euro i samme periode er 10,2. (Google Finance, 2023b; Google Finance, 2023a. Hentet 25. mai) Se omregning i Vedlegg 2.

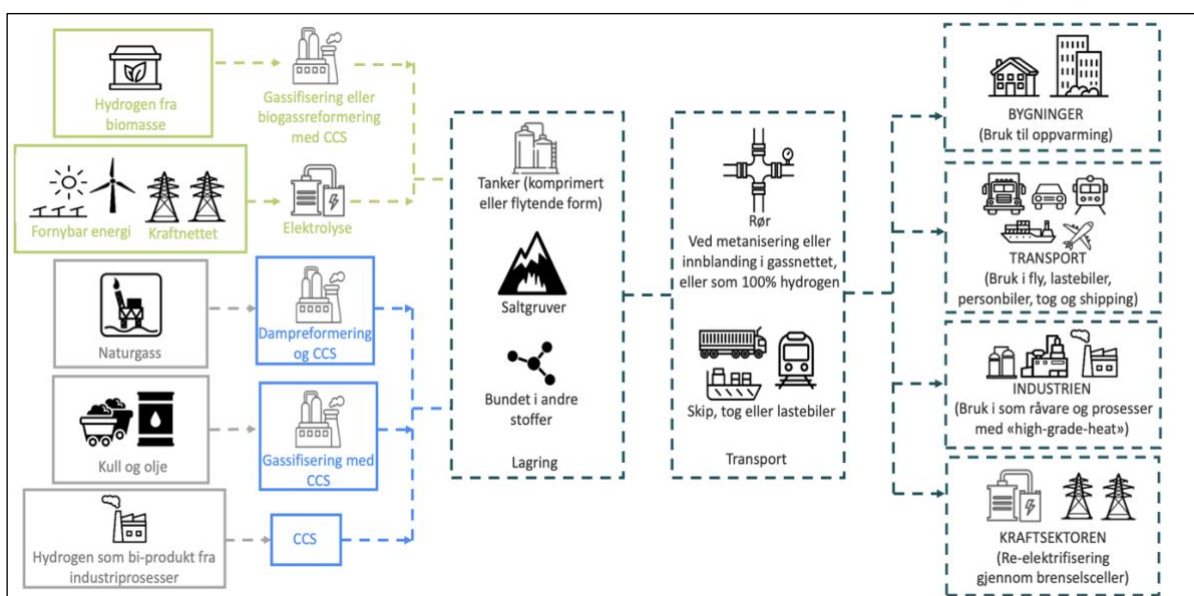


## 5.0 Resultat

I dette kapittelet presenteres funn gjort i de tre dimensjonene, teknologi, organisasjon og diskurs (TOD). Der flere av teknologiene, som for eksempel brenselcelleteknologien, kunne blitt klassifisert som ett teknologisk innovasjonssystem, ser vi på hele verdikjeden til hydrogen som ett teknologisk innovasjonssystem. Vi gjør dette for å få en breddeforståelse av hydrogen og teknologiutviklingen knyttet til verdikjeden. Kapitlet struktureres i tre deler, 1) teknologi, 2) organisasjon, og 3) diskurs. Teknologi undersøker materialiteten og den teknologiske statusen innen hydrogenteknologi i hele verdikjeden til blått og grønt hydrogen. Dette for å få et tydelig bilde av teknologien som eksisterer. Organisasjon undersøker hvordan aktører organiserer seg i nettverk og klynger, samt prosjektaktiviteten i de ulike leddene i verdikjeden. Diskurs undersøker hvilke diskurser og narrativ som er gjeldende for blått og grønt hydrogen gjennom verdikjeden.

### 5.1 Teknologi

Teknologidimensjonen er av teknisk art, og ser på empirisk data fra realiserte resultat. Dette med formål om å kartlegge teknologistatus gjennom verdikjeden, se figur 3. Slik kan en identifisere konkrete utfordringer, og fordeler ved teknologien. Med forbehold om mengden informasjon presentert under, viser vi til «vedlegg 1 – (1) Effektivitetsgrad» som gjerne kan benyttes for orientering mellom ulike effektivitetsgrader. Hver vesentlige del av kappitelet vil ha et sammendrag.



Figur 3: Verdikjedene for blått og grønt hydrogen (Thema Consulting Group, 2019, s. 13)

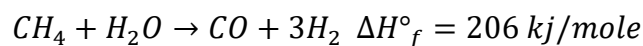
### 5.1.1 Blå produksjon

Blått hydrogen betegner produksjon av hydrogen med karbonfangst og lagring. Norges gassressurser, mulighet for næringsutvikling, miljøargumentet, og sikring av petroleumsformuen brukes som argument for satsning på denne teknologien (OED & SD, 2004, s. 12; Hydrogenrådet, 2006, s. 9). Dette delkapittelet vil beskrive hvordan blått hydrogen blir produsert, CO<sub>2</sub>-fangst og lagringsteknologi samt utfordringene knyttet til dette. I tillegg vil produksjonskostnad, ressursbruk, og utslipp tilknyttet blått hydrogen bli beskrevet.

#### 5.1.1.1 Produksjon

Det er flere metoder å produsere hydrogen på. Reformering av naturgass er den mest utbredte metoden. Gassreforming kan gjøres på forskjellige måter. Dette inkluderer Partiell Oksidasjon (POX) og Autotermisk Reformering (ATR). Den vanligste og mest kostnadseffektive formen for hydrogenproduksjon i verden er gassreformeringsprosessen Steam Methane Reforming (SMR). Estimer viser at 68% av verdens hydrogenproduksjon er basert på SMR (Aarnes et al., 2019). Denne produksjonsmetoden har høyere CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til produksjon enn de andre reformeringsteknologiene nevnt (Khojasteh Salkuyeh et al., 2017). SMR er en endoterm prosess som konverterer damp og metan til hydrogen og karbonmonoksid vist i formel 1 (Bukkholm, 2021. s. 7). Dette betyr at det må tilføres varme til prosessen for at reaksjonen skal skje. Formel 1 viser hvordan metan (CH<sub>4</sub>) og vann (H<sub>2</sub>O) reagerer og blir til karbonmonoksid (CO) og hydrogen (H<sub>2</sub>) og følgelig hvor mye varme som kreves for å drive reaksjonen. Naturgass er vanligst brukt som råstoff. Da prosessen er endoterm kreves det en energitilførsel mellom 2 og 2.5 kWt per m<sup>3</sup> hydrogen for nødvendig varme og trykk til å drive SMR prosessen (Howarth & Jacobson, 2021).

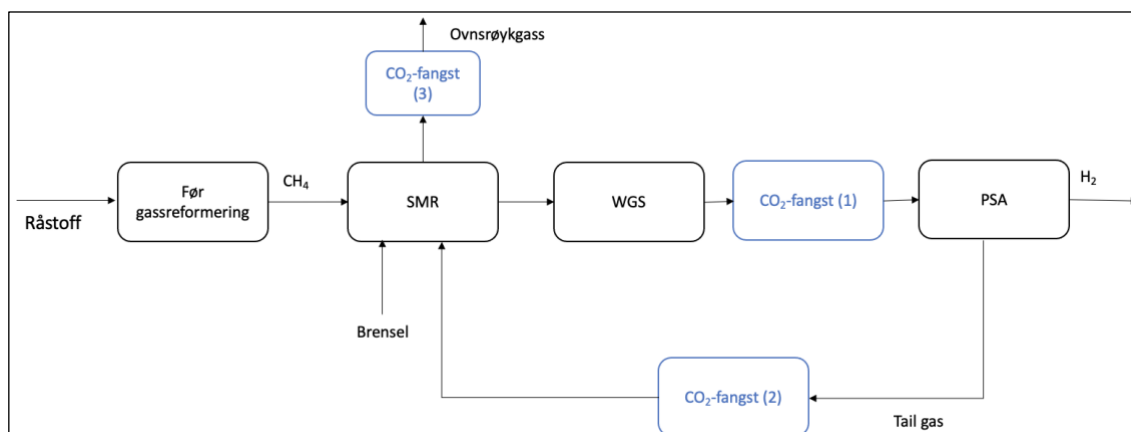
*Formel 1: Gassreforming og produksjon av syntesegass, (Bukkholm,2021.s.6)*



#### 5.1.1.2 Steam Methane Reforming (SMR)

Prosessen kan beskrives i fire steg og en enkel fremstilling av prosessen vises i flytdiagrammet i Figur 4.



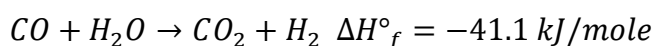


Figur 4: CO<sub>2</sub>fangstpunkt i SMR-prosess (Antonini et al, 2018, s. 8)

I første steg før gassreforming fjernes svovel fra naturgassen. Dette gjøres for å bevare effektivitet. Videre omdannes andre hydrokarboner til metan, denne omdannelsen skjer i en nikkel katalysator ved temperaturer rundt 350 til 550°C (Jakobsen & Åtland, 2016, s. 3-4). I andre steg skjer gassreforming ved temperaturer rundt 700 – 1000°C (Bukkholm, 2021, s. 7). Metan reagerer med damp under 3–25 bar trykk ved en nikkel katalysator oppvarmet av forbrenningen av naturgass (Mueller-Langer et al., 2007). Prosessen produserer syntesegass, som består av hydrogen og karbonmonoksid (CO) vist i formel 1.

Etter reformeringen, i tredje steg, kalt vann/gass skiftreaksjon (WGS), blir karbonmonoksid og vanndamp ført gjennom en katalysator for å produsere ekstra hydrogen og karbondioksid. Prosessen er eksoterm, den gir fra seg varme, sett i formel 2.

Formel 2: Vann-gass skiftreaksjon, (Bukkholm,2021.s.8)



Prosessen foregår i to steg, bestående av høye temperatur skift i reaktorer ved 350 °C og lave temperaturskift ved 190 – 210 °C (Bukkholm, 2021, s. 8). Siste steg er en rensesprosess kalt pressure swing adsorption (PSA). Her renses hydrogen ved å ta fordel av at forskjellige gasser absorberes til forskjellige faste stoffer når de blir utsatt for høyere trykk. Etter denne prosessen er hydrogen klar til lagring eller bruk. Ved anvendelse av den beste eksisterende teknologien blir 70-90% av hydrogen i naturgassen hentet ut, med en renhet på >99,9%. En miks av gasser ikke brukt videre i prosesseringen blir og produsert, kalt «tail gases». For å øke energieffektiviteten til anlegget kan disse gassene bli brukt som brensel sammen med naturgass

(Bukkholm, 2021, s. 8). Andel naturgass konsumert som brensel varierer mellom 3% til 20%, og avhenger av blant annet CO<sub>2</sub>-fangst (Mueller-Langer et al., 2007). Økt konsum av naturgass vil følgelig øke utslipp knyttet til blått hydrogen, dette blir beskrevet senere.

#### *5.1.1.3 CO<sub>2</sub>-Fangst*

For at produksjon skal bli betegnet som blått hydrogen må karbondioksid fanges og lagres. Videre må visse krav bli tilfredsstilt for at blått hydrogen skal karakteriseres som lavutslipp. Dette er blant annet på grunn av utslipp langs naturgass verdikjeden (Bauer et al., 2022).

Fangst av CO<sub>2</sub> kan gjøres ved forskjellige steder i SMR-prosessen og dette vil påvirke den totale fangstraten og effektivitetsgraden av anlegget (DNV, 2022). Elektrisitet kreves for fangst av CO<sub>2</sub> og hvor mye avhenger av fangstteknologi brukt (Tarun et al., 2007). Fangstteknologi brukt vil og påvirke kostnadseffektivitet og grad av fangst. Disse forskjellige fangstteknologiene vil ikke bli videre diskutert (Bukkholm, 2021, s. 9). I produksjonsanlegget er det tre steder CO<sub>2</sub> kan fanges vist i figur 4. Etter WGS (1), etter PSA (2) og fra ovnsrøykgassen (3) (Antonini et al., 2018). Fangstraten ved de forskjellige stedene (1) og (2) er mellom 50-70%, og ved (3) 90% (Collodi et al., 2017; IEA, 2019). Økt fangstrate vil og øke kostnadene for anlegget (Antonini et al., 2018). Videre må karbonet transporteres og lagres.

#### *5.1.1.4 Transport og lagring av CO<sub>2</sub>*

Lagring av CO<sub>2</sub> foregår i to prosesser. Transport av CO<sub>2</sub> og selve lagringen. For transport av større volum CO<sub>2</sub> er skip og transport via rørledning hovedalternativene. For mindre volum og mindre avstander kan CO<sub>2</sub> bli transportert via tungtransport eller jernbane, men dette øker kostnadene per tonn CO<sub>2</sub> (IEA,2021). I tillegg kan dette leddet føre til ytterligere utslipp, med mindre karbonnøytrale eller karbonfrie transportmetoder benyttes.

Transport gjennom rørledning er den billigste måten å transportere CO<sub>2</sub> i større mengder fra land. Avhengig av avstand og volum, er dette også den billigste transportmetoden offshore (IEA,2021). Norges prosjekt «Langskip» vil være det første i verden som transporterer store mengder CO<sub>2</sub> til en offshore lagringsplass (Meld. St. 33(2019-2020).

#### *5.1.1.5 Lagring av CO<sub>2</sub>*

Det eksisterer flere lagringsteknologier for CO<sub>2</sub>. Den eneste som blir brukt kommersielt er



injiserings av CO<sub>2</sub> i gjennomtrengelige undergrunns steinformasjoner, kalt geologisk lagring (Rackley, 2017. s. 29). Dette gjøres ved at CO<sub>2</sub> injiseres i porøs stein som er underlagt et lag med ugjennomtrengelig stein. Dette vil forsegle reservoaret og hindre lekkasje av CO<sub>2</sub>. Flere typer reservoarer er egnet for lagring av CO<sub>2</sub>. Størst kapasitet har tømte olje- og gassreservoarer og saltvannsformasjoner (IEA, 2021).

For å øke lagringskapasitet og sikkerhet for lagring bør CO<sub>2</sub> injiseres som en superkritisk væske. En superkritisk væske er verken flytende eller damp, men på grunn av høyt trykk og temperatur har faregrensen mellom væske og gass forsvunnet. Denne egenskapen fører til en væskelignende tilstand som synker mobiliteten gjennom porøs stein. Dette er ønskelig da lekkasje gjennom stein vil føre til utslipp. Reserverorene må typisk være på dyp større enn 800 meter for at gassen skal forbli i en tett væskelignende tilstand (Rackley, 2017. s. 285). Det eksisterer flere blokkeringsmetoder for at CO<sub>2</sub> skal forbli i reservoaret (IEA, 2021). Hvilken metode brukt avhenger av de geologiske forholdene. Hvilke metode brukt vil og påvirke volumkapasitet for kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup>, samt tidsskala for lagring (Rackley, 2017. s. 293). Gjennomtrengelighet ved ulike geologiske strukturer vil påvirke lekkasje av CO<sub>2</sub>, og litteraturen viser variasjoner av årlig lekkasje fra 0,00001% og 1% (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015). Videre vil effektivitetsgrad, produksjonskostnad og utslipp bli beskrevet.

#### *5.1.1.6 Effektivitetsgrad*

Energi kan verken skapes eller destrueres, bare omsettes. Enhver prosess hvor energi omsettes medfører energitap. Minimering av energitapet er viktig for en bærekraftig energibærer.

Med effektivitetsgrad menes hvor mye energi en får ut, basert på energien puttet inn. Effektivitetsgrad på 60% er et energitap på 40%. Begrepet effektivitetsgrad benyttes ved produksjon og konsum av hydrogen, mens energitap benyttes i overføringsprosessene som fylling, lagring, og transport.

Energieffektiviteten til SMR-anlegg uten CSS er høy, med en effektivitetsgrad fra brensel til hydrogen på 74-85% (Younas et al., 2022). Total prosesseffektivitet er typisk estimert til 70%, men litteraturen viser variasjoner mellom 60% til 90% (Balcombe et al., 2018). Dette avhenger av temperatur, trykk og damp til karbon ratio i reformeringsprosessen (Khojasteh Salkuyeh et al., 2017).



Avhengig av hvor i prosessen CO<sub>2</sub> fanges og hvilke fangstteknologier brukt kan effektivitetsgraden til SMR synke med 5-18% (Jansen et al., 2015; Khojasteh Salkuyeh et al., 2017). Effektivitetstapet knyttet til fangst av CO<sub>2</sub> øker behovet for naturgass med 15% til 65%, med mulighet for å forbedre dette effektivitetstapet ved teknologiutvikling. (Balcombe et al., 2018).

Elektrisitet konsumert ved anlegg med CO<sub>2</sub>-fangst er 60% høyere enn anlegg uten, dette er i stor grad grunnet komprimering av CO<sub>2</sub> (Mueller-Langer et al., 2007). Økt produksjon av CO<sub>2</sub> er direkte knyttet til økt H<sub>2</sub> produksjon. Dette fører til en nær lineær økning i energi nødvendig for CO<sub>2</sub>-fangst. Avhengig av teknologi brukt for fangst av CO<sub>2</sub> vil dette og påvirke konsum av elektrisitet for anlegget (Tarun et al., 2007). Økt behov for naturgass knyttet til effektivitetstap kan øke utslippene. Det samme gjelder det økte behovet for elektrisitet, avhengig av hvor elektrisiteten kommer fra. Økt behov for elektrisitet og kan ha stor betydning da vi forventer kraftunderskudd i årene framover (NOU 2023: 3, s. 79).

#### *5.1.1.7 Produksjonskostnad*

Produksjonskostnad av hydrogen fra naturgass avhenger av både tekniske, økonomiske, og geografiske faktorer. Gassprisen (en del av driftskostnad) og investeringskostnad er de to viktigste faktorene for produksjonskostnaden (IEA, 2019; Zapantis, 2021). Større anlegg vil være mer kostnadseffektive enn små (Aanes & Norheim, 2019). I land med lav gasspris vil investeringskostnad være den største kostnadskomponenten, med en helhetlig kostnad på 12,75 NOK/kg H<sub>2</sub>. Motsatt vil gassprisen være den største kostnadskomponenten hvor prisen er høy. Helhetlig kostnad ved høy gasspris er 20,4 NOK/kg H<sub>2</sub>. Prisanslaget inkluderer en kostnad på transport og lagring av CO<sub>2</sub> på 170 NOK/t CO<sub>2</sub> Produksjon av 1 kg hydrogen med CCS produserer ca. 8-9kg CO<sub>2</sub> som krever transport og lagring (Zapantis, 2021; Sun & Elgowainy, 2019). Dette betyr at brenselskostnad står for mellom 45% og 75% av produksjonskostnaden. Fangst og lagring av CO<sub>2</sub> øker investeringskostnaden med 50%, og 10% for brensel. I gjennomsnitt vil dette doble driftskostnaden på grunn av transport og lagring av CO<sub>2</sub> (IEA, 2019).

LCOH, levelized cost of hydrogen, er en variabel som beskriver hvor mye det koster å produsere 1 kg hydrogen, hvor en inkluderer investeringskostnad og driftskostnad. LCOH for blått hydrogen varierer avhengig av fangstrate, gassreformerings teknologi, og pris på naturgass. LCOH varierer mellom 16 og 19,8 NOK/kg H<sub>2</sub> (Collodi et al., 2017; Khatiwada et al., 2022).



Kostnad for naturgass har derfor stor betydning for produksjonskostnaden til blått hydrogen. Naturgass er en begrenset ressurs, i tillegg ønsker EU å avkarbonisere gassmarkedet og CO<sub>2</sub>-avgiften vil øke (Finansdepartementet, 2021). Disse faktorene vil ha stor betydning for produksjonskostnaden til blått hydrogen i fremtiden.

#### *5.1.1.8 Ressursbruk - Vann*

Formel 1 og 2 viser det støkiometriske masseforbruket konsumert i den kjemiske reaksjonen ved gassreforming. Dette er det teoretiske vannkonsumet som kreves for reaksjonen, og er på 4,5 L H<sub>2</sub>O per kg H<sub>2</sub> (Saulnier et al., 2020). I praksis har prosessen høyere vannkonsum, knyttet til vannkvalitet, damptap og tap fra avkjøling i SMR-prosessen. Som beskrevet krever produksjon både damp, og WGS-reaksjonen produserer varme. Gassreformeringsprosessen krever derfor i praksis 15-40 L H<sub>2</sub>O per kg H<sub>2</sub> (Coertzen et al., 2022). I tillegg vil karbonfangst øke vannkonsumet. Dette grunnet avkjølingsbehov og komprimering av CO<sub>2</sub>. Prosessen fører til et økt vannkonsum på 18-44 L H<sub>2</sub>O per kg H<sub>2</sub>. Ferskvannsressurser er essensielle for mat og vannbehov, samt bevaring av naturmiljø. Energisektoren konkurrerer allerede med disse aspektene. I tillegg vil endring i klima resultere i økt forekomst av tørke (EEB, 2021).

#### *5.1.1.9 Ressursbruk - Naturgass*

Naturgass er brukt som råstoff for produksjon av hydrogen i SMR-prosessen. Beskrevet tidligere vil CCS øke behovet for gass grunnet effektivitetstap. Norge er den tredje største eksportøren av naturgass, og supplerer mellom 20-25 % av EU og Storbritannias naturgassetterspørsel. Dette fører til enorme inntekter. Samtidig er naturgass en begrenset ressurs. Grunnet krigen i Ukraina, og EUs ønske om å fase ut import av russisk gass, vil produksjon øke i årene fremover (IEA, 2022). Per 2022 var Norges gassreserve på 1469 milliarder Sm<sup>3</sup>. Reserve beskriver lønnsomme og påvist naturgassfelt (Norskpetroleum, 2023). Som nevnt er naturgass en begrenset ressurs og globalt er det anslått at ved fortsettelse av forbruk av naturgass i dagens tempo vil ressursen vare til 2060 (Howarth, 2019).

#### *5.1.1.10 Utslipp*

Karbonfangst fanger ikke all CO<sub>2</sub> som blir produsert gjennom produksjonsprosessen til hydrogen. Det totale utslippet av karbondioksid i produksjon av blått hydrogen innebærer også utslipp fra energi brukt til varme og trykk for å drive SMR, utslipp fra energi brukt til å drive



CCS, og indirekte oppstrøms utslipp fra produksjon og transport av naturgass (Howarth & Jacobson, 2021).

#### *5.1.1.11 Utslipp i Europa og beregninger av utslipp*

Utslipp av CO<sub>2</sub> ved dagens fangstteknologi i Europa varierer avhengig av verdikjedene knyttet til elektrisitet og naturgass. Ved en fangstrate på 56% rapporteres det utslipp fra 4,9 – 9,4 kg CO<sub>2</sub>eq per kg H<sub>2</sub>. Ved fangstrate på 90% rapporteres det utslipp fra 1,7 – 5,6 kg CO<sub>2</sub>eq per kg H<sub>2</sub>. Hvor lavalternativene beskriver naturgass og elektrisitet verdikjeder med generelt lave utslipp (Hermesmann & Müller, 2022). Til sammenligning vil produksjon uten CCS genererer utslipp fra 9-11 kg CO<sub>2</sub>eq per kg H<sub>2</sub> (DNV, 2022).

For å konseptualisere dette har vi beregnet hvor mye utslipp lavalternativene for 56% og 90% fangstrate medfører (Vedlegg 1 – (2) Utslipp blått hydrogen). DNV anslår i sin synteserapport at Norge har et fremtidig markedspotensial for hydrogen til nasjonalt bruk i år 2030 på ca. 250 000 tonn H<sub>2</sub>/år (Aarnes et. Al, 2019). Dette tilsvarer 8,2 TWt lagret i hydrogen, som etter bruk i brenselcelle resulterer i 4,1 TWt. Tilsvarende om lag 5,2% av norsk industri sitt forbruk på 77,7 TWt i 2022 (SSB, 2023).

I et anlegg med 56% fangstrate som produserer 250 000 tonn H<sub>2</sub> på ett år, vil utslippene være på 1,22 millioner tonn CO<sub>2</sub>eq. Dette tilsvarer årlig utslipp fra 845 689 biler, eller 29% av Norges bilpark. Ved 90% fangstrate vil utslippene være 427 500 tonn CO<sub>2</sub>eq. Dette tilsvarer årlig utslipp fra 296 338 biler, eller 10% av Norges bilpark.

#### *5.1.1.12 Dagens situasjon*

Per i dag er det kun to anlegg i som produserer blått hydrogen. Ett i Alberta, Canada og ett i Texas, USA. Ved disse anleggene fanges 50-60% av CO<sub>2</sub> -utslipp siden anleggene kun fanger CO<sub>2</sub> fra syntesegassen og ikke fra ovnrøygassen. Anleggene planlagt for Europa er anslått å ha fangstrater høyere enn 90% (Bauer et al., 2022). Per i dag eksisterer det ikke SMR anlegg med en slik fangstrate, men det har blitt demonstrert en tilsvarende fangstrate ved kullkraftverket Petro Nova i Texas (Howarth & Jacobson, 2021; Gorski et al., 2021).





#### *5.1.1.13 Forbedringspotensial knyttet til utslipp*

Ved gjenbruk av PSA «tail gases» etter CO<sub>2</sub> fangst kan en minke konsumet av naturgass med 8-10% sammenlignet med et anlegg uten CO<sub>2</sub>-fangst (Mueller-Langer et al., 2007). Videre er det mulig å bruke overskuddsdamp generert gjennom reformeringsprosessen til CCS for å unngå effektivitetstap (Balcombe et al., 2018).

#### *5.1.1.14 Forutsetninger*

For at blått hydrogen skal være konkurransedyktig mot grønt hydrogen sett i et klimaperspektiv må klimagassutslipp gjennom livssyklusen være mellom 2 – 3.5 kg CO<sub>2</sub>eq per kg H<sub>2</sub>. Dette forutsetter høy CO<sub>2</sub> fangstrate og lave metanutslipp. Dette innebærer metanutslipp under 0.3% sett i et GWP20 perspektiv (Bauer et al., 2022). GWP, «global warming potential» brukes for å sammenligne innvirkningen på global oppvarming av forskjellige gasser. Dette vil si at det måler hvor mye energi utslippene av 1 tonn av en gass vil absorbere over en gitt tidsperiode, relativt til utslippene av 1 tonn karbondioksid. Jo høyere GWP, desto mer oppvarmer gassen jorden sammenlignet med CO<sub>2</sub> over den samme tidsperioden (EPA, 2016).

#### *5.1.1.15 Metanlekkasje*

Metanutslipp gjennom hele verdikjeden til naturgass fra produksjon, prosessering, transport, og distribusjon vil påvirke det totale utslippet til blått hydrogen. For at produksjon av blått hydrogen skal karakteriseres som lavutslipp er en avhengig av lave metanutslipp fra verdikjeden. Tall fra Canada og USA viser store forskjeller mellom utslippstall fra olje- og gassnæringen og ekte utslipp. Det er og store forskjeller mellom ulike land og estimeringer på landsbasis er uklare på grunn av metodiske problemstillinger (Howarth & Jacobson, 2021). Utslipp gjennom naturgass verdikjeden i Norge beskrives å være på under 0,5% (Bauer et al., 2022). Dette er svært lavt sammenlignet med andre land. Lave utslipp til naturgass verdikjeden er en viktig forutsetning for at blått hydrogen skal være bedre enn grått hydrogen. Dette grunnet høyere energiforbruk for karbonfangst. (Howarth & Jacobson, 2021)

#### *5.1.1.16 Hydrogenlekkasje*

Metanlekkasje gjennom verdikjeden til naturgass kan, som beskrevet, føre til betydelige utslipp. Hydrogenlekkasje kan og forekomme gjennom verdikjeden til hydrogen. Hydrogen blir beskrevet som en indirekte drivhusgass. Dette fordi ved lekkasje til atmosfæren vil hydrogen forstyrre den atmosfæriske prosessen som kontrollerer mengden distribusjon av metan og ozon.

Begge gassene blir beskrevet som de viktigste drivhusgassene etter CO<sub>2</sub>. Denne forstyrrelsen fører til at metan sin livstid forlenges, og dermed kan varme klima lengre. Videre fører forstyrrelsen til økt konsentrasjon av ozon. Til slutt vil oksidasjon, overføring av elektron mellom to atomer, av hydrogen i stratosfæren føre til økt vanndamp som gjennom ulike prosesser vil føre til en varmende effekt på klima. Dette kan ha betydelig effekt på klima, spesielt på kort sikt. Noe som er problematisk da utslippskutt må skje raskt for å unngå katastrofal oppvarming av kloden (Ocko & Hamburg, 2022). Å sikre lave hydrogenutslipp vil derfor være viktig på kort sikt, likevel er det viktig å påpeke at utslipp knyttet til hydrogen vil være små sammenlignet med utslipp knyttet til CO<sub>2</sub> da utslipp er knyttet til lekkasje gjennom verdikjeden og ikke direkte utslipp fra forbrenning.

#### *5.1.1.17 Sammendrag*

Blått hydrogen betegner produksjon av hydrogen av naturgass med karbonfangst og lagring. Denne produksjonsmetoden kan være billigere enn produksjon av grønt hydrogen. Det er imidlertid høy usikkerhet knyttet til disse tallene da det ikke eksisterer storskala produksjon av hydrogen med CCS, og på grunn av usikkerheten knyttet til pris på naturgass i framtiden. Fangst og lagring vil påvirke effektivitetsgraden til anlegget negativt. Dette fører til økt behov for naturgass og elektrisitet. Dette kan være problematisk grunnet utslipp knyttet til naturgass verdikjeden, og kraftunderskuddet som er forutsatt i årene framover. Utslippene ved produksjon av blått hydrogen kan være betydelige og en rekke forbehold må tas for at produksjonsmetoden kan bli betegnet som lavutslipp. Disse forbeholdene er essensielle hvis storskala produksjon av blått hydrogen skal bli en realitet da utslippene kan bli tilnærmet produksjon uten CCS. Det er og viktig å påpeke at fangstteknologien som trengs ikke eksisterer i et blått produksjonsanlegg i dag. Samtidig er det en risiko for videre innlåsing i det fossile energiregimet ved bruk av blått hydrogen (Rosenow & Lowes, 2021). Da samfunnet allerede sliter med å avkarbonisere energisystemet vil en mulig forsinkelse av dette få store konsekvenser. Videre må hydrogenlekkasje begrenses for at dette ikke skal påvirke klima negativt. Sett i sammenheng med metanlekkasje kan dette føre til betydelige utslipp. I neste delkapittel vil grønt hydrogen bli forklart.

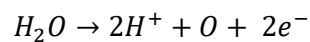
### 5.1.2 Grønn produksjon

Grønt hydrogen betegner produksjon av hydrogen gjennom elektrolyse hvor elektrisiteten kommer fra fornybare energikilder. Norges potensiale for fornybar energiproduksjon, mulighet for grønn industri, miljøargumentet og videreføring av opparbeidet velstand er argumentene for satsing på denne teknologien (Meld. St. 11 (2021–2022), s. 6). Dette kapittelet vil belyse hvordan grønt hydrogen blir produsert, og utfordringene knyttet til dette. I tillegg til produksjonskostnad, ressursbruk, og utslipp knyttet til grønn hydrogenproduksjon.

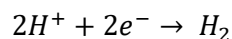
#### 5.1.2.1 Produksjon

I elektrolyseprosessen benyttes elektrisitet til å spalte vann til hydrogen- og oksyngengass. Elektrolysøren består av en katode, en anode, og en flytende eller fast elektrolytt (membran). Elektrisiteten starter en elektrokjemisk prosess ved anoden. Vannmolekyl spaltes til oksygenmolekyl, elektron, og hydrogenatomer ved anoden, vist i formel 3. De frie elektronene, og positive hydrogenatomene trekkes mot katoden, reagerer med elektronene, og danner hydrogenmolekyler (gass), som vist i formel 4. Hele reaksjonslikningen kan ses i formel 5 (Løfblad, 2019, s. 7).

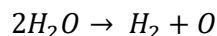
*Formel 3: Reaksjon Anode (Kumar & Himabindu, 2019)*



*Formel 4: Reaksjon Katode (Kumar & Himabindu, 2019)*



*Formel 5: Reaksjonslikning elektrolyse (Kumar & Himabindu, 2019)*



Det eksisterer flere produksjonsmetoder, hvor to er dominerende. Vi begrenser oss derfor til proton elektrolyttmembran (PEM), og alkalisk elektrolyse (AFC). PEM og AFC har like prosesser, men benytter ulike elektrolytter. PEM har en fast membran av edle metaller, mens AFC benytter en flytende elektrolytt, og andre metall til anode og katode, for eksempel nikkel (Ursin, 2021). Reaksjon ved katode og anode er og noe ulik, men reaksjonslikningen er lik (Kumar & Himabindu, 2019).



Alkalisk elektrolyse består av en katode og en anode som står i en alkalisk løsning. Katoden gir fra seg elektron som reagerer med løsningen og danner hydroksid. Hydroksidet reagerer ved anoden og oksideres til vann og oksygen, samtidig gir det fra seg elektronet hentet fra katoden. Prosessen opererer på 60-80°C, hvor produsert hydrogen har en renhet på > 99,9% (Pedersen, 2022).

PEM bruker rent vann og en fast membran hvor platina benyttes, ellers er prosessen lik alkalisk elektrolyse. Samtidig er PEM skalerbar da cellen er modulær, altså kan skaleres i størrelse, som gir fleksibilitet i produksjonskapasitet. Produsert hydrogen har noe lavere grad av renhet i forhold til AFC (Aarnes et al., 2019).

#### *5.1.2.2 Effektivitetsgrad*

Som nevnt tidligere kan energi verken skapes eller destrueres, bare omsettes. Enhver prosess hvor energi omsettes medfører energitap. Minimering av energitapet er viktig for en bærekraftig energibærer. AFC og PEM har effektivitetsgrad på henholdsvis 55-69% og 55-66% (Pedersen, 2022; Aarnes et al., 2019). For PEM er det estimert en mulig forbedring i effektivitetsgrad, opp til 62-74% innen 2030 (Aarnes et al., 2019), mens Alkalisk elektrolyse er antatt å ha stagnert.

#### *5.1.2.3 Produksjonskostnad*

Tilgangen til fornybar energi bestemmer produksjonskostnaden til grønt hydrogen. Topografi, geografi, politikk, og sosial aksept legger derfor føringer for kostnaden (Kumar & Himabindu, 2019; Patonia & Poudineh, 2022). Kapasiteten av fornybar energi bestemmer og størrelse på produksjonsanlegget, som igjen påvirker kostnad ved produksjon (Kumar & Himabindu, 2019).

Fordelen ved elektrolyse er lavt karbonavtrykk, fleksibel produksjon, fravær av giftige stoffer, og hydrogenets renhet. Edle metaller benyttet i membranen gjør storskala produksjon vanskelig (Barei et al., 2019). Membranen utgjør den største massen i elektrolysøren, og medfører store kostnader grunnet manglende tilgang på metallene (Ayers et al., 2010). Produksjonskostnad varierer fra 36 til 88,4 NOK/kg H<sub>2</sub> (Terlouw et al., 2022; Kumar & Himabindu, 2019)

Områder med god tilgang til billig fornybar energi og arbeidskraft har gode forutsetninger for å produsere grønt hydrogen til en mer konkurransedyktig pris. Ved bruk av elektrisitet fra



solcellepaneler har DNV, gjennom prøveprosjekt i Sør-Amerika og Afrika, demonstrert produksjon for 17 til 25,5 NOK/kg H<sub>2</sub> (DNV, 2019).

LCOH varierer med faktorene som inngår i produksjon, som størrelse, strømkilde, og vann- og nettilgang. Med utgangspunkt i solenergi, koster det mellom 41,7 til 50,2 NOK/kg H<sub>2</sub> (Khan et al., 2021).

#### *5.1.2.4 Ressursbruk*

Innsatsfaktorene i produksjon er ferskvann og elektrisitet. Det kreves 9 kg vann for å fremstille 1 kg hydrogen. Da omtrent 1% av verdens vannreserver er ferskvann, er avsalting og avionisering av saltvann en nødvendig fremgangsmåte for å imøtekomme etterspørselen. Estimert hydrogenforbruk på 2,3 Gigatonn per år vil følgelig kreve 20,5 Gigatonn vann. Dette utgjør om lag 0,0003% av saltvannreserve (Beswick et al., 2021). Konsum av elektrisitet, og følgelig materialbruk ved produksjon av elektrisitet, følger effektivitetsgraden vist i 5.1.2.2.

Et viktig moment under ressursbruk er bruken av edle metall i membranen i elektrolysørene. Platina og iridium er de foretrukne edle metallene for membran, men utvinningen er knapp og krever store mengder energi og vann (Granados-Fernández et al., 2021). Så knapp at det gjøres strategisk arbeid for å sikre større kvantum til fremtidig grønn omstilling (Hao et al., 2019). Sirkulær økonomi og resirkulering vil derfor være en forutsetning for storskala produksjon av grønt hydrogen grunnet knappheten til de nødvendige edle metallene. Materialistiske egenskaper hos metallene fremsetter utfordringer her og, spesielt i form av vann- og energibruk, samt temperatur, renhet, og utslipp av giftige gasser (Diac et al., 2020; Granados-Fernández et al., 2021). Forskingen på resirkuleringsmetoder ser lite fremgang (Zupanc et al., 2022).

#### *5.1.2.5 Utslipp*

Hvordan elektrisiteten produseres er sentralt i utregning av utslipp knyttet til produksjon av grønt hydrogen. På Eigerøy, med sin karbonfattige energiproduksjon, slippes det ut 1,3 kg CO<sub>2</sub> per kg H<sub>2</sub>. For karbonbaserte energisystemer kan det slippes ut opp til 41,4 kg CO<sub>2</sub> per kg H<sub>2</sub> (Terlouw et al., 2022). For at produksjon skal bli betegnet som grønn må elektrisitet komme fra fornybare energikilder.



### 5.1.2.6 Sammendrag

Grønt hydrogen betegner produksjon av hydrogen fra fornybar energi til å spalte vann. Produksjonsmetoden er noe dyrere enn blått hydrogen, noe som er tett knyttet til pris for fornybar energi. Det er imidlertid usikkerhet tilknyttet tallene da ingen storskala produksjonsanlegg for grønt hydrogen eksisterer, og følgelig har ingen demonstrert reell kostnad eller reell effektivitetsgrad. Produksjon av grønt hydrogen kan være konfliktfylt da Norge vil oppleve et kraftunderskudd i årene fremover. Stabil tilgang til fornybar energi er essensielt for å forsvarlig bygge ut storskala produksjon av grønt hydrogen. Samtidig må tilgang til ferskvann gjennom avsalting og avionisering etableres, og for oppskalering av nasjonal produksjon av grønt hydrogen må en sikre tilgang til edle metaller som blir brukt i elektrolyseren. Resten av verdikjeden vil være lik for både blått og grønt hydrogen. Videre vil lagring, transport, og applikasjon, sett i figur 3, bli beskrevet.

### 5.1.3 Lagring

Hydrogen har lav massetetthet per energimengde. Derfor er lagring av hydrogen problematisk og kostnadsintensivt. Øking av tetthet er energi- og kostnadskrevende. Avansert teknologi for nedkjøling og komprimering benyttes i de ulike prosessene, mens kostbart materiale og strenge prosedyrer må følges for oppbevaring. Dette fordi både nedkjøling og komprimering av hydrogen stiller tekniske krav til oppbevaringstankene. Samtidig er eksplosjons- og brannfare en sentral problemstilling ved lagring.

Under atmosfærisk trykk rommer 1 kg hydrogengass 11 m<sup>3</sup>. Det vil si at under normale atmosfæriske forhold opptar 1 kg hydrogengass 11 kubikkmeter med volum, eller 33,3 kWt energi per 11 kubikkmeter med volum. For økonomisk gjennomførbar lagring må tettheten økes slik at totalvolumet til gassen reduseres (Schlapbach & Züttel, 2001). Ulike metoder anvendes, og prosessene er komplekse. Sluttforbruker legger føringer for lagringsmetode, da ulike bruksområder har ulike behov. Renhet, fleksibilitet, og hyppighet av fylling er avgjørende faktorer som bestemmer lagringsmetode (Carpentis, 1982). Hydrogen kan lagres som 1) gass eller i flytende form, uten fysisk eller kjemisk binding til andre material, 2) absorbert i material, og 3) kjemisk bundet, eller kjemisk absorbert (Andersson & Grönkvist, 2019).

Grunnet oppgavens omfang vil vi her vektlegge de lagringsteknologiene som er demonstrert gjennom forskning og demonstrasjonsprosjekt. Metodene vi legger til sides er absorbert metall,



metallhydrider, intermetalliske hydrider, komplekse metallhydrider, og kjemiske hydrider foruten ammoniakk. Interesserte kan se vedlegg 3 for forklaring av disse metodene for lagring.

#### *5.1.3.1 Lagring av rent hydrogen*

Rent hydrogen har <0,01% forurensing fra andre grunnstoff. Dette er viktig for å ikke ødelegge membranen i brenselceller ved konsum av hydrogen. Rent hydrogen kan lagres i form av komprimert, eller flytende hydrogen. Dette er de eneste metodene anvendt i større skala (Tietze et al., 2016).

#### *5.1.3.2 Komprimert hydrogen*

Komprimering av hydrogengass gjøres ved trykksetting av gassbeholdere. Høyere trykk medfører høyere massetetthet (Witkowski et al., 2017). Kombinasjonen av mekanisk trykksetting og lagring under trykk byr på utfordringer. Trykksetting av større tanker krever materialer som kan motstå trykket, samtidig krever mekanisk arbeid ekstra energi relativt til trykk. Dette gjør at landbasert lagring sjeldent overgår 100 bar, mens underjordiske anlegg benytter 200 bar (Wolf, 2015). Høyere trykk krever mindre volum. Balanseringen mellom materielle egenskaper og driftskostnader er avgjørende for å redusere energitapet ved komprimering, som ligger mellom 5-20% (Witkowski et al., 2017; Gardiner, 2009). Kombinasjonen av volum og energibehov gjør dette til en mindre attraktiv form for langtidslagring, da store områder må benyttes, og resulterer i lav energieffektivitet og høye kostnader.

#### *5.1.3.3 Flytende hydrogen*

For å gjøre hydrogen flytende må temperaturen reduseres til under kokepunktet på 20 Kelvin (Aziz, 2021). Dette resulterer i et energikonsum på om lag 40% av total energi i hydrogenet (Moradi & Groth, 2019). En antatt fordel er at flytende hydrogen er lettere å transportere og lagre, og har høyere massetetthet, relativt til komprimert hydrogen (Cardella et al., 2017). Gitt det lave kokepunktet vil flytende hydrogen oppleve et energitap i form av «boil-off». Dette betyr at når temperaturen går over 20 Kelvin omsettes hydrogenvæsken til gass. Effekten kan reduseres ved kompleks teknologi, kostbare materialer, og design. Som ved bruk av sfæriske tanker som benytter glassfiber, aluminium, og karbonfiber, med flere lag isolasjon har bevist å redusere termodynamiske krefter (Klell, 2010). Energitapet er kontinuerlig og vil stå i proporsjon til volumet i tanken. Sfæriske tanker benyttes for å redusere volum-til-overflate-



forholdet, som er sentralt innen termodynamikken. Resultatet er daglig energitap på 3%-0,3%, proporsjonalt med volum fra 50 m<sup>3</sup> til 20 000 m<sup>3</sup> (Ghafri et al., 2022). Da boil-off ikke kan elimineres kreves kontinuerlig trykkregulering (Amos, 1998). Et slikt kontinuerlig energitap skaper en absolutt barriere for langtidslagring av flytende hydrogen. Samtidig vil den økonomiske kostnaden for å bygge betydelig lagringskapasitet være høy grunnet de tekniske kravene til lagring.

#### *5.1.3.4 Ammoniakk*

Ammoniakk (NH<sub>3</sub>) har modnet syntese, håndtering, transport, og oppbevaring gjennom utvikling i gjødselproduksjon (Klerke et al., 2008). Ammoniakk fremstilles ved å reformere naturgass til hydrogengass, så reagere med nitrogengass. Energitettheten er 5,2 kWt/kg NH<sub>3</sub>, som er vesentlig lavere enn hydrogen på 33,33 kWt/kg. Ammoniakk drar fordel av å være mer volumeffektiv, hvor hydrogen er mer tyngdeeffektivt. Produksjonsprosessen er eksoterm, krever trykk på 200-350 bar, og temperaturer på 300-500°C (Klerke et al., 2008). Varmegenereringen gjør produksjonen effektiv da damp benyttes for å skape trykket (Tunå et al., 2013). Fremdeles er ammoniakk ekstremt giftig grunnet nitrogenet. Det påpekes at ammoniakk gass rundt 400 ppm. er dødelig for mennesker, og selv mindre mengder resulterer i destruktive konsekvenser for biologisk liv (DNV, 2021). Samtidig er nitrogen en klimagass 300 ganger sterkere en CO<sub>2</sub>, noe som legger føringen for bruk av ammoniakk som energibærer (CDC, 2017; Robertsen, 2023)

#### *5.1.4 Distribusjon*

Oppbevaring og transport av hydrogen krever trykksetting, eller syntetisering til væskeform. Grunnet Joule-Thomson effekten må en ta forbehold om en rekke faktorer for å sikre trygg transport. Joule-Thomson effekten beskriver temperaturendring i en gass som beveger seg gjennom en åpning, et rør, eller en ventil (Ormestad, 2023). Ved transport av høyt volum eller over lengre avstander er det flytende hydrogen som er mest aktuelt, da flytende hydrogen er mer effektivt med hensyn til volum enn komprimert hydrogen (Aanes et al., 2019).

##### *5.1.4.1 Komprimert gassbeholder*

Komprimert hydrogen kan, avhengig av ønsket mengde, transporteres i gassbeholdere på tilhenger. Begrensingen i mengde kommer av volumbegrensning for lasten til rørhengeren. 25





000 liter hydrogen komprimert ved 200 bar tilsvarer om lag 420 kg hydrogen (Rödl et al., 2018). Dette er nærliggende en normal rørhenger til lastebil.

#### *5.1.4.2 Kryogen væsketanker*

Transport av flytende hydrogen kan gjøres med lastebil, tog eller skip. Ulempen med tog og lastebil er volum-til-overflate forholdet. Skip kan frakte hydrogen i større sfæriske beholdere, og følgelig redusere boil-off effekten (Zohuri, 2018). Fremdeles vil molekylær friksjon ved frakt fungere som en intern termodynamisk driver, hvor all bevegelse resulterer i varmedannelse og dermed resultere i energitap.

#### *5.1.4.3 Rørledning*

Rørledninger er den mest kostnadseffektive metoden for storskala gasstransport (Reddi et al., 2016). Eksisterende infrastruktur, kompetanse, og effektivitet legger grunnlag for denne transportmetoden for hydrogen. Samtidig er det den mest klimavennlige transportløsningen (Demir&Dincer, 2018). Risiko for samfunnskritiske ulykker som brann, eksplosjon, og lekkasje er og relativt lav i forhold til andre transportløsninger, men investeringskostnadene er store (Laureys et al., 2022). Eksisterende infrastruktur ødelegges av eksponering mot hydrogen, og krever videre forskning og investeringer for å forhindre dette. Grunnet hydrogenatomets størrelse vil det flykte gjennom andre molekylære sammensetninger og bryte molekylstrukturen. Fenomenet heter hydrogensprøhet (Johnson, 1874). Videre problematiseres transportmetoden med energitap og lekkasje (Witkowski et al., 2018).

#### *5.1.4.4 Utblandet med naturgass*

Da håndtering av hydrogen er vanskelig, kan det blandes med naturgass (HBNG) for så å fraktes via rørledninger. Naturgassen fungerer som en bærer for hydrogenet. Gassen blir så rensert for å hente ut hydrogenet nærmere sluttforbrukeren (Dehdari et al., 2022). Blandinger mellom 5-15% medfører små problem, mens 15-50% medfører omfattende modifikasjoner langs rørledningen for å opprettholde trykk (Reitenbach et al., 2015). Utblanding på 30% medfører og signifikant forbedring i Joule-Tomson effekten på nærmere 50% (Li et al., 2021). Samtidig vises det at blanding tidlig i transporten er mer effektivt enn å blande underveis (Zhou et al., 2022). Altså kan utblanding av hydrogen i naturgass gjøre det lettere å transportere selve hydrogenet fra produsent til konsument, men grensen går på 30% hydrogen i blandingen.



### 5.1.5 Fylling

Komprimert hydrogengass er eksoterm og vil gi fra seg varme under prosessen med fylling fra en beholder til en annen, grunnet Joule-Thompson effekten (Ormestad, 2023). Dette medfører komplikasjoner for materialbruk, bortføring av varme, og tap av energi. Energitapet varierer fra 2-10%, ut ifra trykk, mengde og hurtighet på fylling (Durbin & Malardier-Jugroot, 2013). Flytende hydrogen viser svakheter ved boil-off under fylling, grunnet lavt volum-til-overflateforhold i rør. Rundt 27% av energien er tapt ved fylling av flytende hydrogen (Petitpas & Aceves, 2018).

### 5.1.6 Applikasjoner

Identifisering av markedet og behov hos sluttbruker står sentralt grunnet 1) avklare krav til hydrogen, som renhet, volum og trykk, 2) utvikle teknologi for å konsumere hydrogen, og 3) skape samarbeid i industri for å kommersialisere den relevante teknologien (Forsberg, 2007). Her følger en gjennomgang av foreslåtte applikasjonsområder for hydrogen.

#### *5.1.6.1 Industri*

Om lag halvparten av hydrogenkonsumet i dag går med som helt nødvendig innsatsfaktor i ammoniakkproduksjon som videre benyttes i gjødselproduksjon. Hydrogenet produseres fra naturgass uten CCS, og resulterer i høyt karbonavtrykk (Pattabathula & Richardson, 2016). Andre industriområder viser potensial i bruk av hydrogen. Direkte antenning for varmereproduksjon utnytter en betydelig del av den potensielle energien, med energieffektivitet på rundt 80% (Panepinto et al., 2014). Grunnet godt potensiale for varmereproduksjon kan hydrogen erstatte kull og elektrisitet i høytemperatur industri. Samtidig vil antenning av hydrogen medføre renere, mer kostnadseffektive, og mer produktive produksjonsmetoder for blant annet jern og stål (Anameric & Kawatra, 2023).

#### *5.1.6.2 Elektrisitetsproduksjon*

Etterspørsel etter strøm varierer gjennom dagen og uken, mellom sesonger, med hensyn til temperatur og vind, og en rekke andre makrofaktorer. Resultatet er store variasjoner i strømprisen. Hydrogen gir en fleksibilitet som stabiliserer, hvor overskuddsstrøm fra fornybare kilder kan lagres, og tilbakeføres ved behov (Ruhnau, 2022). Det er to tilbakeføringsmetoder som er aktuelle, brenselcelle og antenning.

### 5.1.6.3 Brenselcelle

En brenselcelle er en elektrokjemisk forbrenningsmotor som omdanner kjemisk energi til elektrisitet. Prosessen er omvendt elektrolyse. Edle metaller (Platina og Iridium) i membranen medfører krav om høy grad av renhet i hydrogenet som benyttes for å forhindre slitasje (Pei et al., 2020). Brenselceller benytter ulike elektrolytter, og består av fem hovedtyper. Vi vil se på to av dem: 1) Protonutvekslingsmembran (PEM), og 2) Alkalisk brenselcelle (AFC). Interesserte kan se vedlegg 3 for en beskrivelse av de andre typene. PEM og AFC er de mest utbredte brenselcelleteknologiene. Forbrenningsprosessen er lydløs og uten vibrasjon. Kombinasjonen av nullutslipp, modularitet, og stillegående forbrenning gjør at elektrokjemiske brenselceller promoterer som en bedre løsning en forbrenningsmotor (Sharaf & Orhan, 2014).

PEM er mest lovende for kommersialisering. Kompakt utforming, operasjon ved lav temperatur og modularitet muliggjør mange applikasjonsområder (Shojaeefard et al., 2016). Effektivitetsgraden er mellom 47,6%-50,4% (Taner, 2018). Lav temperatur gjør den og effektiv til oppvarming av bygg (Wang&Appleby,2003). Forskning og utvikling viser tegn til mulig kostnadsreduksjon og effektivitetsøkning (Wang et al., 2021).

AFC er den eldste brenselcelleteknologien (The Royal Institute, 2022). Fordelen er marginal høyere effektivitet, og lavere kostnad relativt til PEM (Bidault et al., 2009). AFC benytter kaliumhydroksid som løsning (Merle et al., 2011). Grunnet sensitivitet til CO<sub>2</sub> foretrekkes ofte PEM (Gülzow & Schulze, 2004).

### 5.1.6.4 Antenning

Innen antenning eksisterer skillet mellom direkte antenning for varmereproduksjon, og antenning i turbin for elektrisitetsproduksjon. Altså om en skal produsere varme for høgetemperatur industri, eller produsere strøm for konsum. Direkte antenning i turbin for å drive mekanisk arbeid gjennom ekspansjon, for eksempel bevegelse i en turbin, har en virkningsgrad på 30% (Panepinto et al., 2014). Dette er betydelig lavere en antenning for varmereproduksjon og bruk i brenselcelle.

### 5.1.6.5 Transport

Hydrogen er foreslått som en energibærer for transportsektoren. Brenselcelle for tungtransport, og skips- og flytrafikk er områder regjeringens hydrogenstrategi belyser (Bru & Rotevatn,

2020). SINTEF, på bakgrunn av regjeringens Grønn plattform, forsker på bruk av ammoniakk som energibærer i skipsfart (Gabrieli, 2021). Airbus forsker på en brenselcelle til flyindustrien, med et mål om å være operasjonelle innen 2035 (AirBus, 2021).

#### 5.1.6.6 Desentraliserte markeder

Dersom kostnadseffektive verdikjeder til hydrogen blir oppnådd, kan hydrogen bli benyttet til oppvarming av vann, samt oppvarming og nedkjøling av bygg. Dette er desentraliserte områder som krever lite hydrogen. Det er derfor ikke gunstig å bruke hydrogen her før hele verdikjeden er kostnadseffektiv (Dodds et al., 2015).

#### 5.1.7 Risikovurdering av hydrogen

Hydrogen er brennbar ved romtemperatur, og brenner svakt blå og gjennomsiktig flamme. Under riktige forhold er flammen usynlig for mennesker. Dette byr på utfordringer og risiko ved håndtering av gassen, hvor en hydrogenlekkasje ikke gir visuelle spor (Kofstad & Pedersen, 2023).

Både flytende og komprimert hydrogen byr på utfordringer. Med kokepunkt på 20 Kelvin vil boil-off ved flytende hydrogen skape trykk som kan utsette tanken for stress. Uten trykkregulering kan tanken eksplodere. Samtidig har hydrogen høy viskositet, som gjør flytende hydrogen sensitiv for bevegelse og termodynamiske krefter (Keesom & Macwood, 1938). Ved komprimert hydrogen kan trykket til hydrogenet påvirkes av temperaturendring. En økning i temperatur vil medføre økt entropi, som igjen resulterer i høyere trykk og mer stress for tanken.

Risiko knyttet til viskositet spiller og en viktig rolle i transport av hydrogen, hvor alle transportmetoder innebærer økt molekylær friksjon. Dette medfører et energitap grunnet regulering av oppbevaringstankene for å motvirke eksplosjons- og brannfare. Følgelig vil transport av hydrogen stille krav til strenge tekniske kvaliteter ved transportløsningen.

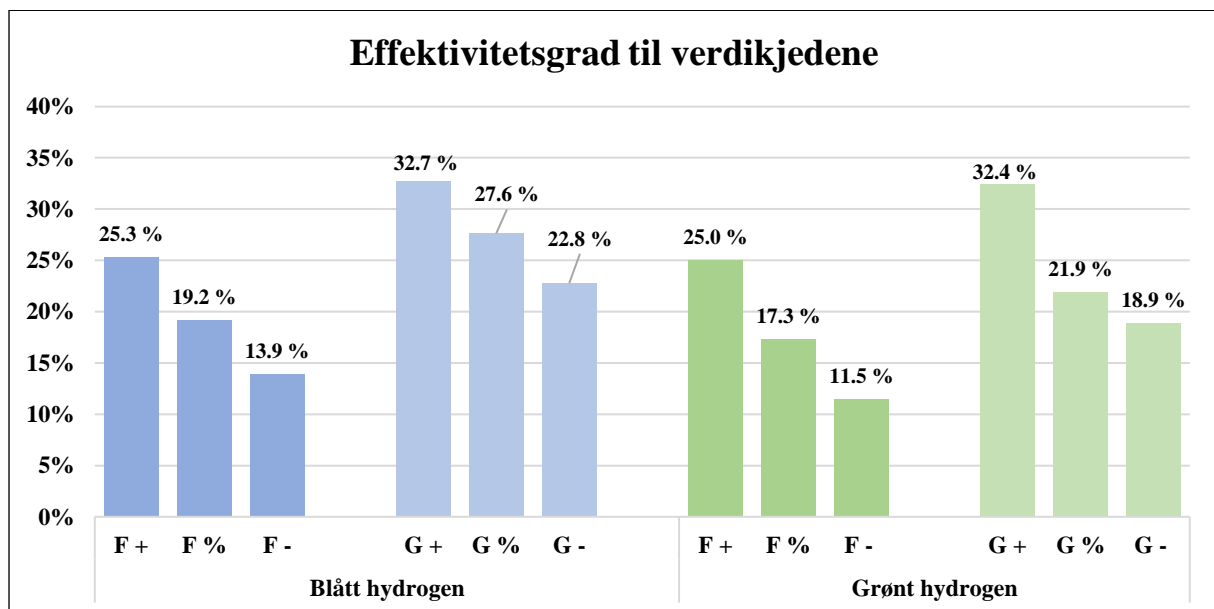
#### 5.1.8 Utrekninger

For å konkretisere effektivitetstapet gjennom verdikjeden beregner vi samlet effektivitetstap fra produksjon, lagring, fylling, og konsum av hydrogen. Det er regnet ut tre scenarioer, 1) Best case (+), basert på lavest effektivitetstap, 2) Worst case (-), basert på høyeste effektivitetstap, og 3) Gjennomsnitt (%), er gjennomsnitt av ytterpunktene. Grunnet oppgavens omfang ifm.



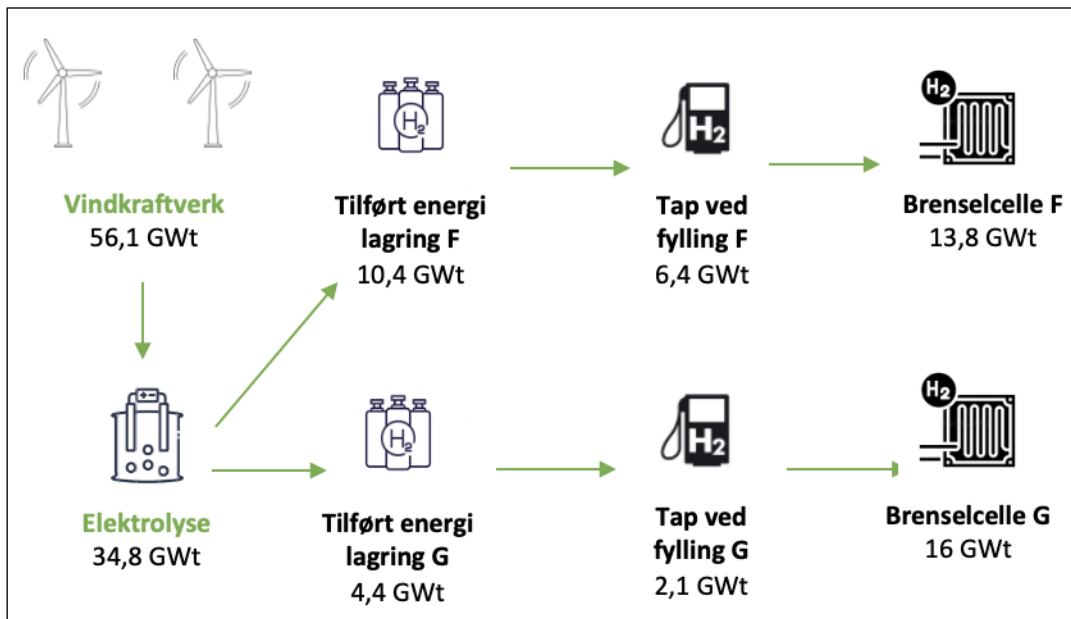
datagrunnlag ekskluderes distribusjon, og boil-off effekten. Samtidig på samme grunnlag ekskluderes «upstream» effektivitetsgrad hos både naturgassproduksjon og fornybar energiproduksjon. Fremdeles må det noteres at distribusjon medfører eksternt energibehov, boil-off medfører energitap over tid hos flytende hydrogen, og «upstream» aktivitet er energi- og arealkrevende. Vi inkluderer kun komprimert (G), og flytende lagring (F), da de har kommet lengst i teknologiutviklingsprosessen.

Fra Figur 5 viser diagrammet at effektivitetsgraden til blått hydrogen er marginalt bedre enn grønt. Scenarioene (+ og -) spriker drastisk. Teknologivalg i leddene, og lagringsform, vil ha stor betydning for endelig effektivitetsgrad til verdikjeden.



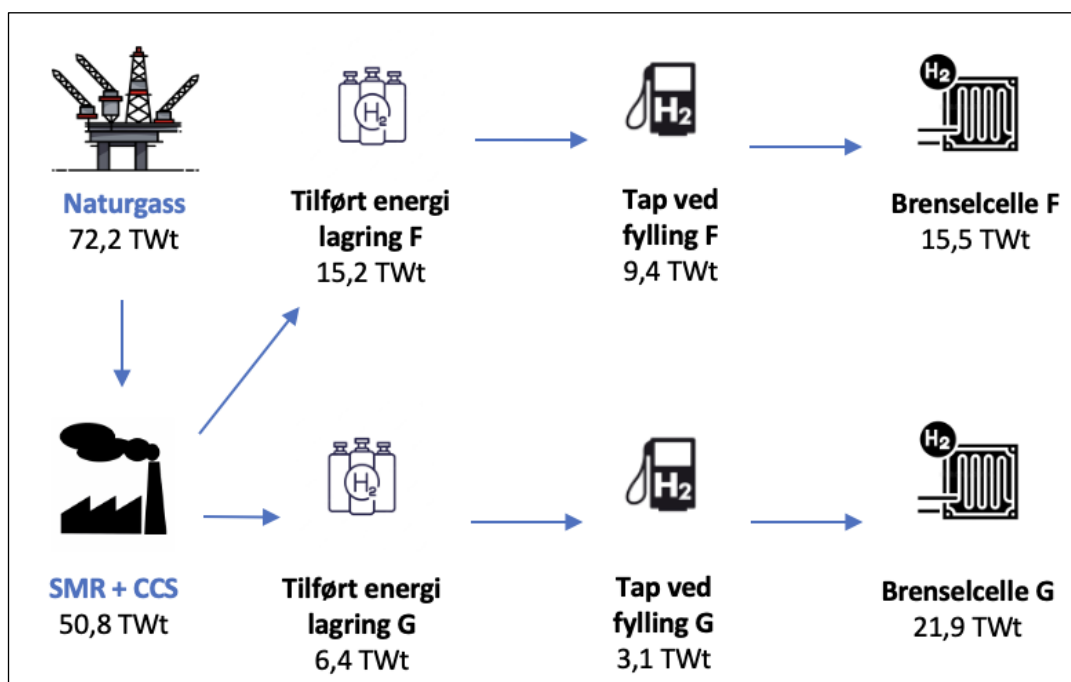
Figur 5: Effektivitetsgrad til verdikjedene for blått og grønt hydrogen (Vedlegg 1 – (1) Effektivitetsgrad)

Figur 6 og 7 visualiserer effektivitetstapet gjennom verdikjeden til grønt og blått hydrogen. Figur 6 viser verdikjeden fra elektrisitetsproduksjon til bruk i brenselcelle. Av 56,1 GWt fra vindkraftparken, får en ut henholdsvis 13,8 GWt (F) og 16 GWt (G) fra brenselcellen. Lagringsprosessen krever ekstra tilført energi. Totalt energikonsum er derfor vindkraftverk (56,1) + tilført energi ved lagring (10,4 (F), 4,4 (G)), som resulterer i 66,5 GWt (F), og 60,5 GWt (G). 13,8 GWt (F) krever altså 66,5 GWt elektrisitet, mens 16 GWt (G) krever 60,5 GWt.



Figur 6: Verdikjede for grønt hydrogen (Vedlegg 5). Se vedlegg for referanser.

Figur 7 viser verdikjeden fra naturgassproduksjon til bruk i brenselcelle. Av 72,2 TWt i gassekvivalenter, får en ut henholdsvis 15,5 TWt (F) og 21,9 TWt (G) fra brenselcellen. Som nevnt kreves ekstra tilført energi ved lagring. Totalt energikonsum er derfor naturgassproduksjon (72,2) + tilført energi ved lagring (15,2 (F), 6,4 (G)), som resulterer i 87,4 TWt (F), og 78,8 TWt (G). 15,5 TWt (F) krever 87,4 TWt energi, mens 21,9 TWt (G) krever 78,8 TWt (G).



Figur 7: Verdikjede for blått hydrogen (Vedlegg 5). Se vedlegg for referanser.

### 5.1.9 Sammendrag

Verdikjedene til blått og grønt hydrogen er komplekse, og preget av effektivitetstap i alle ledd som beskrevet i delkapittelet over.

I tillegg er det få standardiserte løsninger, og nødvendig infrastruktur for distribusjon eksisterer ikke. Det er en vesentlig forskjell i å frakte naturgass og hydrogengass. Det eksisterer infrastruktur for gasstransport, men grunnet hydrogens atomstørrelse må infrastrukturen oppgraderes for å motvirke hydrogensprøhet (Johnson,1874). Samtidig eksisterer ingen konsensus rundt applikasjonsform. Denne usikkerheten rundt applikasjonsform medfører usikkerheter langs hele verdikjeden, da applikasjonsform bestemmer renhet og lagringsmedium for hydrogenet, og følgelig hvilke teknologiske løsninger som trengs ved de ulike leddene.

Ved blå hydrogenproduksjon har vi identifisert utfordringer tilknyttet utslipp. Både ved produksjon da CCS ikke fanger 100% av utslipp, samt metanlekkasje til naturgass verdikjeden. Uten forbedring i CCS teknologi og CO<sub>2</sub>-håndtering kan utslippene være betydelige. Strengt utslippskrav vil derfor være helt nødvendig.

Ved grønn hydrogenproduksjon har vi identifisert utfordringer ved tilgang til ferskvann, tilgang til grønn elektrisitet, og tilgang til edle metaller. Grunnet oppgavens omfang har vi ikke anledning til å tallfeste utfordringene rundt edle metaller, annet en at de er betydelige og svært avgrensede for oppskalering av produksjonskapasitet. Tilgang til grønn elektrisitet blir utfordret grunnet forventet kraftunderskudd. Tilgang til ferskvann vil og kreve avsalting og avionisering, som igjen får konsekvenser for total energieffektivitet.

Blått hydrogen representerer en fortsettelse av petroleumsformuen, og risikoen for videre innlåsing i det fossile energiregimet er reell. Samtidig kan en ved satsing på blått hydrogen utsette satsningen på grønnere teknologier, som grønt hydrogen. Likevel er det denne teknologien som har best effektivitetsgrad og lavest produksjonskostnad noe som gjør det lettere å argumentere for en satsning på blått hydrogen. Blått hydrogen vil uansett være bedre enn alternativet, grått hydrogen. Grønt hydrogen representerer en fornybarsatsning og er en tryggere teknologi sett i et klimaperspektiv. Likevel kan økt elektrisitetsforbruk, økt vannforbruk, og økt etterspørsel av edelmetaller føre til negative virkninger sett i et helhetlig bærekraftperspektiv.



## 5.2 Organisasjon

Vi analyserer organisasjonsdimensjonen med bakgrunn i teorien tilknyttet teknologisk innovasjonssystem. TIS fremhever rollen til institusjonelle strukturer og viktigheten av aktørene for fremveksten av nye teknologier. Fremveksten av nye TIS forklares gjennom tre forskjellige strukturelle prosesser. Disse innebærer inntreden av nye organisasjoner og bedrifter, etablering av nettverk, og institusjonell tilpasning (Hanson et al., 2011, s. 47). Vi fremhever to av disse prosessene gjennom et romlig aspekt. Fra nasjonale nettverk, til regionale klynger og lokale prosjekt. Nettverkene, klyngene, og aktørene er valgt ut ifra hva vi har ansett som sentrale i utviklingen av hydrogenverdikjeden.

### 5.2.1 Nasjonalt – Nettverk

Nasjonale nettverk er samling av bedrifter og relaterte kunnskapsmiljøer som er koblet sammen gjennom likhet i interesse og behov. Nettverk beskrives å ha en viktig rolle i formasjonen av teknologiske innovasjonssystem. (Musiolik et al., 2012).

#### 5.2.1.1 Norsk hydrogenforum

Norsk hydrogenforum (NHF) er den nasjonale bransjeorganisasjonen for hydrogenteknologi. Etablert i 1996, bestående av representanter fra næringsliv som transport- og industrisektoren, forsknings- og utdanningsinstitusjoner, og myndigheter og interesseorganisasjoner (NOU 2004: 11, s. 28). Blant de største medlemmene finner en Equinor, Aker Solutions, Statkraft, SINTEF, DNV, NTNU, HVL, Innovasjon Norge, Samferdselsdepartementet, ZERO, og Fylkesnettverket (NHF, u.å.-b).

NHF påtar seg som primær oppgave å fungere som et konstruktivt bindeledd mellom partene og prosessene, med mål om å sikre gunstige rammevilkår for ammoniakk og hydrogen. Samtidig skal NHF være kunnskapsformidler og talerør for ammoniakk- og hydrogenbransjen. NHF beskriver å være med i en rekke prosjekter. De bidrar blant annet med kunnskapsformidling, prosjektledelse, partnerskap, kartlegging og kompetanse. I tabell 1 er det beskrevet et utvalg hydrogenprosjekter fremhevet av NHF (NHF, u.å.-c).

Tabell 1: Prosjektaktivitet NHF (NHF, u.å.-c)

Prosjektnavn	Beskrivelse	Aktører
Next Wave	Jobber for å styrke det nordiske samarbeidet for hydrogen	Hydrogen Denmark, Everfuel, Islandic New Energy, Vätgas





	infrastruktur for tyngre kjøretøy. Økonomisk støtte fra Nordic Innovation.	Sweden, VTT Finland, Kunnskapsbyen Lillestrøm.
<b>FCH Observatory</b>	Samarbeidsprosjekt hvor NHF bidrar til input til kartlegging av produksjon og bruk av hydrogen fra norsk side.	E4tech, Hydrogen Europe, DWN, HGF, NEN, innoloop, Inycom, Concepto GDI Sàrl + 35 land deriblant Kina, Canada, USA, Norge.
<b>Grønt landtransportprogram</b>	NHO ledet program for reduksjon av klimagasser fra tungtransport. Tildelt 1,5 mill kr fra KLD.	Posten, Postnord, ASKO, Statkraft, Viken Hydrogen, Rema Distribusjon + 54 andre transportaktører og 25 medlemsorganisasjoner.

### 5.2.1.2 Fylkeskommunalt hydrogennettverk

Det Fylkeskommunale Hydrogennettverket ble opprettet i 2017. Nettverket består av fylkeskommunene Agder, Nordland, Vestfold og Telemark, Møre og Romsdal, Troms og Finnmark, Rogaland, Vestland, Viken, og Trøndelag. I tillegg til fylkeskommunene er og kommunene Trondheim, Bodø, Berlevåg, og Oslo med. Arbeidet finansieres av deltakerne og har siden start fått finansiering fra Miljødirektoratet gjennom deres støtteordning til klimareduserende tiltak, Klimasats. (Miljødirektoratet, 2023). Norsk hydrogenforum er sekretariat for Fylkesnettverket (NHF, 2022a).

Grunnet regionale myndigheters sentrale rolle i arbeidet med utfasing av fossile energibærere og fremme lav- og nullutslippsløsninger skal nettverket bidra til å styrke dette arbeidet. Nettverkets formål er å bidra til å danne fungerende verdikjeder for hydrogen på alle nivå; lokalt, regionalt og nasjonalt. Dette skal gjøres gjennom å formidle erfaringer og kompetanse om hydrogen, og styrke samarbeidet mellom fylker og koordinere offentlige hydrogeninitiativer (Miljødirektoratet, 2023). Ulik geografisk plassering og konkurransefortrinn fører til ulik satsing på produksjon, distribusjon, og applikasjonsområder. Koordinering og kunnskapsformidling på tvers av fylkene er derfor viktig for blant annet koordinering av aktiviteter (NHF, 2022a). Nettverket mener at de har i løpet av sin levetid vært utløsende for konkrete offentlige og private hydrogentiltak, og bidrar til å styrke hydrogenkompetansen i fylkeskommunene og kommunene (Miljødirektoratet, 2022a).

### 5.2.1.3 Agder H2

Agder H2 startet i 2022, er et hydrogennettverk med mål om å «løfte Agder som et nasjonalt knutepunkt for hydrogen og andre energibærere» (Agder H2Nettverk, u.å.). Nettverket består av 67 medlemmer. Partnerne i nettverket er klyngen GCE NODE, Greenstat, Nikkelverket, Agder Energi, Universitet i Agder, NORCE, Agder fylkeskommune og Business Region Kristiansand (Næringsforeningen, 2022). Agder H2 får støtte fra Enovas knutepunktsatsning «hydrogen til maritim bruk». Agder er en av fem nasjonale knutepunkt som skal forsyne maritim sektor med hydrogen. Knutepunktet skal levere grønt komprimert hydrogen til maritim bruk (Greenstat, u.å.). Knutepunktet ledes av selskapene Everfuel og Greenstat, i samarbeid med etablert industri i EYDE klyngen og andre aktører (NTB, 2022). De andre fire knutepunktene er lokalisert i Glomfjord, Rørvik, Hitra og Florø (GCE Node, 2022).

## 5.2.2 Regionalt – Klynger

Klynger er en samling av bedrifter og relaterte kunnskapsmiljøer, som er koplet sammen gjennom likhet i interesser og behov (Innovasjon Norge, u.å.). Næringsklynger beskrives å fremme forskning, innovasjon og nyskaping. Gjennom samarbeid kan grupper av bedrifter og kunnskapsaktører utløse synergier (Eide & Johansen, 2021, s. 18). Det eksisterer to rene hydrogenklynger i dag, men en rekke andre klynger med ulik bransjesammensetning har og flere hydrogenprosjekter.

Norwegian Innovation Clusters er et statlig finansiert klyngeprogram, hvor Nærings- og fiskeridepartementet og Kommunal- og distriksdepartementet finansierer programmet. Programmet hevder å bidra til verdiskaping gjennom bærekraftig innovasjon. Programmet er et samarbeidsprosjekt mellom Innovasjon Norge, Siva og Forskningsrådet. Programmet består av ulike nivåer som alle ble iverksatt fra begynnelsen av 2000-tallet til 2019 (Innovasjon Norge, 2023).

### 5.2.2.1 H2Cluster – Den norske hydrogenklyngen

H2Cluster er en nasjonal hydrogenklynge etablert i 2020, med hovedkontor i Lillestrøm, Med mål om samarbeid for å etablere nye fortetningsmuligheter og overkomme barrierer knyttet til økt bruk av hydrogen. Klyngen tar for seg hele verdikjeden til hydrogen. Blant annet er klyngen koordinator for det første hydrogeneksport programmet mellom Norge og Tyskland (H2Cluster, u.å.-c). H2Cluster har til nå holdt én konferanse for verdikjeden til hydrogen, hvor en rekke



aktører bidrog med innspill, statusoppdateringer, og gjennomgang av dagens status (H2Cluster, u.å.-b).

Klyngen består av en rekke partnere, blant annet industriaktører langs hele verdikjeden, FoU-partnere, sluttbrukere og nettverk som Agder H2. Store aktører i klyngen er Equinor, DNV, Greenstat, Yara, Kongsberg Maritim, Viken Hydrogen, Sintef, NEL og Statkraft (H2Cluster, u.å.-a).

#### 5.2.2.2 Ocean Hyway Cluster

Ocean Hyway Cluster er den andre rene hydrogenklyngen i klyngeprogrammet Norwegian innovation Clusters. Dette er en nasjonal klynge med hovedkontor i Florø, grunnlagt i 2019. Klyngen har fokus på maritim sektor. Klyngen ønsker å gjøre Norge ledende i hydrogensatsingen globalt (Ocean Hyway Cluster, u.å.-a).

Klyngen består av en rekke partnere langs hele hydrogen verdikjeden, FoU-partnere, skipsdesign og rederier og andre klynger med fokus på maritim sektor. Store aktører i klyngen er Equinor, Greenstat, Statkraft, DNB, Sintef og Topeka. (Ocean Hyway Cluster, u.å.-b). Ocean Hyway Cluster har syv prosjekter gående. Tabell 2 beskriver kort prosjektene og involverte aktører.

Tabell 2: Prosjektaktivitet Ocean Hyway Cluster (Ocean Hyway Cluster, u.å.-b)

Prosjektnavn	Beskrivelse	Aktører
<b>HyInfra</b>	Kartlegging av hydrogen infrastrukturprosjekter innen maritim industri.	Eget klyngeprosjekt.
<b>Zero Emission Supply Chain Program</b>	Identifisere eksisterende initiativ, og generere nye prosjekter knyttet til avkarbonisering av verdikjeder.	Neptune Energy Norway, Equinor.
<b>Viridis Bulk Carriers: FlexBULK NH3 Power</b>	Utvikling, bygge og drifte kortdistanse bulkskip med ammoniakk som drivstoff støttet av batterier. Tildelt 13,8 mill kr fra Pilot-E.	Amon Maritim, Kongsberg, Elkem, Vestkorn, BioMar, Navigare Logistics AS, Franzefoss Minerals, Viken At market, Sintef, Salt Import, YARA, Mosvolds Rederi.
<b>Ammonia Fuel Bunkering Network</b>	Utvikle og demonstrere ett ammoniakk bunkringsnettverk for skip. Tildelt 89 mill kr fra	Econnect energy, Amon Maritime, Fjord Base, YARA, Viridis, Sintef, Hyex Saftey, Global Ocean Technology.

	Norwegian Green Platform Initiative.	
<b>HyFuel</b>	En av fem hydrogenknutepunkt tildelt støtte fra Enova. Produksjon av komprimert grønt hydrogen, og LOHC til maritim transport. Tildelt 132 mill kr i støtte fra Enova (SFE, 2022).	Fjord Base, Sogn og Fjordane Energi og Gasnor.
<b>Green Destination Vestland</b>	Studere potensiale for grønn maritim turisme i Vestland. Tildelt 395 000 kr fra Vestland fylkeskommune.	«Sammen med medlemmer og andre bedriftsaktører».
<b>Deep Purple pilot project</b>	Produksjon av hydrogen fra sjøvann med el fra havvind, lagring av hydrogen på havbunnen for bruk ved etterspørsel. Tildelt 12,5 mill kr av forskningsrådet og 9,6 mill kr fra Innovasjon Norge.	TechnipFMC, Vattenfall, Repsol, Slåttland, NEL, ABB, UMOE Advanced Composites, DNV, Sintef, USN, GCE Technology, Energy Valley.

### 5.2.2.3 Renergy

Renergy er en fornybar energi klynge, dannet i 2017. Klyngen jobber for omstilling til fornybarsamfunnet og bærekraftig verdiskaping gjennom innovasjon, produksjon, og effektiv utnyttelse av fornybar energi. Relasjonsbygging mellom organisasjoner og bedrifter for å utfordre allerede etablerte strukturer i energisektoren står sentralt. De representerer hele verdikjeden innen fornybar energi (Renergy, u.å.-a). Store aktører i klyngen er Equinor, Enova, Gasnor, Greenstat, Sintef, og Statkraft (Renergy, u.å.-b). Tabell 3 viser noen utvalgte prosjekter klyngen er deltaker i.

Tabell 3: Prosjektaktivitet Renergy (Renergy, u.å.-b)

Prosjekt	Beskrivelse	Aktører
<b>Rørvik hydrogenknutepunkt</b>	Gjøre grønt komprimert hydrogen til et konkurransedyktig drivstoff for maritim transport, med produksjon av grønt hydrogen. Tildelt 125,7 mill kr fra Enova.	NTE Energy, H2 Marine.
<b>MAREN</b>	Nordisk samarbeidsnettverk. Framskynde overgang fra fossile til grønne energikilder i maritim sektor.	SINTEF.
<b>ZeroKyst</b>	Utvikle konkurransedyktig, utslippsfri verdikjede for	Selfa, SINTEF, NTNU.

	hydrogen-elektriske nytte-, havbruks- og fiskefartøy. Prosjektet har fått tildelt 120 mill kr fra Grønn Platform.	
<b>Utslippsfri arbeidsbåt for havbruk</b>	Utvikle og bygge hydrogen-elektrisk arbeidsbåt. Etablere komplett infrastruktur for produksjon og distribusjon av komprimert grønt hydrogen. Tildelt 28 mill kr fra Enova.	SINTEF, Salmnor, NTE, H2 Marine, MOEN.

#### 5.2.2.4 GCE Node

Klyngen er industri-dreven med hensyn til havteknologi, dannet i 2006. De engasjerer seg i prosjekt som fremmer 1) økt konkurransevne innen eksisterende markeder som maritim, og olje og gass, og 2) overføring av teknologi og kompetanse til nye markeder innen blå vekst (GCE Node, u.å.-b). De organiserer flere forum og nettverk for å styrke samarbeid og kunnskapsspredning mellom klyngeselskapene. Forskning, utvikling, testing og kommersialisering av ny teknologi, og overføring av kompetanse fra eksisterende til nye markeder er kjernen av klyngen. Samarbeidet strekker seg mellom forskningsinstitutt, kommersielle industriaktører, og investorer. De største aktørene er Aker Solutions, DNB, DNV, Equinor, og Greenstat (GCE Node, u.å.-a). Tabell 4 viser noen av prosjektene GCE Node er med i (GCE Node, u.å.-b).

Tabell 4: Prosjektaktivitet GCE Node (GCE Node, u.å.-b)

Prosjekt	Beskrivelse	Aktører
<b>Agder H2 Nettverk</b>	Bredt partnerskap av private og offentlige aktører som skal synliggjøre hva Agder kan bidra med i nasjonal hydrogensatsing. Løfte Agder som nasjonalt knutepunkt for hydrogen og andre energibærere.	Everfuel, Greenstat, NHF, H2Cluster, Hydrogen24.
<b>FME HyValue</b>	NORCE-ledet forskningssenter. Utvikle metodologi, og innovative løsningen for hydrogen som energibærer, og bygge og støtte en kompetitiv hydrogensektor. Tildelt 15 mill kr hvert år i 8 år fra Forskningsrådet (Iversen & Nøttveit, u.å.).	NORCE, Equinor, Hydro, Greenstat, Gassco, Sjøfartsdirektoratet, Shell, Statkraft, Vestland fylkeskommune, MIT. (HyValue, u.å.).



### 5.2.2.5 NCE Maritime CleanTech

NCE Maritime CleanTech er en næringsklynge som beskriver seg selv å være en verdensledende kommersiell klynge for utvikling av rene maritime løsninger. Klyngen ble dannet i 2011. De forklarer at de bruker norsk maritim kompetanse sammen med deres partnere som springbrett for å utvikle energieffektive og bærekraftige teknologier. De forteller at gjennom samarbeid etablerer de grønne og banebrytende prosjekter med globalt kommersielt potensial (Maritime CleanTech, u.å.-a). Klyngen består av til sammen 150 partnere med virksomheter fra hele den maritime verdikjeden, fornybar energi aktører, og FoU-partnere. De største aktørene er Corvus Energy, DNV, DNB, Equinor, Greenstat, og Sintef (Maritime CleanTech, u.å.-d). Tabell 5 viser de mest relevante prosjektene klyngen deltar i.

Tabell 5: Prosjektaktivitet NCE Maritime CleanTech (Maritime CleanTech, u.å.-e)

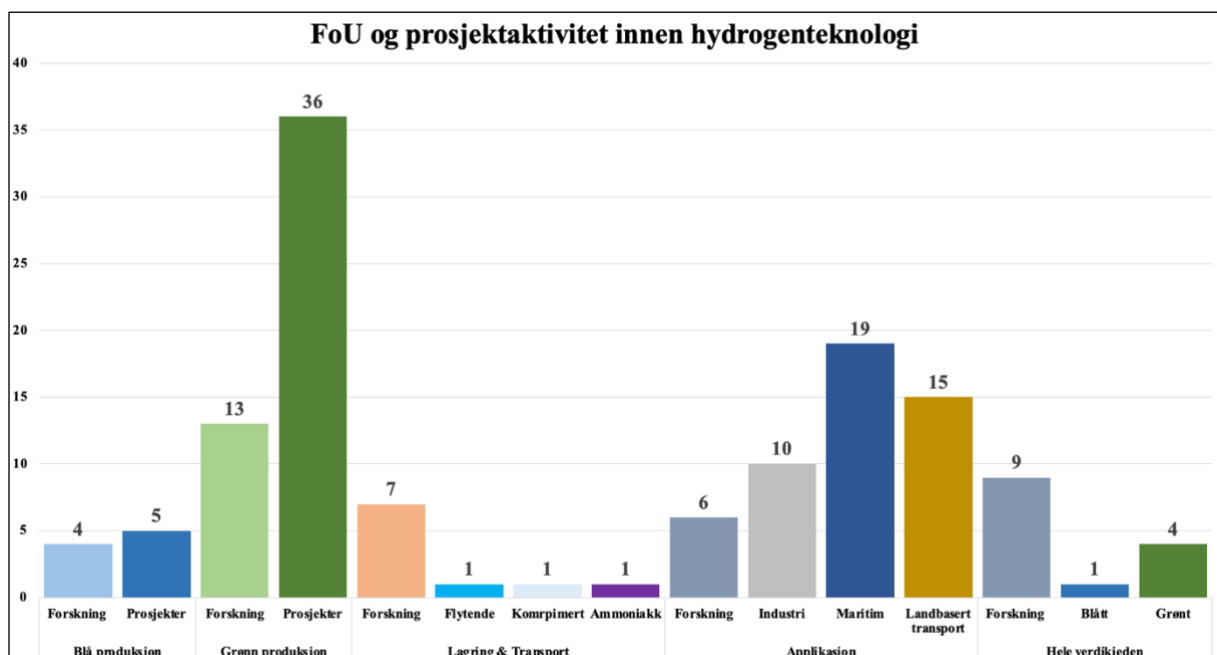
Prosjekt	Beskrivelse	Aktører
<b>Flagships – Hydrogen vessels</b>	Utvikling av to kommersielle hydrogen brenselcelle drevne lastefartøy. Tildelt 5 mill EUR fra EU (Maritime CleanTech, u.å.-b).	Future Proof Shipping, Norled, SEAM, LMG Marin + 9 EU partnere (Maritime CleanTech, u.å.-b).
<b>ShipFC – Green Ammonia Energy System</b>	EU finansiert prosjektet skal demonstrere at langdistanse nullutslippsreiser med høy effekt på større skip er mulig. Skipet Viking Energy skal drives på grønn ammoniakk.	Eidesvik, Equinor, Wärtsilä Norge, Alma, Yara, North Sea Shipping, Sustainable Energy Catapult + 6 EU partnere (ShipFC, u.å.).
<b>Hydrogen PSV</b>	Klyngeprosjekt for konseptutvikling av hydrogendrevet plattformforsyningsfartøy i kombinasjon med batteri og brenselcelle.	Equinor, Wärtsillä Ship Design.
<b>ZeFF – Zero Emission Fast Ferry</b>	Utvikling av hurtigbåt drevet av batteri for korte distanser, og hydrogen for lengre distanser. Tildelt 10,5 mill nok fra Pilot-E.	Norled, Selfa Arctic, LMG Marin, Hyon, Servogear.
<b>H2NOR Fuel Cell</b>	Utvikling og demonstrasjon av et maritimt hydrogen brenselcellesystem. Tildelt 5,9 mill EUR fra innovasjon Norge og Forskningsrådet (Maritime CleanTech, u.å.-c).	Corvus Energy, Toyota, Equinor, Norled Wilhelmsen, USN, LMG Marin.
<b>Pilot-E: Value chain for green liquid hydrogen</b>	Utvikling av en komplett verdikjede til flytende hydrogen for maritime applikasjonsområder.	BKK, Equinor, Air Liquide, NORCE, Norled, NorSea Group, Viking Ocean Cuisines, Wilhelmsen.

<b>MF Hydra</b>	Verdens første flytende hydrogendrevne bilferje. Tre modus batteri plugg-in, ren hydrogen-modus eller biodiesel. Satt i drift 31.03.23 (TU, 2023).	Norled, LMG Marin, Westcon Power & Automation, Prototech.
-----------------	--	---

### 5.2.3 Lokalt – Prosjekter

Prosjektaktiviteten er vist i søylediagrammet i figur 8. Dette er gjort for å få et tydelig bilde av prosjektaktiviteten gjennom verdikjeden. Grunnlaget diagrammet er NHF sin samling av prosjekter (NHF, 2023b). Diagrammet skiller mellom forskningsprosjekter og realiserte prosjekter, blått og grønt hydrogen, ulike lagringsteknologi og ulike sektorer ved applikasjon (vedlegg 4 – FoU og prosjektaktivitet, viser en skjematisk oversikt over disse prosjektene).

Figur 8 viser skjevheten i realisering av prosjekter mellom grønn og blå hydrogenteknologi. Prosjektaktiviteten innen grønn produksjon har et stort flertall sammenlignet med blå produksjon med 36 over 5 prosjekter. Forskning innen grønn produksjon veier og en god del tyngre enn blå produksjon. På tross av forskning innen lagring og transport, er det liten prosjektaktivitet. Når det gjelder applikasjon viser figur 8 til et flertall i transport; særlig maritim. Det er mye forsket på hvordan å utvikle hele verdikjeden, men en ser det ikke er praktisert i stor grad ettersom det er færre realiserte prosjekt.



Figur 8: Prosjektoversikt fra NHF (Vedlegg 4 – FoU og prosjektaktivitet)

## 5.3 Diskurs

I dette kapittelet beskrives den overordnede diskursen, og narrative tilknyttet hydrogen. Vi følger verdikjeden og beskriver narrativ knyttet til produksjon, lagring og distribusjon, og applikasjon. Alle disse områdene kan beskrives som individuelle TIS, men i denne oppgaven ser vi på dem om underområder i et overordnet TIS.

Teknologisk innovasjonssystem legger vekt på at innovasjon er en systemisk prosess som ikke bare er drevet av teknologi og vitenskap. Aktørene, nettverkene, og institusjonene er viktige drivere for innovasjon. Narrativ beskriver fortellingene fortalt av aktørene, og disse narrative kan knyttes til samme diskurs, samtidig kan narrativ bygge på flere diskurser. Hvor diskurs kan beskrives som en praksis som former de sosiale objektene vi snakker om, er narrativ en organisering av kunnskap og betraktninger i en fortellerform. Diskursen setter altså premisser for fortellingen (Aasebø, 2021). Narrativ fortalt av, og mellom, aktører, nettverk, og institusjoner vil påvirke teknologisk utvikling og den teknologiske banen til innovasjonen. Den overordnede diskurser er at hydrogen har en sentral og viktig rolle i energiomstillingen, og narrative er derfor tett knyttet til dette (Regjeringen, 2022b).

### 5.3.1 Produksjon

Den overordnede diskursen til hydrogen er sentrert rundt hurtig klimaomstilling og kutt i klimagassutslipp. Det er en generell konsensus blant aktørene at hydrogen vil ha en sentral og viktig rolle i energiomstillingen, da hydrogen er en nullutslipps energibærer. Samtidig er det et sterkt fokus på narrative om «grønn vekst» og verdiskaping knyttet til hydrogensatsingen (OED&KLD, 2020, s. 8). Språkbruken rundt hydrogen er blant aktørene generelt preget av store lovnader og sterke ord, som «sentral», «helt nødvendig», «hovedfaktor i det grønne skiftet» og «nøkkelrolle» (OED & KLD, 2020; Ødegård, 2020; NHF, 2023a; Equinor, 2020; Aasland, 2022).

#### 5.3.1.1 Blått hydrogen

Ulike nettverk og aktører vil på bakgrunn av sin virksomhet og lokalisering, promotere ulike produksjonsmetoder. Blått hydrogen blir beskrevet som en mellomløsning i omstillingen til grønt hydrogen (Oyarzabal et al., 2022). Dette fordi blått hydrogen blir fortalt å ha lavere produksjonskostnad, bedre energieffektivitet og mulighet til å skalere opp produksjon raskere enn grønt hydrogen (Meld. St.11 (2021–2022), s. 77). Blått hydrogen kan bety en fortsettelse



av olje- og gassvirksomheten til Norge. Denne diskursen har flere narrativ. Regjeringen og andre aktører knyttet til olje- og gassindustri beskriver dette som en mulighet for å sikre og videreutvikle petroleumsformuen. Blått hydrogen blir fortalt å kunne bidra til et «grønt industriløft» for olje- og gassindustrien, hvor en kan dra fordel av den eksisterende næringen som skal videreutvikles (Riekeles & Seland, 2020: 18). Dette skal bidra til økt verdiskaping og eksport. Videre blir det beskrevet hvordan «blått hydrogen er ett av svarene på hvordan vi kan bygge bro mellom utviklingen på norsk sokkel og målene fra Paris-avtalen (Equinor, 2023). Fortellingene sentrerer seg rundt Norges gassressurser og kompetanse, samt mulighet til å lagre CO<sub>2</sub> på norsk sokkel som et konkurransefortrinn. På den andre siden problematiserer noen miljøorganisasjoner hvordan blått hydrogen kan bety en fortsettelse av olje- og gassvirksomheten til Norge, samtidig som det fortsatt er knyttet utslipp til blått hydrogen og økt energibruk ved karbonfangst (Holger, 2021).

#### 5.3.1.2 Grønt hydrogen

Diskursen til grønn hydrogenproduksjon er sentrert rundt Norges kraftoverskudd og klima- og miljøargumentet (Meld. St. 11 (2021-2022), s. 63). Grønt hydrogen har høyere legitimitet enn blått i henhold til klima og miljø, grunnet lave utslipp knyttet til produksjon. Diskursen til grønt hydrogen kan i store trekk deles inn i to narrativ. Hvor noen beskriver eksisterende infrastruktur knyttet til fornybar energi og mulighet til å utnytte overskuddskraft fra fornybar kraft som konkurransefortrinn, er det på den andre siden toneangivende fortellinger om grønn hydrogenproduksjon som «sløsing med strøm», og høye produksjonskostnader problematiseres. Grønn hydrogenproduksjon forutsetter utbygging av fornybar energi, noe som betyr beslag av areal. Narrativ knyttet til lav energieffektivitet og utbygging av fornybar energi gjør at grønt hydrogen mister noe legitimitet mot blått hydrogen (Tennbakk, 2022). Dette sees spesielt i diskusjonen etter olje- og energiminister Terje Aasland og næringsminister Jan Christian Vestre lanserte hydrogensamarbeid mellom Statkraft og Nel. Fortellingen deres beskriver hvordan forventet utbygging av fornybar kraft krever lagring når bruk ikke kan skje direkte og at hydrogen vil være en «glimrende løsning for det». Videre pekes det på Norges lange erfaring, samt mulighet for eksport. Forsknings- og høyere utdanningsminister Ole Borten Moe beskriver denne satsningen som «kraftproduksjon rett i dass», som etter hans skjønn er «lysår unna å være forsvarlig eller fornuftig» (Larsen, 2023). Disse to narrative er de mest sentrale i diskursdimensjonen til grønt hydrogen.



### 5.3.2 Lagring og distribusjon

Den overordnede diskursen er at lagring av hydrogen er en kompleks teknologi som medfører betydelige effektivitetstap, denne fortellingen har vært gjeldende siden hydrogen først ble utredet som energibærer (NOU 2004: 11, s. 17). Narrativ kan deles inn i tre kategorier knyttet til flytende eller komprimert lagring, eller ammoniakk. Sluttkunden legger føringer for lagringsmetode grunnet applikasjonsbehov (Forsberg, 2007). Aktører vil på bakgrunn av sin virksomhet fremme ulike lagringsmetoder. Lagring omhandler både langtidslagring og kortidslagring i teorien, men siden den overordnede diskursen til applikasjonsform generelt omhandler hydrogen til bruk i maritim og langdistanse transport er fokus sentrert rundt kortidslagring.

#### 5.3.2.1 Flytende og komprimert hydrogen

Det er en motstilling i fortellingen til lagring av hydrogen om hvilke lagringsteknologier som er best egnet. Narrativ til flytende hydrogen beskriver hvordan dette er en kjent teknologi, med høyere energitetthet, enklere transport til landbaserte og maritime fyllestasjoner, samt bedre langtidslagring for elektrisitetsproduksjon enn komprimert hydrogen (Nekså, 2023; Hovland, 2019; Statens Vegvesen, u.å.). Det er i stor grad offentlige aktører som statens vegvesen som er toneangivende for dette narrative, på grunn av Norled ferjen «MF Hydra», men forskningsaktører er og fremtredende (IFE, 2023; SINTEF, 2021; Nekså, 2023) Det fortelles at selv med betydelig erfaring fra anvendelse av flytende hydrogen i industri og romfart er det fortsatt uenighet og usikkerhet tilknyttet sikkerhetsforhold. Ved flytende hydrogen beskrives andre risikoforhold enn ved komprimert. Grunnet den lave temperaturen har gassen høyere vekt, og derfor vil synke og samles på bakkenivå. Gassansamlingen medfører betydelig brann- og eksplosjonsfare (Aarnes et al., 2019, s. 34).

Tilhengere av komprimert hydrogen har et helt annet narrativ knyttet til lagring. Her beskrives hvordan flytende hydrogen er en avansert og dyr teknologi, som i tillegg medfører et drastisk høyere energibruk på grunn av nedkjølingsprosessen. Videre problematiseres det at ved valg av flytende hydrogen ekskluderes grønt hydrogen, da det kun eksisterer flytendegjøringsanlegg tre steder i Europa hvor produksjon kommer fra grått hydrogen. Fortellingen er at en «hel kraftbransje» er klare til å tilby grønt komprimert hydrogen i Norge. Komprimert hydrogen beskrives å være enklere å produsere og håndtere, samtidig som gjeldende prosjektaktivitet baserer seg på komprimert hydrogen. Det er i stor grad fornybar-energiaktører som fremmer

narrativ om komprimert hydrogen (Løkke, 2018; Greenstat, 2023; Siva, 2023) Det beskrives at lekkasje av komprimert hydrogen har fordel av at den lette gassen stiger, og blandes ut med luft. Likevel forklares det at lekkasje i lukkede rom kan utgjøre en betydelig brann- og eksplosjonsfare ved mangelfull ventilasjon (Aarnes et al., 2019, s. 34).

### *5.3.2.2 Ammoniakk*

Diskurs knyttet til ammoniakk er sentrert rundt utslippskutt i maritim sektor ved anvendelse av ammoniakk som drivstoff, samt enklere og bedre lagring enn ved bruk av rent hydrogen. Norge som ledende skipsfartsnasjon og produsent av fornybar energi er narrativ knyttet til denne diskursen (Øystese, 2020b; Statkraft, 2023; Nyhus & Siem, 2023). Det er generelt stor optimisme rundt ammoniakk som i hovedsak kommer fra aktører som produserer fornybar energi, maritime aktører, offentlige aktører, og industriaktører (Yara, 2021). Alle aktørene vektlegger en fortelling om at ammoniakk vil bidra til nye grønne arbeidsplasser, eksportinntekter og mulighet for verdiskapning. Ammoniakk blir av noen beskrevet som «løsningen på høna og egget problemstillingen» (Nyhus & Siem, 2023). Erna Solberg uttalte i sin tid som statsminister at ammoniakk kan bli Norges neste industrieventyr (NTB, 2021). Ammoniakk blir fremmet i stedet for hydrogen grunnet høyere energitetthet, og mulighet for enklere lagring (Øystese, 2020a). Likevel er det flere, spesielt forskingsaktører og miljøorganisasjoner som påpeker at ammoniakk er en giftig gass. Sintef-forsker Anders Valland beskriver «ammoniakk er et karbonfritt drivstoff, ikke et miljøvennlig drivstoff» (Sveen, 2021).

### *5.3.2.3 Distribusjon*

Distribusjonsdiskursen til hydrogen sentreres rundt kostnad, tilstrekkelig volum ved frakt og sikkerhetsaspekt (NHF, 2022b). Det er flere distribusjonsmetoder mulig. Distribusjonsnarrativ til hydrogen er tett knyttet til diskursen sentrert rundt eksport av hydrogen (NHF, 2022b). Olje- og gassaktører er her sentrale i narrativet om at hydrogen kan fraktes i rørledning til Europa. Fortellingen baserer seg på at det er mulig å gjenbruke Norges omfattende rørledningsnettverk til distribusjon av hydrogen, eller bygge nye rørledninger (Equinor, u.å; Olden, 2019). Det er likevel en forsiktig optimisme knyttet til dette narrativet grunnet hydrogenatomets størrelse og mulighet for lekkasje. På motsatt side eksisterer det et narrativ som problematiserer frakt av hydrogen i sin helhet. Noen aktører fremmer fortellingen om at frakt vil være for dyrt og energikrevende i Norge grunnet ingen rørinfrastruktur og dårlige veier. Løsningen blir beskrevet å være en desentralisert produksjon, hvor hydrogen lages der det skal brukes. Dette

blir fortalt å være en mer kostnadseffektiv og mer miljøvennlig løsning som har mulighet til å etableres raskere (Jensen, 2020).

### 5.3.3 Applikasjon

Den overordnede diskursen knyttet til hvilke applikasjonsformer hydrogen skal brukes til er bred. Hydrogen beskrives som en energibærer som har mulighet til å avkarbonisere en rekke sektorer. Applikasjonsformene som fremmes spenner seg fra drivstoff i transport til oppvarming av hus (Aarnes et al., 2019; OED & KLD, 2020). Denne fortellingen om hydrogenets brede anvendelse er sentral hos alle aktører (Gardarsdottir & Sundseth, 2023; Statkraft, u.å.-a; Equinor, 2020a; Horne & Hole, 2019).

#### 5.3.3.1 Landtransport

Diskursen til hydrogen som drivstoff har et historisk preg. Hydrogen har blitt omtalt som framtidens drivstoff (Holden, 2002; TU, 2000). Fra starten til midten av 2000-tallet var narrativ sentrert rundt hydrogen som drivstoff til personbil og tungtransport (SINTEF et al., 2009; Equinor, 2005). Fortellingen var da at batterier ikke var egnet grunnet rekkevidde, tyngde, og kostnad (Tveit, 2012). Det er fortsatt noe oppslutning rundt dette narrativet i dag. Lengre rekkevidde ved bruk hydrogen, samt kortere ladetid og lavere vekt enn batteriløsninger er et sentralt narrativ også i dag (Nordal, 2020; Paulsen, 2022; NHO, 2022). Samtidig påpekes det hvordan batterier bruker metaller og mineraler det er knapphet på, og derfor vil en differensiering være nødvendig (Møller-Holst, 2022). Likevel er det tydelig at diskursen stort sett er sentrert rundt hydrogen til bruk i maritim sektor.

#### 5.3.3.2 Maritim transport

Fortellingene er knyttet til Norges mulighet til å bidra til avkarbonisering av transportsektoren, og da særlig maritim transport grunnet Norges omfattende maritime næringsklynge med forskningsmiljøer, verft, utstyrleverandører, og leverandører av maritime tjenester (Enova, 2022; Ulleberg, 2019; Innovasjon Norge, 2021a). Det blir beskrevet av forskingsaktører hvordan Norge er avhengig av hydrogen i transportsektoren for å oppnå utslippsmålene i 2050 (Fodstad, 2020, s. 5). Næringen selv er selv pådriver for bruk av hydrogen, men spesielt er regjeringen toneangivende for denne fortellingen. Narrativet beskriver et ønske om å avkarbonisere denne sektoren med hydrogen, samtidig som dette skal bidra til næringsutvikling, arbeidsplasser, og «grønn vekst» (OED & KLD, 2020).

Geografisk plassering påvirker og narrativ knyttet til hvilken applikasjonsform hydrogen skal benyttes til. Hvor Viken vil posisjonere seg til verdensledende for utprøving og tidlig bruk av hydrogen til transport (Viken fylkeskommune, 2017), vil Trøndelag, Nordland, og Vestland fylkeskommune bruke hydrogen til maritim sektor, og da spesielt hurtigbåter (Trøndelag Fylkeskommune, 2022). Finnmark og Troms ønsker å produsere hydrogen og begrunner dette i fortrinn regionen har med fornybar energi, naturgass og store arealer. De mener produksjon vil overstige forventet forbruk i regionen og ønsker derfor å eksportere hydrogen (Troms og Finnmark fylkeskommune, 2021). Eksport er videre et narrativ fremmet av olje- og gassaktører. Equinor fører et narrativ knyttet til Norges store rolle til å hjelpe land med å oppnå netto-null i 2050. Det beskrives hvordan norsk hydrogen skal sørge for Europas energisikkerhet ved eksport av blått hydrogen og videre elektrisitetsproduksjon ved antenning i gamle naturgassturbiner (Equinor, 2023).

Det er altså ingen konsensus rundt applikasjonsform. Dette er relativt naturlig da det overordnede hydrogen TIS enda er i en formativ fase. Den overordnede diskursen er likevel preget av stor optimisme rundt applikasjonsområdene til hydrogen, og ord som «nøkkelrolle» og «sentral» blir brukt om hydrogens rolle i den fremtidige energimiksen. Det er likevel narrativet om bruk i maritim sektor som har størst oppslutning.



## 6.0 Diskusjon

I dette kapitlet diskuterer vi diskurs, organisasjon og teknologi, og hvordan disse dimensjonene relaterer til ulike funksjoner i TIS. Vi snur TOD for å kunne diskutere teknologidimensjonen med bakgrunn i diskusjon til diskurs- og organisasjonsdimensjonen. Til slutt skal vi diskutere hvordan TOD samspiller med fokus på den teknologiske dimensjonen med bakgrunn i funksjonene. Det er viktig å påpeke at verken TOD eller TIS kan isoleres i ulike deler, det er nettopp samspillet som skaper utvikling.

### 6.1 Diskurs

Den diskursive dimensjonen beskriver narrativ knyttet til hydrogen. Dimensjonen påvirker, og overlapper med flere funksjoner i TIS. Vi anser funksjonene legitimering, markedsetablering, ressursmobilisering, og påvirkning på retning av innovasjon som tilhørende denne dimensjonen. Dette fordi diskurs er tett knyttet til legitimering, hvor legitimering er en sentral del av formasjonen av et TIS (Bergek et al., 2008a). Både diskurs, og funksjonen legitimering, vil påvirke markedsetableringen og ressursmobilisering. Videre mener vi at narrativ fortalt av aktørene, spesielt regjeringen, påvirker retning av innovasjonen.

#### 6.1.1 Legitimering

Da hydrogen kan være en nullutslipps energibærer har teknologien i seg selv en høy legitimitet på bakgrunn av klimakrisen. Dette ser vi gjennom diskursen ført av de ulike aktørene. Det er flere aktører som peker i en retning av at det nærmest ikke er mulighet for et nullutslippssamfunn uten bruk av hydrogen i energisystemet. Dette kommer spesielt fra forskningsinstitusjonene som i seg selv har en høy grad av troverdighet (Helle, 2021; Møller-Holst, u.å.).

Fra regjeringens side er hydrogenfortellingen preget av å legitimere fortsettelsen av olje- og gassvirksomheten. Sikring og videreførelse av petroleumsformuen står sentralt både i den tidlige og sene hydrogenfortellingen (NOU 2004: 11, s. 60). Dette medfører et ønske om å anvende hydrogen som en eksportvare, derfor er det ikke sentralt om hydrogen blir produsert blått eller grønt. Fokuset er sentrert rundt produksjon i seg selv og dannelse av verdikjeder (Regjeringen, 2022a).

De ulike aktørene vil på bakgrunn av sin virksomhet legitimere ulike former for hydrogenproduksjon. Hvor industriaktører som Statkraft, et hovedsakelig fornybart selskap, fokuserer på grønt hydrogen, fokuserer Equinor hovedsakelig på blått hydrogen. Hvor Statkraft begrunner satsingen på grønt hydrogen med miljøvennlighet og kostnadsøkning ved bruk av CCS, begrunner Equinor på sin side at blått hydrogen er mer konkurransedyktig og billigere enn grønt hydrogen (Holsen, 2022; Collins, 2022).

Hvilke applikasjonsformer for hydrogen som blir legitimert og fremmet er avhengig av geografi. Hvor kyst- og fjordrike fylkeskommuner er opptatt av maritim applikasjon, er innlandskommuner opptatt av landbasert transport og flåtetransport. Dette gjør at ulike former for energibærere blir fremmet avhengig av geografisk plassering (Vestland Fylkeskommune, 2019; Viken Fylkeskommune, 2017). Industriaktører ønsker å ta del i det grønne skiftet, og satser følgelig bredt på applikasjon av hydrogen. Industriaktørene fører derfor en bred diskurs rundt applikasjonsområdene. Løsningene strekker seg fra drivstoff i brenselceller til direkte antenning av hydrogen i turbin (Statkraft, 2022; Greenstat, 2022; Equinor, 2020a). Regjeringen har en noe snevrere vektlegging av hydrogen applikasjonsformer, og fokuserer i større grad på sektorer som er vanskelig å direkte elektrifisere, som langdistanse sjø- og landtransport og industri (NFD, 2022). Dette sammenfaller med forskningsinstitusjonene, som i tillegg vektlegger langtidslagring av energi som applikasjonsområde (Møller-Holst, u.å.).

### *6.1.2 Markedsetablering og ressursmobilisering*

Markedsetablering er en viktig del av etableringen av nye teknologier, og vil skje i ulike stadier (Bergek et al., 2008a). Tross et manglende kommersielt hydrogenmarked, fremmer regjering og aktører et narrativ om at hydrogen som energibærer står sentralt i energiomstillingen. Dette kan derfor føre til en markedsdannelse. Sett fra resultat har regjeringen opprettet ulike program som støtter klimavennlig teknologi for å bidra til en markedsetablering (Enova, 2021; Forskningsrådet, 2020; Innovasjon Norge, 2021a). Markedsetableringen er en del av «høna og egget» problemstillingen til hydrogen. Det er flere aktører som mener de vil bruke hydrogen, hvis noen produserer. Og på motsatt side at de vil produsere, hvis noen bruker hydrogen. Derfor er det i teorien en mulighet for en markedsetablering.

Diskurs fører og til en ressursmobilisering. Offentlige aktører legger vekt på grønn vekst og verdiskapning, og narrativet er knyttet til at hydrogen vil skape nye arbeidsplasser, og ny infrastruktur til å støtte opp under ny grønn industri (NFD, 2022). Resultatet er dannelsen av

flere offentlige støtteprogram. Ressursmobilisering er kritisk for å drive innovasjonsprosessen fremover (Bergek et al, 2008a). Funksjonen er og overlappende i organisasjonsdimensjonen.

### *6.1.3 Angivelse av retning og teknologioptimisme*

Angivelse av retning er en funksjon sentral i seleksjonsprosessen til hvilke teknologier som videreutvikles. Diskurs vil ha betydning for, og påvirke FoU, og derfor og hvilken retning den teknologiske utviklingen tar. Forventninger er en viktig del i denne prosessen (Oskarsen, 2009, s. 27). Aktørene sitt narrativ har her et tilsynelatende «teknologioptimistisk» preg, og dette medfører en rekke optimistiske forventninger som påvirker retning av søket. Fortellingene, og dermed forventningene til hydrogen, beskriver ikke-eksisterende begrensinger for hva hydrogen kan benyttes til. Både blå og grønn hydrogenproduksjon skal sikre videre vekst og nye arbeidsplasser. Her er ideen om «grønn vekst» særlig fremtredende, ett narrativ offentlige aktører er spesielt opptatt av (OED & KLD, 2020, s. 8).

Optimismen til hydrogen går tilsynelatende i perioder, hvor siste periode startet på midten av 2000-tallet. Da ble det fremmet ett narrativ om hydrogen som drivstoff i bilparken. Dette resulterte også i optimisme rundt pilot-, demonstrasjons-, og forskningsprosjekter som skulle videreutvikle teknologien til å bli lønnsom (Rosenow & Lowes, 2021). Prosjektene ledet imidlertid til liten utvikling. Kommersiell hydrogenbilteknologi eksisterer som følge av dette, men grunnet manglende lønnsomhet eksisterer det rundt 200 hydrogenbiler på norske veier (Bøeng, 2021). Til sammenligning eksisterer det rundt 617 000 elbiler (Norsk elbilforening, 2021). Vi ser en tendens til at aktørene fremsetter fremtidig utvikling og forbedring av teknologi som en selvfølge, og med dette mulighet til å bidra i klima- og naturkrisen. Vi tilrår forsiktighet rundt denne fortellingen da dette kan fungere som en sovepute for omstilling. Dersom teknologioptimisme og fremtidig utvikling skal være løsningen på dagens utfordringer, utsetter vi klimaomstillingen, og går potensielt glipp av viktig utvikling tilknyttet teknologi som allerede eksisterer.

## 6.2 Organisasjon

TIS fremhever rollen til institusjonelle strukturer, og viktigheten av aktørene for fremveksten av nye teknologier. Organisasjonsdimensjonen er derfor viktig i TIS perspektivet. Dimensjonen sammenfaller med flere funksjoner i TIS. Vi anser disse funksjonene å være kunnskapsutvikling



og -spredning, ressursmobilisering og angivelse av retning. Disse funksjonene preges av at de fleste nettverkene og klyngene er sentrert rundt maritim sektor.

Systembygging er krevende for enkeltaktører. Nettverkssamarbeid er derfor viktig. Konkurransen mot etablert teknologi og sosioteknisk regime gjør det vanskelig for ny teknologi å bryte gjennom (Musiolik et al., 2012). Hydrogen preges av å fortsatt være i en formativ fase, til tross for at teknologien har vært kjent lenge. Fasen karakteriseres av usikkerhet rundt teknologiske valg, regulering, og markedsutvikling. Fasen er en kumulativ prosess hvor det inngår mange små endringer, og kan vare over flere tiår. Fasen ser endring i etablerte, og videreutvikling av funksjoner. Hydrogen preges fremdeles av lav effektivitetsgrad, manglende marked, og en ufullstendig verdikjede, og følgelig sliter med å bevege seg over i vekstfasen (Hanson et al., 2011, s. 49).

### *6.2.1 Kunnskapsutvikling- og spredning*

Vi observerer en tendens til organisering gjennom nettverk- og klyngesamarbeid rundt hydrogenteknologi som er sentrert rundt maritim sektor. Nasjonale og regionale nettverk gir betydelige muligheter for samarbeid, og følgelig kunnskapsutvikling og -spredning. Utveksling av informasjon blir ansett å være et nettverks viktigste funksjon (Oskarsen, 2009, s. 26). I dag har Norge en grunnleggende hydrogenkunnskapsbase (Steen et al., 2019). Historisk fokus har vært på hydrogen som drivstoff til personbil. I senere tid har dette dreid seg til langdistanse sjø- og landtransport, hvor kunnskapsbasen er relativt liten gjennom hele verdikjeden. Det er i maritim sektor vi ser en sterkest tendens til nettverk- og klyngesamarbeid. Dette vil påvirke kunnskapsbasen, og følgelig hvor prosjektaktivitet sentreres som sett i figur 8. Eksisterende pilot-, demonstrasjons-, og forskningsprosjekt vil styrke funksjonen. Samtidig kan prosjektaktiviteten føre til økt legitimering og sosial aksept av teknologien samt danning av nye nettverk. Videre kan og demonstrasjonsprosjekter føre til institusjonell endring (Sjøtun, 2018).

Gjennom kunnskapsutvikling og -spredning kan aktører øke kompetansegrunnlaget rundt produksjon og anvendelse av teknologien. Dette er en del av læringskurven, hvor teorien sier at kostnadene vil reduseres i takt med økt kompetanse. Ved å produsere, prøve ut, og anvende teknologien gjennom læring-og-feiling vil en kunne redusere kostnadene knyttet til teknologien, og etter hvert nå et kostnadsnivå som muliggjør kommersialisering (Grøthe & Vårdal, 2022).

### 6.2.2 Ressursmobilisering og angivelse av retning

Gjennom nettverk- og klyngesamarbeid oppnår aktørene en ressursmobilisering. Dette sees gjennom nettverkens og klyngenes evne til å mobilisere kapital til prosjekter gjennom investorer og offentlige støtteordninger. Som sett i figur 8 eksisterer en betydelig prosjektaktivitet langs verdikjeden. Systemet klarer altså å tilegne seg arbeidskraft, kapital, og kompetanse gjennom organisering i nettverk og klynger, og følgelig prosjektaktivitet.

Regjeringen forsøker aktivt å påvirke nettverk- og klyngedanning, med offentlig støtteordninger gjennom Innovasjon Norge, Forskningsrådet og Enova. Gjennom støtteordningene bidrar regjeringen til en angivelse av retning. Dette blir spesielt tydelig i regjeringens knutepunktsatsning gjennom Enova. Her er det allokert milliarder til dannelsen av fem knutepunkt langs norskekysten som skal bidra til utviklingen av hydrogen som drivstoff til maritim sektor (Enova, u.å.). Regjeringens tydelige fokus på maritim sektor har og gjort at de fleste nettverk- og klyngesamarbeid har utspring fra maritim sektor, eller driver med prosjektaktivitet innenfor maritim sektor. Dette overlapper med funksjonen entreprenørskapsaktivitet, som kan reduserer usikkerhet, og øke problemløsningskapasitet gjennom prøving og feiling.

## 6.3 Teknologi

Innovasjonslitteratur fokuserer på systembygging rundt teknologien. Ny teknologi preges av usikkerhet grunnet konkurranse med eksisterende teknologi og det øvrige sosioteknisk regime. Teknologien trenger derfor beskyttelse og støtte i markedet for å bli tatt i bruk. Likevel vil teknologien i seg selv sette barrierer. Teknologi påvirker funksjonene, samtidig som funksjonene påvirker teknologien. Derfor kan de tekniske barrierene sette begrensninger for denne systembyggingen ved å tvinge aktørene innenfor visse rammer som både begrenser og muliggjøre deres handlinger (Suurs, 2009, s. 45).

Delkapittelet diskuterer entreprenørskapsaktivitet tilknyttet teknologidimensjonen gjennom verdikjeden til hydrogen, og samtidig beskriver de tekniske barrierene ved effektivitetsgrad, sikkerhet, og ressursbruk.

### 6.3.1 Entreprenørskapsaktivitet

Et TIS vil kun utvikle seg hvis det eksisterer entreprenører som eksperimenterer (Hanson et al., 2011, s. 51). Entreprenører får bukt med usikkerhet forbundet med ny teknologi og nye markeder (Oskarsen, 2009, s. 26). Entreprenøren skaper og drar nytte av nye forretningsmuligheter ved å omgjøre potensialet i ny kunnskap, nye nettverk, og nye markeder. (Lindholm-Dahlstrand et al., 2018). Entreprenørskapsaktivitet har som effekt å kunne forsterke, eller korrigere, de andre funksjonene. Ved å fremme kunnskapsutvikling og -spredning, kan ny teknologi kartlegges og videreutvikles, eventuelt avskrives. Dette kan påvirke retning av søket, legitimitet, og ressursmobilisering. Entreprenørskapsaktivitet langs hele verdikjeden er nødvendig i arbeidet med utvikling i takt med omstilling. Spesielt for å overkomme eksisterende utfordringer, samt utforske alternative teknologiske løsninger. Vi synes den manglende entreprenørskapsaktiviteten i deler av verdikjeden er interessant på bakgrunn av den sentrale rollen aktiviteten spiller, og de identifiserte tekniske utfordringene. Uten eksperimentering og endring av teknologien vil ikke utfordringene løses (Bergek et al., 2008a).

#### 6.3.1.1 Produksjon

Kontekstkapittelet beskriver at Norge har lang erfaring med grønn hydrogenproduksjon, og at hydrogenteknologi ble introdusert på 1920-tallet, hvor blå hydrogenproduksjon overtok på 1990-tallet. Figur 8 viser en skjevhet i entreprenørskapsaktivitet rundt produksjonsteknologi.

#### 6.3.1.2 Grønt hydrogen

Elektrolyseprosessen preges av lav energieffektivitet, rundt 60%, og høy produksjonskostnad på 36 til 88,4 NOK/kg hydrogen. Eksperimentering og entreprenørskapsaktivitet er derfor viktig for å minske effektivitetstap, produksjonskostnad, og tilknyttet usikkerhet. Figur 8 viser betydelig prosjektaktivitet tilknyttet grønn hydrogenproduksjon, og resultat har vist god organisering av nettverk og klynger rundt produksjon. Sett fra kontekst har Norge lang erfaring med grønt hydrogen, og følgelig har det pågått mye entreprenørskapsaktivitet. Derfor er det interessant at teknologien fremdeles møter barrierer knyttet til effektivitetsgrad og produksjonskostnad.

Dette fordi blått hydrogen har lavere produksjonskostnad på 16 til 20 NOK/kg hydrogen, bedre energieffektivitet, på rundt 80%, og mulighet til hurtigere oppskalering relativt til grønt hydrogen (Meld. St. 11 (2021–2022), s. 77). Figur 8 viser lav prosjektaktivitet, og følgelig lav

entreprenøriell eksperimentering tilknyttet blått hydrogen, kontra grønt. Dette kan få betydelige konsekvenser da et TIS uten bred eksperimentering vil stagnere (Bergek et al., 2008b)

### 6.3.1.3 Blått hydrogen

Blå hydrogen beskrives å kunne skaleres raskere enn grønt hydrogen grunnet lavere produksjonskostnad på 16 til 20 NOK/kg hydrogen, og bedre energieffektivitet, på rundt 80% (Meld. St. 11 (2021–2022), s. 77) Vi anser ikke denne påstanden som reell grunnet energitapet ved karbonfangst og tap i verdikjeden er effektivitetsgraden til blått og grønt hydrogen tilnærmet lik. Våre utregninger beskriver effektivitetsgrader på henholdsvis 32,7% og 32,4% for best case scenario komprimert hydrogen. Billig gass og elektrisitet har lenge vært en etablert sannhet, men grunnet krig i Europa har denne sannheten blitt utfordret. I tillegg er gass en begrenset ressurs, og økende CO<sub>2</sub>-avgift vil videre påvirke prisen. Samtidig er ikke teknologi for karbonfangst kommersielt tilgjengelig. Utbygging uten tilstrekkelig teknologi er derfor en tilstedeværende fare. Lavutslippsalternativet med fangstrate på 90% vil fremdeles ha utslipp tilsvarende 296 338 biler. En slik fangstrate (høy) er dessuten ikke bevist i kommersielle anlegg. Dette konkretiseres med Equinor sitt ønske om å elektrifisere Melkøya. Det er et tankekors at Equinor gjennom sin fortelling beskriver billig og effektiv blå hydrogenproduksjon, men uttaler at naturgassproduksjon med CCS på Melkøya er for teknisk vanskelig, og for dyrt (Larsen, 2023).

Figur 8 viser lav prosjekt- og entreprenørskapsaktivitet tilknyttet blå hydrogenproduksjon. Dette kan få betydelige konsekvenser da et TIS uten bred eksperimentering vil stagnere (Bergek et al., 2008b). Dette kan bli en barriere for rask oppskalering.

### 6.3.1.4 Lagring og distribusjon

Resultatkapittelet identifiserer utfordringer tilknyttet lagring og distribusjon, eksplosjons- og brannfare, og hydrogensprøhet. Applikasjon legger føringer for lagring og distribusjon. Konkret ser vi utfordringen med behov for tilførsel av 40% av totalenergien i hydrogenet ved flytendegjøringen, og 5-20% i komprimeringsprosessen. Samtidig eksisterer utfordringer tilknyttet oppbevaring, hvor flytende hydrogen krever sfæriske kryogene tanker med skjerpet kvalitet for å holde temperaturen nær absolutt null, og oppbevaring i salthuler hvor hydrogenet igjen må renses før det kan benyttes i brenselceller. Samtidig kan ikke hydrogen fraktes i eksisterende rørledninger uten at de først oppgraderes slik at de kan motstå hydrogensprøhet

(Johnson, 1874), teknologi som ikke er avklart per i dag. Volumtetthet og lagringsmetode bidrar og til utfordringer tilknyttet distribusjon. Lave temperaturer og høyt trykk medfører følsomhet til endringer i temperatur. Tilførsel av temperatur kan forekomme eksternt og internt. Internt ved molekylær friksjon som resultat av bevegelse i gassen eller væsken. Videre problematiseres fyllprosessen grunnet enten lave temperaturer, eller høyt trykk, som medfører mer energitap, og krav til avansert teknologisk løsning. Til slutt er det betydelig eksplosjons- og brannfare uansett lagrings- og transportform for hydrogen. Vi ser behov for en omfattende entreprenørskapsaktivitet for å overkomme barrierene tilknyttet lagring og distribusjon. Figur 8 viser en skjevfordeling av entreprenørskapsaktiviteten, hvor lagring og distribusjon er underrepresentert. Uten entreprenørskapsaktivitet vil denne delen av verdikjeden stagnere, og barrierene vil forbli (Bergek et al. 2008a). Entreprenørskapsaktivitet står sentralt i innovasjonsprosessen, så vel som kommersialiseringsprosessen. Det kan sees som den absorberende kapasiteten innad i et innovasjonssystem. Bestående av mottakeligheten av ny teknologi og kunnskap, så vell som evnen til å agere og eksperimentere på den (Bergek et al. 2008a).

#### *6.3.1.5 Ammoniakk*

Oppmerksomhet vies til ammoniakk på bakgrunn av gunstigere forhold rundt lagring og distribusjon, og noe bedre effektivitetsgrad gjennom verdikjeden (Talic, 2023). Vi har ikke tallfestet dette grunnet oppgavens omfang.

Gjennom rundt 100 år med industriutvikling har entreprenørskapsaktiviteten formet og utviklet kunstgjødselproduksjon. Ammoniakk presenteres som energibærer i en forlengelse av hydrogen. En sentral problemstilling i anvendelse av ammoniakk er hvor giftig det er, selv i små mengder, og dødelig ved 400 ppm. Dette er en barriere som er vanskelig å overkomme gjennom entreprenørskapsarbeid, spesielt da ulykker er uforutsigbare og unike. Et ammoniakk-utslipp vil resultere i konsentrert forurensing i området, og ammoniakk vil bli absorbert i biologisk materiale. Samtidig vil ammoniakken fordufte i form av gass, og danne en skadelig lokal luftkonsentrasjon. Ammoniakk vil forbli en sentral innsatsfaktor i kjemisk industri, men grunnet risikobildet rundt ammoniakk-utslipp ser vi ikke noe reell anvendelse i maritim eller landbasert transport.



### 6.3.1.6 Applikasjon

Hydrogenapplikasjon deles inn i tre kategorier: 1) Drivstoff i brenselceller, 2) direkte antenning for mekanisk og termisk arbeid, og 3) innsatsfaktor i kjemisk industri

Figur 8 viser stort spenn i prosjektaktivitet tilknyttet applikasjonsområder. Eksisterende entreprenørskapsaktivitet er viktig for å kartlegge og videreutvikle ønskede teknologiske løsninger (Bergek et al., 2008a). Landbasert transport har sett en pågående entreprenørskapsaktivitet siden før den første kommersielle hydrogenbilen kom for 30 år siden (Yunzhe et al., 2020; Solomon & Banerjee, 2006) Fremdeles preges brenselcelleteknologien av effektivitetsgrad rundt 50%. Det kan poengteres at effektiviteten til brenselcelleteknologien er vesentlig bedre en konvensjonelle forbrenningsmotorer som benytter fossile energibærere, men fremdeles ender verdikjeden samlet på rundt 20% (vedlegg 1 – (1) Effektivitetsgrad). Brenselcelleteknologien har kun sett små forbedringer siden den første hydrogenbilen kom. Den samme teknologien er ønsket i maritim sektor, hvor vi ser den største konsentrasjonen av entreprenørskapsaktivitet i figur 8. Her er splid i om en skal benytte hydrogen eller ammoniakk som energibærer.

Figur 8 viser entreprenørskapsaktivitet innen industri, med 8 pågående prosjekt. Høytemperatur og kjemisk industri er hovedområdene hvor hydrogen utprøves for applikasjon. Grunnet de fysiske egenskapene til hydrogen, er det godt egnet i høytemperatur industri, med 80% effektivitetsgrad ved varmedannelse gjennom antenning. Dette utkonkurrerer elektrisitet ved ønskede temperaturer opp mot, og over 1000°C. I kjemisk industri benyttes hydrogen som en innsatsfaktor som er absolutt nødvendig for å produsere kjemikalier. Nødvendighet og god effektivitetsgrad, kombinert med entreprenørskapsaktivitet og mangel på alternativ for å kutte utslipp, legger ett godt grunnlag for industriell applikasjon. Spesielt viktig er en omstilling fra grått til grønt hydrogen i kjemisk industri for å kutte utslipp i tråd med overordnet plan for utslippskutt.

Det vies og oppmerksomhet til å benytte hydrogen i elektrisitetsproduksjon gjennom antenning i turbin for å omsette energien til mekanisk arbeid, med effektivitetsgrad på rundt 30% (Panepinto et al., 2014). Sett i verdikjedeperspektiv er den totale energieffektiviteten ned mot 10-12% ved slik anvendelse. Vi har ikke sett entreprenørskapsaktivitet som konkret arbeider med denne løsningen. Fremdeles er gassturbiner en veletablert og kommersiell teknologi, og ønsket om omstilling fra naturgass til hydrogen blir fremmet av Equinor. Å omsette hydrogen

til mekanisk arbeid for å produsere strøm har som vist lavere effektivitetsgrad enn brenselceller, og med et kommende energiunderskudd kan en slik fremgangsmåte stride med energisikkerheten Norge og Europa streber etter.

## 6.4 Samspillet teknologi, organisasjon og diskurs

Dimensjonene teknologi, organisasjon, og diskurs interagerer og påvirker hverandre (Sjøtun & Njøs, 2019). TIS-teorien vektlegger dimensjonene organisasjon og diskurs for systembygging, men litteratur påpeker også hvordan teknologien i seg selv kan sette begrensninger for systembyggingen (Suurs, 2009, s. 45). Delkapittelet bygger på diskusjonen ført over, og vi undersøker TOD-samspillet gjennom verdikjeden til hydrogen for å si noe om hva dette samspillet betyr for teknologiutviklingen.

### 6.4.1 Produksjon

Overordnet diskurs er at hydrogenproduksjon må skaleres opp for å møte tiltenkt etterspørsel. Skillet går mellom promotering av blå eller grønn produksjonsmetode.

#### 6.4.1.1 Blått hydrogen

Diskursen til blå hydrogenproduksjon beskriver hvordan blått hydrogen skal være en mellomløsning før omstilling til grønn hydrogenproduksjon. Dette fordi narrativ beskriver at blått hydrogen har lavere produksjonskostnad, bedre energieffektivitet og en mulighet til å skalere opp produksjon raskere enn grønt (D). Nettverkene og klyngene analysert vier ingen oppmerksomhet til blått hydrogen. Det er i hovedsak regjeringen og andre aktører tilknyttet olje- og gassindustrien som er sentrale i denne fortellingen, og de fokuserer på at blått hydrogen skal sikre og videreutvikle petroleumsformuen. Samtidig kan hydrogensatsing gjøre denne industrien «grønn». Likevel er det her det er lavest prosjektaktivitet jf. figur 8. (O). Resultat fra teknologidimensjonen viser at blått hydrogen har en lav effektivitetsgrad gjennom verdikjeden, med best case effektivitetsgrad på 32.7%. Det eksisterer ikke kommersielle blå hydrogenanlegg i dag med fangstraten nødvendig for betydelige utslippsreduksjon. I tillegg viser våre utregninger at fangstrate på 90% vil fortsatt resultere i årlig utslipp som tilsvarer 296 338 biler. Produksjonskostnad er og tett knyttet til gasspriser. Lave gasspriser har lenge vært en etablert sannhet som har blitt utfordret med krigen i Europa (T).

Teknologidimensjonen står derfor ikke i samsvar med diskursdimensjonen på grunn av lav effektivitetsgrad, usikkerhet knyttet til produksjonskostnad og betydelige utslipp ved oppskalering. Samtidig står ikke teknologidimensjonen i samsvar med organisasjonsdimensjonen, siden forbedring av effektivitetsgrad og fangstteknologi er avhengig av anvendelse av teknologiene for å styrke funksjonene i TIS. Det er derfor en skjevhet i TOD-samspillet. Dette kan få betydning for utslippskutt og fører til en risiko for videre innelåsning i det fossile energiregimet.

#### *6.4.1.2 Grønt hydrogen*

Diskurs til grønt hydrogen er sentrert rundt Norges kraftoverskudd og klima- og miljøargumentet. Grunnet klimakrisen har grønn hydrogenproduksjon høyere legitimitet enn blått, men narrativ om høyere produksjonskostnad og lavere effektivitetsgrad svekker denne legitimiteten mot blå hydrogen (D). Figur 8 viser betydelig prosjektaktivitet tilknyttet grønt hydrogen, hvor fornybare energiaktører nødvendigvis er sentrale. Tre av fem knutepunktsatsningen tildelt støtte fra Enova er sentrert rundt grønn produksjon. Nettverket Agder H2, med klyngen GCE Node og EYDE organiserer seg rundt en knutepunktsatsning for produksjon av grønt hydrogen. Knutepunktet ledes av aktørene EverFuel og Greenstat. Ocean Hyway Cluster, med aktørene Fjord Base, Sogn og Fjordane Energi og Gasnor har og organisert seg rundt en knutepunktsatsning knyttet til grønn produksjon. Det samme gjelder Renergy, som med aktørene NTE Energy, og H2 Marine som og har organisert seg rundt en knutepunktsatsning. (O). Resultat fra teknologidimensjonen viser at produksjon av grønt hydrogen har marginalt dårligere effektivitetsgrad gjennom verdikjeden enn blått hydrogen. Med en best case effektivitetskrav på 32.4%. Effektivitetsgradene ved produksjon er i favør blått hydrogen, men når hydrogenet faktisk skal brukes vil effektivitetsgradene være tilnærmet like. Samtidig møter teknologien en utfordring knyttet til ressurser, da elektrolyse krever betydelig mengder strøm og krever bruk av begrensede edelmetaller (T).

Grunnet forventet kraftunderskudd og begrenset tilgang til edelmetaller står ikke teknologidimensjonen i samsvar med diskursdimensjonen. Miljønarrativet i diskursen mister legitimitet ved oppskalering da økt bruk av elektrisitet og økt bruk av edelmetaller kan komme i konflikt med bærekraftaspektet i miljøargumentet. Vi observerer at organisasjonsdimensjonen samsvarer med teknologidimensjonen. Dette grunnet den betydelige prosjektaktiviteten i dette leddet av verdikjeden, samt aktørenes evne til å organisere seg i nettverk og klynger for å drive teknologiutvikling gjennom prosjekter. Dette samsvaret mellom organisasjon og teknologi kan



føre til at funksjonene innad i TIS styrkes og kan derfor løse noen av utfordringer knyttet til skjevheten i diskurs og teknologi.

#### 6.4.2 Lagring og distribusjon

Den overordnede diskursen er at lagring av hydrogen er komplekst og medfører effektivitetstap. Det er generelt lite oppmerksomhet fra aktørene viet til dette leddet i verdikjeden. Vi har delt lagring av hydrogen inn i tre deler, flytende, komprimert og ammoniakk. De tre lagringsmetodene blir ofte sammenlignet med hverandre, og narrativet er derfor knyttet til hvilken lagringsteknologi som er bedre enn de andre. Dette fører til ett «enten/eller» narrativ, som kan være ugunstig for teknologiutviklingen da man kan bli låst i en stivhengighet, og dermed ikke utforsker andre løsninger.

##### 6.4.2.1 Flytende hydrogen

Narrativet til flytende hydrogen beskriver hvordan denne teknologien er kjent, har høy energitetthet og enklere transporteres til landbaserte og maritime fyllestasjoner enn komprimert hydrogen. Det beskrives usikkerhet og uenighet i risikoforholdene knyttet til flytende hydrogen. Grunnet lav temperatur synker gassen, gassansamling medfører betydelig brann- og eksplosjonsfare (D). Prosjektaktiviteten her er lav sett i figur 8. Organiseringen rundt flytende hydrogen er relativt lav, og det er i stor grad klyngen Maritime CleanTech som organiserer prosjektaktivitet knyttet til bruk av flytende hydrogen i maritim sektor. Sentrale aktører i denne prosjektaktiviteten er Norled, Equinor, NORCE, og BKK. Klyngen, med Statens Vegvesen som har brukt offentlig anskaffelse som virkemiddel, har bidratt til utviklingen av verdens første bilferje drevet av flytende hydrogen, satt i drift 31.03.23 (O). Flytendegjøring av hydrogen krever tilskudd av 40% energi av total energi i hydrogenet, dette betyr at for hver kWt med hydrogen som skal gjøres flytende krever prosessen 0,4 kWt elektrisitet. Dette på grunn av det lave kokepunktet til hydrogen som er på 20 Kelvin, -253C. Det lave kokepunktet resulterer i energitap i form av «boil-off», for å redusere dette tapet kreves det kompleks teknologi, kostbare materiale og spesielt design i form av sfæriske tanker. Likevel resulterer det i et daglig energitap på 3-0,3% proporsjonalt med volum fra 50 m<sup>3</sup> til 20 000 m<sup>3</sup>. Kontinuerlig trykkregulering vil være nødvendig, som øker kostnad og energibehov (T).

Den overordnede diskursen knyttet til lagring samsvarer med teknologidimensjonen som viser til helt konkrete teknologiske barrierer ved lagring av flytende hydrogen. «Enten/eller»

narrativet fører til usikkerhet, og kan medføre en stivhengighet hvor andre løsninger ikke blir utforsket. Prosjektaktiviteten og organiseringen rundt flytende hydrogen er lav. Dette samsvarer ikke med teknologidimensjonen. For å løse de tekniske utfordringene kreves det utbredt FoU, samt anvendelse av teknologien. Samspeillet mellom dimensjonene blir derfor skjevt og kan føre til liten teknologiutvikling.

#### *6.4.2.2 Komprimert hydrogen*

Narrativ knyttet til komprimert hydrogen beskriver denne teknologien som enklere å anvende enn flytende hydrogen. Samtidig beskrives det hvordan en hel kraftbransje i Norge er klare til å tilby grønt komprimert hydrogen. Risikoforhold beskrives å være noe enklere da gassen vil stige og blandes med luft, men lekkasje i lukkede rom utgjør fortsatt en betydelig brann- og eksplosjonsfare ved mangelfull ventilasjon (D). Det er betydelig mer organisering knyttet til komprimert hydrogen enn flytende. Tre av fem knutepunksatsninger, Rørvik, Fløra og Agder, organiserer prosjektaktivitet knyttet til produksjon av grønt komprimert hydrogen. Klyngene Renergy, Ocean Hyway Cluster og GCE Node er deltagere i disse tre knutepunksatsningene, samtidig organiserer Renergy prosjekt knyttet til produksjon og distribusjon av komprimert grønt hydrogen. Det er i hovedsak fornybar-energiaktører som sentrerer seg rundt komprimert hydrogen, med forskingsaktøren SINTEF og andre maritime aktører (O). For å komprimere hydrogen kreves det 5-20% av energiinnholdet i hydrogen, avhengig av ønsket trykk. Volumet til komprimert hydrogen bestemmes av trykk, da høyere trykk medfører høyere massetetthet. Komprimert hydrogen krever dermed betydelig plass (T).

Den samme problemstillingen ved «enten/eller» narrativ oppstår også i diskursdimensjonen til komprimert hydrogen. Likevel samsvarer diskursdimensjonen med organisasjonsdimensjonen. Dette grunnet den betydelige organiseringen av klynger til prosjekter knyttet til komprimert hydrogen. Organisasjonsdimensjonen samsvarer derfor med teknologidimensjonen. Den overordnede diskursen samsvarer og med teknologidimensjonen. Dette samsvaret i TOD kan føre til en videreutvikling av teknologien.

#### *6.4.2.3 Ammoniakk*

Diskursen til ammoniakk er sentrert rundt brukt i maritim sektor. Narrativ til ammoniakk beskriver denne teknologien som enklere å lagre og høyere energitetthet enn rent hydrogen. Fortellingene er sentrert rundt muligheten ammoniakk har til å danne nye grønne arbeidsplasser,



eksportinntekter og mulighet for verdiskapning. Ammoniakk blir beskrevet å være løsningen på «høne og egget problemstillingen», samt Norges neste industrieventyr (D). Prosjektaktivitet i figur 8 er lav, men det er stor organisering rundt ammoniakk i nettverkene og klyngene. Klyngene Ocean Hyway Cluster og NCE Maritime CleanTech organiserer en rekke aktører gjennom demonstrasjonsprosjekt. Dette er i stor grad maritime aktører, samt Yara og Equinor. SINTEF er den fremtredende forskingsaktøren. Maritime CleanTech har og organisert europeiske aktører gjennom deres demonstrasjonsprosjekt ShipFC (O). Ammoniakk har høy energitetthet, og kan lagres nær moderate temperaturer og atmosfærisk trykk. I tillegg er teknologien kjent og modnet gjennom anvendelse i gjødselproduksjon. Ammoniakk er en svært giftig og etsende gass, som er farlig for mennesker og vannbårne organismer. Dette fører til store utfordringer knyttet til lagring og sikker håndtering, og medfører store sikkerhetsområder. I tillegg kan ammoniakk medføre utslipp i form av lystgass (nitrogengass), som er en klimagass 300 ganger sterkere en CO<sub>2</sub> (T).

Diskursdimensjonen knyttet til ammoniakk står ikke i samsvar med teknologidimensjonen. Optimismen om nytt industrieventyr står i kontrast til de vesentlige uløselige utfordringene knyttet til teknologien vedrørende giftighet. Storskala bruk av ammoniakk medfører betydelig risiko for lekkasje og utslipp. Lekkasje og ulykker vil være spesielt katastrofalt i maritim kontekst. Organisasjonsdimensjonen samsvarer med teknologidimensjonen grunnet den betydelige organiseringen av klynger rundt teknologien. Anvendelse av teknologien kan forbedre utfordringene, men risikoen vil aldri forsvinne. TOD-samspeillet er derfor skjevt, men samspeillet mellom organisasjon og teknologi kan føre til teknologiutvikling som forbedrer samspeillet.

#### 6.4.3 Applikasjon

Vi har identifisert hvordan alle aktørenes narrativ knyttet til hydrogens applikasjonsområde er svært bred. Fortellingene om næringsutvikling og «grønn vekst» er sentral. Som sett i diskusjon er det en teknologioptimistisk fortelling knyttet til hydrogens applikasjonsområde. Likevel er det narrativet om bruk av hydrogen i maritim sektor som har mest oppslutning. Dette skiller seg fra den historiske konteksten, hvor narrativ var knyttet til hydrogen til personbil. (D). Det er stor prosjektaktivitet knyttet til alle applikasjonsformene vi har sett på, hvor aktivitet er sentrert rundt maritim sektor. De maritime klyngene, Ocean Hyway Cluster og Maritime CleanTech, er her sentrale i organisering rundt demo-, og pilotprosjekter knyttet til hydrogen til maritim bruk. Prosjektene organiserer en rekke nasjonale og internasjonale aktører tilknyttet den maritime

verdikjeden. Fornybar energi-klyngen Renergy organiserer og en rekke prosjekt tilknyttet maritim bruk. Hvor aktørene NTE Energi, H2 Marine og SINTEF er i de fleste prosjekter (O). De ulike applikasjonsområdene vil ha ulik effektivitetsgrad, felles for dem alle er at denne effektivitetsgraden er lav. Dette fordi alle leddene i verdikjeden fører til energitap. I maritim sektor vil de anvende brenselcelle for å konvertere hydrogen til elektrisitet. Brenselcelle har høyere energieffektivitet enn konvensjonelle forbrenningsmotorer. Likevel er tapet gjennom verdikjeden såpass stort at energien igjen til forbrenning er lav. Dette betyr at det vil kreve store mengder elektrisitet eller naturgass for å dekke dette energibehovet (T).

Den sentrale og overordnede diskursen knyttet til hydrogen handler om klimaomstilling, bærekraftig utvikling og utslippsreduksjon i en rekke sektorer. En bred anvendelse av hydrogen vil utfordre denne diskursen grunnet forventingene om kraftunderskudd. Bred anvendelse og høyt forbruk av hydrogen vil legge mer press på arealressursene til Norge, føre til økt forbruk av begrensede edelmetaller som vil kreve en sirkulær økonomi, møte utfordringer ved sosial aksept ved utbygging av fornybar energi, og utslipp knyttet til produksjon av blått hydrogen. Samtidig er hydrogen i seg selv en indirekte drivhusgass. Diskursen blir et paradoks fordi bærekraftig utvikling og grønn vekst er vanskelig med en slik forbruksøkning av ressurser, lav sosial aksept og potensialet for betydelige utslipp. Dette er i tråd med annen litteratur som beskriver hvordan aktiv politikk for å redusere forbruket har mer potensiale enn grønn vekst for bærekraftig utvikling (Sandberg et al., 2019).

Diskursdimensjonen og organisasjonsdimensjonen samsvarer da organiseringen av nettverk og klynger til prosjekter etterlever diskursen med fokus på hydrogen til maritim bruk. Det brede og teknologioptimistiske narrativet om applikasjonsområder samsvarer og med den brede prosjektaktiviteten vist i figur 8. Grunnet de store effektivitetstapene, utfordringer knyttet til ressursbruk og utslipp, både ved bred anvendelse og ved anvendelse av brenselcelle til maritim bruk, mener vi at teknologidimensjonen ikke samsvarer med diskursdimensjonen. Denne skjevheten mellom diskursdimensjonen og teknologidimensjonen kan føre til en satsing som ikke samsvarer med tiltakene som kreves for å håndtere klima- og naturkrisen. Likevel kan samsvaret mellom organisasjon og diskurs føre til en teknolog utvikling som kan forbedre samspillet til teknologidimensjonen på sikt. Samtidig må det påpekes at tid er en knapp ressurs i klimaomstillingsprosessen.

## 7.0 Konklusjon

Vi ønsket med denne bacheloroppgaven å belyse viktigheten av den teknologiske dimensjonen i innovasjonsteori. Innovasjonsteori legger vekt på systembygging rundt teknologien. Institusjonell endring, kunnskapsutvikling, og dannelsen av nettverk er essensielle prosesser for at nye teknologier skal kunne konkurrere mot etablerte teknologier. Likevel setter teknologien og de materielle egenskapene i seg selv barrierer for denne prosessen. Oppgaven stiller spørsmål ved tidsrommet for bred applikasjon av hydrogen, mot utslippsreduksjon på 50-55% i 2030, og netto null i 2050. Blått og grønt hydrogen er preget av komplekse verdikjeder og effektivitetstap i alle ledd. I tillegg til store utfordringer knyttet til bærekraftig ressursbruk og HMS. Et premiss for oppskalering av hydrogenproduksjon og anvendelse er sirkulær økonomi, slik at levetiden til ressursene blir forlenget.

For å svare på problemstillingen «*Hvordan samspiller teknologi, organisasjon og diskurs i det norske teknologiske innovasjonssystemet tilknyttet hydrogen?*»

Dimensjonene i TOD sammenfaller med en rekke funksjoner i TIS. Gjennom samspillet mellom diskurs, organisasjon og teknologi har aktørene opparbeidet legitimitet tilknyttet hydrogen, en ressursmobilisering, kunnskapsutvikling- og spredning gjennom nettverk og klynger, startet en markedsetablering, og en angivelse av retning. Likevel møter systemet utfordringer grunnet teknologidimensjonen, med skjevhet i entreprenørskapsaktivitet langs verdikjeden som kan medføre ufullstendig teknologiutvikling.

Vi ser en skjevhet i samspillet mellom dimensjonene teknologi, organisasjon og diskurs gjennom de fleste leddene i verdikjeden. Den overordnede diskursen er tilknyttet rask klimaomstilling, hvor narrativene sentrerer rundt grønn vekst, bærekraft, og potensiale til å avkarbonisere en rekke sektorer (D). Det er en sterk tendens til organisering av nettverk og klynger rundt hydrogenteknologier, men det er en skjevhet i verdikjeden hvor noen ledd, grønn produksjon og maritim applikasjon, har betydelig bedre organisering enn andre (O). Teknologien i alle leddene til verdikjeden viser utstrakte og konkrete teknologiske utfordringer (T).

Vi mener derfor at diskursdimensjonen ikke samsvarer med teknologidimensjonen grunnet tidsrammen narrativet presenter, de teknologiske barrierene, samt materielle og sosiopolitiske

utfordringene som oppstår ved økt forbruk. Narrativet om hydrogen som energibæreren som skal løse «alt» og avkarbonisere flere sektorer er en teknologioptimistisk fortelling. Det er helt nødvendig at sektorer som allerede benytter hydrogen omstilles fra grått til grønt hydrogen, men narrativet om bruk av hydrogen i en rekke applikasjonsområder mener vi er sløsing med tid og ressurser vi ikke har råd til å sløse i et klimaperspektiv. Selv om organisasjonsdimensjonen og diskursdimensjonen samsvarer, mener vi at de tekniske barrierene, effektivitetstap og ressursbruk, er såpass store at teknologiutvikling vil ha redusert betydning i et klimaomstillingsperspektiv. Det er og viktig å påpeke at hydrogen er en indirekte klimagass, dette kan føre til utfordringer tilknyttet bred anvendelse.

Hydrogen vil finne sin nisje, og vi mener dette er innen høytemperaturindustri grunnet høy effektivitetsgrad ved direkte antenning for varmeproduksjon, i tillegg til kjemisk industri som innsatsfaktor for å avkarbonisere sektoren. IPCC påpeker at klima- og naturkrisen medfører et tidspres for omstilling, i tillegg til arealkrav og ressurskrav for at omstillingen skal betegnes som bærekraftig. Norge er juridisk bundet gjennom Parisavtalen til å etterleve utslippsreduksjon innen 2030, og 2050.

Vi ønsker bedre samspill mellom dimensjonene, spesielt opp mot teknologidimensjonen. Dagens skjeve samspill kan medføre utsettelse av klimaomstilling, og videre innlåsing i det fossile energiregimet. Vi har ikke tid til å vente på fremtidens energibærer, vi må aktivt bruke og videreutvikle klimavennlig teknologi som er moden og bredt anvendt i dag. Klima, og vi, er tjent med en realistisk fortelling om teknologien og de tekniske barrierene. Større vektlegging av teknologidimensjonen mener vi kan medføre gode prosesser og mer organisering rundt de tekniske barrierene, som og reduserer usikkerhet rundt implementering av hydrogen. Teknologien setter begrensning for hva som er mulig, tross fokuset TIS har på dimensjonene diskurs og organisasjon.

Tidspresset i klima- og naturkrisen medfører at tiltak må være effektive, realistiske, og målrettet. Det er helt essensielt å balansere både klima- og naturkrisen, og at utslippsreduksjon ikke går på bekostning av naturkrisen. Hydrogensatsingen må sentreres rundt grønt hydrogen både da dette unnviker risiko for videre innlåsing i det fossile energiregimet, og unngår utlipp i samme skala som blått hydrogen. Overforbruk mener vi likevel er hovedproblemet. Videre skalering av grønn hydrogenproduksjon må foregå i samspill med reduksjon i totalforbruk, slik at bærekraftperspektivet ivaretas.



## Referanseliste

- Aarnes, J., Haugom, P. H., Norheim B. (2019) *PRODUKSJON OG BRUK AV HYDROGEN I NORGE*. (2019-0039, Rev. 1) DNV GL  
<https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf>
- Aasland, T. (2022, Oktober 5). *Åpning FME-sentre HYDROGENi og HYvalue* [Tekst].  
<https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/apning-fme-sentre-hydrogeni-og-hyvalue/id2931696/>
- Aasebø, T. S. (2021). Fortellinger om gutters krise, jenters fremgang og skolens utfordringer med sosiale ulikheter. *Nordisk Tidsskrift for Pedagogikk Og Kritikk*, 7(0), 1.  
<https://doi.org/10.23865/ntpk.v7.2178>
- Agder H2Nettverk. (u.å.). *Agder H2Nettverk*. <https://www.agderh2.no/>
- AirBus. (2021, Juni 24). *ZEROe*. Airbus. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>
- Amos, W. (1998). *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*.  
<https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25106.pdf>
- Anameric, B., & Kawatra, K. (2023). *PROPERTIES AND FEATURES OF DIRECT REDUCED IRON*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*.  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827500600835576>
- Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- Antonini, C., Spek, D.V.M., Sutter, D., Streb, A., Gazzani, M., Mazzotti, M. (2018). *Enabling a Zero-Carbon Economy via Hydrogen and CCS* (Act Elegancy rapport 271498). Sintef.  
[https://www.sintef.no/globalassets/project/elegancy/deliverables/elegancy\\_d1.3.1\\_optimal-plants-low-carbon-h2.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/elegancy/deliverables/elegancy_d1.3.1_optimal-plants-low-carbon-h2.pdf)
- Asheim, B. T., Smith, H. L., & Oughton, C. (2011). Regional Innovation Systems: Theory, Empirics and Policy. *Regional Studies*, 45(7), 875–891. <https://doi.org/10.1080/00343404.2011.596701>
- Ayers, K. E., Anderson, E. B., Capuano, C., Carter, B., Dalton, L., Hanlon, G., Manco, J., & Niedzwiecki, M. (2010). Research Advances towards Low Cost, High Efficiency PEM Electrolysis. *ECS Transactions*, 33(1), 3–15. <https://doi.org/10.1149/1.3484496>
- Aziz, M. (2021). Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. *Energies*, 14(18), 5917. <https://doi.org/10.3390/en14185917>
- Balcombe, P., Speirs, J., Johnson, E., Martin, J., Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1077–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.089>
- Bareið, K., de la Rua, C., Möckl, M., & Hamacher, T. (2019). Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. *Applied Energy*, 237, 862–872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>
- Bauer, C., Treyer, K., Antonini, C., Bergerson, J., Gazzani, M., Gencer, E., Gibbins, J., Mazzotti, M., McCoy, S. T., McKenna, R., Pietzcker, R., Ravikumar, A. P., Romano, M. C., Ueckerdt, F.,



- Vente, J., & van der Spek, M. (2022). On the climate impacts of blue hydrogen production. *Sustainable Energy & Fuels*, 6(1), 66–75. <https://doi.org/10.1039/d1se01508g>
- Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S., & Rickne, A. (2008a). *Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis*. 37(3), 407–429. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003>
- Bergek, A., Jacobsson, S., & Sandén, B. (2008b). “Legitimation” and “development of positive externalities”: two key processes in the formation phase of technological innovation systems. *Technology Analysis & Strategic Management*. doi.org/10.1080/09537320802292768
- Beswick, R., Oliveira, A., & Yan, Y. (2021). *Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?* ACS Energy Letters. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.1c01375>
- Bukholm, S. I. (2021) *Electric steam methane reforming: Economical and environmental implications of replacing methane with electricity for heating in a steam methane reformer*. [Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet]. NTNU open. <https://hdl.handle.net/11250/2785385>
- Buvik, M., Cabrol, J., Spilde, D., Skaansar, E., & Roos, A. (u.å.). Norsk og nordisk effektbalanse fram mot 2030. In *NVE* (p. 26). [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2022/rapport2022\\_20.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2022/rapport2022_20.pdf)
- Bøe, M. V. (2022, Desember 16). *Energi*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/energi>
- Bøeng, A. C. (2021, November 16). *Har verden nok fornybar strøm til transportsektoren?* SSB. <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/artikler/har-verden-nok-fornybar-strom-til-transportsektoren>
- Cardella, U., Decker, L., & Klein, H. (2017). Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13329–13338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.068>
- Carlsson, B. (1991). *On the nature, function and composition of technological systems*. *Journal of Evolutionary Economics*. [https://www.academia.edu/21178027/On\\_the\\_nature\\_function\\_and\\_composition\\_of\\_technological\\_systems](https://www.academia.edu/21178027/On_the_nature_function_and_composition_of_technological_systems)
- CARPETIS, C. (1982). Estimation of storage costs for large hydrogen storage facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7(2), 191–203. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90146-x](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90146-x)
- CDC. (2017). *Ammonia | Medical Management Guidelines | Toxic Substance Portal | ATSDR*. Cdc.gov. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=7&toxid=2>
- Coertzen, R., Potts, K., Brannock, M., & Dagg, B. (2022, Mars 11). *Water for Hydrogen*. GHD.com. <https://www.ghd.com/en/perspectives/water-for-hydrogen.aspx>
- Collins, L. (2022, August 31). *Equinor: “Blue hydrogen will be cheaper than green for the next two decades — from Norway, at least.”* Recharge. <https://www.rechargenews.com/energy-transition/equinor-blue-hydrogen-will-be-cheaper-than-green-for-the-next-two-decades-from-norway-at-least/2-1-1287257>
- Collodi, G., Azzaro, G., Ferrari, N., & Santos, S. (2017). Techno-economic Evaluation of Deploying CCS in SMR Based Merchant H<sub>2</sub> Production with NG as Feedstock and Fuel. *Energy Procedia*, 114, 2690–2712. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1533>





- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*, 9, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- Dalland, O. (2020). *Metode og oppgaveskriving*. (7. Utgave). Gyldendal Akademisk.
- Dehdari, L., Burgers, I., Xiao, P., Li, K. G., Singh, R., & Webley, P. A. (2022). Purification of hydrogen from natural gas/hydrogen pipeline mixtures. *Separation and Purification Technology*, 282, 120094. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120094>
- Demir, M. E., & Dincer, I. (2018). Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10420–10430. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.002>
- Diac, C., Maxim, F. I., Tirca, R., Ciocanea, A., Filip, V., Vasile, E., & Stamatina, S. N. (2020). Electrochemical Recycling of Platinum Group Metals from Spent Catalytic Converters. *Metals*, 10(6), 822. <https://doi.org/10.3390/met10060822>
- DNV. (2019). *Green hydrogen production*. Dnv.com. <https://eto.dnv.com/technology-progress-report-2021/energy-use-conversion/green-hydrogen-production>
- DNV. (2021). AMMONIA AS A MARINE FUEL SAFETY HANDBOOK. In *grontskipsfartsprogram.no*. <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2022/03/Ammonia-as-Marine-Fuel-Safety-Handbook-Rev-01.pdf>
- DNV. (2022). DNV Hydrogen Forecast 2022 to 2050. In *dnv.com*. <https://www.dnv.com/news/hydrogen-at-risk-of-being-the-great-missed-opportunity-of-the-energy-transition-226628>
- Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., & Ekins, P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2065–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>
- Durbin, D. J., & Malardier-Jugroot, C. (2013). Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14595–14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.058>
- EEB - European Environmental Bureau. (2021, Mai 7). *Hydrogen: The reality behind the hype - EEB Position Paper*. Eeb.org. <https://eeb.org/library/hydrogen-eeb-position-paper/>
- Egge, H. (2020, April 2). *Hva er egentlig grått, grønt, blått og turkis hydrogen?* SINTEF. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/hva-er-egentlig-gra-gronn-bla-og-turkis-hydrogen/>
- Eide, M.J., Johansen, M. (2021). *Klynger som drivkraft for næringsutvikling: En casestudie av bedrifters nyttiggjøring av klyngedeltakelse* [Masteroppgave, Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.] NTNU Open. <https://hdl.handle.net/11250/2780509>
- Enova. (u.å.). *Hydrogen til maritim transport | Hydrogen*. Enova. Hentet Mai 29, 2023, fra <https://www.enova.no/bedrift/hydrogen/hydrogen-til-maritim-transport/>
- Enova. (2021). *Hydrogen – Søk om støtte til ny teknologi*. Enova. <https://www.enova.no/bedrift/hydrogen/>
- Enova. (2022). *Hydrogen til maritim transport | Hydrogen | Enova*. Enova. <https://www.enova.no/bedrift/hydrogen/hydrogen-til-maritim-transport/>



- EPA - United States Environmental Protection Agency. (2016, Januar 12). *Understanding Global Warming Potentials*. US EPA. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Equinor. (u.å.). *Slik vil rent norsk hydrogen sørge for Europas energisikkerhet*. Www.equinor.com. Hentet Mai 29, 2023, fra <https://www.equinor.com/no/magasin/rent-norsk-hydrogen-til-europa>
- Equinor. (2005, Februar 6). *Creating hydrogen centre - equinor.com*. Equinor.com. <https://www.equinor.com/news/archive/2005/06/02/CreatingHydrogenCentre>
- Equinor. (2020). *Hydrogen*. Equinor. <https://www.equinor.com/no/energi/hydrogen>
- Equinor. (2023). *Slik vil rent norsk hydrogen sørge for Europas energisikkerhet*. Equinor.com. <https://www.equinor.com/no/magasin/rent-norsk-hydrogen-til-europa>
- Erbach, G. & Jensen, L. (2021). EU Hydrogen policy: Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy. (PE 689.332). European Parliamentary Research Service. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS\\_BRI\(2021\)689332\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)689332_EN.pdf)
- EU. (u.å.). *Supporting Clean Hydrogen*. Single-Market-Economy.ec.europa.eu. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen_en)
- EU. (2020). *EUR-Lex - 52020DC0301 - EN - EUR-Lex*. Eur-Lex.europa.eu. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- Fagerberg, J., Mowery, D. C., & Nelson, R. R. (2006). The Oxford Handbook of Innovation. I *Google Books*. OUP Oxford. [https://books.google.no/books?id=NA6APkrCSKwC&printsec=frontcover&hl=no&source=gs\\_bse\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.no/books?id=NA6APkrCSKwC&printsec=frontcover&hl=no&source=gs_bse_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Fedoryshyn, N. (2017, August 14). *Hva påvirker utslipp til luft fra veitrafikk?* Ssb.no. <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/hva-pavirker-utslipp-til-luft-fra-veitrafikk>
- Finansdepartementet. (2021, November 8). *Avgift på utslipp av klimagasser og veibruksavgift*. Regjeringen.no; Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/avgift-pa-utslipp-av-klimagasser-og-veibruksavgift/id2884952/>
- Finansdepartementet. (2022, Juni 9). *IMF: Sterk vekst i norsk økonomi*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/imf-sterk-vekst-i-norsk-okonomi/id2917951/>
- Fodstad, M. (2020). *Veikart for energi i Norge mot 2050 (Rapport nr. 2019:01467)*. SINTEF. [https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2641880/Veikart\\_energi\\_2050%2b%25281%2529.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2641880/Veikart_energi_2050%2b%25281%2529.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Forsberg, C. W. (2007). Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(4), 431–439. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.059>
- Forskningsrådet. (2020). *Forskningsrådets hydrogensatsing*. Forskningsradet.no. <https://www.forskningsradet.no/utlysninger/hydrogensatsing-2021/>

- Gabriellii, C. (2021, September 8). *SINTEF skal forske på ammoniakk som grønt drivstoff til skipsfarten - SINTEF*. SINTEF. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/sintef-skal-forske-pa-ammoniakk-som-gront-drivstoff-til-skipsfarten/>
- Gallagher, K. S., Grübler, A., Kuhl, L., Nemet, G., & Wilson, C. (2012). The Energy Technology Innovation System. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 137–162. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-060311-133915>
- Gardarsdottir, S. O., & Sundseth, K. (2023, April 21). *Hydrogen som energi for fremtiden: SINTEF Hydrogen forskning*. SINTEF. <https://www.sintef.no/fagomrader/hydrogen/>
- Gardiner, M. (2009). *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record*. [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013\\_energy\\_requirements\\_for\\_hydrogen\\_gas\\_compression.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf)
- GCE Node. (u.å.-a). *About GCE NODE*. GCE NODE. <https://gcnoden.no/about-node/>
- GCE Node. (u.å.-b). *Projects*. GCE NODE. Hentet mai 11, 2023, fra <https://gcnodeno.tempurl.host/project/>
- GCE Node. (2022, Juli 12). *Developing Agder as a hydrogen hub*. GCE NODE. <https://gcnoden.no/news/developing-agder-as-a-hydrogen-hub/>
- Ghafri, A., Swanger, A., Jusko, V., Arman Siahvashi, Perez, F., Johns, M. M., & May, E. F. (2022). *Modelling of Liquid Hydrogen Boil-Off*. 15(3), 1149–1149. <https://doi.org/10.3390/en15031149>
- Google Finance. (2023a, Mai 25). *EUR/NOK Currency Exchange Rate & News - Google Finance*. [Www.google.com. https://www.google.com/finance/quote/EUR-NOK?window=5Y](https://www.google.com/finance/quote/EUR-NOK?window=5Y)
- Google Finance. (2023b, Mai 25). *USD/NOK Currency Exchange Rate & News - Google Finance*. [Www.google.com. https://www.google.com/finance/quote/USD-NOK?window=5Y](https://www.google.com/finance/quote/USD-NOK?window=5Y)
- Gorski, J., Jutt, T., & Wu, K. (2021). *Carbon intensity of blue hydrogen production Accounting for technology and upstream emissions Carbon intensity of blue hydrogen production Accounting for technology and upstream emissions*. <https://www.pembina.org/reports/carbon-intensity-of-blue-hydrogen-revised.pdf>
- Granados-Fernández, R., Montiel, M. A., Díaz-Abad, S., Rodrigo, M. A., & Lobato, J. (2021). *Platinum Recovery Techniques for a Circular Economy*. *Catalysts*, 11(8), 937. <https://doi.org/10.3390/catal11080937>
- Greenstat. (2022). *Making green happen – Investor presentation*. [https://api.greenstat.no/uploads/Greenstat\\_Investor\\_Presentation\\_Okt\\_2\\_62fdbd2344.pdf?updated\\_at=2022-10-11T14:24:17.339Z](https://api.greenstat.no/uploads/Greenstat_Investor_Presentation_Okt_2_62fdbd2344.pdf?updated_at=2022-10-11T14:24:17.339Z)
- Greenstat. (u.å.). *Greenstat*. Greenstat. <https://greenstat.no/prosjekter/hydrogenknutepunkt-agder>
- Greenstat. (2023, Mars 9). *Positiv utvikling for Stord Hydrogen*. Greenstat. <https://greenstat.no/nyheter/positiv-utvikling-for-hydrogenproduksjonsanlegget-pa-stord>
- Grønmo, S. (2021, Mai 10). *forskningsmetode - samfunnsvitenskap*. Store Norske Leksikon. [https://snl.no/forskningsmetode\\_-\\_samfunnsvitenskap](https://snl.no/forskningsmetode_-_samfunnsvitenskap)

- Grøthe, O. A., & Vårdal, T. J. S. (2022). *Wrights Lov - Å føreseie produksjonskostnader*. [Bacheloroppgave, Høgskulen på Vestlandet]. HVL Open. [https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/3011895/Gr%c3%b8the\\_V%c3%a5rdal.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/3011895/Gr%c3%b8the_V%c3%a5rdal.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gulbrandsen, L., H. & Hermansen, E., A., T. (2022) Ever Closer Union? Norges tilknytning til EUs klimaregelverk, 170-183. <https://tidsskriftet-ip.no/index.php/intpol/article/view/3674/6539>
- Gülzow, E., & Schulze, M. (2004). Long-term operation of AFC electrodes with CO<sub>2</sub> containing gases. *Journal of Power Sources*, 127(1-2), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.020>
- Guterres, António. (2022). COP27 [Tale]. <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2022-11-07/secretary-generals-remarks-high-level-opening-of-cop27>
- H2Cluster. (u.å.-a). *Partners*. Arena H2Cluster the Norwegian Hydrogen Cluster. <https://h2cluster.com/partners>
- H2Cluster. (u.å.-b). *Projects*. Arena H2Cluster the Norwegian Hydrogen Cluster. <https://h2cluster.com/projects>
- H2Cluster. (u.å.-c). *The cluster*. Arena H2Cluster the Norwegian Hydrogen Cluster. <https://h2cluster.com/the-cluster>
- Hagen, Ø. (2004). *Forutsetninger for radikal innovasjon i etablert virksomhet*. NTNU. [https://www.ntnu.no/c/document\\_library/get\\_file?uuid=3d828928-1695-4675-a936-cca21149012b&groupId=10370](https://www.ntnu.no/c/document_library/get_file?uuid=3d828928-1695-4675-a936-cca21149012b&groupId=10370)
- Hanson, J., Kasa, S., & Wicken, O. (2011). *Energirikdommens paradokser. Innovasjon som klimapolitikk og næringsutvikling*. Universitetsforlaget.
- Hao, H., Geng, Y., Tate, J. E., Liu, F., Sun, X., Mu, Z., Xun, D., Liu, Z., & Zhao, F. (2019). Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition. *One Earth*, 1(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.08.012>
- Hekkert, M. P., Suurs, R. A. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S., & Smits, R. E. H. M. (2007). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(4), 413–432. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002>
- Helle, V. (2021, September 20). *Skal finne optimale forhold for å få hydrogen opp fra bakken - Norce*. NORCE Norwegian Research Centre. <https://www.norceresearch.no/aktuelt/skal-finne-optimale-forhold-for-a-fa-hydrogen-opp-fra-bakken>
- Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Holden, E. (2002, September 15). *Hydrogen er fremtidens drivstoff - og vil være det i 50 år til!* Samferdsel; Transportøkonomisk Institutt. <https://samferdsel.toi.no/article11736-323.html>

- Holger. (2021, November 21). *Miljø- og naturkonsekvenser av potensielle energibærere*. Naturvernforbundet. <https://naturvernforbundet.no/uttalelser-fra-styrende-organer/miljo-og-naturkonsekvenser-av-potensielle-energibaerere/>
- Holsen, B. (2022). *Hydrogen: A new market on its way*. Statkraft.com. <https://www.statkraft.com/newsroom/news-and-stories/2023/hydrogen-a-new-market-on-its-way/>
- Horne, H., & Hole, J. (2019). *FAKTA - Hydrogen i det moderne energisystemet*. NVE. [http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019\\_12.pdf](http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_12.pdf)
- Hovland, K. M. (2019, Mai 13). *Norled får EU-støtte: Vurderer en ekstra hydrogenferge*. E24.no. <https://e24.no/energi-og-klima/i/MRd7KR/norled-faar-eu-stoette-vurderer-en-ekstra-hydrogenferge>
- Howarth, J. (2019, Desember 2). *When will fossil fuels run out?* Octopus Energy; Octopus Energy. <https://octopus.energy/blog/when-will-fossil-fuels-run-out/>
- Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676–1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
- Hydrogenrådet. (2006). *Norsk storsatsing på hydrogen - Handlingsplan for perioden 2007 -2010 Hydrogenrådet i henhold til mandat gitt av Olje-og energidepartementet og Samferdselsdepartementet*. [https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/temabilder/petroleumsforskning/norsk\\_storsatsing\\_pa\\_hydrogen\\_handlingsplan\\_2007-2010.pdf](https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/temabilder/petroleumsforskning/norsk_storsatsing_pa_hydrogen_handlingsplan_2007-2010.pdf)
- HyValue. (u.å.). *Centre Partners | HyValue*. Hyvalue.no. <https://hyvalue.no/centre-partners>
- IEA - International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities June 2019*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf)
- IEA - International Energy Agency (2021), *About CCUS*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/about-ccus>, License: CC BY 4.0
- IEA - International Energy Agency. (2022). *Norway Natural Gas Security Policy – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/articles/norway-natural-gas-security-policy>
- IFE. (2023, Februar 15). *Skal gjøre hydrogenproduksjon billigere – med magneter*. IFE. <https://ife.no/skal-gjore-hydrogenproduksjon-billigere-med-magneter/>
- Innovasjon Norge. (u.å.). *Begreper - Veileder: Ledelse og organisering av klyngeprosjekter*. Wwv.innovasjon norge.no. <https://www.innovasjon norge.no/static/norinclu-veileder/index.php/begreper.html>
- Innovasjon Norge. (2021). *Hydrogen – mer enn en hype!* Innovasjon norge.no. <https://www.innovasjon norge.no/no/om/nyheter/2021/hydrogen--mer-enn-en-hype/>
- Innovasjon Norge. (2023, Januar 12). *Om NIC*. Innovasjon Norge. [https://www.innovasjon norge.no/no/subsites/forside/Om\\_NIC/](https://www.innovasjon norge.no/no/subsites/forside/Om_NIC/)
- IPCC. (2023). *SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*. In *IPCC Reports* (p. 53). IPCC. [https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf)

- Isaksen, A., & Ørstavik, F. (2022, August 23). *Innovasjonssystem*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/innovasjonssystem>
- Iversen, F., & Nøttveit, A. (u.å.). *Norwegian Centre for Hydrogen Research (HyValue) - Norce*. NORCE Norwegian Research Centre. <https://www.norceresearch.no/en/projects/norwegian-centre-for-hydrogen-research-hyvalue>
- Jacobsson, S., & Johnson, A. (2000). The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. *Energy Policy*, 28(9), 625–640. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(00\)00041-0](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(00)00041-0)
- Jakobsen, D., Åtland, V. (2016) *Concepts for Large Scale Hydrogen Production*. [Masteroppgave, Norges tekniske-naturvitenskaplige universitet] NTNU Open. <http://hdl.handle.net/11250/2402554>
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E. van, & Carbo, M. (2015). Pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 167–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028>
- Jensen, S. B. (2020, November 7). *Håpløst dyrt å transportere hydrogen – derfor bør den produseres lokalt*. Wwww.dn.no. <https://www.dn.no/innlegg/hydrogen/fornybar-energi/olje-og-gass/haplost-dyrt-a-transportere-hydrogen-derfor-bor-den-produseres-lokalt/2-1-904612>
- Johnson, W. H. (1874). *On some remarkable changes produced in iron and steel by the action of hydrogen and acids*. Wwww.jstor.org. <https://www.jstor.org/stable/pdf/113285.pdf>
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, Fast and Slow* (p. 80). Farrar, Straus and Giroux.
- Kårstein, A. (2008). *HyNor -den norske hydrogenveien?* (p. 11). [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/244096/139432\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/244096/139432_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)
- Keesom, W. H., & Macwood, G. E. (1938). The viscosity of liquid hydrogen. *Physica*, 5(8), 745–748. [https://doi.org/10.1016/s0031-8914\(38\)80196-8](https://doi.org/10.1016/s0031-8914(38)80196-8)
- Khan, M. A., Al-Shankiti, I., Ziani, A., & Idriss, H. (2021). Demonstration of green hydrogen production using solar energy at 28% efficiency and evaluation of its economic viability. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(4), 1085–1094. <https://doi.org/10.1039/d0se01761b>
- Khatiwada, D., Vasudevan, R. A., & Santos, B. H. (2022). Decarbonization of natural gas systems in the EU – Costs, barriers, and constraints of hydrogen production with a case study in Portugal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112775>
- Khojasteh Salkuyeh, Y., Saville, B. A., & MacLean, H. L. (2017). Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 18894–18909. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.219>
- KLD - Klima- og miljødepartementet. (2020). Helhetlige forvaltningsplaner for de norske havområdene. I *Regjeringen* (p. 99). <https://www.regjeringen.no/contentassets/5570db2543234b8a9834606c33caa900/no/pdfs/stm201920200020000dddpdfs.pdf>

- KLD - Klima- og miljødepartementet. (2021a, Oktober 11). *EØS-avtalen om klima og miljø*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/eos-avtalen-og-miljo/id2339794/>
- KLD - Klima- og miljødepartementet. (2021b, Oktober 22.). Klimaendringer og norsk klimapolitikk. Regjeringen. <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/>
- KLD - Klima- og miljødepartementet, OED - Olje- og energidepartementet, & Statsministerens kontor. (2021, December 17). *Milliardstøtte til hydrogenprosjekter*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/milliardstotte-til-hydrogenprosjekter/id2892615/>
- Klell, M. (2010). Storage of Hydrogen in the Pure Form. *Handbook of Hydrogen Storage*, 1–37. <https://doi.org/10.1002/9783527629800.ch1>
- Klerke, A., Christensen, C. H., Nørskov, J. K., & Vegge, T. (2008). Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 18(20), 2304. <https://doi.org/10.1039/b720020j>
- Kofstad, P., & Pedersen, B. (2023, Januar 22). *Hydrogen*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/hydrogen>
- Kolberg, M., Ali, I., Vissgren, J., & Carlsen, M. R. (2019, Juni 11). *Eksplasjon ved hydrogenstasjon*. NRK. <https://www.nrk.no/norge/eksplasjon-ved-hydrogenstasjon-1.14582914>
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Lahn, B. (2021, November 29.) Parisavtalen. I Store Norge Leksikon. <https://snl.no/Parisavtalen>
- Larsen, H. (2023, Mars 23). *Mener karbonfangst kan koste en tredel av det Equinor sier*. NRK; NRK. <https://www.nrk.no/tromsogfinnmark/regnet-ut-at-karbonfangst-pa-melkoya-kan-koste-en-tredel-av-det-equinor-sier-1.16350147>
- Larsen, M. H. (2023, Januar 10). *Aasland slår tilbake mot Borten Moe – avviser kraftsløseri*. E24.No; E24. <https://e24.no/energi-og-klima/i/abjwKd/aasland-slaar-tilbake-mot-borten-moe-avviser-kraftsloeseri>
- Laureys, A., Depraetere, R., Cauwels, M., Depover, T., Hertelé, S., & Verbeken, K. (2022). Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 101, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104534>
- Li, J., Su, Y., Yu, B., Wang, P., & Sun, D. (2021). *Influences of Hydrogen Blending on the Joule–Thomson Coefficient of Natural Gas*. ACS Omega. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c00248>
- Lindholm-Dahlstrand, Å., Andersson, M., & Carlsson, B. (2018). Entrepreneurial experimentation: a key function in systems of innovation. *Small Business Economics*, 53(3), 591–610. <https://doi.org/10.1007/s11187-018-0072-y>
- Løfblad, R. E. (2019). Hydrogenproduksjon fra elektrolyse ved fjernvarmeanlegg i Norge: Vurdering av rammevilkår og lønnsomhet. In *nmbu.brage.unit.no*. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu->

[xmlui/bitstream/handle/11250/2624149/Masteroppgave%20Rikke%20L%c3%b8fblad%20.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://hdl.handle.net/11250/2624149/Masteroppgave%20Rikke%20L%c3%b8fblad%20.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- Løkke, J. A. (2018, November 30). *Derfor bør Vegvesenet styre unna flytende hydrogen*. Tu.no. <https://www.tu.no/artikler/derfor-bor-vegvesenet-styre-unna-flytende-hydrogen/452539>
- Mac Dowell, N., Sunny, N., Brandon, N., Herzog, H., Ku, A. Y., Maas, W., Ramirez, A., Reiner, D. M., Sant, G. N., & Shah, N. (2021). The hydrogen economy: A pragmatic path forward. *Joule*, 5(10), 2524–2529. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.014>
- Maritime CleanTech. (u.å.-a). *About NCE Maritime CleanTech*. NCE Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/about-us/>
- Maritime CleanTech. (u.å.-b). *Flagships - Hydrogen vessels*. Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/project/flagships/>
- Maritime CleanTech. (u.å.-c). *H2NOR Fuel Cell*. Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/project/h2nor-fuel-cell/>
- Maritime CleanTech. (u.å.-d). *Our Partners*. Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/partners/>
- Maritime CleanTech. (u.å.-e). *Some of our projects*. Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/projects/>
- Meld. St. 11 (2021–2022). *Tilleggsmelding til Meld. St. 36 (2020 – 2021) Energi til arbeid – langsiktig verdiskaping fra norske energiresurser*. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-11-20212022/id2908056/?ch=5>
- Meld. St. 21 (2011–2012). *Norsk klimapolitikk*. Miljødepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld-st-21-2011-2012/id679374/>
- Meld. St. 28 (2019–2020). *Vindkraft på land – Endring i konsesjonsbehandlingen*. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-28-20192020/id2714775/?ch=1>
- Meld. St. 33 (2019–2020). *Langskip – fangst og lagring av CO2*. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/contentassets/943cb244091d4b2fb3782f395d69b05b/nn-no/pdfs/stm201920200033000dddpdfs.pdf>
- Meld. St. 36 (2020–2021). *Energi til arbeid – langsiktig verdiskaping fra norske energiresurser*. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-36-20202021/id2860081/?ch=1>
- Merle, G., Wessling, M., & Nijmeijer, K. (2011). Anion exchange membranes for alkaline fuel cells: A review. *Journal of Membrane Science*, 377(1-2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.04.043>
- Miljødirektoratet. (2022, February 14). *Fylkeskommunalt Hydrogennettverk - Miljødirektoratet. Klimasats Sluttrapport*. <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klimasats/2022/fylkeskommunalt-hydrogennettverk/#>



- Miljødirektoratet. (2022, November 14.). Norske utslipp og opptak av klimagasser. <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/klimagassutslipp-fra-olje--og-gassutvinning/>
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Mueller-Langer, F., Tzimas, E., Kaltschmitt, M., & Peteves, S. (2007). Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16), 3797–3810. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.027>
- Musiolik, J., Markard, J., & Hekkert, M. (2012). Networks and network resources in technological innovation systems: Towards a conceptual framework for system building. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(6), 1032–1048. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.01.003>
- Møller-Holst, S. (u.å.). *Hydrogenteknologi og energilagring*. SINTEF. <https://www.sintef.no/ekspertise/sintef-industri/hydrogenteknologi-og-energilagring/>
- Møller-Holst, S. (2022, Mars 16). – *På tide å børste støvet av hydrogenbilsatsingen* - SINTEF. SINTEF. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2022/-pa-tide-a-borste-stovet-av-hydrogenbilsatsingen/>
- Nekså, P. (2023). *Flytendegjøring av hydrogen* - SINTEF. SINTEF. <https://www.sintef.no/ekspertise/sintef-energi/flytendegjoring-av-hydrogen/>
- NFD - Nærings- og fiskeridepartementet. (2022, June 23). *Grønt Industriløft*. Regjeringen. [https://www.regjeringen.no/contentassets/1c3d3319e6a946f2b57633c0c5fcc25b/veikart\\_skisse\\_uu\\_ja.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/1c3d3319e6a946f2b57633c0c5fcc25b/veikart_skisse_uu_ja.pdf)
- NHO. (2022, Juni 28). *Hydrogen i tungtransport - prosjektmøte for pilot H2 Truck*. Wwww.nho.no. <https://www.nho.no/samarbeid/gront-landtransportprogram/artikler/h2-truck-prosjektmete/>
- Njøs, R., & Sjøtun, S. G. (2016). *Innovasjon: Ei kortfatta innføring i sentrale begrep og tenkemåtar*. HVL Open. <https://hdl.handle.net/11250/2643666>
- Nordal, A. G. (2020, Mars 11). – *Hverken diesel eller el er løsningen for tungtransport*. Wwww.tekna.no. <https://www.tekna.no/magasinet/hverken-diesel-eller-el-er-loesningen-for-tungtransport/>
- Norsk elbilforening. (2021, September 21). *Statistikk elbil*. Elbil.no. <https://elbil.no/om-elbil/elbilstatistikk/>
- Norsk Hydro. (2013). *Hydrogen siden 1926*. Hydro.com; Norsk Hydro. <https://www.hydro.com/no-NO/energy/about-hydro-energy/kraften-bak-hydro-energis-historie/hydrogen-siden-1926/>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (u.å.-a). *Hydrogen og sikkerhet*. Norsk Hydrogenforum <https://www.hydrogen.no/om-hydrogen/sikkerhet#Brann-+og+eksplosjonsfare>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (u.å.-b). *Medlemmer*. Norsk Hydrogenforum. <https://www.hydrogen.no/om-nhf/medlemmer>

- NHF - Norsk Hydrogenforum. (u.å.-c). *Om NHF*. Norsk Hydrogenforum.  
<https://www.hydrogen.no/om-nhf/>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (2022a, Oktober 12). *Det fylkeskommunale hydrogennettverket*. Norsk Hydrogenforum. <https://www.hydrogen.no/om-nhf/fylkesnettverket>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (2022b, Desember 6). *Tysklands reviderte hydrogenstrategi baner vei for norsk eksport*. Norsk Hydrogenforum. <https://www.hydrogen.no/aktuelt/nyheter/tysk-revidert-hydrogenstrategi-apner-for-norsk-eksport>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (2023a). *Hydrogen får nøkkelrolle i revidert fornybardirektiv*. Norsk Hydrogenforum. <https://www.hydrogen.no/aktuelt/nyheter/hydrogen-far-nokkelrolle-i-revidert-fornybardirektiv>
- NHF - Norsk Hydrogenforum. (2023b, April 13). *The Norwegian Hydrogen Landscape*. Norsk Hydrogenforum. <https://www.hydrogen.no/faktabank/det-norske-hydrogenlandskapet>
- Norskpetroleum. (u.å.). *Om kalkulatoren*. Norskpetroleum.no.  
<https://www.norskpetroleum.no/kalkulator/om-kalkulatoren/>
- Norskpetroleum. (2023, Februar 22). *Ressursregnskap*. Norskpetroleum.no; Olje- og energidepartementet. <https://www.norskpetroleum.no/petroleumsressursene/ressursregnskap-norsk-sokkel/>
- NOU 1974: 55. (1974). *Norges ressursituasjon i global sammenheng*.  
[https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2012121007158?page=0](https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb_digibok_2012121007158?page=0)
- NOU 2004: 11. (2004). *Hydrogen som fremtidens energibærer*. Olje- og energidepartementet og Samferdselsdepartementet.  
<https://www.regjeringen.no/contentassets/73005ad86d4f4bb89f28457fdc69b664/no/pdfs/nou200420040011000dddpdfs.pdf>
- NOU 2023: 3 (2023). *Mer av alt – raskere*. Energikommisjonens rapport. Olje- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2023-3/id2961311/>
- NTB. (2021, Juli 2). *Solberg: Grønn ammoniakk kan bli et nytt industrieventyr*. KSU.NO.  
<https://ksu.no/artikler/ksu-no/108688-solberg-gronn-ammoniakk-kan-bli-et-nytt-industrieventyr>
- NTB Kommunikasjon. (2022, Juni 23). *Enova støtter hydrogenprosjekter i maritim sektor med 1,12 milliarder kroner* | Enova. Kommunikasjon.ntb.no.  
<https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/enova-stotter-hydrogenprosjekter-i-maritim-sektor-med-112-milliarder-kroner?publisherId=17848299&releaseId=17941867>
- Nyhus, H., & Siem, B. (2023, Mars 13). *Her kjem Europas første fabrikk for grønn ammoniakk*. NRK.  
<https://www.nrk.no/vestland/her-kjem-europas-forste-fabrikk-for-gron-ammoniakk-1.16334234>
- Næringsforeningen. (2022, November 25). *Lanserer hydrogen-nettverk i Agder*. Næringsforeningen.  
<https://www.nikr.no/aktuelt-nyheter/lanserer-hydrogen-nettverk-i-agder>
- Ocean Hyway Cluster. (u.å.-a). *About Ocean Hyway Cluster*. Arena pro Ocean Hyway Cluster.  
<https://www.oceanhywaycluster.no/the-cluster>

- Ocean Hyway Cluster. (u.å.-b). *Members*. Arena pro Ocean Hyway Cluster. <https://www.oceanhywaycluster.no/members>
- Ocko, I. B., & Hamburg, S. P. (2022). Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(14), 9349–9368. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>
- OED - Olje- og energidepartementet. (2022, April 22). *En nødvendig gjenåpning for vindkraft*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/en-nodvendig-gjenapning-for-vindkraft/id2909724/>
- OED - Olje- og energidepartementet, & KLD - Klima- og miljødepartementet. (2020). Regjeringens hydrogenstrategi. In *Regjeringen* (pp. 8, 27, 9). <https://www.regjeringen.no/contentassets/40026db2148e41eda8e3792d259efb6b/y-0127b.pdf>
- OED - Olje- og energidepartementet, & SD - Samferdselsdepartementet. (2004). Satsing på hydrogen som energibærer innenfor transport og stasjonær energiforsyning. I *Regjeringen* (p. 7). <https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/kilde/sd/pla/2005/0001/ddd/pdfv/256289-hydrogenstrategi.pdf>
- Olden, V. (2019, November 7). *HyLINE - Safe Pipelines for Hydrogen Transport*. SINTEF. <https://www.sintef.no/en/projects/2019/hyline-safe-pipelines-for-hydrogen-transport/>
- Ormestad, H. (2023, Januar 22). *Joule–Thomson-effekt*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/Joule%E2%80%93Thomson-effekt>
- Oskarsen, Joakim. (2009) *Teknologiske Innovasjonssystemer: en casestudie av en norsk aktør innen bølgekraft*. [Masteroppgave Universitetet i Oslo]. DUO vitenarkiv. <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-26126>
- Oyarzabal, R., Mertenskötter, P., & Molyneux, C. G. (2022, Januar 7). *New Definitions for Blue and Green Hydrogen: The European Commission's Package on Hydrogen and Decarbonized Gas Markets*. Inside Energy & Environment. <https://www.insideenergyandenvironment.com/2022/01/new-definitions-for-blue-and-green-hydrogen-the-european-commissions-package-on-hydrogen-and-decarbonized-gas-markets/>
- Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., & Genon, G. (2014). Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste and Biomass Valorization*, 6(1), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9322-7>
- Patonia, A., & Poudineh, R. (2022). Cost-competitive green hydrogen: How to lower the cost of electrolyzers? *Econstor.eu*. <https://doi.org/978-1-78467-193-8>
- Pattabathula, V., & Richardson, J. (2016, September 8). *Introduction to Ammonia Production*. Aiche.org. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2016/september/introduction-ammonia-production>
- Paulsen, Ø. (2022, Mars 7). *De tunge hydrogenbilene kommer til Norge*. Hydrogen24. <https://hydrogen24.no/2022/03/07/de-tunge-hydrogenbilene-kommer-til-norge/>
- Pece, A. M., Simona, O. E. O., & Salisteanu, F. (2015). Innovation and Economic Growth: An Empirical Analysis for CEE Countries. *Procedia Economics and Finance*, 26, 461–467. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00874-6](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00874-6)
- Pedersen, B. (2022, Oktober 24). *elektrolyse*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/elektrolyse>

- Pei, P., Wang, M., Chen, D., Ren, P., & Zhang, L. (2020). Key technologies for polymer electrolyte membrane fuel cell systems fueled impure hydrogen. *Progress in Natural Science: Materials International*, 30(6), 751–763. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.08.015>
- Petitpas, G., & Aceves, S. M. (2018). Liquid hydrogen pump performance and durability testing through repeated cryogenic vessel filling to 700 bar. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(39), 18403–18420. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.097>
- Rackley, S. A. (2017). *Carbon Capture And Storage* (Second edition). Butterworth-Heinemann. [https://www.google.no/books/edition/Carbon Capture and Storage/nQGqDQAAQBAJ?hl=no&gbpv=1&dq=inauthor:%22Steve+A.+Rackley%22&printsec=frontcover](https://www.google.no/books/edition/Carbon+Capture+and+Storage/nQGqDQAAQBAJ?hl=no&gbpv=1&dq=inauthor:%22Steve+A.+Rackley%22&printsec=frontcover)
- Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., & Sutherland, E. (2016). Building a hydrogen infrastructure in the United States. *Compendium of Hydrogen Energy*, 293–319. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-364-5.00013-0>
- Reed, E. U. (2021, Januar 12). *Historien om hydrogen*. CICERO. <https://cicero.oslo.no/no/artikler/historien-om-hydrogen>
- Regjeringen. (2022a, Juni 23). *100 tiltak i veikartet for grønt industriløft*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/gront-industriloft/100-tiltak/id2920293/>
- Regjeringen. (2022b, Juni 23). *Hydrogen*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/gront-industriloft/hydrogen/id2920298/>
- Reitenbach, V., Ganzer, L., Albrecht, D., & Hagemann, B. (2015). Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 6927–6937. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4176-2>
- Renergy. (u.å.-a). *Om oss*. RENERGY - Renewable Energy Cluster. <https://renergycluster.no/om-oss/>
- Renergy. (u.å.-b). *Prosjekter*. RENERGY - Renewable Energy Cluster. <https://renergycluster.no/prosjekter/>
- Riekeles, H., Seland, S. (2020). *Hydrogen – muligheter og hindringer for en ny norsk eksportnæring*. (Civita-notat nr. 18). Civita. <https://civita.no/notat/hydrogen-muligheter-og-hindringer-for-en-ny-norsk-eksportnaering/>
- Robertsen, T. (2023, April 11). *Ny metode kan redusere lystgassutslipp fra landbruket med 95 prosent*. Nmbu.no. <https://www.nmbu.no/aktuelt/node/46917>
- Rödl, A., Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2018). Assessment of Selected Hydrogen Supply Chains—Factors Determining the Overall GHG Emissions. *Hydrogen Supply Chains*, 81–109. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811197-0.00003-8>
- Rosenow, J., & Lowes, R. (2021). Will blue hydrogen lock us into fossil fuels forever? *One Earth*, 4(11), 1527–1529. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.10.018>
- Rosvold, K. A. (2022, Mai 28). *Energimiks*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/energimiks>
- Ruhnau, O. (2022). How flexible electricity demand stabilizes wind and solar market values: The case of hydrogen electrolyzers. *Applied Energy*, 307, 118194. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118194>



- Sandberg, M., Klockars, K., & Wilén, K. (2019). Green growth or degrowth? Assessing the normative justifications for environmental sustainability and economic growth through critical social theory. *Journal of Cleaner Production*, 206, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.175>
- Saulnier, R., Minnich, K., Eng, P., & Sturgess, P. (2020). *Water for the Hydrogen Economy*. <https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy-WaterSMART-Whitepaper-November-2020.pdf>
- SFE. (2022, Juni 23). *Hyfuel får støtte*. SFE. <https://sfe.no/konsern/aktuelt/helikopter-synfaring2/>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- ShipFC. (u.å.). *Partners - Zpirit*. ShipFC. <https://shipfc.eu/partners/>
- Shojaeefard, M. H., Gholam Reza Molaeimanesh, Mehran Nazemian, & Mohammad Reza Moqaddari. (2016, September). *A review on microstructure reconstruction of PEM fuel cells porous electrodes for pore scale simulation*. ResearchGate; Elsevier. [https://www.researchgate.net/publication/308274262\\_A\\_review\\_on\\_microstructure\\_reconstruction\\_of\\_PEM\\_fuel\\_cells\\_porous\\_electrodes\\_for\\_pore\\_scale\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/308274262_A_review_on_microstructure_reconstruction_of_PEM_fuel_cells_porous_electrodes_for_pore_scale_simulation)
- SINTEF. (2021, Oktober 27). *LH2 Pioneer*. SINTEF. <https://www.sintef.no/prosjekter/2021/lh2-pioneer-ultraisoleret-lagersystem-for-global-skipstransport-av-flytende-hydrogen/>
- SINTEF, NTNU, & IFE. (2009, Mai). *Core Message and Executive Summary*. SINTEF. <https://www.sintef.no/contentassets/ec25f254706f49a18c24d1e47638f1dd/norways-hydrogen-transport.pdf>
- Siva. (2023, April 26). *Energiboost for grønt hydrogenselskap*. Siva. <https://siva.no/2023/04/energiboost-for-gront-hydrogenselskap/>
- Sjøtun, S. G. (2018). A ferry making waves: A demonstration project “doing” institutional work in a greening maritime industry. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 73(1), 16–28. <https://doi.org/10.1080/00291951.2018.1526208>
- Sjøtun, S. G., & Njøs, R. (2019). Green reorientation of clusters and the role of policy: “the normative” and “the neutral” route. *European Planning Studies*, 27(12), 2411–2430. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1630370>
- Skei, H. H. (2021, Oktober 29). *litteraturvitenskap*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/litteraturvitenskap>
- Sletnes, K. B. (2019, August 19). *naturvitenskap*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/naturvitenskap>
- Solbrekken, M. H., & Standal, O. E. B. (2021). *Å bygge mot strømmen. En sosioteknisk studie av utslippsfrie bygge- og anleggsplasser* [Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet]. ntnuopen.ntnu.no. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2781844/no.ntnu%3Ainspera%3A78640011%3A22269216.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Solomon, B. D., & Banerjee, A. (2006). *A global survey of hydrogen energy research, development and policy*. 34(7), 781–792. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.007>



- Spjelkavik, M., & Klitkou, A. (2022). Virkemiddelapparatet, stivhengighet og grønn omstilling. In *nifu.brage.unit.no*. NIFU. <https://nifu.brage.unit.no/nifu-xmlui/bitstream/handle/11250/2998540/NIFU-innsikt2022-7b.pdf?sequence=6>
- SSB - Statistisk sentralbyrå. (2022). Fakta om Olje og energi. SSB. <https://www.ssb.no/energi-og-industri/faktaside/olje-og-energi>
- SSB - Statistisk Sentralbyrå. (2023a, Mars 22). *Kjørelengder*. SSB. <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/kjorelengder>
- SSB - Statistisk Sentralbyrå. (2023b, Mars 24). *Bilparken*. SSB. <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken>
- SSB - Statistisk Sentralbyrå. (2023c, Mai 16). *Energibruk i industrien*. SSB. <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/energibruk-i-industrien>
- Statens Vegvesen. (u.å.). *Publisering av rapporter og data fra Statens vegvesen hydrogentester*. Statens Vegvesen. <https://www.vegvesen.no/fag/trafikk/ferje/gronn-ferjedrift/testing/>
- Statkraft. (u.å.). *Grønt hydrogen | Statkraft*. Statkraft. <https://www.statkraft.no/produkter-og-tjenester/gront-hydrogen/>
- Statkraft. (2022). Low Emissions Scenario. In *Statkraft.no*. <https://www.statkraft.no/globalassets/0/.no/lavutslipp/2022/low-emissions-scenario-report-2022-digital.pdf>
- Statkraft. (2023, Mars 30.). *Fortescue Future Industries og Statkraft sikrer kraft til det foreslåtte Holmaneset-prosjektet for grønt hydrogen og grønn ammoniakk*. Wwww.statkraft.com. <https://www.statkraft.no/nyheter/nyheter-og-pressemeldinger/2023/fortescue-future-industries-og-statkraft-sikrer-kraft-til-holmaneset-prosjektet-for-gront-hydrogen-og-gronn-ammoniakk/>
- Steen, M., Bach, H., Bjørgum, Ø., Hansen, T., & Kenzhegaliyeva, A. (2019). *Greening the fleet: A technological innovation system (TIS) analysis of hydrogen, battery electric, liquefied biogas, and biodiesel in the maritime sector*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24651.54568>
- Sun, P., & Elgowainy, A. (2019, September 30). *Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET® 2019*. Greet.es.anl.gov. [https://greet.es.anl.gov/publication-smr\\_h2\\_2019](https://greet.es.anl.gov/publication-smr_h2_2019)
- Suurs, R. A. A. (2009). *Motors of Sustainable Innovation: Towards a theory on the dynamics of technological innovation systems*. Utrecht University, Utrecht.
- Sveen, S. (2021, Desember 27.). Kritisk til grønn storsatsing. *Finansavisen*. [https://www.finansavisen.no/nyheter/energi/2021/12/27/7792086/kritisk-til-gronn-storsatsing?zephrr\\_sso\\_ott=Mjyxlb](https://www.finansavisen.no/nyheter/energi/2021/12/27/7792086/kritisk-til-gronn-storsatsing?zephrr_sso_ott=Mjyxlb)
- Talic, B. (2023). *Ammoniakk - SINTEF*. SINTEF. <https://www.sintef.no/fagomrader/hydrogen/ammoniakk/>
- Taner, T. (2018). Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy*, 143, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.102>
- Tarun, C. B., Croiset, E., Douglas, P. L., Gupta, M., & Chowdhury, M. H. M. (2007). Techno-economic study of CO2 capture from natural gas based hydrogen plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(1), 55–61. [https://doi.org/10.1016/s1750-5836\(07\)00036-9](https://doi.org/10.1016/s1750-5836(07)00036-9)



- Tennbakk, B. (2022, Mai 5.). *Grønt eller blått hydrogen: Hva betyr det for kraftmarkedet?* - Thema. Thema. <https://thema.no/rapporter/gront-eller-blatt-hydrogen-hva-betyr-det-for-kraftmarkedet/>
- Terlouw, T., Bauer, C., McKenna, R., & Mazzotti, M. (2022). Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. *Energy & Environmental Science*, 15(9), 3583–3602. <https://doi.org/10.1039/d2ee01023b>
- Thema Consulting Group. (2019) *Systemvirkninger og næringsperspektiver ved Hydrogen* (Rapport 2019-07). <https://offshorenorge.no/contentassets/0e45c45e5e72401b92c6d05d389650fb/systemvirkninger-og-naringsperspektiver-ved-hydrogen-thema-consulting-group-2019.pdf>
- The Royal Institute. (2022, Juli 25). *William Robert Grove*. The Royal Institution. <https://www.rigb.org/explore-science/explore/person/william-robert-grove-1811-1896>
- Tietze, V., Luhr, S., & Stolten, D. (2016). Bulk Storage Vessels for Compressed and Liquid Hydrogen. *Hydrogen Science and Engineering : Materials, Processes, Systems and Technology*, 659–690. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch27>
- Tranøy, K. E. (2022, Mai 6.). *intersubjektiv*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/intersubjektiv>
- Troms og Finnmark fylkeskommune. (2021). *Innledning - Troms og Finnmark fylkeskommune*. Tffk.no. <https://www.tffk.no/tjenester/plan-og-horinger/gjeldende-planer-og-strategier/hydrogensone-arktis-strategier-for-hydrogensatsing-i-troms-og-finnmark-2021/innledning/>
- Trøndelag Fylkeskommune. (2022). *Skal utvikle hydrogendrevet hurtigbåt*. Trondelagfylke.no. <https://www.trondelagfylke.no/nyhetsarkiv/skal-utvikle-hydrogendrevet-hurtigbat/>
- TU. (2000, Juni 29.). *Hydrogen er fremtidens drivstoff*. Tu.no. <https://www.tu.no/artikler/hydrogen-er-fremtidens-drivstoff/272075>
- TU. (2023, Mars 30.). *Første seilas med hydrogen for fergen Hydra*. Tu.no. <https://www.tu.no/artikler/forste-seilas-med-hydrogen-for-fergen-hydra/528872?key=UupMp1rQ>
- Tunå, P., Hultheberg, C., & Ahlgren, S. (2013). Techno-economic assessment of nonfossil ammonia production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), 1290–1297. <https://doi.org/10.1002/ep.11886>
- Tveit, K. O. (2012, Mars 11.). *Hydrogenbilen gasser fra alternativene*. Dagens Perspektiv. <https://dagensperspektiv.no/hydrogenbilen-gasser-fra-alternativene>
- UiO - Universitetet i Oslo. (u.å.). *Litteraturstudie*. UiO.no. <https://www.uio.no/studier/emner/medisin/med/MED5090/retningslinjer-prosjektoppgaven/litteraturstudier.pdf>
- Ulleberg, Ø. (2019, Mars 13.). *Hydrogen i maritim sektor - IFE*. IFE; IFE. <https://ife.no/hydrogen-i-maritim-sektor/>
- Ursin, L. (2021, April 13). *Ekspertintervjuet: Strøm + vann = hydrogen*. Energiogklima.no. <https://energiogklima.no/to-grader/ekspertintervju/ekspertintervjuet-strom-vann-hydrogen/>



- Van Lancker, J., Mondelaers, K., Wauters, E., & Van Huylbroeck, G. (2016). The Organizational Innovation System: A systemic framework for radical innovation at the organizational level. *Technovation*, 52-53, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2015.11.008>
- Vestland fylkeskommune (2019) *Hydrogen Region Vestlandet – Strategi og handlingsdokument 2019-2020*. [https://www.vestlandfylke.no/globalassets/gron-vekst-og-klima/hydrogen/hydrogenregionvestlandet\\_strategi.pdf](https://www.vestlandfylke.no/globalassets/gron-vekst-og-klima/hydrogen/hydrogenregionvestlandet_strategi.pdf)
- Viken Fylkeskommune (2017). *Hydrogenstrategi*. <https://viken.no/f/p1/i227a2f2e-8980-4fbf-8b56-f9ec666e506b/hydrogenstrategi-for-oslo-og-akershus-2014-2025-rullert-2017-handlingsprogram-2017-18.pdf>
- Wang, C., & Appleby, A. J. (2003). High-Peak-Power Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 150(4), A493. <https://doi.org/10.1149/1.1559068>
- Wang, Y., Yuan, H., Martinez, A., Hong, P., Xu, H., & Bockmiller, F. R. (2021). Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives. *Advances in Applied Energy*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100011>
- Wilhelms, H., Grønning, T., & Bøthun, S. H. (2023, Januar 24.). *Norge går mot kraftunderskudd i 2027 – verst for strømkunder i nord*. NRK. <https://www.nrk.no/tromsogfinnmark/norge-gar-mot-kraftunderskudd-i-2027--verst-for-stromkunder-i-nord-1.16268863>
- Witkowski, A., Rusin, A., Majkut, M., & Stolecka, K. (2017). Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. *Energy*, 141, 2508–2518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.141>
- Witkowski, A., Rusin, A., Majkut, M., & Stolecka, K. (2018). Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 166, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.08.002>
- Wolf, E. (2015). Large-Scale Hydrogen Energy Storage. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 129–142. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00009-7>
- Yara. (2021, February 18). *Åpner for historisk satsing på grønt hydrogen og grønn ammoniakk i Norge | Yara International*. Yara None. <https://www.yara.com/corporate-releases/apner-for-historisk-satsing-pa-gront-hydrogen-og-gronn-ammoniakk-i-norge/>
- Younas, M., Shafique, S., Hafeez, A., Javed, F., & Rehman, F. (2022). An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. *Fuel*, 316, 123317. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>
- Yunzhe, J., Feifei, W., Bowei, Z., & Mengmeng, L. (2020, Juni). *Research on Hydrogen Energy and Fuel Cell Vehicle Roadmap in Various Countries*. Researchgate. [https://www.researchgate.net/publication/342280756\\_Research\\_on\\_Hydrogen\\_Energy\\_and\\_Fuel\\_Cell\\_Vehicle\\_Roadmap\\_in\\_Various\\_Countries](https://www.researchgate.net/publication/342280756_Research_on_Hydrogen_Energy_and_Fuel_Cell_Vehicle_Roadmap_in_Various_Countries)
- Zapantis, A. (2021) *Blue hydrogen*. Global CCS institute. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/04/Circular-Carbon-Economy-series-Blue-Hydrogen.pdf>
- Zhou, D., Yan, S., Huang, D., Shao, T., Xiao, W., Hao, J., Wang, C., & Yu, T. (2022). Modeling and simulation of the hydrogen blended gas-electricity integrated energy system and influence





- analysis of hydrogen blending modes. *Energy*, 239, 121629.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121629>
- Zohuri, B. (2018). Cryogenics and Liquid Hydrogen Storage. *Hydrogen Energy*, 121–139.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7_4)
- Zupanc, A., Install, J., Jereb, M., & Repo, T. (2022). Sustainable and Selective Modern Methods of Noble Metal Recycling. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(5).  
<https://doi.org/10.1002/anie.202214453>
- Ødegård, A. (2020, Juli 7). *Rent hydrogen vil spille en nøkkelrolle - SINTEF*. SINTEF.  
<https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/rent-hydrogen-vil-spille-en-nokkelrolle/>
- Øystese, K. (2020a, Januar 23). *Hele skipsfarten kan potensielt gå på grønn ammoniakk*. Energiogklima.no. <https://energiogklima.no/meninger-og-analyse/debatt/hele-skipsfarten-kan-potensielt-ga-pa-gronn-ammoniakk/>
- Øystese, K. (2020b, Oktober 6). *Ammoniakk kan kutte store utslipp i skipsfart*. Klimastiftelsen.no. <https://klimastiftelsen.no/publikasjoner/ammoniakk-kan-kutte-store-utslipp-i-skipsfart/>

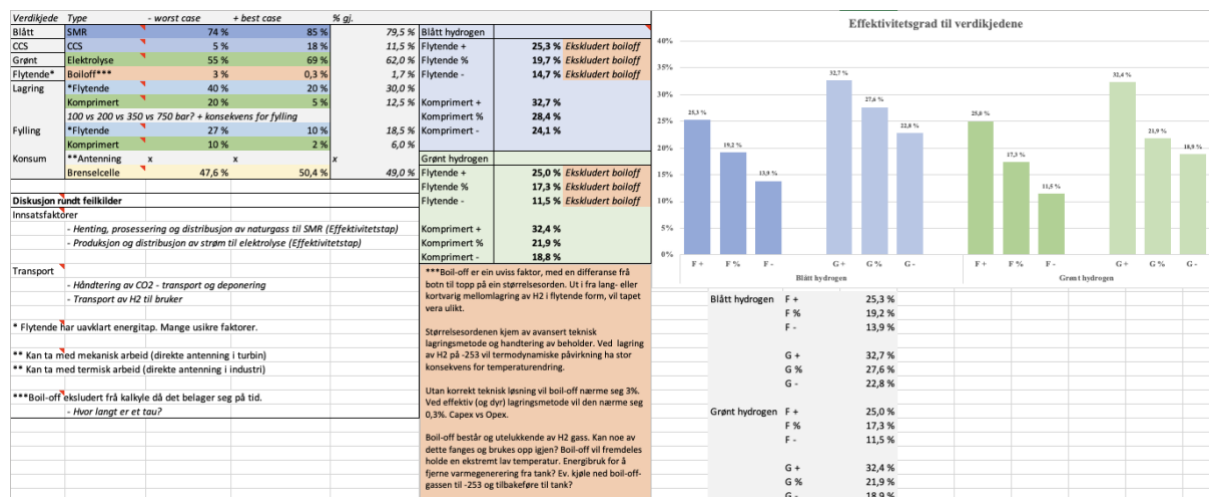


# Vedlegg

Alle vedlegg ligger i Wiseflow.

## Vedlegg 1

### Ark (1) Effektivitetsgrad



### Ark (2) Utslipp blått hydrogen

Estimert årlig produksjon 2030	250 000	tonn
	250 000 000	kg

Utslipp ved produksjon av blått og grønt hydrogen				
Scenario	Fangstrate	kg CO2eq/kgH2	kg CO2eq	Tonn CO2eq
Best case	56 %	4,9	1 220 000 000	1 220 000
Worst case	56 %	9,4	2 337 500 000	2 337 500
Best case	90 %	1,7	427 500 000	427 500
Worst case	90 %	5,6	1 390 000 000	1 390 000
Best case	0 %	9	2 250 000 000	2 250 000
Worst case	0 %	11	2 750 000 000	2 750 000

Total energilagring i hydrogen per år 2030 Blå H2			
Energi per kg H2 (kWh)	Årlig energi kWh	Årlig energi TWt	Energi for produksjon TWt
33	8 250 000 000	8,25	10,4

Total energilagring i hydrogen per år 2030 Grønn H2			
Energi per kg H2 (kWh)	Årlig energi kWh	Årlig energi TWt	Energi for produksjon TWt
33	8 250 000 000	8,25	13,3

Energi hos konsument blå H2 TWt		Energi hos konsument grønn H2 TWt	
Flytende	Gass	Flytende	Gass
2,0	2,9	2,3	2,9

Utslipp i bilparken	
Diselbil CO2 utslipp	0,13 kg CO2/km
Gj. Kjøre lengde personbil i 2022	11097 km
Gj. Utslipp dieselbil	1442,6 kg CO2

Total utslipp målt i biler for hver produksjonsmetode	
Fangstrate 56%	845 689 biler
Fangstrate 90%	296 338 biler
Fangstrate 0%	1 559 673 biler

Sammenligning med eksisterende personbilpark	
Antall personbiler Norge	2 917 435
Andel av eksisterende personbilpark	29,0 %
	10,2 %
	53,5 %

### Ark (3) Grønn produksjon





## Vedlegg 3

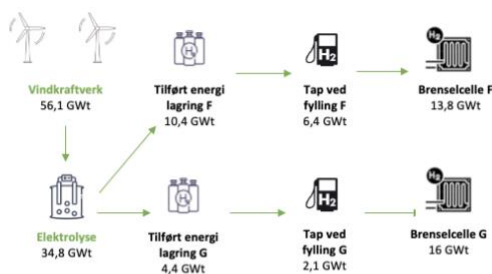
Vedlegget er på 1235 ord, og ment som en fordypelse i lagrings- og brenselcelleteknologi. Se Wiseflow ved interesse.

## Vedlegg 4

Grunnet størrelse på Excel-arket passer det ikke å legge ved her. Se vedlagt fil i Wiseflow.

## Vedlegg 5

### Lysbilde 1 – Verdikjede grønt hydrogen



#### Utrekninger gjort i Vedlegg 1 – (3) Grønn produksjon

##### Referanseliste illustrasjoner

Stockvectorwin (Dreamstime.com, u.å). *Fuel cells hydrogen glyph icon vector illustration* [Illustrasjon]. <https://www.dreamstime.com/fuel-cells-hydrogen-glyph-icon-vector-illustration-sign-isolated-contour-symbol-black-image209437368>

Style-Photography (Istockphoto, 2020). *Black H2 Gas Pump Icon stock illustration* [Illustrasjon]. <https://www.istockphoto.com/vector/black-h2-gas-pump-icon-gm1248464329-363618876>

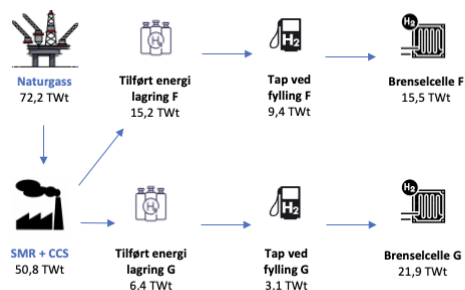
Nexusbu (Freepik, u.å). *Hydrogen tanks icon h2 storage line vector* [Illustrasjon] [https://www.freepik.com/premium-vector/hydrogen-tanks-icon-h2-storage-line-vector\\_26510503.htm](https://www.freepik.com/premium-vector/hydrogen-tanks-icon-h2-storage-line-vector_26510503.htm)

Meth Mehr (Istockphoto, 2019). *Linear electrolysis icon from Industry outline collection. Thin line electrolysis icon isolated on white background. electrolysis trendy illustration stock illustration* [Illustrasjon]

(Supercoloring, u.å) *Vindturbin fargelegge* [Bilde] <https://www.supercoloring.com/nb/tegninger-til-fargelegging/vindturbin-1>

MindWorlds (Flaticon, u.å) *Hydrogen free icon* [Bilde] [https://www.flaticon.com/free-icon/hydrogen\\_8295387?related\\_id=8295387&origin=search](https://www.flaticon.com/free-icon/hydrogen_8295387?related_id=8295387&origin=search)

### Lysbilde 2 – Verdikjede blått hydrogen



#### Utrekninger gjort i Vedlegg 1 – (4) Blå produksjon

##### Referanseliste illustrasjoner

(Creazilla, u.å) *Oil rig clipart* [Clipart] <https://creazilla.com/nodes/3868191-oil-rig-clipart>

(Clipart Library, u.å). *Factory Clipart Black And White #1022206* [Clipart] [http://clipart-library.com/clip-art/309-3091493\\_factory-industry-silhouette-png-image-factory-smoke-clipart.htm](http://clipart-library.com/clip-art/309-3091493_factory-industry-silhouette-png-image-factory-smoke-clipart.htm)

