



**FFI** Forsvarets  
forskningsinstitutt

23/01418

FFI-RAPPORT

# Nullutslippsforsvaret

– en mulighetsstudie av klimavennlig teknologi for Forsvaret

Brynjar Arnfinnsson  
Even K. Tønsberg



# **Nullutslippsforsvaret**

## **– en mulighetsstudie av klimavennlig teknologi for Forsvaret**

Brynjar Arnfinnsson  
Even K. Tønsberg

---

---

## **Emneord**

Klima  
Energi  
Drivstoff  
Langtidsplanlegging  
Teknologisk utvikling  
Logistikk

## **FFI-rapport**

23/01418

## **Prosjektnummer**

1658

## **Engelsk tittel**

The Zero Emission Defence – a Review of Climate-Friendly Technology for the Norwegian Armed Forces

## **Elektronisk ISBN**

978-82-464-3483-4

## **Godkjennerne**

Mona Sagsveen Guttelvik, *forskningsleder*  
Sigurd Glærum, *forskningssjef*

*Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.*

## **Opphavsrett**

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

---

---

## Sammendrag

Norge må gjennom en krevende, men nødvendig, omstilling til et nullutslippssamfunn. Olje og gass tar før eller siden slutt, og samfunnet må innrette seg mot nullutslipp så raskt som mulig for å unngå katastrofale klimaendringer. Regjeringens målsetting er å oppnå netto nullutslipp i 2050.

Samfunnets omstilling til alternative energikilder og energibærere vil endre rammebetingelsene til Forsvaret. Dersom samfunnet lykkes med omstillingen, forsvinner markedet for fossilt drivstoff. Det vil bli dyrere og langt vanskeligere å få tak i. Forsvaret er derfor tjent med å vurdere alternativer til fossilt drivstoff på lang sikt.

I denne rapporten har vi vurdert elektrisitet, hydrogen, ammoniakk, hydrokarboner og alkoholer som mulige alternative energibærere. Som alternative energikilder har vi vurdert elektrisitet fra fornybar energi og kjernekraft.

Drivstoff med lavere energiinnhold gir dårligere rekkevidde og dermed redusert operativ evne. Av de alternative energibærerne vi har vurdert er det kun biodrivstoff og e-drivstoff som har tilsvarende energiinnhold som de fossile drivstoffene Forsvaret bruker i dag. Biodrivstoff og e-drivstoff framstår dermed som de mest hensiktsmessige løsningene for Forsvaret. Det gjenstår imidlertid fortsatt store utfordringer knyttet til bærekraft, produksjon og kostnader her.

Kjernefysisk energi og framdrift skiller seg ut med et enormt høyt energiinnhold sammenlignet med alle alternativene, inkludert dagens fossile drivstoff. Imidlertid er det kun praktisk egnet for bruk til framdrift på relativt store fartøy. Kjernekraft kan også tenkes å utnyttes til energiforsyning i felt og til produksjon av andre kjemiske drivstoff.

Fornybare energikilder som sol- og vindkraft kan bidra til lokal energiproduksjon i baser og i felt. Siden disse energikildene er væravhengige må Forsvaret derfor sørge for å ha flere komplementære energikilder, energilagring og/eller tilgang til elektrisitetsnettet for å oppnå tilfredsstillende energiforsyning.

Elektrokjemiske batterier som driver elektriske motorer er det mest energieffektive alternativet for å konvertere energi til framdrift. På grunn av lavt energiinnhold i elektriske batterier er det store begrensninger på hva som kan gå utelukkende på elektrisitet i Forsvaret, men det finnes enkeltanvendelser hvor det er godt egnet. I tillegg er batterihybridisering aktuelt for de fleste typer plattformer.

Basert på denne mulighetsstudien anbefaler vi følgende: 1) Forsvarssektoren iverksetter forskning, utvikling og eksperimentering med bærekraftig biodrivstoff og e-drivstoff. 2) Norge og Forsvaret vurderer egne produksjonsanlegg for biodrivstoff og e-drivstoff for å sikre egne forsyninger. 3) En grundigere utredning av militær bruk av kjernekraft som inkluderer tekniske, samfunnsmessige og sikkerhetspolitiske forhold. 4) Forsvarssektoren vurderer både *dual-fuel* framdriftssystemer og kjernefysisk framdrift i arbeidet med ny overflatestruktur. Sistnevnte må sees i sammenheng med utredningen i forrige punkt. 5) Forsvarssektoren utvikler konsepter og gjennomfører forsøk med fornybar energiforsyning i felt. 6) Forsvarssektoren øker satsningen på batteriteknologi, særlig knyttet til batterihybridisering av eksisterende og nytt materiell, og for energilagring i felt.

---

---

## Summary

Norway must go through a demanding, but necessary, transition to a zero-emissions society. Oil and gas are not renewable resources, and society must transition to net zero emissions as quickly as possible to avoid catastrophic climate change. The Government's objective is to achieve net zero emissions by 2050.

Society's transition to alternative energy sources and energy carriers will change the operation conditions for The Armed Forces. If society succeeds in the transition, the market for fossil fuels will disappear. They will be more expensive and far more difficult to obtain. The Armed Forces should therefore consider alternatives to fossil fuels in the long term.

In this report we have assessed electricity, hydrogen, ammonia, hydrocarbons and alcohols as possible alternative energy carriers. As alternative energy sources, we have considered electricity from renewable energy sources and nuclear power.

Fuels with a lower energy content gives a shorter range and thus reduced operational capability. Only biofuels and e-fuels have equivalent energy content compared to the fossil fuels currently in use. Biofuel and e-fuel thus appear as the most practical solutions for The Armed Forces. However, there are still substantial challenges related to sustainability, production and costs.

Nuclear energy and propulsion stands out with a severely higher energy content compared to all the alternatives, including today's fossil fuels. However, it is only practically suitable for use for propulsion on relatively large vessels. Nuclear power can also be used for energy supply in the field and for the production of other chemical fuels.

Renewable energy sources such as solar and wind power can contribute to local energy production in bases and in the field. Since these energy sources are weather-dependent, the Norwegian Armed Forces must ensure that they have several complementary energy sources, energy storage and/or access to the electricity grid to achieve satisfactory energy supply.

Electrochemical batteries that power electric motors are the most energy-efficient option for converting energy into propulsion. Due to the low energy content of electric batteries, there are major limitations on what can run exclusively on electricity in the Armed Forces, but there are individual applications where it is well suited. In addition, battery hybridization is relevant for most types of platforms.

Based on this feasibility study, we recommend the following: 1) The defense sector initiates research, development and experimentation with sustainable biofuels and e-fuels. 2) Norway and the Armed Forces should consider its own production facilities for biofuel and e-fuel to secure its own supplies. 3) A more thorough investigation of the military use of nuclear power, which includes technical, social and security policy aspects. 4) The defense sector should consider both dual-fuel and nuclear propulsion systems for its new surface vessels. This must be seen in connection with the investigation in the previous point. 5) The defense sector should develop concepts and conduct trials with renewable energy supply in the field. 6) The defense sector should increase its investment in battery technology, particularly related to battery hybridization of existing and new platforms, and for energy storage in the field.

---

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	3
<b>Summary</b>	4
<b>Forord</b>	6
<b>1 Innledning</b>	7
<b>2 Metode</b>	8
<b>3 Klimavennlige energikilder og energibærere</b>	9
3.1 Elektrisitet	9
3.2 Hydrogen	14
3.3 Ammoniakk	19
3.4 Kjernekraft	21
3.5 Hydrokarboner del 1: Biodrivstoff	27
3.6 Hydrokarboner del 2: E-drivstoff	31
3.7 Alkohol	34
<b>4 Sammenligning av teknologier</b>	37
4.1 Energiinnhold	37
4.2 Energieffektivitet	39
4.3 Livssyklus klimagassutslipp	44
4.4 Kostnader	49
4.5 Skaderisiko	52
4.6 Samlet vurdering	53
<b>5 Mulige anvendelser i Forsvaret</b>	57
5.1 Energibærere for framdrift	57
5.2 Energikilder for base- og systemdrift	60
<b>6 Diskusjon</b>	63
6.1 Kan nullutslippsteknologi redusere Forsvarets logistikkbehov?	63
6.2 Viktige veivalg for Forsvaret	65
<b>7 Oppsummering og anbefalinger</b>	67
<b>Referanser</b>	68

---

---

## Forord

Det forsvaret som først klarer å knekke koden – med hvordan bli mindre avhengig av fossil logistikk – de har en stor fordel.

---

*Forsvarssjef Eirik Kristoffersen*  
FFIs klima- og sikkerhetskonferanse  
25. november 2022

Kan klimavennlig teknologi styrke Forsvaret? Kan miljøhensyn og sikkerhet forenes? Hvordan kan Forsvaret fortsette å operere i et samfunn som har gått vekk fra fossilt drivstoff? Vi har vært så heldige at vi har fått lov til å dykke ned i disse problemstillingene i litt over et år, og denne rapporten dokumenterer arbeidet og funnene vi har gjort.

Rapporten spenner bredt og den tar for seg en tematikk som vekker stort engasjement hos mange. Vi håper rapporten kan være opplysende og inspirerende, og at den legger grunnlag for en saklig debatt rundt framtidens forsvar av Norge.

Takk til våre FFI-kollegaer Sverre Kvalvik, Kristian Lausund og Trine Wiborg Hagen, samt Jon Hovland, Bjørn Christian Enger og Duncan Akporiaye ved SINTEF, for innspill underveis og bidrag til faglig kvalitetssikring av denne rapporten. Takk også til Ida Karine Grefslie og Espen Hofoss for hjelp med språk og kommunikasjon. Vi vil også takke våre ledere Mona Sagsveen Guttelvik og Alf Christian Hennem for at dere har støttet og tilrettelagt for studien.

Eventuelle feil og mangler i rapporten er forfatterens ansvar.

Kjeller, 5. juli 2023.

Brynjar Arnfinnsson  
Even K. Tønsberg



---

---

# 1 Innledning

Forsvaret kan ikke være den eneste gjenværende fossile sektoren i et samfunn som i framtiden skal være fossilfritt. Vi må forene behovet for å ha et sterkt forsvar med et grønt forsvar.

---

*NATOs Generalsekretær Jens Stoltenberg*  
Verdens Gang  
26. juni 2023

Det er bare et tidsspørsmål før Norge blir et nullutslippssamfunn. Olje og gass er ikke fornybare ressurser og tar før eller siden slutt. For å unngå irreversible klimaendringer er det imidlertid nødvendig å gå over til nullutslippssamfunnet lenge før det går så langt at vi ikke har mer olje og gass igjen. Regjeringens målsetting er å oppnå netto nullutslipp i 2050 (AP og SP 2021). Stortinget har vedtatt klimaloven som lovfester at utslippene skal være redusert med 90–95 % i 2050 sammenlignet med 1990. Begge målsettingene åpner for bruk av klimakvoter for å oppnå målene, så selv om målene nås er det ikke gitt at Norge er et reelt nullutslippssamfunn i 2050. Allikevel må utslippene være drastisk redusert og de resterende utslippene kommer mest sannsynlig til å være fra kilder som er vanskelig å substituere med alternativ teknologi, som enkelte utslipp fra industri og landbruk. Andre sektorer som også er krevende å substituere er langdistanse shipping og luftfart. Størstedelen av Forsvarets drivstofforbruk er nettopp i sjø- og luftdomenet. En overgang til andre energibærere i sivil shipping og luftfart vil derfor endre rammebetingelsene til Forsvaret. Dersom disse sektorene går vekk fra fossile drivstoff forsvinner mesteparten av markedet og Forsvaret kan sitte igjen som eneste samfunnssektor som fortsatt har behov for disse produktene. Det vil påvirke kostnader, tilgang og forsyningssikkerhet negativt. Forsvaret er derfor selv tjent med å vurdere alternativer til fossilt drivstoff på lang sikt.

NATOs nye strategiske konsept slår fast at menneskeskapt klimaendring er en faktor som påvirker vår sikkerhet negativt, og at alliansen skal jobbe for å redusere utslipp av klimagasser (NATO 2022). Konseptet slår også fast at reduksjon av utslipp ikke skal gå negativt ut over den operative evnen. Vi ser derfor på konsekvenser for operativ evne når vi vurderer ytelsen til de ulike teknologiene.

I kapittel 2 beskriver vi problemstilling, metode og avgrensninger. I kapittel 3 gis en innføring i utvalgte energikilder og energibærere som har potensiale til å være klimanøytrale. I kapittel 4 sammenlignes de ulike energikildene og energibærerne langs ulike relevante parametere. I kapittel 5 drøftes teknologiene for ulike anvendelser i Forsvaret. I kapittel 6 diskuterer vi noen mulige operative konsekvenser og legger opp til en diskusjon om hvilke teknologier Forsvaret burde satse på i framtiden. I kapittel 7 oppsummerer vi funnene og legger fram våre anbefalinger til forsvarssektoren.

Målgruppen for rapporten er Forsvarets politiske og militære ledelse samt personell i forsvarssektoren og -industrien som er involvert i langtidsplanlegging, anskaffelsesprosjekter, forskning, utvikling og innovasjon.

---

---

## 2 Metode

Problemstillingene vi tar for oss i denne rapporten er:

*Dersom Forsvaret skal eliminere behovet for fossil energi og fossilt drivstoff, hvilke teknologiske muligheter finnes? Hvor i Forsvaret er det aktuelt å benytte de ulike teknologiene, og hvordan vil teknologiene påvirke operativ evne?*

Vi har søkt gjennom forskningslitteratur, offentlig tilgjengelige rapporter og nettportaler for oppdatert informasjon om de ulike teknologiene. Der vi har sammenlignbare data gjør vi også kvantitative sammenligninger på relevante fysiske egenskaper som energiinnhold, motoreffektivitet, med mer. I tillegg bruker vi egen kompetanse på militære operasjoner for å vurdere aktuelle anvendelsesområder for teknologiene.

Dette er en overordnet, teknisk mulighetsstudie og ikke en komplett analyse av alle mulige energikilder og energibærere. Det er heller ikke en analyse av alle relevante faktorer, slik som sikkerhetspolitiske forhold knyttet til de ulike teknologiene. Vi har valgt ut de mest relevante energikildene og -bærerne basert på egen fagkunnskap og skjønn. Det finnes mange andre typer drivstoff enn de vi nevner eksplisitt her, som for eksempel dimetyleter, hydrazine, glyserol, med mer. Rakettdrivstoff og framdriftsteknologi for missiler er heller ikke vurdert.

Vi har valgt å fokusere på teknologier som gjør det mulig å eliminere fossile drivstoff fullstendig. Vi ser derfor ikke på teknologier som kun reduserer bruken av disse, slik som energieffektivisering og bruk av simulatorer, selv om vi mener at disse er svært viktige på kort og mellomlang sikt for å kutte utslipp så raskt som mulig (Arnfinnsson og Kirkhorn 2021; Skjelland et al. 2023).

Begrepe nullutslipp og klimanøytralt brukes noen ganger om hverandre i dagligtale selv om dette er upresist. I denne rapporten har vi fokusert på teknologier som har *potensial* til å være *klimanøytrale*. Noen av disse er nullutslipp i bruksfasen, slik som batterier, men vi har også inkludert biodrivstoff, som ikke er nullutslipp ettersom det produserer lokale utslipp. Det har derimot potensiale til å være klimanøytralt under de rette omstendighetene, som beskrevet nærmere i delkapittel 3.5.

Tekniske data på avledede egenskaper som motoreffektivitet, virkningsgrad og lignende er tallfestet for å kunne sammenligne teknologiene på generelt grunnlag. For konkrete løsninger eller prosjekter vil parameterne kunne avvike fra verdier oppgitt i denne rapporten. Kostnader beskrives hovedsakelig kvalitativt ettersom dette er en rapport som ser overordnet på teknologiske muligheter. Det krever mer konkrete prosjekter for å kunne gjøre gode kvantitative kostnadsanalyser.

Vi har etterstrebet en mest mulig nøytral og faktabasert framstilling av de teknologiske alternativene. Analysen er myntet på Forsvarets situasjon og utfordringer og adresserer ikke overgangen til nullutslippssamfunnet i stort. Allikevel håper og tror vi at flere av betraktningene vil ha relevans også utenfor forsvarssektoren.

---

---

## 3 Klimavennlige energikilder og energibærere

Det er ikke opplagt hva som er den beste og mest effektive veien til et nullutslippssamfunn. Det som derimot er sikkert er at veien dit består av en kombinasjon av teknologier basert på ulike energikilder og energibærere. Dette kapitlet tar for seg et utvalg av de mest aktuelle energiteknologiene og beskriver de viktigste aspektene ved produksjon, lagring, anvendelse og teknologisk utvikling for hver av dem. Først diskuteres den mest grunnleggende CO<sub>2</sub>-frie energibæreren, elektrisitet. Videre diskuteres også alternative drivstoff til prosesser som er vanskelig å elektrifisere.

### 3.1 Elektrisitet

#### 3.1.1 Produksjon

Hovedkildene til elektrisitet på verdensbasis er produksjon ved forbrenning av kull og naturgass. I 2021 stod fossile brensler for hele 62 % av verdens elektrisitetsproduksjon (IEA 2022). Det er derfor ikke nødvendigvis slik at noe som går på elektrisitet er klimanøytralt. Andelen elektrisitet som produseres fra fornybare kilder som vann, vind og sol stiger for hvert år som går. Dette er CO<sub>2</sub>-frie kilder som bør utnyttes til det fulle. Den største utfordringen med kraft fra vind og sol er væravhengigheten som medfører uregelmessig produksjon. I motsetning til vind og sol kan vann lagres i magasiner, og vannkraft har derfor ikke en tilsvarende momentan væravhengighet.<sup>1</sup> Avhengig av geografiske forhold og størrelsen på magasineringen kan vannkraft derimot ha store sesongvariasjoner. Den siste andelen av ikke-fossil elektrisitet kommer fra kjernekraft. Dette er en kilde til CO<sub>2</sub>-fri elektrisitet som ikke er sesong- eller væravhengig. Kjernekraft omtales ytterligere i delkapittel 3.4.

Kraft fra vind produseres ved hjelp av vindturbiner som først konverterer kinetisk energi til rotasjonsenergi. Denne rotasjonsenergien konverteres så videre til elektrisk energi via en generator. Den høyeste teoretisk mulige virkningsgraden er 59,3 %, gitt av Betz' lov (Betz 2013). Den reelle prosessen involverer en rekke turbulens- og friksjonstap. Som et resultat av dette klarer dagens mest effektive turbiner å konvertere rundt 45 % av den kinetiske energien til elektrisitet. Størrelsen på dagens turbiner spenner helt fra små turbiner som kan plasseres på taket til et hus, typisk 1–10 kW, til enorme turbiner som plasseres langt til havs, typisk 3–5 MW. Den største turbinen som er i drift i dag er GE Renewable Energy sin «Haliade-X» med en rotordiameter på 220 m og en kapasitet på 14 MW (GE 2021).

Sollys kan utnyttes til å produsere elektrisitet på to ulike måter: enten ved bruk av solceller eller med termisk solkraft. Solceller konverterer sollys til elektrisitet ved hjelp av halvledende materialer og den fotovoltaiske effekten. Dagens kommersielt tilgjengelige solceller kan deles inn i to hovedgrupper: silisium og tynnfilm. Solcellepaneler av silisium har en typisk virkningsgrad på 15–20 %. På en helt skyfri dag med solinnstråling på 1000 W/m<sup>2</sup> kan slike solcellepaneler altså produsere rundt 200 W/m<sup>2</sup>. Tynnfilm-solceller er mye tynnere og ganske fleksible, slik at de kan integreres i tekstiler eller

---

<sup>1</sup>Her er det snakk om vannkraftverk med store magasiner. Mindre kraftverk eller elvekraftverk uten betydelig magasinering blir i mye større grad påvirket av gjeldende værforhold (Contreras et al. 2020).

---

---

andre bøyelige materialer. Solcellepaneler i tynnfilm har betydelig dårligere virkningsgrad, typisk 8–12 % (NSF 2022). Termisk solkraft omfatter produksjon hvor en stor mengde sollys blir ledet til et lite område for å akkumulere termisk energi. Den termiske energien brukes til å fordampe væske for så å drive en dampturbin. En typisk utforming av et termisk solkraftverk er et relativt stort landområde dekket av bevegelige speil med et tårn i midten. Speilene roteres med solen slik at lyset hele tiden rettes mot tårnet hvor selve dampkraftverket er plassert. Den viktigste fordelene med termisk solkraft sammenlignet med solceller er at den termiske energien kan lagres opp til bruk senere, og på den måten produsere elektrisitet også etter at solen har gått ned. I 2018 startet byggingen av verdens største termiske solkraftverk, «Noor Energy 1» utenfor Dubai, som vil ha en kapasitet på hele 700 MW ved ferdigstillelse (Lilliestam et al. 2021).

Vannkraft er den klart største kilden til fornybar energi i dag. Rundt 16 % av den global elektrisitetsproduksjonen kommer fra vannkraft (IEA 2021d). Kraften produseres ved å utnytte den potensielle energien i et høytliggende vannreservoar eller den kinetiske energien i en vannstrøm. Vannet ledes gjennom en turbin som er koblet til en generator. Turbinene som benyttes utformes ulikt avhengig av høydeforskjell, mengde og hastighet på vannet som passerer gjennom turbinen. Med moderne turbiner er vannkraft svært energieffektivt. Den mest brukte turbintypen i Norge, Francis-turbinen, kan oppnå en virkningsgrad på over 95 % under optimale driftsforhold. (Henriksen et al. 2020). Det største vannkraftverket i verden er «Three Gorges Dam» i Kina. Det består av 34 turbiner og har en total kapasitet på 22 500 MW (Qin et al. 2020). Vannkraft kan også produseres på steder uten høydeforskjell mellom to reservoarer, gjennom såkalt tidevannskraft. Tidevannskraft utnytter strømninger forårsaket av tidevannsbevegelser på to ulike måter. Den ene metoden går ut på å plassere turbiner under vann i trange sund hvor vannhastigheten syklisk blir svært høy. Utformingen kan minne om vindturbiner under vann. Den andre metoden går ut på å utnytte høydeforskjellen mellom flo og fjære ved å demme opp og sørge for at vannet må passere gjennom turbiner på vei inn og/eller på vei ut. Denne utformingen ligner mer på konvensjonelle vannkraftverk. Det største tidevannskraftverket i verden er av denne typen, «Sihwa Tidal Power Plant» i Sør-Korea med en kapasitet på 254 MW (Park og Lee 2021).

### 3.1.2 Lagring

Produksjon av elektrisitet fra fornybare kilder som vind og sol innebærer uregelmessige start og stopp i produksjonen. Forbrukere av elektrisiteten kan bare til en viss grad tilpasse seg denne uregelmessigheten. Til de aller fleste formål bør strømtilførselen være uavbrutt. Dette oppnås ved å lagre deler av det som produseres. For å kunne bevege oss bort fra fossile kilder og mot nullutslipp blir teknologi for lagring av elektrisitet stadig viktigere. Dagens lagringsmetoder er mange. Eksempelvis kan lagringen være:

- elektrokjemisk – ved bruk av batterier,
- mekanisk – ved bruk av pumpekraftverk,
- termisk – ved bruk av Carnot-batterier,
- elektrostatisk – ved bruk av superkondensatorer,
- kjemisk – ved konvertering av væske/gass.

Her omtales et utvalg av disse lagringsmetodene. Metoder for kjemisk lagring diskuteres videre i

---

---

delkapitlene 3.2, 3.3 og 3.5 til 3.7 som omtaler henholdsvis hydrogen, ammoniakk, hydrokarboner og alkoholer.

Når det kommer til lagring av elektrisitet tenker mange umiddelbart på batterier. Elektrokjemisk lagring ved bruk av batterier er en veletablert teknologi som benyttes verden rundt og teknologien er i stadig utvikling. I dagens digitale samfunn er bruk av off-grid, mobile enheter essensielt og besittelse av batterier med egnede egenskaper er derfor svært viktig. Her spiller egenskaper som energitetthet, levetid, skaderisiko og kostnadseffektivitet sentrale roller. Energitetthet er viktig fordi det er ønskelig at et batteri veier lite og at det ikke er for plasskrevende. Levetiden er viktig fordi kapasiteten til batterier forringes med tid og bruk. Ytelsen til oppladbare batterier faller etter hvert som batteriet lades ut og opp igjen gjentatte ganger, og det er ønskelig at batteriet kan gjennomgå et høyt antall ladesykluser før kapasiteten til batteriet faller betraktelig. Skaderisiko er en viktig faktor i den forstand at batterier kan inneholde kjemikalier som er brannfarlige, eksplosive, giftige eller på andre måter skadelig for mennesker og miljø (Schismenos, Chalaris og Stevens 2021). Kostnadseffektivitet er viktig for at produksjonen av en batteritype skal kunne skaleres opp og for at teknologien skal kunne videreutvikles. Det er svært mange ulike typer batterier tilgjengelig på markedet i dag. Disse kan deles inn i 2 hovedkategorier: primær- og sekundærbatterier. Primærbatterier er basert på en ikke-reversibel kjemisk prosess og kan derfor bare lades ut én gang. Sekundærbatterier er derimot reversible og kan lades opp igjen flere ganger etter utlading. Markedet for oppladbare batterier er i dag sterkt dominert av litiumbatterier som benyttes i alt fra småelektronikk til elektriske biler. Verdens største installasjon av litiumbatterier er «Moss Landing Energy Storage Facility» i California. Batterianlegget kan levere 400 MW og har en lagringskapasitet på 1 600 MWh (Colthorpe 2022a). Anlegget er installert for å stabilisere strømmettet og jevne ut variasjonene forbundet med energiproduksjon fra sol og vind.

Batterier er best egnet til korttidslagring (timer–dager) av elektrisk energi ettersom de selvutlades og ytelsen reduseres med tid og bruk. For stasjonær langtidslagring (dager–måneder) finnes det mange alternativer til batterier. Såkalte pumpekraftverk er den teknologien med klart størst kapasitet for lagring av elektrisk energi i dag. Pumpekraftverk ligner på konvensjonelle vannkraftverk, men har i tillegg anlegg for å pumpe vann tilbake opp til det øverste reservoaret igjen og på den måten lagre energi. På verdensbasis anslår IEA<sup>2</sup> at den totale lagringskapasiteten til pumpekraftverk var på hele 8,5 TWh i 2020. Til sammenligning var lagringskapasiteten til alle stasjonære batteriinstallasjoner og alle elektriske kjøretøy kombinert på 0,66 TWh (IEA 2021c). Andre former for mekanisk lagring som benyttes er komprimert luft og svinghjul (Mahmoud et al. 2020). Prinsippet bak lagring med komprimert luft er å bruke elektrisitet til å drive en kompressor og lagre den trykksatte luften i hulrom under bakken eller i en trykktank. Når elektrisiteten skal hentes ut igjen lar man luften ekspandere gjennom en turbin koblet til en generator. Dette er en relativt billig og fleksibel lagringsmetode, men sammenlignet med pumpekraftverk er den totale virkningsgraden til systemet lav. Prinsippet bak svinghjul er å lagre energi i form av rotasjonsenergi. Overskuddsenergi brukes til å akselerere en roterende disk eller ring. Deretter kan energien hentes ut igjen ved å bremse ned rotasjonen og transformere energien til elektrisitet. Denne lagringsmetoden er best egnet for korttidslagring (minutter – timer) på grunn av betydelige friksjonstap i systemet over tid (Li og Palazzolo 2022).

En annen metode for lagring av elektrisk energi er termisk lagring med såkalte Carnot-batterier. Carnot-batterier er en samlebetegnelse for teknologi som bruker elektrisk energi til å skape en

---

<sup>2</sup>IEA: International Energy Agency.

---

---

temperaturdifferanse mellom to reservoarer og lagre termisk energi, for deretter å transformere den termiske energien tilbake til elektrisitet igjen ved å la varme strømme fra reservoaret med høy temperatur til reservoaret med lav temperatur via en varmekraftmaskin (Dumont et al. 2020). Den totale virkningsgraden til et slikt system er ikke spesielt høy, men lagringsmetoden er allikevel gunstig fordi svært billige lagringsmaterialer kan benyttes og systemet er enkelt å skalere opp. Lagringsmaterialet kan være i form av gass, væske eller fast stoff, og materialet kan gjennomgå faseoverganger etterhvert som Carnot-batteriet lades opp eller tømmes for energi. Typiske lagringsmaterialer er stein, vann, luft og salt. I en verden som stadig tappes for ressurser er det svært fordelaktig at Carnot-batterier kan benytte et bredt utvalg av miljøvennlige lagringsmaterialer.

Ved lagring av elektrisitet er det ikke bare den totale mengden lagret energi som er tellende. I mange brukstilfeller er det også viktig å kunne lagre eller hente ut betydelige mengder energi i løpet av et svært kort tidsrom. I stedet for energitetthet ligger da fokuset på effekttetthet, og her er elektrostatisk lagring ved bruk av superkondensatorer godt egnet. Superkondensatorer kan ikke holde på like store mengder energi som et batteri, men det kan derimot gi fra seg og ta opp elektrisk energi mye raskere. I tillegg kan en superkondensator gå gjennom svært mange ladesykluser før ytelsen reduseres. Denne lagringsmetoden er kun aktuell for korttidslagring (sekunder – minutter) fordi høy selvutlading gjør at superkondensatorer taper energi raskt. De ulike egenskapene til superkondensatorer og batterier gjør at de to lagringsmetodene utfyller hverandre godt og det kan derfor være lønnsomt med hybride lagringssystemer (Khalid 2019). Det vil si systemer med evne til flere ulike typer energilagring, slik at lagringen kan tilpasses bruksmønsteret og på den måten øke både ytelsen og levetiden til systemet. Eksempelvis har Kouchachvili, Yaïci og Entchev (2018) redegjort for at hybride lagringssystemer som kombinerer superkondensatorer og batterier kan forbedre ytelsen til elektriske biler. En annen form for lagring av elektrisk energi som er egnet for hurtig opp- og utlading er superledende magnetisk energilagring. Prinsippet bak denne lagringsformen er at elektrisitet lagres i en spole som er kjølt ned til en så lav temperatur at spolen er superledende. Det vil si at spolen har null elektrisk motstand og energien kan i prinsippet lagres uten tap på ubestemt tid. Den høye kostaden til superledende spoler og den store energimengden som kreves for å holde spolen nedkjølt gjør at denne lagringsmetoden bare har noen få aktuelle bruksområder innenfor korttidslagring (sekunder – minutter). Et av de mest aktuelle bruksområdene er stabilisering av strømmettet (DNV GL Energy 2020).

### 3.1.3 Teknologisk utvikling

Oppmerksomheten rundt klimakrisen og fokuset på bærekraft har steget kraftig i moderne tid. Det har ført til store satsninger og banebrytende utvikling innen bærekraftig teknologi. Produksjon av elektrisitet fra fornybare kilder blir stadig mer energi- og kostnadseffektivt. Innenfor vindkraft blir turbinene større og mer effektive. IRENA<sup>3</sup> har rapportert hvordan det globale energimarkedet vil utvikle seg fram mot 2050. I sin rapport fastslår de muligheten for at vindkraft kan stå for hele 35 % av den globale elektrisitetsproduksjonen i 2050 (IRENA 2019). Utviklingen går også hurtig innenfor solkraft. Solcellepaneler blir stadig bedre og billigere. Et raskt voksende marked driver innovasjon, og nye metoder/materialer for produksjon av solceller får se dagens lys. En teknologi som ser lovende ut er organiske solceller bygget opp av karbonbaserte halvledere. Organiske solceller har så langt en betydelig lavere virkningsgrad enn silisium-solceller, men de er derimot billigere og

---

<sup>3</sup>IRENA: International Renewable Energy Agency.

---

---

enklere å produsere. De organiske materialene som benyttes er miljøvennlige og storskala utnyttelse medfører ikke ressursknapphet. Videre er organiske solceller svært fleksible og de kan skreddersys for mange ulike typer anvendelser (Riede, Spoltore og Leo 2021).

En annen form for fornybar elektrisetsproduksjon som det forskes på er bølgekraft. Den enorme energimengden som til enhver tid befinner seg i bølger på havet representerer en utømmelig kraftkilde som ingen per dags dato har klart å utnytte på en kosteffektiv måte. Mange konsepter for transformasjon fra bølgekraft til elektrisitet har blitt demonstrert, men det er fortsatt store utfordringer knyttet til energieffektivitet, levetid, påvirkning på marint miljø, investeringskostnader og mer som må løses før teknologien er moden nok til å realiseres fullt ut. Den potensielt meget store gevinsten av et teknologisk gjennombrudd er en sterk drivkraft for videre forskning på bølgekraft (Mwasilu og Jung 2019).

Den teknologiske utviklingen går tilsvarende raskt når det kommer til lagring av elektrisitet, spesielt innenfor batteriteknologi. Den dominerende batteritypen, litiumbatterier, har med tiden blitt en svært moden teknologi og fortsatt blir ytelsen bedre og batteriene billigere for hvert år som går. Allikevel forskes det intensivt på et bredt utvalg av andre batterityper (El Kharbachi et al. 2020). Litiumbatterier egner seg ikke under alle omstendigheter, og batteriene er avhengige av begrensede råvarer som nikkel og kobolt (DNV GL Energy 2020). Det kan bli knapphet på slike råvarer dersom all satsning rettes mot én og samme teknologi. Eksempler på alternative råvarematerialer er natrium, sink, aluminium og kalium (Ma et al. 2021). Konvensjonelle litiumbatterier består blant annet av en flytende elektrolytt som gjør batteriene lett brennbare. Faststoffbatterier, som ikke består av noen elementer i væskeform, er et lovende alternativ som kan gi både økt sikkerhet og høyere energitetthet. Foreløpig er ytelsen til faststoffbatterier mye dårligere enn batterier med flytende elektrolytt, men utviklingen går i riktig retning. En alternativ teknologi som står i kontrast til faststoffbatterier er flytbatterier. I flytbatterier lagres flytende elektrolytt i separate tanker utenfor selve batteriet. Under lading og utlading flyter elektrolytten gjennom batteriet ved hjelp av to pumper. Flytbatterier er mindre brannfarlige enn konvensjonelle litiumbatterier, samt at de er enklere å skalere opp til ønsket energi- og effektkapasitet. For å kunne kommersialisere denne typen batterier må derimot utfordringer med lav energitetthet og energieffektivitet løses. Utviklingen har tidligere vært rettet primært mot energilagring for mobile enheter slik som bærbar elektronikk og el-biler. Nå skifter derimot utviklingen mer over mot stasjonære on-grid enheter for å understøtte fornybar kraftproduksjon og fjerne avhengigheten av kontinuerlig krafttilførsel. Dette er med på å endre rammebetingelsene og åpner opp for at nye batteriteknologier kan vinne fram.

For mekanisk lagring av elektrisitet er pumpekraftverk den klart mest utbredte metoden. En stor ulempe med konvensjonelle pumpekraftverk er at det krever store landområder og er begrenset av topografi. For å fjerne topografibegrensninger og redusere fotavtrykket er underjordiske pumpekraftverk under utvikling (Matos, Carneiro og Silva 2019). Her er det nederste reservoaret plassert under bakken, for eksempel i en tidligere gruve eller i et hulrom gravd ut for dette formålet. Med underjordiske pumpekraftverk kan det bli aktuelt å etablere pumpekraftverk på lokasjoner hvor det tidligere ikke har vært hensiktsmessig. Store mengder vann er ikke tilgjengelig overalt og vann har en relativt lav massetetthet sammenlignet med faste stoffer som betong eller bly. Større potensiell energi kan lagres på et mindre område dersom et lagringsmedium med høyere massetetthet benyttes. Derfor forskes det på mulighetene rundt lagring av energi ved å heve og senke elementer med høy massetetthet. Flere ulike typer gravitasjonell energilagring har blitt utviklet. Et eksempel er det amerikanske selskapet ARES<sup>4</sup> som har utviklet en lagringsmetode hvor tunge jernbanevogner dras

---

<sup>4</sup>ARES: Advanced Railing Energy Storage.

---

---

opp en bratt bakke og slippes ned igjen for å henholdsvis lagre og hente ut energi (ARES 2022). Et annet eksempel er det britiske selskapet Gravitricity som har utviklet et system hvor energi lagres ved å heve og senke tunge vektlodd (Gravitricity 2022). Vektloddene senkes ned i gamle gruvesjakter og heves igjen ved hjelp av elektriske vinsjer. Det argumenteres for at systemet er fleksibelt og har lang levetid. Botha og Kamper (2019) har analysert lagringsmetoden og vist at den er konkurransedyktig sammenlignet med både pumpekraftverk og batterier. En annen metode for mekanisk lagring under utvikling er flytende luft. Prinsippet bak energilagring med flytende luft har mange likheter med komprimert luft, men i tillegg til å komprimere luften kjøles den ned til en så lav temperatur at luften går over fra gass- til væskeform. Det gir høy energitetthet og løser plassutfordringer knyttet til komprimert luft. I lagringsprosessen overføres store mengder termisk energi til og fra luften, og man er avhengig av effektiv utnyttelse av overskuddsvarme for at systemet skal være energieffektivt i sin helhet (Vecchi et al. 2021).

En stor andel av lagringsmetodene beskrevet over er bare egnet for stasjonær energilagring. De få som derimot har evne til mobil lagring, slik som batterier, svinghjul og superkondensatorer, er ikke spesielt godt egnet til lagring av store mengder energi over lengre tid. De mobile lagringsmetodene har relativt lav energitetthet og/eller en høy grad av selvutlading. For energikrevende, off-grid applikasjoner vil det ofte være hensiktsmessig å heller benytte energi i form av kjemiske forbindelser. To av de mest aktuelle alternativene, hydrogen og ammoniakk, diskuteres i de neste delkapitlene.

## 3.2 Hydrogen

### 3.2.1 Produksjon

Hydrogen finnes overalt rundt oss. Faktisk er hele 90 % av alle atomer i universet hydrogenatomer (Kofstad et al. 2022a). Her på jorda er en stor andel hydrogen kjemisk bundet i form av vann. Hydrogen er en fundamental byggekloss i organisk materiale og forekommer i alle levende dyr og planter. Ren hydrogengass,  $H_2$ , forekommer derimot i svært liten grad på jordens overflate. For å anskaffe større mengder hydrogengass må man spalte hydrogen fra andre kjemiske forbindelser, eksempelvis fra vann, olje eller naturgass. En slik spaltingsprosess er energikrevende. Hydrogengass er en  $CO_2$ -fri energibærer og forbrenning av gassen medfører svært begrensede miljøskadelige utslipp. Allikevel kan ikke all bruk av hydrogengass ansees som miljøvennlig. Produksjonsmetoden og kilden til energi for produksjonsanlegget har stor betydning for om gassen kan ansees som miljøvennlig eller ikke i det totale bildet. Dersom den energikrevende framstillingsprosessen er basert på fossile kilder hjelper det lite at forbrenningen av gassen er utslippsfri. De vanligste produksjonsmetodene krever tre hovedelementer: et materiale som inneholder hydrogen, energi som tilføres dette materialet og en katalysator som øker hastigheten på den kjemiske reaksjonen. Energien som tilføres materialet kan være i form av elektrisitet, varme, lys, biologisk energi og kjemisk energi, enten alene eller i kombinasjon med hverandre (Acar og Dincer 2019; Dawood, Anda og Shafiullah 2020). Det er vanlig å kategorisere hydrogen basert på hvilken type materiale og energikilde som er brukt under produksjonen. Hovedkategoriene er grå, blå og grønn hydrogen. Grå hydrogen omtaler hydrogen med et forurensende opphav, for eksempel hydrogen som er produsert gjennom såkalt dampreforming av naturgass. Dampreforming av naturgass dominerer dagens hydrogenmarked fordi det er den klart mest kosteffektive produksjonsmetoden. Hele 96 % av verdens hydrogenproduksjon er basert på naturgass, olje eller kull (Ji og Wang 2021). Med et mål om nullutslipp er ikke disse



---

---

fossile kildene aktuelle. I den andre enden av skalaen ligger grønn hydrogen. Det vil si hydrogen som er avspaltet fra et ikke-fossilt materiale ved bruk av 100 % fornybar energi. Blå hydrogen representerer et mellomledd mellom grå og grønn hydrogen. Produksjon av blå hydrogen er basert på fossile kilder, men miljøutslippene reduseres ved å fange opp og lagre resulterende CO<sub>2</sub>. Blå hydrogen er et steg i riktig retning, men det innebærer fortsatt en avhengighet av fossile kilder. En fjerde kategori som brukes i litteraturen er lilla hydrogen. Denne kategorien omhandler hydrogen som er produsert ved hjelp av kjernekraft (Ishaq, Dincer og Crawford 2022).

For produksjon av grønn hydrogen er elektrolyse av vann den mest brukte metoden. Her spaltes vann til hydrogen og oksygen ved hjelp av elektrisk strøm, i henhold til følgende reaksjonsligning:



Denne prosessen krever store mengder elektrisitet og utspiller seg typisk ved en temperatur på 50–90 °C. Produksjonskostnadene ved elektrolyse av vann kan i mange tilfeller være rundt 3 til 4 ganger høyere sammenlignet med hydrogen fra dampreforming av naturgass (Ji og Wang 2021).<sup>5</sup> Teknologisk utvikling i form av økt energieffektivitet og høyere produksjonsrate er avgjørende for at denne produksjonsmetoden skal bli konkurransedyktig. En stor fordel med elektrolyse av vann kontra de fleste andre produksjonsmetoder er renheten i prosessen. Enkelte anvendelser av hydrogen krever at det er svært få urenheter til stede. For eksempel krever brenselceller<sup>6</sup> i hydrogendrevne kjøretøy en renhet på 99,97 % (Dawood, Anda og Shafiullah 2020).<sup>7</sup> Etter elektrolyseprosessen må hydrogenet tørkes og oksygenbaserte urenheter fjernes. Ved produksjon basert på fossilt brensel eller biomasse må hydrogenet utover dette også gjennom en rekke renseprosesser for å fjerne karbonbaserte urenheter (Nguyen et al. 2019). Grønn hydrogen fra elektrolyse av vann bidrar bare til en liten andel av det globale hydrogenmarkedet i dag, men teknologien er i sterk vekst. Et eksempel er den vest-europeiske industriplattformen «HyDeal Ambition», et initiativ som kobler sammen en rekke selskaper innenfor hele hydrogenverdikjeden. Ambisjonen er å bygge opp solkraftdrevet elektrolyse med en total kapasitet på 67 GW og evne til å produsere 3,6 millioner tonn grønn hydrogen i 2030 (HyDeal 2022). Til sammenligning var total elektrolysekapasitet i verden litt over 300 MW i 2021 (IEA 2021b).

Mens produksjon av fossilt drivstoff krever tilgang til råvarer som olje, gass eller kull, er vann er den eneste nødvendige råvaren for produksjon av hydrogen ved elektrolyse. Vann er tilgjengelig på store deler av jordens overflate. Ved hjelp av sol-, vind- eller kjernekraft kan man produsere hydrogen nesten hvor som helst. Bruk av hydrogen som drivstoff gir derfor større fleksibilitet og forsyningssikkerhet, og det åpner opp for mobile produksjonsmuligheter som ikke eksisterer for fossilt drivstoff.

---

<sup>5</sup>Kostnad per kg H<sub>2</sub> produsert. Usikre tall på grunn av store regionale forskjeller og sterk korrelasjon med elektrisitet- og brenselkostnader (IEA 2021b).

<sup>6</sup>Brenselceller omtales i avsnitt 3.2.3.

<sup>7</sup>Her er renheten oppgitt i molprosent. Mol er SI-enheten for stoffmengde og angir antall partikler eller partikkelgrupper (Holtebekk og Hofstad 2022). I dette tilfellet angir molprosenten antall H<sub>2</sub>-molekyler i forhold til totalt antall molekyler i blandingen.

---

---

### 3.2.2 Lagring

Hydrogen er det letteste av alle grunnstoffene og har atomnummer 1 i periodesystemet. Under et trykk på 1 atm<sup>8</sup> koker hydrogen ved en temperatur på -252,9 °C (Kofstad et al. 2022a). Med andre ord må temperaturen være svært lav for å kunne lagre hydrogen i væskeform. Temperaturen må senkes ytterligere, ned til -259,2 °C, for at hydrogen skal fryse til fast stoff. På kelvinskalaen tilsvarer dette 14 K. Det vil si at frysepunktet kun er 14 grader over det absolutte nullpunkt, den laveste temperaturen som er fysisk mulig. Det er krevende å oppnå så lav temperatur, og store energikostnader medløper hvis slike temperaturforhold skal opprettholdes over lengre tid. Lagring av ren hydrogen i fast form er derfor ikke aktuelt med dagens teknologi. På en annen side kan hydrogen lagres i fast form ved å kombinere hydrogenet med andre stoffer. Ved kombinasjon med eksempelvis natrium, lithium, bor og/eller aluminium endrer egenskapene seg og hydrogenholdig fast eller flytende materiale kan lagres under langt mer moderate temperaturforhold (Tarhan og Çil 2021). Med denne typen kjemisk lagring må hydrogenet separeres fra lagringsmaterialet før det kan benyttes igjen, ofte gjennom å tilføre varme til materialet. En stor utfordring med kjemisk lagring er å sikre stabilitet og hindre at andre uønskede gasser produseres under separasjonsprosessen (Moradi og Groth 2019). Når det kommer til lagring av ren hydrogen i væskeform er det også her veldig energikrevende å kjøle ned hydrogenet tilstrekkelig. Selve nedkjølingsprosessen for omgjøring fra gass til væske kan kreve energi tilsvarende mer enn 1/3 av energiinnholdet i det flytende hydrogenet som lagres (Wijayanta et al. 2019). Videre må lagringstanken være svært godt isolert for å begrense mengden hydrogen som fordamper under lagring og transport (Aziz 2021). Utfordringene knyttet til flytende hydrogen medfører at lagringsformen er mest aktuell når store mengder hydrogen skal fraktes over en lengre distanse. Flytende hydrogen er dårlig egnet for lagring i mindre skala fordi det er krevende og lite energieffektivt å opprettholde tilstrekkelig lav temperatur i mindre lagringstanker. For stasjonær lagring, samt ikke-stasjonær lagring i mindre skala, er det langt mer aktuelt med hydrogen i form av komprimert gass.

Hydrogengass har en massetetthet på 0,084 kg/m<sup>3</sup> ved 20 °C og 1 atm. Til sammenligning har flytende hydrogen ved -252,9 °C en massetetthet på 70,8 kg/m<sup>3</sup> (Lanz, Heffel og Messer 2001). Altså vil en trykkløs lagringstank med væske kontra gass inneholde over 800 ganger mer hydrogen. For å utjevne denne forskjellen og gjøre lagring av hydrogengass kosteffektivt må gassen komprimeres. Hydrogengass komprimeres og lagres under trykk, normalt fra 100 atm til rundt 800 atm (Elberry et al. 2021). For å oppnå like høy tetthet som flytende hydrogen må gassen komprimeres til 2 000 atm. Det er ikke aktuelt å operere med et så høyt trykknivå på grunn av alt for energikrevende kompresjon, veldig kostbare lagringstanker og stor skaderisiko. Komprimert gass er den mest brukte metoden for hydrogenlagring grunnet lav kostnad, høy energieffektivitet og teknisk enkelhet sammenlignet med flytende hydrogen, kjemisk lagring og andre lagringsmetoder (Li et al. 2019). Utfordringene er allikevel mange. H<sub>2</sub>-molekyler er veldig små og har derfor en evne til å gjennomtrengte det meste. I kombinasjon med oksygen dannes knallgass, en svært eksplosiv blanding, og lekkasjer kan derfor utgjøre stor skaderisiko. Videre har hydrogen en evne til å svekke de mekaniske egenskapene til metaller og skape såkalt hydrogensprøhet som kan føre til sprekkdannelser (Moradi og Groth 2019). Av den grunn stilles det strenge krav til materialene som benyttes ved lagring og transport av hydrogen. For storskala hydrogenlagring er underjordisk lagring et alternativ som er lønnsomt både økonomisk og sikkerhetsmessig. Her er saltgruver spesielt godt egnet på grunn av høy gasstetthet og

---

<sup>8</sup>Standard atmosfære (symbol: atm) er en måleenhet for trykk. 1 standard atmosfære tilsvarer 101 325 pascal, som er det midlere atmosfæriske trykket ved havoverflaten (Hofstad 2022c).

---

---

kjemisk motstandsdyktighet mot hydrogen. Verdens største hydrogenlager er saltgruven «Spindletop» i USA, med en energilagringsskapasitet på 274 GWh (Małachowska et al. 2022).

### 3.2.3 Anvendelser

I 2020 var den globale etterspørselen etter hydrogen på 90 millioner tonn (IEA 2021b). Nesten 45 % av dette ble brukt til oljeraffinering. Videre ble rundt 55 % brukt i industrielle prosesser, hovedsakelig til ammoniakk-, metanol- og stålproduksjon. Andre relevante sektorer, slik som transport, bygninger og kraftproduksjon, sto for mindre enn 1 % av den totale hydrogenetterspørselen. Hydrogen har svært høy spesifikk energi<sup>9</sup> og har derfor potensiale til å benyttes som et alternativt drivstoff. Utfordringene knyttet til hydrogenlagring har hemmet utvikling i transportsektoren, men hydrogenrevne kjøretøy benyttes allerede i store deler av verden (Thomas et al. 2020). Hydrogen kan enten forbrennes direkte i en forbrenningsmotor eller det kan transformeres til elektrisitet ved hjelp av en brenselcelle og forsyne en elektrisk motor. Den elektrokjemiske prosessen som foregår i en brenselcelle er den motsatte av prosessen for elektrolyse av vann, som tidligere beskrevet med reaksjonsligning 3.1. En brenselcelle forbruker hydrogen og oksygen, og sluttproduktet fra prosessen er strøm og vann. Oksygenet som brukes kan enten være ren oksygen eller i form av luft (Manoharan et al. 2019). Hydrogenrevne kjøretøy med brenselceller har mange fordeler sammenlignet med konvensjonelle forbrenningsmotorer. Hydrogenbrenselceller er energieffektive, stille i drift og forbrenningen medfører ingen miljøskadelige utslipp (Felseghi et al. 2019). Dette er ikke tilfellet når hydrogen brukes som drivstoff til forbrenningsmotorer. Sluttproduktet av denne typen forbrenning kan inneholde miljøskadelige gasser. Spesielt NO<sub>x</sub>-gass er en av avfallsproduktene som er skadelig for både helse og miljø (Miljødirektoratet 2021).

Når det gjelder anvendelser i transportsektoren har hydrogen også blitt brukt som drivstoff til jetmotorer. Opp gjennom årene har det vært flere pilotprosjekter for bruk av hydrogen innen luftfart, men uten store gjennomslag (Baroutaji et al. 2019). På starten av 2000-tallet finansierte EU «Cryoplane»-prosjektet, et stort forskningsprosjekt ledet av Airbus som så på muligheten for å gå over til hydrogen som drivstoff i luftfartsindustrien (CORDIS 2005). Resultatene fra prosjektet var i all hovedsak positive. Konklusjonene viste enorme miljøbesparelser og et stort potensiale for utnyttelse av hydrogen, men prosjektet ble ikke videreført på grunn av identifiserte kostnader knyttet til miljøvennlig produksjon og manglende infrastruktur (Airbus 2003). I motsetning til luftfart har suksessen vært stor innen romfart. Flytende hydrogen har vært det primære drivstoffet til raketter i flere tiår (NASA 2021). En stor fordel med å bruke hydrogen som drivstoff er man kan produsere sitt eget drivstoff på stedet dersom man har tilgang til vann og elektrisitet. En elektrolyseprosess gir både hydrogen og oksygen. Dette utnyttes på den internasjonale romstasjonen til å produsere oksygen til mannskapet og drivstoff samtidig. NASA (2021) peker på at man i framtiden også vil kunne bruke brenselcelleteknologi til regenerering av vann ved å kombinere hydrogen og CO<sub>2</sub> pustet ut av mannskapet på romstasjonen.

### 3.2.4 Teknologisk utvikling

Hydrogen blir ansett som en viktig brikke i framtidens energisystemer, og det er derfor mange som satser på forskning og utvikling av hydrogenteknologi. Flere produksjonsmetoder for grønn

---

<sup>9</sup>Spesifikk energi er energiinnhold per masseenheter (J/kg).

---

---

hydrogen er under utvikling. Den konvensjonelle elektrolyseprosessen blir optimalisert, samt at nye teknikker som er spesialtilpasset hvert enkelt bruksområde får se dagens lys. Et eksempel er forskningen som gjøres på elektrolyse ved bruk av sjøvann istedenfor ferskvann. Bruk av sjøvann er krevende, blant annet på grunn av korrosjon og dannelse av uønskede gasser, men dersom utfordringene løses vil det tilgjengeliggjøre og akselerere grønn hydrogenproduksjon (Asghari et al. 2022). Videre forskes det på alternative måter å spalte vann til hydrogen og oksygen på. Istedenfor å være avhengig av ren elektrisitet utvikles det metoder for å utnytte lys (Shi et al. 2019). Her blir energien i lysets fotoner utnyttet og spaltingsprosessen omtales som fotolyse. Hydrogenproduksjon kan også understøttes av biologiske prosesser. For eksempel gjennom biofotolyse, en prosess hvor alger fanger opp sollys og produserer hydrogen fra vann og CO<sub>2</sub> (Akhlaghi og Najafpour-Darzi 2020). Disse grønne produksjonsmetodene har fortsatt en lang vei å gå for å bli kosteffektive sammenlignet med elektrolyse. Innenfor elektrolyse går utviklingen svært raskt, og stadig mer oppmerksomhet blir nå rettet mot høytemperaturolektrolyse. Dette er elektrolyse som foregår ved en temperatur på 500–1000 °C (Ji og Wang 2021). Ved å tilføre varme reduseres elektrisitetsbehovet og den totale energieffektiviteten til produksjonsprosessen øker. Flere studier peker på at operasjonsforholdene til høytemperaturolektrolyse i stor grad samsvarer med operasjonsforholdene ved enkelte typer kjernekraftverk og at en stor energigevinst kan oppnås ved å kombinere de to. El-Emam og Özcan (2019) løfter fram kjernekraft som den best egnede energikilden i en hydrogenbasert økonomi, i samsvar med Ji og Wang (2021) som hevder at kjernekraft vil være den viktigste drivkraften for hydrogenproduksjon i framtiden. Kjernekraft omtales ytterligere i delkapittel 3.4.

Viktigheten av grønne produksjonsmetoder øker ettersom nye bruksområder dukker opp og hydrogenetterspørselen øker. En fullstendig overgang til hydrogendrivstoff i transportsektoren lar vente på seg, mye grunnet utfordringene knyttet til hydrogenlagring og mangelfull infrastruktur. Derimot pekes det på at hydrogen kan benyttes for å drive sekundære systemer, slik som kontroll og styringssystemer, uten at det vil stille spesielt store krav til lagringskapasitet og utbygging av infrastruktur. Eksempelvis nevner Baroutaji et al. (2019) mulighetene for å benytte hydrogen i luftfartsindustrien ved å drifte flyenes APU-er<sup>10</sup> med brenselceller. Dette vil redusere luftfarten sitt CO<sub>2</sub>-fotavtrykk uten å kreve en stor omveltning i industrien. APU-er benyttes også på skip og enkelte store kjøretøy, og en tilsvarende endring kan gjøres i flere transportbransjer. Et annet eksempel på et relativt nytt bruksområde for hydrogen innen luftfart er «scramjet»-motoren.<sup>11</sup> Scramjet er en jetmotor som kan operere effektivt ved ekstremt høye hastigheter, i det hypersoniske området hvor  $M > 5$ .<sup>12</sup> Slike motorer er aktuelle for bruk blant annet i missiler og i høyhastighet luftfart. Hydrogen blir ansett som best egnede drivstoffet til scramjet på grunn av dets brennbarhet og termodynamiske egenskaper. Teknologien er foreløpig ikke moden, spesielt grunnet utfordringer knyttet til hydrogendrivstoff sin lave massetetthet (Choubey et al. 2020).

De termodynamiske egenskapene til hydrogen medfører mange utfordringer knyttet til lagring og transport, og det forskes derfor mye på utvikling av ny lagringsteknologi. Den stadige utviklingen innen materialteknologi og kjøleteknikk vil framover gi lagringstanker som er bedre egnet for hydrogen, både med tanke på kosteffektivitet og sikkerhet (Alves et al. 2022). I tillegg til lagring av ren hydrogen utforskes nye muligheter for lagring av hydrogen i kombinasjon med andre stoffer. Her er nanoteknologi en viktig driver, spesielt når det kommer til fast-stoff hydrogenlagring. Boateng og

---

<sup>10</sup>APU: *Auxiliary power unit*.

<sup>11</sup>Scramjet: *Supersonic combustion ramjet*.

<sup>12</sup>Mach (symbol: M) er et forholdstall mellom legemets hastighet og lydens hastighet ved tilsvarende temperatur- og trykkforhold (Tandberg 2021). Ved  $M = 1$  er hastigheten lik lydens hastighet. Lydens hastighet i luft ved 20 °C er 1235 km/t.

---

---

Chen (2020) presenterer den seneste utviklingen innen nanomaterialer for hydrogenlagring. De viser til svært mange aktuelle lagringsmaterialer, men det gjenstår fortsatt mye forskning før disse materialene har en lagringskapasitet som er høy nok til at teknologien blir kosteffektiv. Lagring av hydrogen i kombinasjon med andre stoffer er ikke bare aktuelt i fast form. Hydrogen i kombinasjon med nitrogen danner ammoniakk, NH<sub>3</sub>, et stoff som er betydelig lettere å lagre i væskeform enn rent hydrogen. Det er derfor aktuelt å benytte ammoniakk som en hydrogenbærer og separere ut hydrogenet igjen før det skal benyttes. Egenskapene og bruksområdene til ammoniakk er tema i neste delkapittel.

## 3.3 Ammoniakk

### 3.3.1 Produksjon

Ammoniakk er en kjemisk forbindelse bestående av hydrogen og nitrogen. Den kjemiske betegnelsen er NH<sub>3</sub>. Dagens ammoniakkproduksjon er hovedsakelig basert på fossile kilder som naturgass og kull. I likhet med hydrogen er dampreforming av naturgass den klart mest kosteffektive produksjonsmetoden og av den grunn er over 70 % av verdens ammoniakkproduksjon basert på naturgass (IEA 2021a). Den mest brukte produksjonsmetoden er navngitt Haber-Bosch-metoden. Haber-Bosch er basert på at hydrogen og nitrogen reagerer i henhold til følgende reaksjonsligning:



Reaksjonen foregår ved en temperatur på 350–600 °C og et trykk på 150–300 atm (Pedersen 2022). De fleste andre produksjonsmetodene som brukes har likheter til Haber-Bosch, men de foregår ved betydelig høyere trykk eller temperatur og er derfor ikke like kosteffektive. Moderne produksjonsanlegg har en energieffektivitet på 65 % (MacFarlane et al. 2020). Med andre ord er det bare rundt 2/3 av mengden energi ammoniakkproduksjonen krever som senere kan nyttegjøres ved å forbrenne ammoniakken. I tillegg er det betydelige energikostnader knyttet til gassene som tilføres prosessen. Nitrogenet som benyttes i produksjonen hentes fra luften. På havnivå består luft av 78 % nitrogen. Nitrogen skilles ut ved å kjøle ned luften til svært lav temperatur og utnytte at komponentene har ulikt kokepunkt. Eksempelvis er kokepunktet til oksygen -183 °C, mens kokepunktet til nitrogen er -196 °C (Kofstad et al. 2022b). I mellom disse to temperaturene vil luftens oksygen være i flytende form, mens nitrogenet fortsatt er gass og dermed kan separeres ut. Hydrogenet som benyttes i ammoniakkproduksjonen kan komme fra ulike kilder. Som beskrevet i avsnitt 3.2.1 blir hydrogen i all hovedsak produsert ved bruk av naturgass. Fossilbasert hydrogen er hovedårsaken til at ammoniakkproduksjon også er tungt knyttet til fossile kilder. Ammoniakkproduksjon kan være miljøvennlig dersom grønn hydrogen produsert ved elektrolyse benyttes. Med andre ord er grønn ammoniakkproduksjon fullt mulig, men foreløpig er teknologiens miljøvennlighet bundet av sin egen hydrogenavhengighet. Ammoniakk produsert ved bruk av Haber-Bosch-metoden blir ikke miljøvennlig før hydrogenproduksjon fases over i en grønnere retning. Med sikte på høyere energieffektivitet og et grønnere fotavtrykk er alternative metoder for ammoniakkproduksjon under utvikling. Denne utviklingen diskuteres videre i avsnitt 3.3.4.

---

---

### 3.3.2 Lagring

Under et trykk på 1 atm koker ammoniakk ved en temperatur på  $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Altså er ammoniakk en gass ved atmosfærisk trykk og romtemperatur. Lenger ned på temperaturskalaen, ved  $-77,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fryser ammoniakk til fast stoff (NCBI 2022). Den klart mest brukte lagringsformen er flytende ammoniakk. Overgangen fra gass til væske kan oppnås på to måter, enten ved å kjøle ned ammoniakk-gass til  $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  eller ved å komprimere gassen. Ammoniakk kan lagres i flytende form ved  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dersom trykket økes til rundt 10 atm. Da oppnås en massetettheten på  $600\text{ kg/m}^3$  (Aziz, Wijayanta og Nandiyanto 2020). De moderate kravene til trykk og temperatur gjør at relativt billige og lette lagringstanker kan benyttes.

Ammoniakk er giftig og kan utgjøre en risiko ved eventuell lekkasje. Derimot er ammoniakk-gass lettere enn luft og dersom lekkasjen skjer i friluft vil gassen raskt stige til værs slik at den ikke utgjør noen direkte fare. I tillegg har gassen en sterk, stikkende lukt som gir en selvalarmerende effekt. For å redusere risikoelementer ytterligere har det blitt utviklet metoder for fast-stoff lagring hvor ammoniakk bindes med andre stoffer, for eksempel  $\text{Ca}(\text{NH}_3)_8\text{Cl}_2$ . Et slikt stoff bærer med seg betydelige mengder ammoniakk som på ønsket tidspunkt kan frigis ved å varme opp stoffet til rundt  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Aziz, Wijayanta og Nandiyanto 2020).

### 3.3.3 Anvendelser

I 2020 var den globale ammoniakkproduksjonen på 185 millioner tonn (IEA 2021a). Hele 70 % av dette ble brukt til gjødsel i jordbruksindustrien. Den resterende andelen ble brukt til industrielle formål som produksjon av plast, syntetiske fibre og eksplosiver. Fram til nyere tid har ammoniakk i svært liten grad blitt benyttet til energiformål, men stadig mer oppmerksomhet rettes nå mot energisektoren. De termodynamiske egenskapene til ammoniakk er godt egnet til anvendelser innen varme- og kuldetechnik. Til bruk i varmpumper er ammoniakk et godt etablert naturlig kuldemedium med lite miljøskadelig effekt, i sterk kontrast til mange kunstige kuldemedier som fram til nå har dominert markedet (Wu, Hu og Wang 2021). Videre har flytende ammoniakk relativt høy energitetthet og det er derfor en aktuell drivstoffkandidat til transportsektoren. Ammoniakk kan enten forbrennes direkte i en forbrenningsmotor eller benyttes i en brenselcelle for å drive en elektrisk motor. I begge tilfeller foregår forbrenning av ammoniakk hovedsakelig etter følgende reaksjonligning:



Denne reaksjonen er helt fri for karbon og sluttproduktene er ufarlig nitrogengass og vanddamp. Ved bruk av ammoniakk i forbrenningsmotorer kan ufullstendig forbrenning føre til dannelse av miljøskadelig  $\text{NO}_x$ -gass, i likhet med direkte forbrenning av hydrogen. Metoder for reduksjon av  $\text{NO}_x$ -utslipp er godt utviklet, blant annet ved å rense eksos med bruk av katalysatorer (MacFarlane et al. 2020).

Et annet bruksområde som løftes fram er å benytte ammoniakk som en ren hydrogenbærer. Moderate krav til trykk og temperatur gjør at ammoniakk er signifikant mye enklere å lagre og transportere sammenlignet med hydrogen. I tillegg er massetettheten til flytende ammoniakk mye høyere enn massetettheten til flytende hydrogen. Ved et trykk på 10 atm og  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  inneholder 1 kubikkmeter med flytende ammoniakk hele 121 kg hydrogen (Aziz, Wijayanta og Nandiyanto 2020). Til

---

---

sammenligning, som beskrevet i avsnitt 3.2.2, har flytende hydrogen en massetetthet på 70,8 kg/m<sup>3</sup>. Flytende ammoniakk representerer altså et lagrings- og transportalternativ for hydrogen som både er mindre fysisk krevende og mer plasseffektivt. Utfordringen her ligger i det å separere ut hydrogenet igjen før det skal benyttes. Separasjonsprosessen foregår ved temperaturer på over 400 °C og krever store mengder energi, noe som betydelig reduserer den totale energieffektiviteten. Dette en utfordring som må løses gjennom teknologisk utvikling dersom ammoniakk skal kunne brukes som en hydrogenbærer i stor skala.

### 3.3.4 Teknologisk utvikling

For å produsere ammoniakk må nitrogen og hydrogen bindes sammen. Nitrogen er i seg selv enkelt å oppdrive, på grunn av den store forekomsten i luft, men det er derimot krevende å få nitrogenet til å reagere med andre stoffer. N<sub>2</sub>-molekyler er svært stabile og lite reaktive. Bindingsenergien mellom to nitrogenatomer som danner et N<sub>2</sub>-molekyl er høy (Kofstad et al. 2022b). Dette gjør omformingsprosessen energikrevende og bidrar til begrenset energieffektivitet for ammoniakkproduksjon. Av den grunn er stor forskningsaktivitet rettet mot å finne mindre energikrevende metoder for å binde sammen nitrogen og hydrogen. Et lovende teknologisk alternativ er det som omtales som elektrokjemisk reduksjon av nitrogen (MacFarlane et al. 2020). I en slik prosess tilføres N<sub>2</sub>-molekyler til en elektrokatalysator. Elektrokatalysatoren tilrettelegger for at nye bindinger til N<sub>2</sub>-molekylet kan skapes. Gjennom en stegvis prosess splittes nitrogenmolekylet og det tilføres ett og ett hydrogenatom helt til det ønskede NH<sub>3</sub>-molekylet dannes. Elektrokjemisk reduksjon av nitrogen har flere fordeler sammenlignet med konvensjonell ammoniakkproduksjon ved bruk av Haber-Bosch. For det første kan produksjonen foregå med uregelmessig strømtilførsel. Midlertidig strømstans skader ikke prosessen. Dette er en stor fordel når produksjonen kobles opp mot fornybar energi som sol- og vindkraft. For det andre er prosessen mindre sensitiv overfor urenheter i nitrogentilførselen. Minimale forekomster av O<sub>2</sub> eller H<sub>2</sub>O kan gjøre skade på katalysatoren i en Haber-Bosch-prosess, mens det bare medfører midlertidig lavere virkningsgrad ved elektrokjemisk reduksjon av nitrogen (MacFarlane et al. 2020). Videre er det en stor fordel at produksjonen kan foregå ved romtemperatur og atmosfærisk trykk (Deng, Iñiguez og Liu 2018). Teoretiske beregninger viser at elektrokjemisk reduksjon av nitrogen kan oppnå høyere energieffektivitet enn Haber-Bosch-metoden, men teknologien er foreløpig ikke moden nok til å oppnå dette. En annen teknologisk utfordring er lav produksjonshastighet. For at produksjonsmetoden skal bli konkurransedyktig må den kunne skaleres opp. Forskning og utvikling er rettet mot å øke produksjonshastigheten og kosteffektiviteten til teknologien. Med tiden vil dette bidra til at ammoniakk blir en enda sterkere energi- og drivstoffkandidat i det grønne skiftet.

## 3.4 Kjernekraft

### 3.4.1 Produksjon

Kjernekraft er utnyttelse av kontrollerte kjernefysiske reaksjoner for å utvinne energi. Begrepet omfatter energiproduksjon fra alle de kjernefysiske reaksjonene fisjon, radioaktivt henfall og fusjon, men tradisjonell kjernekraft utnytter utelukkende fisjonsprosesser. Energi fra radioaktivt henfall

---

---

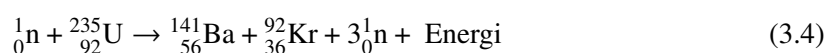
utnyttet i noen svært spesielle anvendelser som romfartøy og fjerntliggende fyrstårn (Trakimavičius 2021). Disse omtales som nukleære batterier (Terranova 2022) og omtales nærmere i boks 3.2.

I desember 2022 annonserte Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) at de hadde oppnådd et historisk gjennombrudd innen fusjon. Overskriftene som fulgte kunne imidlertid gi feil inntrykk av energiregnskapet i prosessen, og hvor langt unna fusjon fortsatt er som en energikilde. Laserne leverte 2,05 megajoule (MJ) energi på målet, en pellet med deuterium og tritium, og dette igangsatte en fusjonsprosess som genererte 3,15 MJ output. Men laserne som ble brukt har en virkningsgrad på under 1 % og trengte rundt 300 MJ for å levere 2,05 MJ energi til målet (U.S. Department of Energy 2022). Man får altså ut ca. 1 % av energien man putter inn, og er fortsatt svært langt unna å utnytte fusjon for energiproduksjon. Resten av dette delkapittelet omhandler derfor hovedsakelig fisjonskraft.

Kjernekraft anvendes i dag til strømproduksjon (og i noen tilfeller fjernvarme) i store kjernekraftverk eller til framdrift på skip. I begge tilfeller utnyttes et såkalt spaltbart materiale (som regel uran i form av uran-235) til å sette i gang og opprettholde en stabil kjernereaksjon hvor uranet spaltes til mindre bestanddeler og frigir energi.

Uran er et grunnstoff som finnes naturlig i jordskorpen. Naturlige forekomster av uran består av to ulike isotoper (varianter): 99,3 % er uran-238 og 0,7 % er uran-235. Tallene 238 og 235 henviser til nukleontallet (også kalt massetallet) til isotopen og angir antall kjernepartikler (protoner + nøytroner). Begge isotopene er svakt radioaktive og relativt stabile med en halveringstid på cirka 4,5 milliarder og 700 millioner år for henholdsvis uran-238 og uran-235.

Et materiale sies å være *fissilt* hvis det kan opprettholde en kjedereaksjon. Uran-235 som treffes av et nøytron vil spaltes i mindre bestanddeler, og slippe ut nye nøytroner. Eksempelvis kan en typisk fisjonsreaksjon se slik ut:



Uran-238 har ikke denne egenskapen og er derfor ikke et fissilt materiale. For enklere å kunne opprettholde en kjedereaksjon er det derfor vanlig at konsentrasjonen av uran-235 økes. Denne prosessen kalles anriking.<sup>13</sup>

Anrikingsgrad for uran som skal brukes som drivstoff i vanlige kjernekraftverk er typisk 3–5 %. Anrikingsgrader over 20 % kalles høyanrikt uran og blir ofte brukt i atomdrevne ubåter, hangarskip eller isbrytere. Når anrikingsgraden er rundt 90 % eller høyere kalles det våpengrad uran og kan brukes i kjernevåpen. Det finnes også andre fissile materialer, men uran-235 er det eneste av disse som forekommer naturlig og derfor også det som er mest utbredt. Noen andre fissile materialer blir nærmere omtalt i avsnitt 3.4.4.

Den vanligste reaktortypen både til kraftproduksjon i kjernekraftverk og til framdrift på skip er såkalte lett vannsreaktorer. Det betyr at vanlig vann (i motsetning til tungtvann) brukes som kjølemiddel og moderator<sup>14</sup> i reaktoren. Varmeenergien som produseres fra kjernereaksjonene brukes til å drive en damp turbin som genererer strøm og/eller framdrift.

---

<sup>13</sup>Det finnes også reaktorer som er designet for å bruke naturlig uran som drivstoff, altså uten anriking.

<sup>14</sup>Stoff som bremser nøytroner slik at de får «riktig» hastighet/energi.



---

---

### Boks 3.1 – Framstilling av brenselstaver

Uran finnes i jordskorpen i varierende konsentrasjoner over hele kloden, og utvinnes med ulike teknikker på samme måte som andre mineraler. Uranet blir så separert og filtrert ut i form av uranoksidpulver. Stoffet konverteres videre til uranheksafluorid, som gjøres om til gass for å kunne anrikes i sentrifuger. Etter anriking til ønsket grad konverteres det til urandioksidpulver, som videre presses sammen og varmebehandles til å danne harde, keramiske brenselpellets. Pelletsene settes sammen til brenselstaver som brukes i reaktoren (WNA 2023). Se Heireng (2015) for en mer detaljert framstilling av disse prosessene.

#### 3.4.2 Lagring

Siden pelletsene/stavene består av fast stoff er det teknisk enkelt å lagre og transportere brenselet. For å unngå fissilt materiale på avveie må det imidlertid omfattende sikkerhetstiltak på plass i begge tilfeller. Grunnet urans høye energitetthet er det imidlertid svært plasseffektivt.

I tillegg må også brukt brensel lagres forsvarlig, både fordi avfallet er miljø- og helsefarlig i seg selv grunnet høy radioaktivitet, og fordi det inneholder fissilt materiale som ikke må komme på avveie. Det skiller her ofte mellom korttidslagring, mellomlagring og permanent deponi. Korttidslagring av avfallet foregår som regel *on-site* for et kjernekraftverk ettersom avfallet ikke tar stor plass (det byttes brensel bare ca. hvert ett til to år). Deretter går avfallet på et mellomlager, før avfallet plasseres i et endelig deponi. I skrivende stund er ingen endelige deponi tatt i bruk. Finland er landet som har kommet lengst i prosessen. De har bygget Onkalo-anlegget som ligger an til å bli det første permanente deponiet som tas i bruk, etter planen i 2025. I flere land har det vært krevende å beslutte endelig lagring, men noen avventer også mulighetene for å reprocessere avfall for å hente ut mer energi av dette før man etablerer endelig deponi. Hvorvidt dette har vært ansett som økonomisk gunstig har variert med prisen på uran og øvrige faktorer som prisen på elektrisitet.

#### 3.4.3 Anvendelser

Kjernekraft anvendes til å produsere elektrisitet, varme og/eller framdrift. Som regel er varmeproduksjonen en bieffekt av å produsere elektrisitet eller framdrift.

Denne varmeproduksjonen kan være både en fordel og en ulempe. Der elvevann brukes som kjølevann kan det oppstå negative konsekvenser for elveøkosystemet. Dersom varmen imidlertid har en direkte anvendelse, for eksempel som fjernvarme eller i industrielle prosesser, er varmeproduksjonen en fordel som i praksis kan doble effekten av reaktoren. For eksempel kan varmen utnyttes i produksjon av hydrogen, ammoniakk eller hydrokarboner. Flere land i tørre deler av verden er også interessert i å bruke varmen til å produsere ferskvann ved avsalting av sjøvann.

---

---

### Boks 3.2 – Nukleære batterier

Noen atomkjerner er ustabile og vil før eller siden gi fra seg en energi i en prosess som kalles radioaktivt henfall. Energien sendes normalt ut i form av alfa-, beta- eller gammastråler. Alfastråling består av heliumkjerner (to protoner og to nøytroner). Betastråling består av elektroner (fra beta-minus henfall) eller positroner (elektronets antipartikkel, fra beta-pluss henfall)<sup>a</sup>. Gammastråler er energirike fotoner (lyspartikler). Ofte vil flere henfall etterfølge hverandre suksessivt i såkalte henfallskjeder, helt til atomkjernen når en stabil form.

Energien som avgis i radioaktivt henfall kan utnyttes som en energikilde, og dette kalles nukleære batterier. Varmen konverteres til elektrisk energi ved et termoelektrisk element. I motsetning til vanlige batterier kan de ikke lades opp på vanlig måte, men de vil kunne gi stabil energitilførsel over veldig lang tid, i størrelsesorden mellom 100 og 1000 år. Derfor brukes dette i dag som strømkilde til romfartøy og fjerntliggende fyrårn. Merk at det ikke brukes til framdrift for romfartøy, kun som energikilde til systemene ombord ettersom effekten som oppnås er svært begrenset (i praksis rundt noen hundre watt for romfartøyene).

Nukleære batterier har typisk høyere spesifikk energi (kJ/kg) men lavere spesifikk effekt (W/kg) enn litiumbatterier. Det betyr at de er dårlig egnet til å levere høy effekt (mye energi på kort tid) men godt egnet til å levere stabil energi over lang tid (Terranova 2022).

I prinsippet kan alle radioaktive materialer brukes som energikilde i et nukleært batteri. I praksis vil valg av radioaktiv kilde være avhengig av formålet, for eksempel varighet/levetid på systemet og om det er krav til energi/vekt-forhold, tilgjengelighet med mer. Tradisjonelle kjernekraftverk produserer radioaktivt avfall og deler av dette kan benyttes som energikilde i nukleære batterier.

Den største utfordringen knyttet til bruk av nukleære batterier er at sterke radioaktive kilder kan bli relativt lett tilgjengelig. Dette legger store begrensninger på hva som kan være aktuelle anvendelser og lokasjoner.

---

<sup>a</sup>I tillegg sendes det også ut nøytrinoer eller antinøytrinoer, men disse er så små og lette at de knapt er detekterbare og gjør ingen skade.

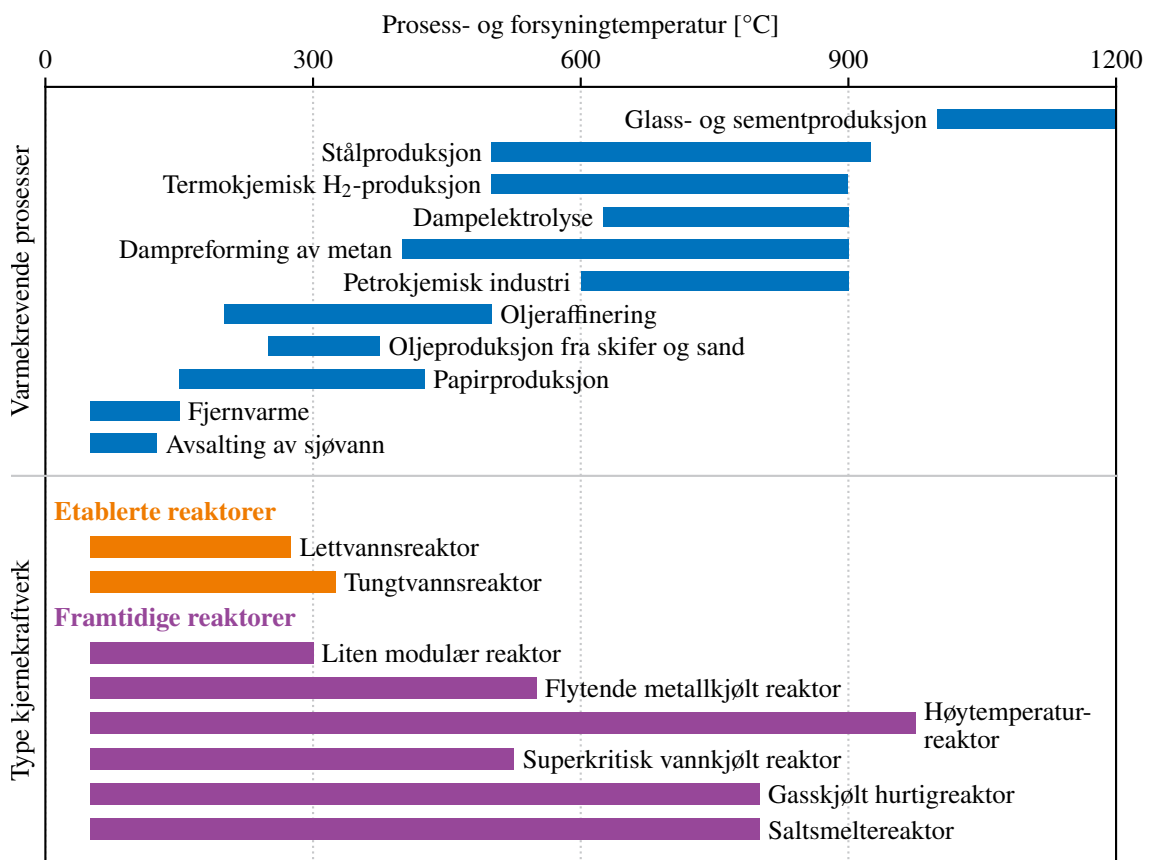
#### 3.4.4 Teknologisk utvikling

Det foregår omfattende teknologisk utvikling innenfor kjernekraft. Nye reaktordesign har typisk ett eller flere av disse målene:

- Økt omsetning av brenselet (øke energimengden man henter ut av brenselet). Dette gjør også avfallet mindre farlig.

- Utnyttelse til flere anvendelser (industrielle prosesser).
- Økt sikkerhet.
- Mindre størrelse.
- Utnytte andre stoffer enn uran.
- Tilrettelegging for serieproduksjon (modularitet).

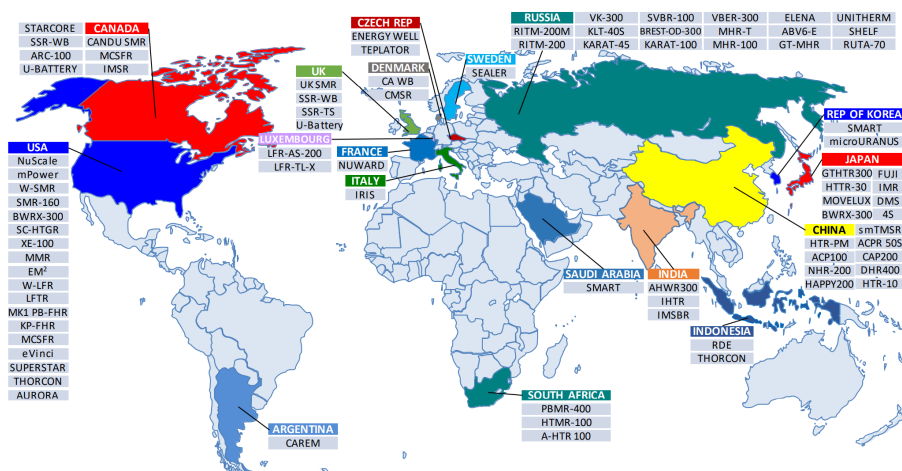
I figur 3.1 vises utvalgte eksisterende og nye reaktortyper med ulike operasjonstemperaturer sammen med en rekke industrielle prosesser med ulike varmebehov. Det finnes mange forskjellige varianter innenfor hver kategori med ulike fordeler og ulemper. I resten av dette delkapittelet fokuserer vi på utviklingen av små reaktorer, ettersom dette har det største potensiale til å bli relevant for forsvarssektoren.



Figur 3.1 Temperaturbehov for et utvalg ulike industrielle prosesser og temperaturleveranse fra noen ulike reaktordesign. Tilpasset fra IAEA (2017).

Reaktorer som er vesentlig mindre enn de som finnes i dagens kjernekraftverk er for så vidt ikke noe nytt. Reaktorer på atomubåter er allerede relativt små. Og siden atomforskningens begynnelse har man brukt små reaktorer i forskningsøyemed (Trakimavičius 2020). Tradisjonelt har ikke disse små reaktorene vært økonomisk lønnsomme og dette har begrenset anvendelsesområdene. Framgang innen materialteknologi og automatisering innenfor produksjon er i ferd med å endre på dette og derfor ser man nå et stort antall mindre reaktorer under utvikling over hele verden, se figur 3.2.

IAEA (2022) beskriver utviklingen av små modulære reaktorer (SMR) etter følgende kategorisering



Figur 3.2 Små reaktorer under utvikling per 2020. Hentet fra IAEA (2020).

basert på reaktorteknologi: Vannkjølte reaktorer, høytemperatur gasskjølte reaktorer, flytende metallkjølte reaktorer og saltmeltereaktorer.

Vannkjølte reaktorer omfatter både lettvanns- og tungtvannsreaktorer, og representerer den mest modne reaktorteknologien. Verdens første SMR som ble tilknyttet elektrisitetsnettet var av denne typen og ble tilknyttet elektrisitetsnettet i Russland i 2020.

Høytemperatur gasskjølte reaktorer opererer ved over 750 °C og er godt egnet for å industriell varme i tillegg til elektrisitet. I 2021 ble en kinesisk SMR av denne typen tilknyttet elektrisitetsnettet. Det er også bygget flere testreaktorer av denne typen som er i operasjon. Det amerikanske forsvarsdepartementet har iverksatt *Project Pele*: et prosjekt som skal bygge en mobil containerbasert mikroreaktor med sikte på anvendelse for det amerikanske forsvaret (U.S. Department of Defense 2022). Reaktoren er en høytemperatur gasskjølt reaktor som skal bruke lavanrikt uran som brensel og vil kunne levere 1–5 MW elektrisk effekt i tre år av gangen, hovedsakelig for operasjonsbaser utenfor strømmettet.

Flytende metallkjølte reaktorer har tidligere vært i bruk i atomubåter. I dag er teknologien kun i bruk i et fåtall russiske kjernekraftverk. En SMR av denne typen er under bygging i Russland i dag. Det jobbes med å utvikle teknologien i flere land, men disse prosjektene er foreløpig i designfasen.

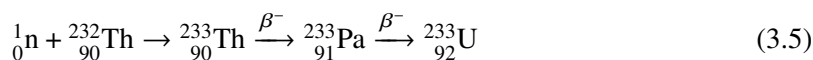
Saltmeltereaktorer den siste teknologien som trekkes fram. I tillegg til å kunne brukes som energikilde på land har teknologien fått oppmerksomhet som mulig kilde for maritim framdrift, både sivilt og militært (Hill, Hodge og Gibbs 2020; Valentine 2021), på grunn av lav kompleksitet og høy grad av innebygd sikkerhet. Kina har bygget en saltmeltereaktor for forskning som nylig har fått operasjonstillatelse (World Nuclear News 2023). I tillegg til uran vil denne reaktoren også bruke thorium som brensel.

Thorium er et grunnstoff som finnes rundt omkring i jordskorpen, akkurat som uran. Naturlige forekomster består nesten utelukkende av isotopen Thorium-232, som er svakt radioaktivt med en halveringstid omtrent lik universets alder (Thorium 2022). I motsetning til uran-235 er ikke thorium-232 *fissilt*, men dersom thorium-232 utsettes for nøytronstråling kan det sette i gang en

---

---

prosess som produserer uran-233 som er fissilt (*Thorium fuel cycle* 2022):



Derfor kalles thorium *fertilt*. Thorium kan altså brukes som brensel for å opprettholde en kjerne-reaksjon, men trenger en «gnist» for å komme i gang i form av nøytronkilde som for eksempel uran-235.

Det forskes på flere konsepter som kan utnytte thorium ettersom det har en rekke fordeler sammenlignet med uran (Touran 2022b):

- Thoriumsyklusen tillater mye mer effektiv utnyttelse av brenselet, som mangedobler den effektive energitettheten til brenselet og reduserer behovet for gruvedrift.
- Det blir ikke produsert radioaktive transuraner (plutonium, americium, curium med flere) som er den største bekymringen når det gjelder avfallshåndtering fra tradisjonelle kjernekraftverk.
- Det finnes ca. tre ganger så mye thorium som uran i jordskorpen.
- Det er vesentlig vanskeligere å lage kjernevåpen basert på stjålet brensel eller avfall.

Samtidig er det også noen ulemper som må adresseres:

- Det er litt vanskeligere å framstille fast brensel med thorium. Dette er imidlertid irrelevant for reaktorer som bruker flytende brensel som en saltsmeltereaktor.
- I en saltsmeltereaktor er fisjonsproduktene oppløst i saltsmelten og beholderen utsettes derfor for stoffer som kan skade materialet.
- Det produseres noen svært radioaktive isotoper som emitterer høyenergetiske gammastråler. Det setter høyere krav til strålingsbeskyttelse.
- Noen reaktordesign krever at du separerer ut  ${}^{233}_{91}\text{Pa}$ , som etter henfall til  ${}^{233}_{92}\text{U}$  mates tilbake til reaktoren. Men  ${}^{233}_{92}\text{U}$  kan brukes til våpenformål, så dersom de som har kontroll over reaktoren har vilje og evne til det kan thorium i en slik reaktor i teorien brukes til kjernevåpenproduksjon. Siden  ${}^{233}_{91}\text{Pa}$  er kortlivet (27 dagers halveringstid) er det til enhver tid lite  ${}^{233}_{91}\text{Pa}/{}^{233}_{92}\text{U}$  utenfor kjernen, så i praksis må våpenproduksjon være ønsket over tid av de som kontrollerer reaktoren.

I tillegg til nye reaktordesign og brenselstoff forskes det også på alternativer til vanlig mineralutvinning. Havet inneholder rundt 1000 ganger mer uran sammenlignet med kjente mineralforekomster (Rao 2010), og det forskes derfor på utvinning fra sjøvann (Yang et al. 2022).

## 3.5 Hydrokarboner del 1: Biodrivstoff

### 3.5.1 Produksjon

Hydrokarboner er kjemiske forbindelser som bare inneholder hydrogen og karbon. Metan ( $\text{CH}_4$ ) er det enkleste hydrokarbonet, og er hovedbestanddelen i naturgass. Råolje inneholder en blanding av hydrokarboner med ulikt antall karbonatomer.

---

---

I dag domineres energi- og transportsektoren av fossile, ikke-fornybare hydrokarboner, men hydrokarboner kan også framstilles av fornybare råvarer, for eksempel biologiske råvarer eller CO<sub>2</sub> fra luften. Hydrokarboner framstilt av biologiske råvarer kalles biodrivstoff, mens hydrokarboner produsert fra CO<sub>2</sub> kalles e-drivstoff eller e-fuel. E-drivstoff vil typisk være et kjemisk rent produkt, mens renheten til biodrivstoff vil avhenge av produksjonsmetoden. E-drivstoff omtales nærmere i delkapittel 3.6.

Biodrivstoff kan produseres av mange ulike råstoff på mange forskjellige måter. De mest brukte prosessene i dag er fermentering av stivelse/sukker til bioetanol og prosessering av planteoljer/avfall til biodiesel. Bioetanol omtales nærmere i delkapittel 3.7.

Den vanligste formen for biodiesel er fettsyremetylester/FAME<sup>15</sup> (NAF 2023). FAME lages av planteoljer eller dyrefett som reagerer med metanol ved hjelp av en katalysator. Som det kjemiske navnet røper er ikke FAME rene hydrokarboner og har dermed ulik kjemisk struktur fra fossil diesel. I vanlig norsk diesel tillates opptil 7 % innblanding av FAME.

Biogass dannes når organisk materiale brytes ned av mikroorganismer i et oksygenfritt miljø. Biogass består hovedsakelig av metan og CO<sub>2</sub>. Etter nedbrytningen sitter man igjen med en restmasse, kalt biorest. Dette er en næringsrik masse som enger seg til plantegjødsel og kan redusere behovet for kunstgjødsel. Ved økt utnyttelse av biogass oppnår man dermed en «dobbel gevinst» hvis biogass erstatter naturgass og bioresten kan erstatte kunstgjødselproduksjon.

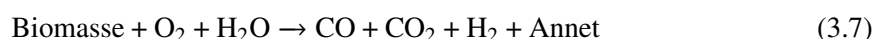
«Syntetisk drivstoff» er en samlebetegnelse på kjemisk framstilte (syntetiske), ikke-fossile drivstoff. Dette kan omfatte både kjemisk framstilt<sup>16</sup> biodrivstoff og e-drivstoff.

Et alternativ til FAME er å prosessere planteoljer/dyrefett med hydrogen til HVO<sup>17</sup>/HEFA<sup>18</sup>. Begrepene HVO og HEFA brukes om hverandre i litteraturen, ofte uavhengig av faktisk råstoff. I denne rapporten bruker vi HVO. Denne hydroprosesseringen produserer hydrokarboner som er kjemisk svært likt som fossil diesel. Dermed kan dieselmotorer i prinsippet gå på 100 % HVO.

Den vanligste formen for fett i dyre- og planteoljer er triglyserider, dvs. estere av glyserol og tre fettsyremolekyler. Hydroprosessering går ut på å behandle triglyserider med hydrogengass for å danne hydrokarboner, se likning (3.6) og figur 3.3:



En annen måte å produsere syntetisk flytende drivstoff på er ved bruk av Fischer-Tropsch-prosessen (FT). «Byggeklussene» i FT-prosessen (og mange andre petrokjemiske prosesser) er hydrogengass (H<sub>2</sub>) og karbonmonoksid (CO). En blanding av disse to gassene kalles syntesegass (eller bare syngas). Prosessen går ut på å gasifisere biomasse til syngas. Denne prosessen har fire steg: tørking, pyrolyse, delvis oksidasjon og gasifisering/reduksjon (Soclema 2023). Hele prosessen kan beskrives med en forenklet reaksjonslikning (Adhikari, Eikeland og Halvorsen 2015; Ayub, Park og Binns 2020):



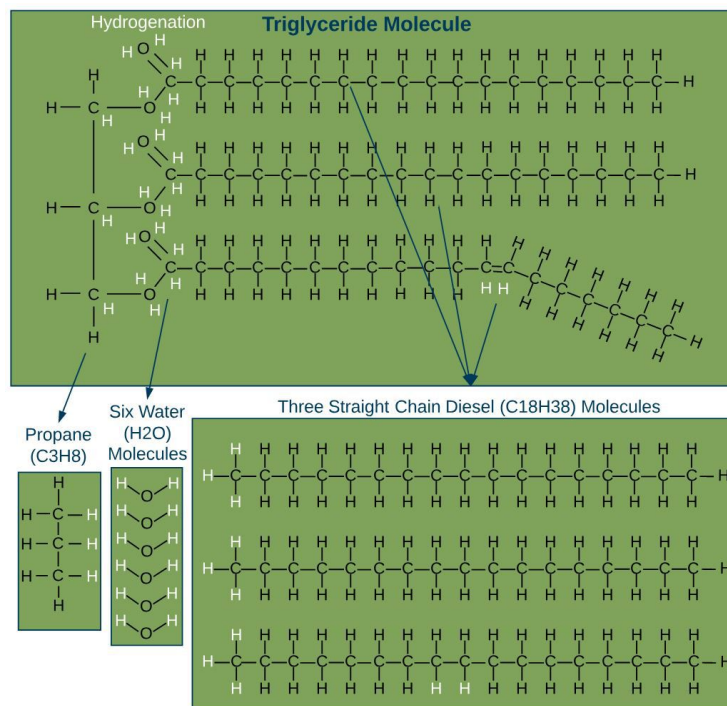
---

<sup>15</sup>FAME: *Fatty acid methyl-ester*.

<sup>16</sup>I motsetning til biodrivstoff framstilt fra biologiske prosesser, som fermentering eller biologisk nedbrytning.

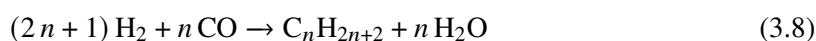
<sup>17</sup>HVO: *Hydrotreated vegetable oil*.

<sup>18</sup>HEFA: *Hydroprocessed esters and fatty acids*.



Figur 3.3 Illustrasjon av hydroprosessering, hvor hydrogen bryter opp triglyserider til propan, vann og rette hydrokarbonkjeder. Hentet fra Ryze (2023).

Deretter brukes dette i en FT-prosess for å produsere ønskede hydrokarboner:



Hvor  $n$  er karbontallet (antallet karbonatomer) i hydrokarbonet. For eksempel har bensin karbontall i området 4–12 og diesel mellom 9 og 23. FT-prosessen vil produsere en blanding av hydrokarboner med ulike karbontall. Reaksjonsforhold som temperatur, trykk og valg av katalysator vil påvirke sammensetningen. De ulike hydrokarbonene kan separeres senere til renere produkter, akkurat som råolje separeres for å lage bensin, diesel, osv. Som med råolje kan eventuelt uønskede lange karbonkjeder viderebehandles ytterligere for å oppnå ønsket sammensetning ved krakking. FT-prosessen er en kjent kjemisk prosess som har vært i bruk i over 100 år og er veletablert i industrien.

I desember 2022 ble gasifisering av avfallsbiomasse i kombinasjon med FT-prosessen brukt i industriell skala for første gang for å produsere syntetisk biodrivstoff (Fulcrum BioEnergy 2022).

---

---

### Boks 3.3 – Hvor bærekraftig er biodrivstoff?

Det er skrevet mye faglitteratur og populærvitenskapelig om hvorvidt biodrivstoff er bærekraftig eller ikke. Det er et komplisert spørsmål, og forutsetningene spiller en avgjørende rolle for svaret.

#### **Bærekraftighet etter råmateriale:**

Dersom råmaterialet til biodrivstoffet har et annet bruksområde, for eksempel i mat- eller såpeproduksjon, kan ikke dette biodrivstoffet kalles bærekraftig, ettersom det vil føre til økt produksjon et annet sted for å kompensere for dette. Det medfører igjen fare for avskoging eller annen degradering av naturlige karbonlagre. For at biodrivstoff skal kunne kalles bærekraftig kan altså ikke råmaterialet ha noen annen anvendelse.

#### **Skalering og bærekraft:**

Det er ikke nok biologisk råmateriale uten andre anvendelser til å erstatte dagens forbruk av fossile drivstoff med biodrivstoff. Med dagens råmaterialer og teknologi er altså ikke biodrivstoff en løsning som lar seg skalere til å løse klimaproblemet på en bærekraftig måte.

### 3.5.2 Lagring

Fossile hydrokarboner lagres og transporteres i dag i store kvanta over hele verden, både som gass (naturgass) og væske (oljeprodukter og flytende naturgass). Oljeprodukter lagres og transporteres under normale trykk- og temperaturforhold. Naturgass fraktes vanligvis enten under trykk i trykktanker (10–100 bar), rørledninger (ca. 200 bar) eller nedkjølt til  $-160^{\circ}\text{C}$  som flytende naturgass (LNG<sup>19</sup>) (Norges vassdrags- og energidirektorat 2004).

Syntetiske hydrokarboner har stort sett minst like gode lagringsegenskaper som fossile hydrokarboner og kan dermed fungere i dagens infrastruktur og systemer.

Noen typer ikke-syntetiske biodrivstoff, som FAME, er ikke like kjemisk rent som de syntetiske eller fossile variantene og har dårligere lagringsegenskaper som setter begrensninger på hvor lenge de kan lagres og hvilke forbrenningsmotorer de fungerer på (European Defence Agency 2017).

### 3.5.3 Anvendelser

Anvendelsesområdet til ikke-fossile hydrokarboner er som erstatning for fossile hydrokarboner i forbrenningsmotorer.

---

<sup>19</sup>LNG: *Liquefied natural gas.*



---

---

### 3.5.4 Teknologisk utvikling

Den overordnede utfordringen til biodrivstoff med dagens råvarer og teknologi kan beskrives som et trilemma mellom bærekraft, volum/skala og produksjonskostnad, hvor ingen av dagens produkter scorer tilfredsstillende på alle tre samtidig. Forskning, utvikling og innovasjon innen biodrivstoff forsøker derfor å forbedre dette gjennom finne eller utvikle 1) nye bærekraftige kilder til biomasse, 2) nye metoder for (pre)prosessering for å kunne utnytte eksisterende, men utnyttede kilder til biomasse, og 3) redusere kostnader og/eller øke skala og effektivitet i produksjonen (Brown et al. 2020; Joint Research Center 2019).

Økonomisk teori tilsier at større skala på produksjonen gir lavere pris. Men siden bærekraftige råmaterialer foreløpig er et knapphetsgode er det ingen automatikk i at større skala gir lavere priser. Etterhvert som bærekraftskriterier har blitt bedre på å skille faktisk bærekraftige fra ikke-bærekraftige biodrivstoff har etterspørselen etter bærekraftig biodrivstoff økt og presset prisene opp (Bøeng 2022).

Som nevnt i boks 3.3 kan ikke råmaterialene ha andre anvendelsesområder dersom de skal kalles bærekraftige. Avfall som ellers går til forbrenning eller deponering er derfor som regel bærekraftig. Dette utnyttes i dag til produksjon av biodrivstoff, men i liten skala globalt. For å øke utnyttelsen av avfallstrømmer drives det forskning, testing og utvikling av metoder for preprosessering av biomasse slik at syngasproduksjonen blir praktisk og økonomisk gunstig (Joint Research Center 2019).

Akvatisk dyrking av biomasse ved bruk av mikroalger er en mulighet det forskes mye på, ettersom dette potensielt kan være en bærekraftig kilde til biomasse. Men foreløpig er det energi- og kostnadskrevende å skille ut den anvendbare biomassen fra vann og andre ikke-anvendbare substanser (Olabi et al. 2022).

I tillegg pekes det på endrede praksiser i landbruket som kan virke sammen med teknologisk utvikling for å skaffe nye, bærekraftige kilder til biomasse, for eksempel ved bruk av oljeproduserende dekkvekster (Fairley 2022).

## 3.6 Hydrokarboner del 2: E-drivstoff

### 3.6.1 Produksjon

E-drivstoff er syntetisk drivstoff hvor hydrokarbonene er produsert fra fanget eller oppsamlet CO<sub>2</sub> og grønn eller lilla hydrogen.<sup>20</sup> I desember 2022 produserte Haru Oni-fabrikken i Chile sine første liter med fossilfri flytende e-drivstoff som første fullskala anlegg i verden (Siemens Energy 2022).

Produksjonen av e-drivstoff baseres på FT-prosessen beskrevet i avsnitt 3.5.1. Første steg er igjen å produsere syngas (H<sub>2</sub> og CO). Hydrogenproduksjon er allerede beskrevet i avsnitt 3.2.1. I tillegg trengs en ikke-fossil karbonkilde. For e-drivstoff kan det være CO<sub>2</sub> som er fanget fra lufta, gjennom såkalt *direct air capture* (DAC), eller oppsamlede industrielle CO<sub>2</sub>-utslipp. CO<sub>2</sub> omdannes til CO gjennom en reversert vann-gass-skiftreaksjon:



<sup>20</sup>Se avsnitt 3.2.1 for definisjon av grønn og lilla hydrogen.

---

---

Denne reaksjonen krever høy temperatur og en katalysator som favoriserer denne reaksjonen framfor metanproduksjon, se likning (3.10) (Zhang et al. 2022).

Fra fanget eller oppsamlet CO<sub>2</sub> kan e-metan dannes ved bruk av Sabatier-prosessen. Her produseres syntetisk metan ved hjelp av trykk, temperatur og katalysator:



Denne prosessen har vært i bruk i flere tiår, men typisk med kull som karbonkilde.

En annen metode å produsere e-drivstoff på er ved bruk av mikroorganismer som konverterer CO/CO<sub>2</sub> til etanol i en gassfermenteringsprosess. Etanol omdannes til ønsket drivstoffsammensetning gjennom en serie kjemiske prosesser som ofte omtales som *alcohol-to-jet* (ATJ). Utviklingen har skutt fart de siste årene grunnet framskritt innen syntetisk biologi og er allerede etablert kommersielt (Köpke og Simpson 2020).

Det finnes allerede 18 operasjonelle anlegg for direkte CO<sub>2</sub>-fangst fra luften i verden i dag, men disse opererer på liten skala og fanger til sammen bare 10 000 tonn CO<sub>2</sub> årlig (Budinis 2022). Det tilsvarer det årlige utslippet fra ca. 2 000 personbiler (EPA 2022b). Men kun 2 av de 18 anleggene lagrer CO<sub>2</sub>-en de fanger. De resterende fanger CO<sub>2</sub> til industriell bruk, for eksempel til bruk i kullsyreholdig drikke (Budinis 2022). To ulike teknologier brukes for å fange CO<sub>2</sub> fra luften. Den ene er basert på faststoff-absorbant (såkalt S-DAC<sup>21</sup>) som opererer under lavt trykk og temperaturer mellom 80 og 120 °C. Den andre er basert på en flytende absorbant (såkalt L-DAC<sup>22</sup>). For at denne løsningen skal friggi CO<sub>2</sub> slik at den kan utnyttes eller lagres kreves det høyere temperaturer (mellom 300 og 900 °C). Selv om L-DAC krever høyere temperatur er det totale energibehovet lavere enn for S-DAC, med 6,5 GJ/tCO<sub>2</sub> mot 10 GJ/tCO<sub>2</sub>.

---

<sup>21</sup>S-DAC: *Solid direct air capture*.

<sup>22</sup>L-DAC: *Liquid direct air capture*.

---

---

### Boks 3.4 – Hvor bærekraftig er e-drivstoff?

Det er mye diskutert hvorvidt e-drivstoff er bærekraftig eller ikke. Også dette er et spørsmål hvor forutsetningene spiller en avgjørende rolle for svaret.

#### **Bærekraftighet etter råmateriale:**

Råmaterialet til e-drivstoff kan enten være ferdig konsentrert CO<sub>2</sub>, for eksempel fra en fabrikk, eller det kan hentes ut fra luften, såkalt *direct air capture* (DAC). E-drivstoff basert på DAC kan telles som nullutslipp siden mengden karbon som tilføres atmosfæren ved forbrenning er lik mengden som fjernes for å lage drivstoffet. E-drivstoff basert på ikke-biologiske industriutslipp medfører at CO<sub>2</sub>-en gjenbrukes, men medfører ikke netto nullutslipp, siden CO<sub>2</sub> fortsatt tilføres atmosfæren til slutt uten at det fjernes noe derfra.

#### **Bærekraftighet etter energisystem:**

Dagens energisystem er dominert av fossil energi. Å bruke elektrisk energi på å framstille e-drivstoff er ineffektivt og vil i praksis i dagens situasjon øke totale utslipp.<sup>4</sup> Derfor er ikke e-drivstoff bærekraftig i dagens energisystem. I en framtid uten fossil energi vil derimot e-drivstoff basert på DAC kunne medføre netto nullutslipp og være bærekraftig i et klimaperspektiv.

#### **Skalering og bærekraft:**

Produksjon av e-drivstoff med DAC er svært energikrevende (The Royal Society 2019). Å erstatte dagens forbruk av fossile drivstoff med e-drivstoff vil derfor mangedoble klodens energibehov. Selv i en framtid uten fossile energikilder i energisystemet vil det være et spørsmål hvor mye energi som kan produseres bærekraftig, da all energiproduksjon medfører miljø- og naturpåvirkninger.

<sup>4</sup>Et unntak fra dette vil være i en region med overskudd av fossilfri kraft som ikke blir eksportert. Men i slike tilfeller ville det vært mer klimavennlig å bygge kabler som kan eksportere den fossilfrie kraften til områder hvor fossil kraftproduksjon kan erstattes.

### 3.6.2 Lagring

E-drivstoff kan lagres og transporteres på samme måte som fossilt drivstoff og biodrivstoff. Se avsnitt 3.5.2.

### 3.6.3 Anvendelser

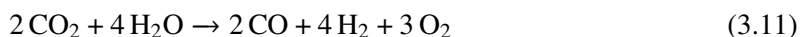
I likhet med biodrivstoff er det aktuelle anvendelsesområdet til e-drivstoff å erstatte fossile drivstoff til forbrenningsmotorer.

---

---

### 3.6.4 Teknologisk utvikling

En alternativ måte å produsere ikke-fossil syngas på, som eliminerer behovet for både den reverserte vann-gass-skiftreaksjonen og elektrolyse av hydrogen, er å bruke konsentrert sollys som en varmekilde til å drive termokjemisk splitting av CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O (Haeussler et al. 2020; Schäppi et al. 2022):



Det første industrielle anlegget som skal produsere drivstoff med denne metoden er nå under bygging (Synhelion 2022).

En alternativ produksjonsvei ved bruk av mikrober er gassfermentering av CO<sub>2</sub> til aceton, som i likhet med etanol kan brukes som råstoff til videre prosessering til drivstoff. Det skal bygges et demonstrasjonsanlegg for acetonproduksjon ved Herøya Industripark basert på lokalt industrielt fanget CO<sub>2</sub> (Wentzel 2023).

Det forskes både på nye faststoffabsorbanter og væsker som kan forbedre energieffektiviteten til henholdsvis S-DAC og L-DAC. I tillegg forskes det på andre måter å fange CO<sub>2</sub> fra lufta som enda er på laboratoriestadiet, som elektrosvingabsorpsjon (ESA<sup>23</sup>) og membranbasert DAC (m-DAC). ESA bruker elektrokjemiske celler hvor en faststoffelektrode absorberer CO<sub>2</sub> når den er negativt ladd, for å så friggi CO<sub>2</sub> når den blir positivt ladd (Budinis 2022). m-DAC er et lovende konsept men det gjenstår enda å utvikle membraner som effektivt separerer ut CO<sub>2</sub> uten å kreve for mye energi (Fujikawa og Selyanchyn 2022).

## 3.7 Alkohol

### 3.7.1 Produksjon

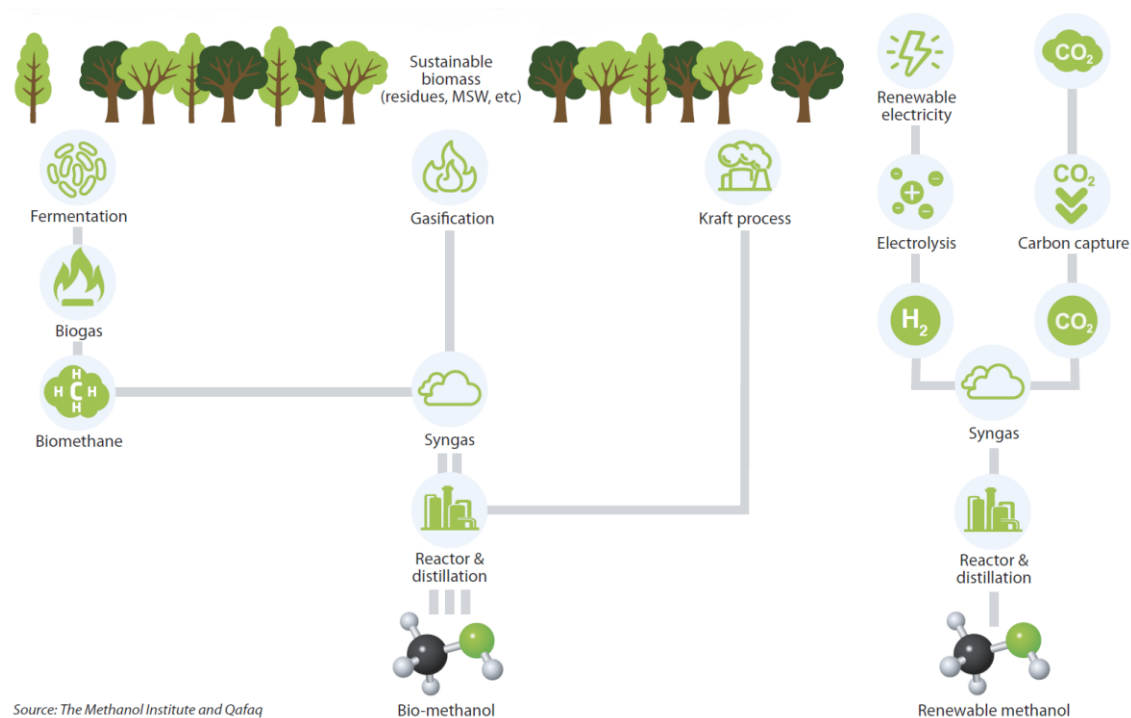
Alkoholer er organiske kjemiske forbindelser som ligner på hydrokarboner, men hvor ett eller flere av hydrogenatomene er byttet ut med én eller flere OH-grupper. Det enkleste alkoholet er metanol, CH<sub>3</sub>OH, også kjent i dagligtale som tresprit. Det som i dagligtale omtales som alkohol har det kjemiske navnet etanol, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH.

Som med hydrokarboner kan alkoholer produseres både fra fossile kilder, biologiske kilder og fra oppsamlet CO/CO<sub>2</sub>. Tidligere ble metanol produsert ved tørrdestillasjon av trevirke, men dagens produksjon domineres av produksjon fra naturgass (grå metanol). Etanol kan framstilles biologisk ved gjæring av sukker/stivelse eller industrielt ved å la vann reagere med eten (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Både metanol og etanol kan blandes i bensin, og kan benyttes som rent drivstoff dersom motoren er tilpasset for dette (Grahl-Nielsen 2017a,b).

På grunn av høy tilgjengelighet på bioetanol i enkelte land brukes dette i stor skala, for eksempel i Brasil hvor rundt halvparten av alt drivstoff til bilparken er bioetanol (Grahl-Nielsen 2017b). Mye av dagens bioetanol har de samme utfordringene knyttet til bærekraft som øvrig konvensjonelt biodrivstoff, men det vil avhenge av råstoff, produksjonsmetode og lokale forhold (Sandquist 2017).

---

<sup>23</sup>ESA: *Electro-swing absorption*.



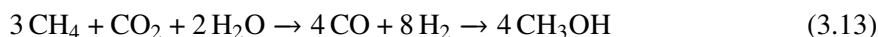
Figur 3.4 Produksjon av biometanol og e-metanol. Hentet fra Klein (2020).

Særlig innen skipsfart har det i nyere tid vært en økende interesse for metanol som alternativt drivstoff (Stensvold 2023). For enkelhets skyld omhandler det som følger i denne rapporten primært metanol, men mange av de samme forholdene vil også gjelde for øvrige alkoholer.

For å lage e-metanol produseres først syngas på samme måte som for øvrige e-drivstoff omtalt i avsnitt 3.6.1. Fra syngas produseres metanol direkte ved bruk av en katalysator:



Biometanol kan produseres på flere måter. Biometanol kan utvinnes som et biprodukt av produksjon av papirmasse ved bruk av kraftprosessen (også kalt sulfatprosessen). Biomasse kan også gassifiseres til syngas som beskrevet i avsnitt 3.6.1 og deretter syntetiseres til biometanol ved samme prosess som for e-metanol gitt i likning (3.12). I tillegg kan biomasse fermenteres til biogass, som beskrevet i avsnitt 3.5.1. Biogassen kan så brukes til å produsere metanol ved å først omdannes til syngas ved dampreformering (IEA Bioenergy 2020; Zhao et al. 2020):



Metanet i biogassen kan også brukes til å produsere metanol direkte ved kjemisk oksidering (ETIP Bioenergy 2023):



### 3.7.2 Lagring

Metanol, og de fleste andre enkle alkoholer, er en klar væske ved romtemperatur og atmosfærisk trykk (Klein 2020). Det er dermed forholdsvis enkelt å lagre og transportere.

---

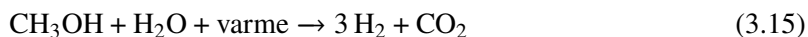
---

### 3.7.3 Anvendelser

Metanol er en allsidig innsatsfaktor i kjemisk industri og er ett av verdens mest omsatte kjemiske produkter (Klein 2020). Mange års erfaring med håndtering, lagring og transport av metanol er et av aspektene som gjør metanol til et attraktivt alternativt drivstoff. En annen fordel er at det brenner rent med lite partikkelutslipp.

I tillegg til å kunne brukes som innblanding i vanlig drivstoff, kan metanol brukes som rent drivstoff både i tilpassede forbrenningsmotorer og i brenselceller.

Metanol kan også brukes som en hydrogenbærer. Dette kan være en svært energieffektiv måte å lagre hydrogen hvor man slipper å måtte kjøle ned eller komprimere hydrogenet. Hydrogenet hentes ut ved reformering av metanol og vann med tilført varme (Edlund 2021):



Denne metanolreformingen krever mindre enn 0,04 kWh elektrisk energi og 7,5 kWh termisk energi per kg hydrogen produsert, mot 50–55 kWh per kg hydrogen produsert direkte ved elektrolyse. Med dagens teknologi kan produksjon av H<sub>2</sub> ved denne metoden oppnå 84 % energieffektivitet.

### 3.7.4 Teknologisk utvikling

Bio- og e-metanol utgjør en svært liten del av dagens metanolproduksjon, hovedsakelig på grunn av kostnader (IRENA and Methanol Institute 2021). Billig tilgang på grå metanol resulterer i få insentiver for oppskalering av bio- og e-metanolproduksjon. For e-metanol er fokuset på å få ned kostnader gjennom større skala på produksjon, læringseffekter og optimalisering i produksjonslinjen. Dette gjelder også for biometanol, men her er i tillegg bærekraftige råmaterialer et viktig utviklingsfelt, som for øvrige biodrivstoff diskutert i avsnitt 3.5.4. I tillegg forskes det på nye produksjonsmetoder, for eksempel bruk av bakterier til å omgjøre biogass/-metan til biometanol (Sahoo, Goswami og Das 2021).

---

---

## 4 Sammenligning av teknologier

Alle energibærerne presentert i kapittel 3 har ulike egenskaper og de egner seg ikke nødvendigvis til samme bruksområde. I dette kapitlet settes en rekke av energibærernes egenskaper opp mot hverandre med sikte på å kunne identifisere fordeler og ulemper med hver teknologi. Disse fordelene og ulempene vil være avgjørende når mulige teknologisatsninger for Forsvaret skal vurderes.

### 4.1 Energiinnhold

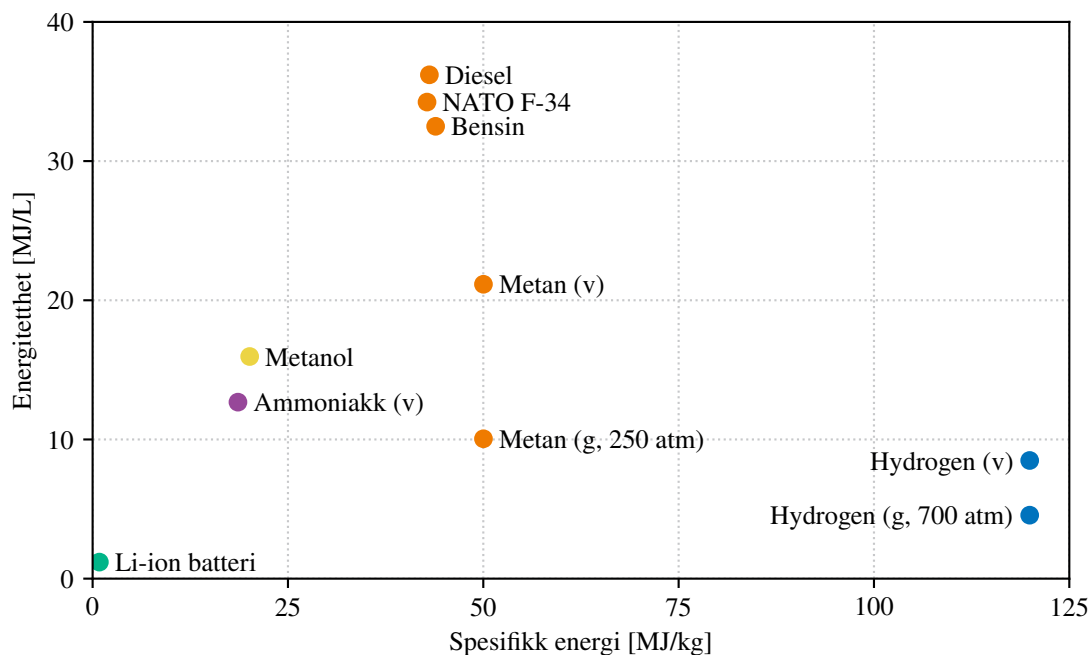
En energibærer må, som ordet i seg selv antyder, ha en evne til å bære energi. Det er fordelaktig å kunne bære mest mulig energi med lavest mulig vekt og/eller minst mulig volum. Denne evnen karakteriseres av to parametere: spesifikk energi og energitetthet. Spesifikk energi er definert som energiinnhold per masseenhed og angis typisk i Joule per kilogram (J/kg). Energitetthet er definert som energiinnhold per volumenhet og angis typisk i Joule per kubikkmeter ( $J/m^3$ ) eller Joule per liter (J/L).

Energiinnhold kan ha flere betydninger, fordi energi finnes i svært mange ulike former. For betraktningene som følger i dette delkapitlet refererer energiinnhold til den mengden energi som kan utnyttes. For et batteri vil energiinnholdet være mengden elektrisk energi som er lagret i batteriet. For en kjemisk forbindelse vil derimot energiinnholdet være mengden termisk energi som frigis ved fullstendig forbrenning av stoffet. Denne forbrenningsenergien omtales i litteraturen som brennverdi, og det skilles mellom øvre og nedre brennverdi. Øvre brennverdi angir den totale termiske energien som frigis ved forbrenning, inklusive den energien som er bundet opp i vanndamp produsert under forbrenningsprosessen. Nedre brennverdi tilsvarer øvre brennverdi fratrukket energien bundet i den produserte dampen (Hofstad 2022a). For den typen anvendelser som diskuteres i denne rapporten vil ikke energien i vanndampen kunne nyttiggjøres. Energien går tapt sammen med avgassene fra forbrenningen. Av den grunn blir kun nedre brennverdi ansett som relevant. Alle verdier for energiinnhold i kjemiske forbindelser som oppgis i følgende sammenligninger viser til nedre brennverdi.

Spesifikk energi og energitetthet for et utvalg energibærere er presentert i figur 4.1.<sup>24</sup> Elektrisitet, her representert i form av et litiumbatteri, er den energibæreren som kommer dårligst ut både på spesifikk energi og energitetthet. Blant utvalget er hydrogen den energibæreren med klart høyest spesifikk energi. Allikevel, grunnet veldig lav massetetthet, krever hydrogen et relativt stort volum for å bære samme mengde energi som flere av de andre energibærerne. Hydrogen har lav energitetthet både som komprimert gass og som nedkjølt væske. Ammoniakk har høyere energitetthet enn hydrogen, men nitrogenet som legges til den kjemiske forbindelse medfører en betydelig vektøkning og ammoniakk har derfor lav spesifikk energi. Metanol har lignende evne til å bære energi som ammoniakk, med litt høyere energitetthet. De ulike hydrokarbonene befinner seg i mellomstikket på spesifikk energi, men kommer klart best ut når det kommer til energitetthet. Det enkleste hydrokarbonet, metan, er det mest plasskrevende, mens den langt mer komplekse sammensetningen til diesel er minst

---

<sup>24</sup>Data sammenstilt fra Aziz, Wijayanta og Nandiyanto (2020), Buchmann (2021), CGSB (2020), Elberry et al. (2021), Hofstad (2022b), Lanz, Heffel og Messer (2001), NCBI (2022), SGS (2020), Shell (2022) og Unitrove (2022).



Figur 4.1 Spesifikk energi og energitetthet for ulike energibærere. NATO F-34 er det primære drivstoffet til Forsvaret i dag. (g) indikerer komprimert gass ved romtemperatur. (v) indikerer nedkjølt væske under atmosfærisk trykk. Kilde: Se fotnote 24.

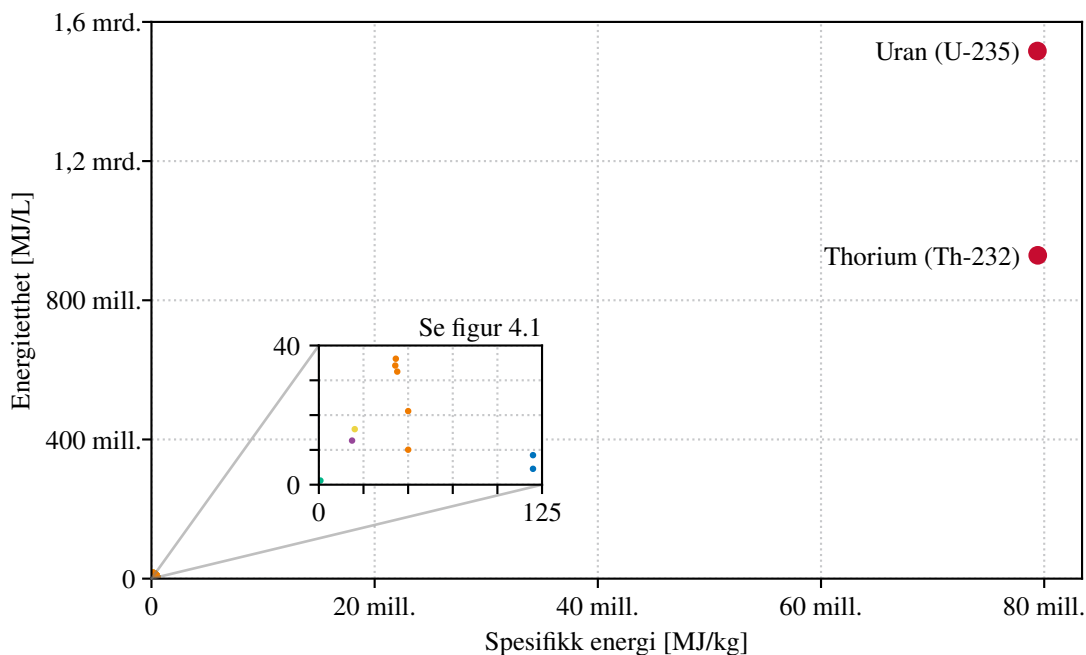
plasskrevende. Denne sammenligningen viser én av årsakene til at fossile drivstoff dominerer transportsektoren i dag. Diesel og bensin har høy energitetthet og en stor mengde energi kan av den grunn lagres i en relativt liten drivstofftank. Det primære drivstoffet til Forsvaret er et flydrivstoff betegnet med NATO-kode F-34. F-34 har relativt lik sammensetning som det mest brukte drivstoffet i luftfartsindustrien, Jet A-1, men det inneholder i tillegg komponenter for ekstra beskyttelse mot korrosjon og ising (Shell 2022). Energitettheten til F-34 ligger mellom bensin og diesel.

Når det kommer til energiinnhold er det én teknologi som utklasser alle andre, nemlig kjernekraft. Den enorme forskjellen i mengden energi som kan hentes ut fra uran og thorium kontra mer konvensjonelle energibærere er illustrert i figur 4.2.<sup>25</sup> Eksempelvis er energitettheten til ren U-235 over 40 millioner ganger høyere enn energitettheten til diesel. Som beskrevet i avsnitt 3.4.1 har drivstoff til kjernekraftverk en typisk anrikingsgrad på 3–5 %. Denne typen drivstoff har derfor en betydelig lavere energitetthet enn ren U-235, men sammenlignet med andre drivstoff er energitettheten fortsatt ekstremt høy. I praksis betyr den høye energitettheten at et kjernekraftdrevet fartøy kan operere i årevis uten å etterfylle drivstoff. Generelt gir høyere anrikingsgrad høyere utholdenhet. Eksempelvis benytter Frankrikes ubåter lavanriket uran (5–7 %) og bytter brensel hvert 7–10 år. USA bruker våpengrad anriking (over 90 %) i sine maritime reaktorer, og eksempelvis Los Angeles-klasse ubåter kan operere i 33 år uten etterfylling av drivstoff (WNA 2021).

Spesifikk energi og energitetthet er to svært betydningsfulle faktorer ved vurdering av ytelsen til en energibærer. Vekt kan påvirke om et drivstoff er egnet til bruk eller ikke, spesielt innen luft- og

<sup>25</sup>Data sammenstilt fra *Thorium* (2022), *Touran* (2022a) og *Uranium* (2022).





Figur 4.2 Spesifikk energi og energitetthet for uran og thorium. Illustrasjon av den enorme forskjellen mellom kjernekraft og energibærerne i figur 4.1. Kilde: Se fotnote 25.

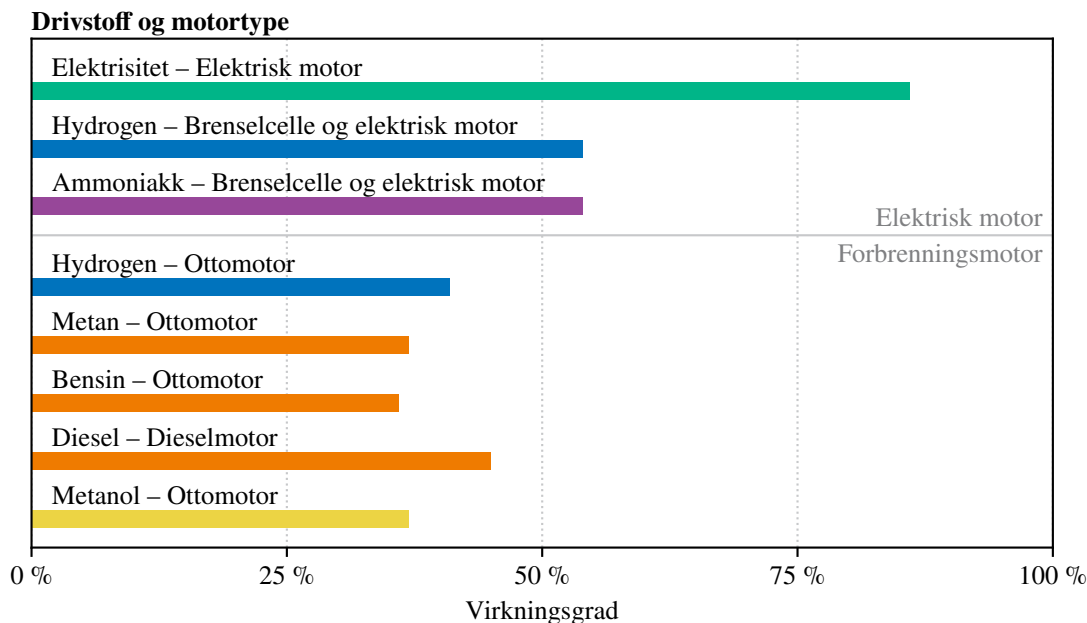
sjøtransport. Volum er viktig innenfor alle typer transport, men spesielt kritisk for drivstoff til små, mobile enheter. I tillegg har volum en stor innvirkning på kostnader knyttet til stasjonær lagring. Jo lavere energitetthet en energibærer har, jo mer ressurskrevende er det å lagre og transportere energibæreren. Når det er sagt, er det viktig å ikke glemme at det er andre faktorer enn energiinnhold som også spiller inn i den totale vurderingen. Eksempelvis kan man peke på den voldsomme utviklingen i bruken av elbiler i Norge. Som demonstrert i figur 4.1 kommer elektriske batterier svært dårlig ut både på spesifikk energi og på energitetthet. Allikevel har elbilen nå over lengre tid vært det mest gunstige alternativet for mange. Dette er mye grunnet reduserte kostnader knyttet til transport, men elbilen skiller seg også positivt ut på andre områder, deriblant energieffektivitet.

## 4.2 Energieffektivitet

Det hjelper lite å benytte en energibærer med et høyt energiinnhold dersom energien ikke kan utnyttes på en effektiv måte. Energieffektivitet sier noe om i hvor stor grad en prosess klarer å nyttiggjøre seg av energien som tilføres prosessen. I dette delkapittelet vurderes det hvor effektivt ulike energibærere kan utnyttes som drivstoff til kjøretøy. Først analyseres energieffektiviteten til to delprosesser: forbrenning av drivstoff og produksjon av drivstoff. Deretter slås de to delprosessene sammen for å se på total energieffektivitet fra produksjon til forbrenning.

I figur 4.3 presenteres virkningsgraden ved forbrenning av en rekke drivstoff i ulike motortyper.<sup>26</sup>

<sup>26</sup>Data sammenstilt fra Breuer et al. (2022), Cai og Rozario (2022), Handwerker, Wellnitz og Marzbani (2021) og Hänggi et al. (2019).

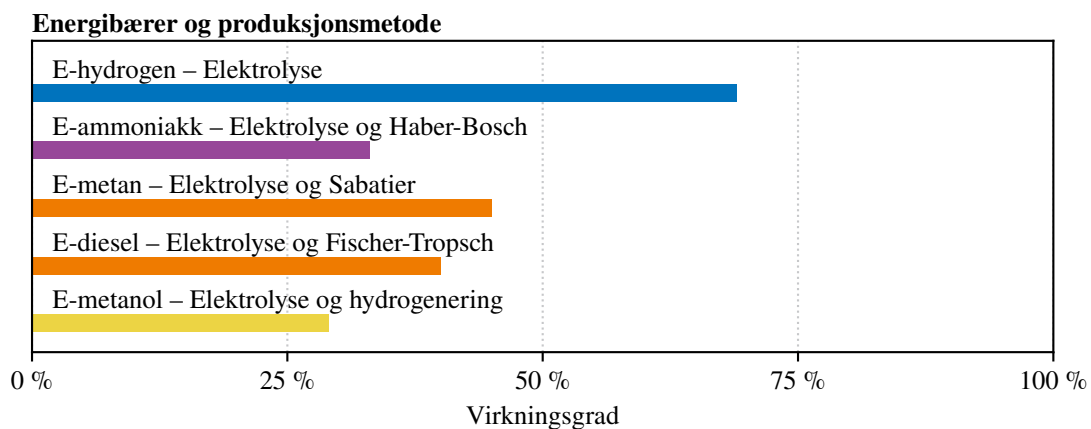


Figur 4.3 Virkningsgrad for ulike kjøretøykonfigurasjoner. Her i form av «Tank-to-Wheel»-virkningsgrad. Prosentverdien angir forholdet mellom mengden energi avgitt fra hjulene til et kjøretøy og mengden energi i det forbrente drivstoffet. Kilde: Se fotnote 26.

Virkningsgrad refererer her til forholdet mellom mengden energi avgitt fra hjulene til et kjøretøy og energiinnholdet til den mengden drivstoff som forbrennes. I litteraturen omtales dette som «Tank-to-Wheel»-virkningsgrad, forkortet TtW (Breuer et al. 2022). Det bør presiseres at virkningsgraden til en motor er sterkt avhengig av driftsforholdene. En motor kan ha betydelig dårligere evne til å transformere energi når motoren opererer ved ikke-optimal last. Prosentverdiene som er gitt i figur 4.3 tilsvarer virkningsgrad i det øvre sjiktet, når motoren opererer under optimale driftsforhold. Det minst energieffektive alternativet er den typen motor som brukes i bensindrevne biler, kalt ottomotor. Med bensin eller metangass klarer en slik motor å omsette opptil 37 % av den kjemiske energien til bevegelsesenergi (Breuer et al. 2022). Metanol presterer på lik linje med metan (Hänggi et al. 2019), om ikke bedre. Enkelte studier hevder at metanoldrevne motorer har betydelig bedre virkningsgrad enn bensinmotorer grunnet de gunstige forbrenningsegenskapene til metanol (SGS 2020). Videre kan ottomotorer som er modifisert til å gå på hydrogen oppnå en relativt høy virkningsgrad på 41 % (Handwerker, Wellnitz og Marzbani 2021). Modifikasjoner kan også gjøres for å drifte ottomotorer med ammoniakk. Denne teknologien har lav modenhet og er fortsatt i utviklingsfasen. Blant annet er det tekniske utfordringer knyttet til at ammoniakk har lav forbrenningshastighet. På nåværende stadium blandes det inn andre stoffer, for eksempel ekstra hydrogen, for å gi ammoniakkbasert drivstoff mer gunstige egenskaper (Tornatore et al. 2022). Av den grunn er det ikke oppgitt noen prosentverdi for direkte forbrenning av ren ammoniakk i figur 4.3. Blant utvalget av forbrenningsmotorer presentert her er dieselmotoren den med høyest virkningsgrad, opptil 45 %.

Elektrisitet er en form for energi som er betydelig lettere å transformere til bevegelsesenergi

sammenlignet med kjemisk energi. Derfor kommer alternativer som benytter en elektrisk motor bedre ut på energieffektivitet enn forbrenningsmotorer. Ved bruk av batterilagring og en elektrisk motor kan opptil 86 % av den elektrokjemiske energien lagret i batteriet bli omgjort til bevegelsesenergi (Handwerker, Wellnitz og Marzbani 2021). Brenselceller er ikke like energieffektive som batterier. Typisk vil 5 % av energien gå tapt når energi hentes ut fra et batteri, mens rundt 40 % av energien går tapt i de mest effektive brenselcellene. For et hydrogendrevet kjøretøy resulterer dette i en TtW-virkningsgrad på 54 %. Ammoniakkdrevne brenselceller av typen SOFC<sup>27</sup> kan oppnå like høy virkningsgrad som hydrogendrevne brenselceller av typen PEMFC<sup>28</sup> (HFTO 2015). Av den grunn kan ammoniakk og hydrogen være to like energieffektive drivstoffalternativer. Det bør her nevnes at ammoniakkdrevne brenselceller har lavere teknologisk modenhet og betydelig høyere operasjonstemperatur sammenlignet med hydrogendrevne brenselceller, og at disse brenselcellene derfor er mer utfordrende å benytte i kjøretøy.



Figur 4.4 Virkningsgrad for elektrisitetsbasert produksjon av ulike energibærere. Her i form av «Power-to-X»-virkningsgrad. Prosentverdien angir forholdet mellom energiinnholdet til sluttproduktet og mengden elektrisk energi produksjonen krever. Kilde: Se fotnote 29.

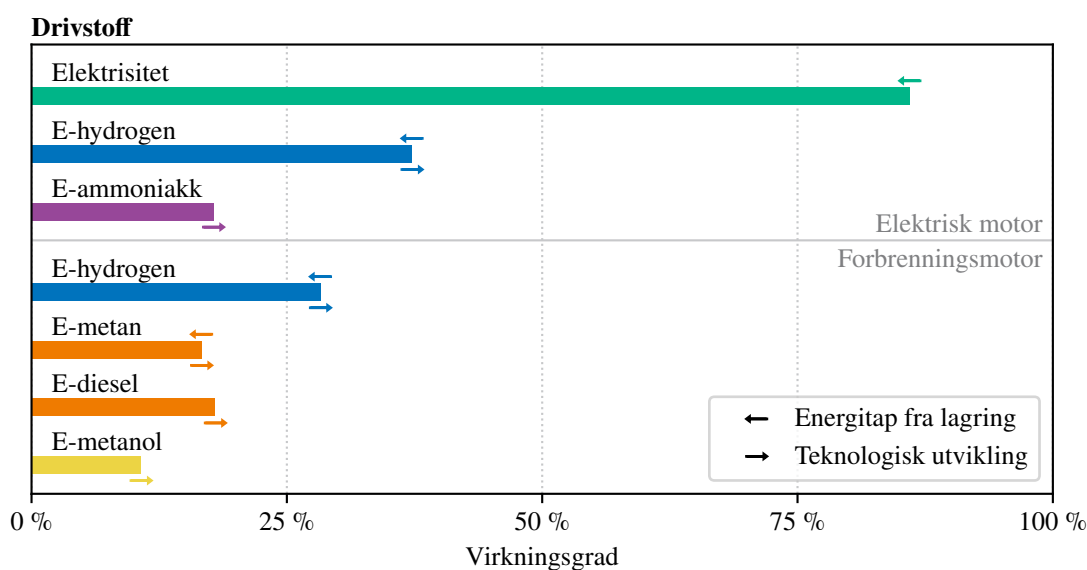
På grunn av dens fleksibilitet og evne til effektiv utnyttelse blir elektrisitet en stadig mer dominerende energibærer i mange sektorer. Det at samfunnet elektrifiseres kan bidra til at e-drivstoff vil spille en viktig rolle i fremtiden. For å vurdere framtidens energibærere bør man derfor se på hvor effektivt elektrisitet kan omsettes til de aktuelle energibærerne. Virkningsgraden for elektrisitetsbasert produksjon av ulike energibærere er illustrert i figur 4.4.<sup>29</sup> Prosentverdiene gitt i figuren representerer forholdet mellom mengden elektrisk energi som går med i produksjonen og det kjemiske energiinnholdet til sluttproduktet, såkalt «Power-to-X»-virkningsgrad (forkortet PtX). Elektrolyse av vann er første steg i produksjonen for samtlige av energibærerne, fordi de alle er avhengige av hydrogen. Elektrolyseteknologien blir stadig mer energieffektiv og Kakoulaki et al. (2021) hevder at elektrolyse vil ha en PtX-virkningsgrad på 69 % innen 2030. For produksjon av elektrisitetsbasert ammoniakk må hydrogenet kombineres med nitrogen gjennom den energikrevende

<sup>27</sup>SOFC: Solid oxide fuel cell.

<sup>28</sup>PEMFC: Proton-exchange membrane fuel cell.

<sup>29</sup>Data sammenstilt fra Adolf et al. (2018), Aziz, Wijayanta og Nandiyanto (2020), Bargiacchi, Antonelli og Desideri (2019), Kakoulaki et al. (2021) og Lanz, Heffel og Messer (2001).

Haber-Bosch-prosessen, beskrevet i avsnitt 3.3.1. Det totale elektrisitetsforbruket resulterer i en virkningsgrad på 33 % for e-ammoniakk (Bargiacchi, Antonelli og Desideri 2019). Videre er det gitt tall for tre karbonholdige alternativer: e-metan, e-diesel og e-metanol. E-metan kan produseres ved å kombinere hydrogen med karbon gjennom Sabatier-prosessen, beskrevet i avsnitt 3.6.1. Sabatier-prosessen er mindre energikrevende enn Haber-Bosch og PtX-virkningsgraden for e-metan er derfor noe høyere, på 45 %. Jo lengre hydrokarbonkjeder som produseres, jo mer energikrevende er det. E-diesel krever derfor mer elektrisk energi enn e-metan. E-diesel produksjon ved bruk av Fischer-Tropsch-prosessen, beskrevet i avsnitt 3.5.1, har en PtX-virkningsgrad på 40 % (Adolf et al. 2018). For elektrisitetsbasert produksjon er metanol det alternativet med lavest virkningsgrad. Metanol produsert ved hydrogenering av CO<sub>2</sub>, beskrevet i avsnitt 3.7.1, har en PtX-virkningsgrad på 29 % (Bargiacchi, Antonelli og Desideri 2019).



Figur 4.5 Samlet virkningsgrad for ulike elektrisitetsbaserte drivstoff. En illustrasjon av «Power-to-X-to-Wheel»-virkningsgrad. Prosentverdien angir forholdet mellom mengden energi avgitt fra hjulene til et kjøretøy og mengden elektrisk energi som har gått med i drivstoffproduksjonen. Motortype er angitt i figur 4.3 og produksjonsmetode er angitt i figur 4.4. Venstrepil indikerer at det kan være store energitap knyttet til lagring som vil redusere den samlede virkningsgraden. Høyrepil indikerer lav teknologimodenhet og forventet økt virkningsgrad i framtiden.

For å få et bedre innblikk i den totale energieffektivitet til e-drivstoff bør utnyttelse og produksjon sees i sammenheng. Av den grunn blir utnyttelsesvirkningsgraden i figur 4.3 multiplisert med produksjonsvirkningsgraden i figur 4.4. Resultatet er vist i figur 4.5. Disse prosentverdiene representerer altså en «Power-to-X-to-Wheel»-virkningsgrad hvor «X» er den aktuelle energibæreren. Med andre ord angir prosentverdiene forholdet mellom mengden energi avgitt fra hjulene til et kjøretøy og mengden elektrisk energi som har gått med i drivstoffproduksjonen. Dette gir et forenklet bilde av beste mulige virkningsgrad for hvert drivstoffalternativ. Det er ikke tatt med i beregningen at det vil være energitap knyttet til lagring, oppladning, tanking og transport for alle alternativene. Denne forenklingen er gjort fordi slike energitap er svært avhengige av forutsetninger

---

---

som lagringsform og lagringstid. Det er ikke hensiktsmessig å kvantifisere lagringstapene og sammenligne på tvers uten å detaljere analysen og gå grundigere til verks i ett eller flere avgrensede tidsdomener. Det er derimot gitt en indikasjon på slikt energitap ved bruk av venstrepiler i figur 4.5. Videre er det plassert ut høyrepilindikatorer på de alternativene som har relativt lav teknologisk modenhet og dermed en forventning om betydelig økt virkningsgrad i framtiden.

Elektrisitet er den energibæreren som kommer klart best ut på samlet energieffektivitet. Med direkte bruk av elektrisitet unngår man et stort «Power-to-X»-tap. I praksis vil det bare være et lite tap knyttet til eventuell transport av elektrisiteten i kraftledninger og noe tap knyttet til batterioppladning. Energitap knyttet til lading kan være av en ubetydelig størrelsesorden dersom batteriet lades svært sakte, men ved hurtig lading kan energitapet være godt over 10 % (Buchmann 2021). Videre er det indikert i figur 4.5 at det kan være et stort lagringstap ved bruk av elektrisitet som energibærer. For eksempel kan det være betydelige energikostnader knyttet til temperaturhåndtering, siden ytelsen og kapasiteten til batterier svekkes ved for lav eller for høy temperatur (Vidal et al. 2019). Når det gjelder teknologisk utvikling er det ikke lagt til noen høyrepilindikator på elektrisitet i figur 4.5. Dette er ikke fordi det ikke vil være noen teknologisk utvikling. Elektriske motorer, likerettere og andre systemkomponenter kan bli mer energieffektive i framtiden, men det er en så moden og velutviklet teknologi den dag i dag at den samlede virkningsgraden ikke vil kunne gjøre store byks framover.

Om vi ser bort fra direkte bruk av elektrisitet er hydrogen det e-drivstoffet med høyest samlet virkningsgrad, både til brenselceller for elektriske motorer og til forbrenningsmotorer. I praksis vil den totale energieffektiviteten reduseres betraktelig grunnet tap knyttet til lagring, enten fordi hydrogenet må komprimeres til høyt trykk eller fordi hydrogenet må oppbevares ved svært lav temperatur. På en annen side, som beskrevet i avsnitt 3.2.4, er det stor forsknings- og utviklingsaktivitet rettet mot produksjon og utnyttelse av hydrogen. Det er derfor forventet en betydelig økning i virkningsgrad framover. E-ammoniakk er det drivstoffalternativet til elektriske motorer med lavest potensiale for energieffektivitet, mye grunnet stor energikostnad knyttet til produksjon. Allikevel er dette et drivstoff som kan konkurrere med e-hydrogen når det skal transporteres over lengre distanser, fordi e-ammoniakk på langt nær har like store energitap knyttet til lagring. Det er også et stort forskningsfokus rettet mot nye produksjonsmetoder for grønn ammoniakk og samlet virkningsgrad vil derfor kunne stige betraktelig i nær framtid. Blant de mindre energieffektive e-drivstoffene finner vi de to hydrokarbonalternativene e-metan og e-diesel. Disse har både lav energiutnyttelse knyttet til forbrenning og relativt store energikostnader knyttet til produksjon. Som beskrevet i avsnitt 3.5.2 er naturgass krevende å lagre og transportere. E-metan har tilsvarende egenskaper, og det kan derfor være betydelige energitap knyttet til lagring. Dette er ikke tilfellet for e-diesel, som lagres og transporteres uten kostbare energitap. For både e-metan og e-diesel er det indikert i figur 4.5 at framtidig teknologiutvikling vil dra energieffektiviteten i en positiv retning. Forbrenningsmotoren er velutviklet og har i praksis nådd sitt fulle potensiale, så her vil det ikke være noen utvikling av stor betydning. Derimot vil innovasjon og utvikling føre til høyere produksjonsvirkningsgrad. Et eksempel er den nyutviklede metoden for syngasproduksjon ved bruk av termokjemisk splitting beskrevet i avsnitt 3.6.4. E-metanol står fram som det minst energieffektive alternativet. E-metanol har tilsvarende lav energiutnyttelse i forbrenningsmotorer som e-metan, og er i tillegg enda mer energikrevende å produsere. Derimot er transport av e-metanol uproblematisk, og det forventes teknologisk utvikling både for mer energieffektiv produksjon og økt ytelse på metanoldrevne motorer.

Et drivstoffalternativ som ikke er tatt med i effektivitetsbetraktningene over er biodrivstoff. En årsak

---

---

til at dette er utelatt er at biodrivstoff kan produseres på utallige måter med mange ulike råstoff. Brennbarheten og egenskapene til drivstoffet vil være avhengig av driftsforholdene. I tillegg har det biologiske produktet ofte lange og komplekse forsyningskjeder. Å beregne energieffektiviteten til biodrivstoffproduksjon og sammenligne med rene elektrisitetsbaserte drivstoffprodukter ansees ikke som hensiktsmessig. Ved behov for kvantifisering av energieffektiviteten til biodrivstoff vises det til langt mer detaljerte studier i litteraturen. Et godt eksempel er Mat Aron et al. (2020) sin studie som tallfester energieffektiviteten til et stort utvalg av ulike biodrivstoff.

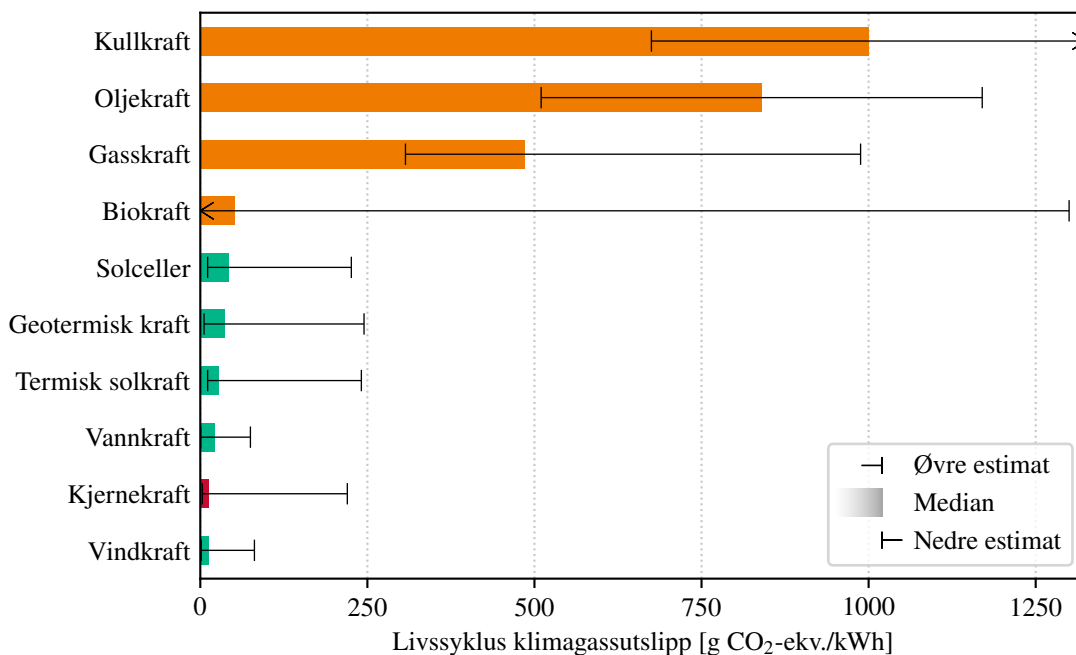
Kjernekraft er en annen kilde til energi som heller ikke er tatt med i effektivitetsbetraktningene over. Å sammenligne virkningsgraden til kjernekraft med virkningsgraden til de mer moderate energibærerne presentert over gir lite verdi, rett og slett fordi de opererer på helt ulike skalaer. For å gi et eksempel: Som tidligere nevnt har ren uran-235 en energitetthet som er over 40 millioner ganger høyere enn diesel. Si at uran-235 kan omsettes til drivkraft for et kjøretøy med en virkningsgrad på 0,01 % og at diesel kan omsettes med en virkningsgrad på 100 %. Selv om virkningsgraden er 1/10 000 av virkningsgraden til diesel vil fortsatt drivkraften til det kjernekraftdrevne kjøretøyet være 4000 ganger høyere. Energieffektivitet får en litt annen betydning når det er snakk om et så enormt energipotensiale. Satt på spissen, for et fartøy som aldri må etterfylles med drivstoff har det liten betydning om drivstoffet er energieffektivt eller ikke. I det store bildet bør det allikevel alltid jobbes mot høyest mulig energieffektivitet, og det er alltid nyttig å utnytte overskuddsvarmen som produseres på en effektiv måte for at ikke store energimengder skal gå til spille.

## **4.3 Livssyklus klimagassutslipp**

Når man skal benytte det vi her omtaler som nullutslippsteknologi er det viktig å være bevisst på at ingen av alternativene er fullstendig utslippsfrie i sin helhet. Alle former for menneskeskapt energiproduksjon, energitransport og energitransformasjon er til en viss grad avhengig av materiell, infrastruktur, landareal og/eller tilrettelagte omgivelser. Dette kan i seg selv ha store energikostnader og medføre betydelige klimagassutslipp. En karbonfri energibærer gir ikke direkte opphav til CO<sub>2</sub> ved forbrenning, men til tross for fraværet av karbon kan en slik energibærer knyttes til CO<sub>2</sub>-utslipp ved å se på hele verdikjeden. Denne typen utslipp blir omtalt som indirekte utslipp. I dette delkapittelet sammenlignes den totale mengden direkte og indirekte klimagassutslipp knyttet til ulike energikilder og energibærere.

### **4.3.1 Energikilder**

En mye brukt metode for å kvantifisere miljøpåvirkning og totale klimagassutslipp forbundet med et produkt eller en aktivitet er såkalt livssyklusanalyse. Slike analyser ser på energiforbruk, materiellforbruk, avfall og forurensning over en hel livssyklus. For å vurdere totalt klimagassutslipp forbundet med ulike typer energiproduksjon kan utslippene deles inn i tre hovedkategorier: Oppstrøms utslipp, driftsutslipp og nedstrøms utslipp. Oppstrøms utslipp er alle utslippene forbundet med utvinning av ressurser, produksjon av materialer og komponenter, anleggskonstruksjon og brenselforsyning. Driftsutslipp er alle utslippene forbundet med forbrenning, drift og vedlikehold, mens nedstrøms utslipp er forbundet med demontering, avfallshåndtering og resirkulering. For



Figur 4.6 Estimert klimagassutslipp over en hel livssyklus for ulike typer elektrisitetsproduksjon. Basert på et stort antall livssyklusanalyser gjennomført av ulike aktører. Data innsamlet av NREL (2021). Øvre estimat for kullkraft er 1689 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh og nedre estimat for biokraft er -1000 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh.

fossildrevet teknologi er driftsutslipp den klart største bidragsyteren til klimagasser. For teknologi drevet av fornybar energi eller kjernekraft er derimot den største bidragsyteren oppstrøms utslipp.

Resultatene fra en livssyklusanalyse påvirkes av rammebetingelsene som settes for analysen og hvilke antagelser/forenklinger som gjøres. Når en teknologi skal vurderes kan det derfor være lurt å se på resultatene fra flere ulike analyser av den aktuelle teknologien. NREL<sup>30</sup> har samlet inn data fra en rekke studier som har gjennomført livssyklusanalyser av ulike typer elektrisitetsproduksjon. Den innsamlede dataen er sammenstilt i figur 4.6. Figuren viser medianen i estimert klimagassutslipp. I tillegg er de laveste og høyeste estimatene markert for å vise variasjonen i resultatene. Som forventet kommer fossilbasert kraftproduksjon dårligst ut, med kullkraft som det minst miljøvennlige alternativet. Videre er resultatene knyttet til biokraft interessante. Medianen på 52 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh tilsier at biokraft er et relativt miljøvennlig alternativ.<sup>31</sup> Variasjonen i resultatene er derimot veldig store. Det laveste estimatet er på -1000 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh. Et negativt utslipp sikter i disse studiene til at man unngår utslipp, ikke til at man fjerner drivhusgasser fra atmosfæren. For eksempel kan utnyttelse av biomasse gjøre at man unngår utslipp av metangass som biomassen ville medført på en søppelfylling. Det høyeste estimatet for biokraft finner vi i andre enden av skalaen, på hele 1300 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh, noe som indikerer at biokraft kan være en miljøversting under visse omstendigheter. De fornybare energikildene, samt kjernekraft, kommer alle godt ut i klimagassregnskapet, men de

<sup>30</sup>NREL: National Renewable Energy Laboratory.

<sup>31</sup>CO<sub>2</sub>-ekv.: CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er en enhet som brukes i klimagassberegninger. Ulike gasser har ulik oppvarmingseffekt og levetid i atmosfæren. For å kunne sammenligne på tvers regnes alle utlippene om til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

---

---

øvre estimatene viser at også disse teknologiene kan medføre klimagassutslipp av betydning (NREL 2021).

På verdensbasis er det fossile energikilder som dominerer energimarkedet. En overgang til et grønnere energimarked vil i seg selv ha en stor miljøpåkjenning da nye produksjonsfasiliteter og energiinfrastruktur må bygges ut. Slameršak, Kallis og O'Neill (2022) ser på energien som kreves og utslippene forbundet med overgangen til framtidens lavkarbon energisystem. I deres rapport analyseres mulige utviklingsretninger for det globale energisystemet for å oppnå 1,5-gradersmålet. Rapporten bekrefter at utviklingsscenarioene som baserer seg på en sakte og gradvis avkarbonisering gir betydelig høyere utslipp enn scenarioene med hurtig omstilling til grønn energiproduksjon. Når det gjelder karbonfangst og lagring tilsier betraktningene til Slameršak, Kallis og O'Neill (2022) at slik teknologi ikke gir en tilstrekkelig klimagevinst til å kompensere for bruk av karbonintensiv energi. Selv om en energiomveltning gir klimapåkjenninger på kort sikt, er den mest klimavennlige løsningen i et langsiktig perspektiv å gå over til et energisystem dominert av fornybar energi og kjernekraft så raskt som mulig.

#### **4.3.2 Energibærere**

Elektrisitet er en fundamental energibærer, og i Norge er effektiv transport av denne bæreren tilrettelagt gjennom et kraftnett som dekker store deler av landet. Kraftnettet må til stadighet vedlikeholdes og oppgraderes. Materiell- og energiforbruk i den forbindelse gir indirekte utslipp knyttet til infrastruktur for elektrisitet. En livssyklusstudie gjennomført av Arvesen et al. (2015) viser at lokale distribusjonsnett bidrar til indirekte utslipp i større grad enn regionale distribusjonsnett, grunnet størst energitap i nett med lave spenningsnivå. For mobile applikasjoner og off-grid systemer er indirekte utslipp av stor betydning. Batterier, som er den dominerende lagringsteknologien, har store miljøkostnader knyttet til utvinning av råmaterialer og produksjon. Som beskrevet i avsnitt 3.1.2 finnes det mange ulike måter å lagre elektrisitet på, spesielt innen stasjonær lagring. Alternativ lagring, for eksempel ved bruk av komprimert luft eller pumpekraftverk, kan redusere mengden indirekte utslipp forbundet med elektrisitet som energibærer (Dehghani-Sanij et al. 2019).

Hydrogen er en langt mindre etablert energibærer sammenlignet med elektrisitet. I en overgangsfase vil det derfor være store utslipp knyttet til utbygging av infrastruktur for lagring og transport av hydrogen. Etter at overgangen er gjennomført vil det, på samme måte som mer etablerte energibærere, kun være vedlikehold og oppgraderinger som gir indirekte utslipp knyttet til infrastruktur. Avhengig av måten hydrogen lagres på vil det være en viss energikostnad knyttet til lagring og transport. Dersom energien benyttet til komprimering/nedkjøling ikke hentes fra en grønn kilde vil det her påløpe betydelige indirekte utslipp. Likeså er utslippene knyttet til hydrogenproduksjon helt avhengig av hvor energien hentes fra. Eksempelvis er ikke elektrolyse av vann utslippsfritt dersom den benyttede elektrisiteten kommer fra et kullkraftverk. Videre er elektrolyseteknologi avhengig av enkelte sjeldne råmaterialer (Yue et al. 2021). Når hydrogenproduksjon ved elektrolyse skaleres opp er det viktig at disse materialene utvinnes på en bærekraftig måte.

Siden hydrogen er hovedbestanddelen i ammoniakk vil de indirekte utslippene knyttet til hydrogen videreføres til den ammoniakken som produseres fra hydrogenet. Som vist i figur 4.4 er e-ammoniakk mer energikrevende å produsere enn e-hydrogen, og det er derfor et enda større potensiale for indirekte utslipp dersom karbonintensiv energi benyttes. Når det gjelder infrastruktur og transport



---

---

av ammoniakk er dette relativt godt utviklet i dag grunnet den store ammoniakketterspørselen i jordbruk og annen industri. Produksjons- og transportkapasiteten må allikevel økes betraktelig dersom ammoniakk skal benyttes som energibærer i stor skala (Morlanés et al. 2021).

Ofte diskuteres det bare rundt kjernekraft som en kilde til energi, ikke som en bærer av energi. Når kjernekraft benyttes til framdrift kan kjernebrenselet betraktes som en energibærer. Prosessen for framstilling av kjernebrensel (beskrevet i boks 3.1) er kompleks og energikrevende. En viss mengde indirekte utslipp kan kobles til denne framstillingsprosessen. På grunn av den enorme mengden energi som hentes ut fra kjernebrenselet blir disse utslippene svært små per energienhet. Høy energitetthet gjør også at utslipp knyttet til transport blir veldig små. Altså er kjernebrensel en energibærer som medfører lave indirekte utslipp.

Hydrokarboner og alkoholer representerer energibærere som gir store direkte utslipp ved forbrenning, men det er viktig også å ta indirekte utslipp med i betraktningen. Karakteristikken til de indirekte utslippene er svært ulik for biodrivstoff og e-drivstoff. Ofte har biodrivstoff lange og komplekse verdikjeder, noe som muliggjør mange utslipp av ulik karakter og mengde. Usikkerheten knyttet til biodrivstoff er noe lignende den usikkerheten som er indikert for biokraft i figur 4.6, hvor estimert livssyklus utslipp varierer mellom -1000 og 1300 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh. De indirekte utslippene knyttet til produksjon av biodrivstoff kan ansees som negative, fordi man unngår utslipp som det biologiske materialet ville gitt et annet sted. For å kunne benytte det biologiske materialet til drivstoffproduksjon må det samles inn og prosesseres, noe som i seg selv krever energi og medfører utslipp. Når det biologiske materialet kommer fra flere ulike kilder og prosesseres på ulike måter blir det svært krevende å spore opp alle de indirekte utslippene. For e-drivstoff er verdikjedene langt mindre komplekse. Råmaterialene som benyttes i produksjonen er veldefinerte kjemiske forbindelser, for eksempel H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vann eller luft, samt at prosesseringen er mer ensartet. Innhenting av karbonholdig råmateriale kan ansees som et negativt indirekte utslipp. Eksempelvis ved CO<sub>2</sub>-fangst for produksjon av e-metan eller e-metanol. Om slik CO<sub>2</sub>-fangst bare representerer en utsettelse av utslipp til atmosfæren eller en faktisk reduksjon av mengden CO<sub>2</sub> i atmosfæren avhenger av om det er et industrielt utslipp som fanges opp eller direkte CO<sub>2</sub>-fangst fra luften. (Dette er diskutert i boks 3.4.) Videre er det helt avgjørende for e-drivstoff hvilken elektrisitetsmiks som benyttes i produksjonen. En grønn elektrisitetsmiks gir lave indirekte utslipp. Med en karbonintensiv elektrisitetsmiks blir derimot de indirekte utslippene så store at miljøgevinsten faller bort og det ikke lenger gir mening å referere til drivstoffet som et e-drivstoff.

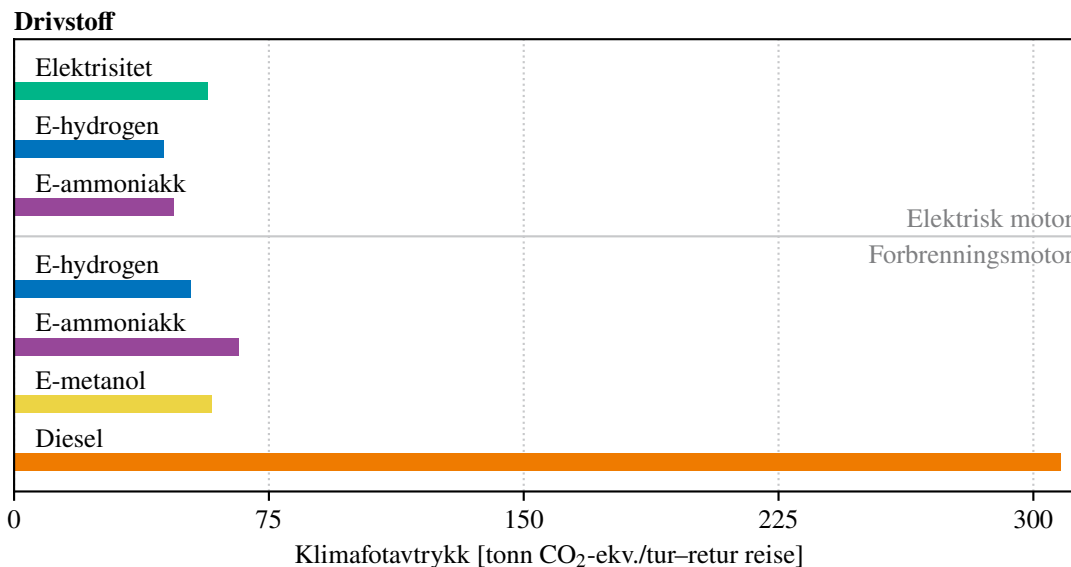
Viktigheten av en grønn elektrisitetsmiks kan demonstreres ved å se på et enkelt regneeksempel for direkte CO<sub>2</sub>-fangst fra luften. Som beskrevet i avsnitt 3.6.1 krever S-DAC<sup>32</sup> opp mot 10 GJ energi per tonn fanget CO<sub>2</sub>. Hvis man antar at all energien kommer fra elektrisitet kan man regne ut hva slags CO<sub>2</sub>-utslipp denne energibruken medfører med en gitt elektrisitetsmiks. Med en tysk elektrisitetsmiks fra 2022 ville 1 tonn fanget CO<sub>2</sub> medført utslipp av 1,07 tonn CO<sub>2</sub>. Med andre ord går vinninga opp i spinninga. Med en norsk elektrisitetsmiks fra 2022 ville derimot 1 tonn fanget CO<sub>2</sub> bare medført utslipp av 0,08 tonn CO<sub>2</sub>.<sup>33</sup>

For å gjøre en kvantitativ sammenligning av indirekte utslipp knyttet til de ulike energibærerne kan vi se på livssyklusanalyser som omhandler framtidens drivstoff. En relevant studie er gjennomført

---

<sup>32</sup>S-DAC: *Solid direct air capture*.

<sup>33</sup>Karbonintensiteten for tysk og norsk elektrisitetsmiks var henholdsvis 385 og 29 g CO<sub>2</sub>/kWh i 2022 (Our World in Data 2022). Regneeksempelet gir ikke et presist bilde av virkeligheten på grunn av sammenkoblinger mellom ulike lands elektrisitetsnett, men er ment for å illustrere viktigheten av lavkarbon kraftforsyning.



Figur 4.7 Klimafotavtrykk med en tidshorisont på 100 år for ulike maritime framdriftssystemer. Livssyklusanalyse av en ferge som går mellom Gøteborg og Kiel. Studie gjennomført av Kanchiralla et al. (2022).

av Kanchiralla et al. (2022). Deler av resultatene i denne studien er presentert i figur 4.7. Studien ser på fossilfrie drivstoffalternativer for en ferge som går mellom Gøteborg og Kiel. Operasjonsåret er satt til 2030, så teknologien er antatt å være noe mer moden enn det den er i dag. Det er gjort livssyklusberegninger for ulike scenarioer hvor fergen benytter en elektrisk motor eller en forbrenningsmotor, og energilagring om bord gjøres ved bruk batterier, e-hydrogen, e-ammoniakk eller e-metanol. Alle scenarioene sammenlignes med et referansescenario hvor fergen driftes med diesel, og det vurderes i hvor stor grad de ulike scenarioene bidrar til global oppvarming over en periode på 100 år. Ved sammenligning av indirekte utslipp fra ulike e-drivstoff er det energieffektiviteten til drivstoffet som er av størst betydning. Jo høyere energieffektiviteten er, jo mindre elektrisitet kreves og jo lavere er de indirekte utslippene fra kraftproduksjon. Om man ser tilbake på figur 4.5, som viser samlet virkningsgrad for de ulike drivstoffalternativene, er det batteridrevne kjøretøy som har den klart høyeste energieffektiviteten. Allikevel er det ikke en batteridrevet ferge som kommer best ut blant scenarioene vist i figur 4.7. Dette skyldes betydelige indirekte utslipp fra batteriproduksjon. I studien er det antatt at fergen opererer i 25 år, mens batteriene som benyttes har en levetid på 8 år. Altså må batteriene byttes ut to ganger i løpet av fergens levetid. Fotavtrykket til batteriproduksjonen gjør at en elektrisk motor drevet på e-hydrogen eller e-ammoniakk kommer bedre ut i et livssyklusperspektiv. Her kommer e-hydrogen ut som det mest miljøvennlige alternativet, men det er verdt å poengtere at e-ammoniakk kommer nesten like bra ut. Om man igjen ser tilbake på samlet virkningsgrad i figur 4.5 ser man at e-ammoniakk i utgangspunktet er mye mindre energieffektivt enn e-hydrogen. E-ammoniakk kommer allikevel nesten like bra ut i klimagassregnskapet fordi hydrogen har store energikostnader knyttet til lagring. Drivstoffet til fergen lagres i flytende form og ammoniakk har her en klar fordel over hydrogen med tanke på energitap. Videre er det antatt at grønn ammoniakkproduksjon og ammoniakkdrevne brenselceller er mer energieffektive som følge av teknologiutvikling fram mot 2030. I scenarioene

---

---

der fergen benytter en forbrenningsmotor kommer e-ammoniakk i større grad dårligere ut enn e-hydrogen. Det skyldes blant annet direkte klimagassutslipp fra forbrenningsmotoren. Kanchiralla et al. (2022) peker spesielt på stor usikkerhet knyttet til mengden N<sub>2</sub>O-gass som produseres ved bruk av ammoniakk i forbrenningsmotorer. Med en tidshorisont på 100 år har N<sub>2</sub>O en GWP-verdi på 298 (EPA 2022a).<sup>34</sup> Det vil si at N<sub>2</sub>O-gass bidrar tilnærmet 300 ganger mer til drivhuseffekten sammenlignet med tilsvarende mengde CO<sub>2</sub>-gass. Det siste drivstoffalternativet som er presentert i figur 4.7 er e-metanol. Dette er et karbonholdig drivstoff og de direkte utslippene fra forbrenning er store. I dette scenarioet blir drivstoffet til fergen produsert ved hjelp av karbonfangst fra luften og de indirekte utslippene fra drivstoffproduksjonen er dermed negative. Dette kansellerer ut deler av de direkte utslippene og gjør at det globale oppvarmingspotensialet blir lavere for e-metanol enn enkelte av de andre drivstoffalternativene. Faktisk bidrar de direkte utslippene fra forbrenning av e-metanol til et klimafotavtrykk på godt over 200 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per tur-retur reise for fergen, men det negative bidraget fra karbonfangsten gjør at totalt klimafotavtrykk bare blir 58 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per tur-retur reise. Det er på høyde med scenarioet hvor fergen er batteridrevet. De elektrisitetsbaserte drivstoffene presentert i figur 4.7 har alle sine fordeler og ulemper, men et av de viktigste poengene resultatene til Kanchiralla et al. (2022) får fram er at samtlige alternativer gir en enorm miljøgevinst sammenlignet med skipsfart drevet av fossil diesel.

## 4.4 Kostnader

### 4.4.1 Elektriske batterier

Prisen på litiumbatterier falt med 97 % i perioden 1991 til 2018 (Our World in Data 2023a). 2022 representerte et trendbrudd hvor prisene på litiumbatterier steg med 7 % (Colthorpe 2022b). Rapporterte årsaker er økte råvarepriser og logistikkutfordringer som følge av Covid-19-pandemien. Det er forventet at den teknologiske utviklingen vil fortsette både for litiumbatterier og andre batteriteknologier som vil bidra til å redusere prisene på batterier på sikt. Imidlertid kan råvaremangel og handelskrig/hjemhenting av industri bidra til økte priser, og det er vanskelig å spå hvor store disse effektene blir de neste årene.

Batterier trenger strømtilførsel, og siden det norske strømmettet er godt utbygd er det ingen store infrastrukturkostnader knyttet til elektrifisering med batterier. Generelt har batterier lave driftskostnader, eksempelvis er elbiler billigere i drift enn fossilbiler ettersom strøm er rimeligere enn drivstoff (Christiansen og Pau 2023) og vedlikeholdet er enklere (U.S. Department of Energy 2023).

### 4.4.2 Hydrogen

I følge Enova kan grønn hydrogen produseres i Norge i dag til ca. 60 kr per kilo, forutsatt en strømpris inkl. nettleie på 60 øre/kWh (Enova 2023). Strømprisen utgjør ca. 2/3 av totalprisen. Siden hydrogen har nesten tre ganger så høy spesifikk energitetthet som fossile drivstoff, og brenselceller

---

<sup>34</sup>GWP-verdi: *Global warming potential*-verdi. Verdien benyttes for å regne om utslipp av en klimagass til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. CO<sub>2</sub>-gass har GWP-verdi lik 1. Høyere GWP-verdi betyr større oppvarmingseffekt.

---

---

har litt høyere virkningsgrad enn fossile forbrenningsmotorer, gjør dette at hydrogen kan være konkurransedyktig mot fossile drivstoff under disse forutsetningene, målt i kroner per kilometer. Storskalafordeler kan redusere framtidig pris ytterligere, men siden framtidig strømpris er svært usikker blir også framtidig hydrogenpris svært usikker. I tillegg til selve hydrogenet vil en overgang til hydrogen som drivstoff kreve store investeringer i hydrogeninfrastruktur. Siden hydrogen er en viktig innsatsfaktor i ammoniakk, syntetisk biodrivstoff og e-drivstoff er en viss utbygging av hydrogeninfrastrukturen uansett nødvendig. Dette vil være langt mindre omfattende enn om man skal bruke hydrogen som drivstoff. Denne infrastrukturen er dermed en stor kostnadsbarriere for å innføre hydrogen som drivstoff i stor skala.

#### **4.4.3 Ammoniakk**

Bruk av ammoniakk som drivstoff krever vesentlige investeringer i infrastruktur, men siden det er noe enklere å lagre ammoniakk enn hydrogen vil nok infrastrukturen i seg selv kunne være billigere enn tilsvarende infrastruktur for hydrogen. Som for grønn hydrogen er kostnaden på grønn ammoniakk også korrelert med strømpris. Grå ammoniakk har falt mye i pris det siste året og er bare litt dyrere enn fossilt drivstoff. Imidlertid er grønn ammoniakk stabilt mye dyrere (DNV 2023).

#### **4.4.4 Kjernekraft**

Investeringskostnadene for kjernekraftverk varierer stort (Lovering, Yip og Nordhaus 2016). Generelt er kjernekraft forbundet med lave driftskostnader, for eksempel koster det 15–18 svenske øre å produsere én kWh. Av dette utgjør «drivstoffkostnaden» (kostnaden for uranbrensel) ca. 3 svenske øre (Analysgruppen 2005). Svenske kjernekraftverk betaler også en avgift på 3–6 svenske øre per produserte kWh til et fond som skal betale for avfallshåndtering (Riksgälden 2022). Dersom man skal anvende kjernekraft i forsvarssektoren må man regne med utviklingskostnader siden det er få løsninger på markedet, og det ikke er sikkert det finnes eksisterende løsninger tilpasset norske militære behov.

#### **4.4.5 Biodrivstoff**

Kostnadene for biodrivstoff varierer med råmateriale og produksjonsmetode. Typisk er det mest bærekraftige og beste biodrivstoffet det dyreste, og dyrere enn fossilt drivstoff. Et unntak fra denne regelen er biogass, hvor produksjonskostnaden er mye lavere enn prisen på naturgass som følge av energisituasjonen i Europa (Thompson 2022). Hvordan dette vil utvikle seg i fremtiden er imidlertid svært usikkert. Som nevnt i avsnitt 3.5.4 pågår det mye aktivitet for å redusere kostnadene og øke bærekraftigheten til biodrivstoff. Det er imidlertid tvilsomt at bærekraftig, flytende biodrivstoff kommer til å bli rimeligere enn fossilt drivstoff (inkludert avgifter) på en god stund. Dette skyldes den enorme etterspørselen etter hydrokarboner i dagens samfunn. I det øyeblikket et bærekraftig biodrivstoff blir billigere i produksjon enn tilsvarende fossilt drivstoff vil etterspørselen etter dette biodrivstoffet skyte i været og presse prisen opp til minst samme pris som den fossile varianten.

Den kostnadmessige (og praktiske) fordelene med biodrivstoff er at det ikke krever vesentlig utbygging av infrastruktur (annet enn eventuelle produksjonsanlegg) eller tilpasning av materiell. Det er altså ikke forbundet med en investeringsbarriere.

---

---

#### 4.4.6 E-drivstoff

Produksjonskostnadene for e-drivstoff er vesentlig høyere enn for biodrivstoff og fossile drivstoff (Brynolf et al. 2018; Zhou, Searle og Pavlenko 2022). Dette skyldes høyt energiforbruk og lavt volum på produksjonen som resulterer i få stordriftsfordeler. Som for ammoniakk og hydrogen er strøm en viktig innsatsfaktor og kostnaden er dermed sterkt korrelert med strømpris. Forskning, utvikling og stordriftsfordeler forventes å drive kostnadene nedover, men det er stor usikkerhet om framtidig kostnadsnivå (Brynolf et al. 2018). Ytterligere økonomiske incentiver og økte CO<sub>2</sub>-avgifter/kvotepriser blir mest sannsynlig nødvendig i mange år framover for å matche prisen på fossile drivstoff på sikt (Zhou, Searle og Pavlenko 2022). Som for biodrivstoff er det her ingen infrastrukturbehov annet enn selve produksjonsanleggene, og det er dermed ikke forbundet med en investeringsbarriere.

#### 4.4.7 Metanol

Metanol som alternativt drivstoff er på framvekst innen skipsfart. En årsak til dette kan være at grå metanol har relativt høy tilgjengelighet og er konkurransedyktig på pris med øvrig fossilt drivstoff. Biometanol er imidlertid vesentlig dyrere enn grå metanol (DNV 2023).

#### 4.4.8 Fossile drivstoff

Bruk av fossile drivstoff er som hovedregel underlagt enten CO<sub>2</sub>-avgift eller klimakvoter. Det er bred enighet om at prisene på disse vil øke framover, men hvor mye og hvor raskt er usikkert. Dersom Forsvaret ikke reduserer sine utslipp kan årlige kostnader til CO<sub>2</sub>-avgift potensielt komme opp i 1,5 milliarder kroner i 2040 (Arnfinnsson og Kirkhorn 2021). Kostnadene ved de fossilfrie alternativene diskutert over må derfor sammenlignes med de økte kostnadene til CO<sub>2</sub>-avgifter/kvoter.

#### 4.4.9 Oppsummering av kostnadsvurderinger

For å kunne gjøre en sammenligning av de ulike teknologiene oppsummerer vi her kostnadsvurderingene våre på generelt grunnlag. Vi tar utgangspunkt i dagens kostnader der disse er tilgjengelige, slik at teknologiske framskritt vil kunne endre på disse vurderingene. Dette danner grunnlaget for sammenligningen i delkapittel 4.6.

Batteridrift er forbundet med lavere driftskostnader enn fossil framdrift, mens investeringskostnaden er noe høyere. For hydrogen framstår driftskostnadene konkurransedyktige med fossilt drivstoff, men med en betydelig usikkerhet grunnet høy avhengighet av strømkostnader. Investeringskostnadene vurderes å være høye. For ammoniakk vurderes både drifts- og investeringskostnadene å være høyere enn for fossile framdriftssystemer, men investeringskostnadene vil være lavere enn for hydrogen. For kjernefysisk energi og framdrift vurderes driftskostnadene til å være lavere enn fossil energi og framdrift. Investeringskostnadene vurderes til å være høye, men denne vurderingen er svært usikker. For biometan vurderes driftskostnadene å være på nivå med fossil naturgass, men denne vurderingen er svært usikker. For e-metan vurderes driftskostnadene til å være betydelig

---

---

høyere enn for fossil naturgass, mens investeringskostnadene vil være som for fossil naturgass. For biodiesel vurderes kostnadene som vesentlig høyere enn fossil diesel, men det varierer med råstoff og produksjonsmetode. Investeringskostnader er på nivå med fossil diesel. Driftskostnadene ved e-diesel er vesentlig høyere enn for fossil diesel, mens investeringskostnadene er på samme nivå. Biometanol er foreløpig vesentlig dyrere enn fossilt drivstoff, men investeringskostnadene vurderes å være på samme nivå som for fossilt drivstoff. Vi vurderer at det samme gjelder for e-metanol.

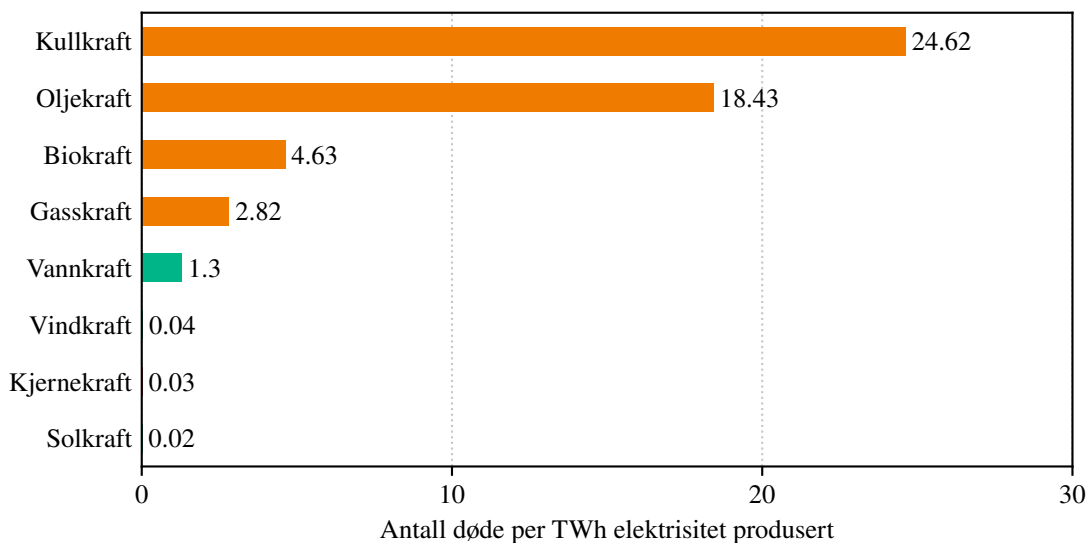
## 4.5 Skaderisiko

Alle energikilder og energibærere har et visst iboende skadepotensial dersom energien frigis på en ukontrollert måte. I tillegg kan energibæreren være giftig i seg selv eller medføre giftig avfall eller biprodukter. I dette delkapittelet forsøker vi å sammenligne skaderisikoen til ulike energikilder og energibærere.

### 4.5.1 Energikilder

Den vanligste måten å sammenligne skadepotensial for ulike energikilder på er ved gjennomsnittlig dødelighet per produserte energienhet strøm, se figur 4.8. Det kan imidlertid diskuteres om gjennomsnittlig dødelighet er det mest riktige målet på dødelighet. Kritikken mot denne metoden går ut på at ulike teknologier brukt av ulike regimer slås sammen i samme bås, og at enkeltulykker får store utslag i statistikken. Et eksempel på dette er verdens dødeligste ulykke knyttet til energiproduksjon: 171 000 døde da Banqiao-demningen raste sammen i Henanprovinsen i Kina i 1975 (Sovacool et al. 2016). Demningen ble bygget på 1950-tallet under et kommunistisk regime med vesentlig lavere HMS-standarder enn i Vesten i dag. Dersom man skal vurdere ulike energikilder i Europa i dag er det derfor tvilsomt at et slikt gjennomsnittstall som inkluderer denne ulykken representerer den reelle risikoen knyttet til ny vannkraft i Europa i 2023. Dødeligheten til vannkraft med og uten denne ene ulykken er hhv. 1,3 og 0,04 dødsfall per TWh (Our World in Data 2023b).

Tilsvarende kan også kjernekraft vurderes med og uten den dødeligste enkeltulykken, som avhengig av regnemetode enten er Tsjernobylulykken i 1986 eller Fukushimaulykken i 2011. Ingen døde direkte i Fukushimaulykken, men én person døde av lungekreft i 2018 som myndighetene mener kan skyldes stråling etter ulykken. I tillegg er det et spørsmål om hvorvidt indirekte dødsfall skal inkluderes. For eksempel døde mange syke og eldre som følge av evakueringen fra Fukushima etter nedsmeltingen ved kjernekraftverket i 2011, ikke fra selve ulykken. Analyser utført i etterkant har vist at evakueringen hadde en større helsemessig og økonomisk kostnad enn hvis man ikke hadde evakuert (Waddington et al. 2017). Så avhengig av hva man inkluderer er dødstallet for denne ulykken mellom 0 og 2314 (Our World in Data 2023c). For Tsjernobyl vet man at 2 mennesker døde i eksplosjonen og 28 arbeidere og brannmenn døde i ukene som fulgte. Ytterligere 106 mennesker var utsatt for høye stråledoser, men innen 2006 var kun 19 av disse døde, og det er usikkert hvorvidt strålingen var en medvirkende faktor. Totalt er antallet bekreftede dødsfall under 100. I 2005 ble det anslått at 15 personer hadde dødd av kreft i skjoldbruskkjertelen og at ytterligere 100 til 400 kunne komme til å dø av skjoldbruskkjertelkreft en gang etter dette (Our World in Data 2023c). Når Our World in Data oppgir dødeligheten til kjernekraft som 0,03 dødsfall per TWh er det inkludert 2314 dødsfall fra Fukushima og 433 fra Tsjernobyl.



Figur 4.8 Dødstall forbundet med ulykker og luftforurensning fra kraftproduksjon med ulike energikilder, angitt som antall døde per TWh elektrisitet produsert. Tilpasset fra *Our World in Data* (2023b).

#### 4.5.2 Energibærere

Diskusjonen over og figur 4.8 refererer til energiproduksjon. Men både fossil energi og kjernekraft brukes også direkte til framdrift. For kjernefysisk framdrift framstår regime og HMS-standarder som avgjørende for sikkerheten. Mens US Navys flåte av reaktordrevne fartøy tilsammen har akkumulert 6200 reaktordriftsår uten én eneste ulykke (WNA 2021) har det vært tre dødelige ulykker med sovjetiske atomubåter (*Nuclear accidents 2022*).

Hydrogen er eksplosivt, ammoniakk er giftig og litiumbatterier er brannfarlige. Vi har ikke funnet totale dødsfall knyttet til disse energibærerne som kan sammenlignes med hverandre eller med elektrisitetsproduksjon, slik som i figur 4.8.

Biodrivstoff og e-drivstoff produserer eksos som bidrar til lokal luftforurensning på samme måte som fossile drivstoff, men e-drivstoff vil være kjemisk renest og ha minst partikkel- og svovelutslipp. Renheten, og dermed lokal forurensning fra biodrivstoff, vil variere med råstoff og produksjonsmetode. Grovt sett, basert på (*Our World in Data 2023b*), kan vi anslå at e-drivstoff og biodrivstoff er mer skadelig enn kjernekraft og fornybar energi, men mindre skadelig enn fossil energi.

#### 4.6 Samlet vurdering

Sammenligningene gjort i delkapitlene 4.1 til 4.5 danner et komplekst bilde av fordelene og ulempene ved hver enkelt energibærer. For å gi et helhetlig inntrykk presenteres det her en samlet vurdering

som grovt oppsummerer betraktningene gjort i de ovenstående delkapitlene. Som referanseverdi i den samlede vurderingen benyttes fossil diesel. Fossil diesel har lignende egenskaper som NATO F-34, det primære drivstoffet til Forsvaret i dag, og vekting mot referansenverdien gir derfor et inntrykk av om den enkelte energibærer skaper en positiv eller negativ effekt for Forsvaret. Den samlede vurderingen er presentert i tabell 4.1.

	Energiinnhold	Energieffektivitet	Klimagass-utslipp	Kostnader
<b>Elektrisitet</b>				
Li-ion batteri	●	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
<b>Hydrogen</b>				
E-hydrogen	● <sup>e</sup> ● <sup>s</sup>	● <sup>b</sup> ● <sup>f</sup>	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
<b>Ammoniakk</b>				
E-ammoniakk	●	● <sup>b</sup> ● <sup>f</sup>	●	● <sup>i</sup> ● <sup>d</sup>
<b>Kjernekraft</b>				
U-235	●	N/A	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
<b>Hydrokarboner</b>				
Biometan	● <sup>e</sup> ● <sup>s</sup>	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
E-metan	● <sup>e</sup> ● <sup>s</sup>	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
Biodiesel	●	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
E-diesel	●	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
<b>Alkoholer</b>				
Biometanol	●	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>
E-metanol	●	●	●	● <sup>d</sup> ● <sup>i</sup>

Tabell 4.1 Samlet vurdering av egenskapene til ulike energibærere i forhold til fossil diesel.

I første kolonne i tabell 4.1 vurderes energibærernes energiinnhold opp mot fossil diesel. Fargene angitt i denne kolonnen er basert på tallene presentert i figurene 4.1 og 4.2. I andre kolonne vurderes energibærernes energieffektivitet opp mot fossil diesel. Diskusjonen rundt energieffektivitet i delkapittel 4.2 omhandler både forbrenning i form av «Tank-to-Wheel»-virkningsgrad og produksjon i form av «Power-to-X»-virkningsgrad. Det gir ikke mening å snakke om «Power-to-X»-virkningsgrad for fossil diesel, siden det ikke er elektrisitetsbasert. Energieffektivitet i tabell 4.1 sikter derfor bare til forbrenning og fargene angitt i kolonnen er basert på «Tank-to-Wheel»-virkningsgraden presentert i figur 4.3. I tredje kolonne i tabell 4.1 vurderes energibærernes livssyklus klimagassutslipp opp mot fossil diesel. Fargene angitt i denne kolonnen er basert på betraktningene gjort i delkapittel 4.3 og livssyklusanalysen presentert i figur 4.7. I fjerde kolonne vurderes kostnader tilknyttet energibærerne opp mot fossil diesel, basert på diskusjonen i delkapittel 4.4.

Elektrisitet lagret i litiumbatterier er den energibæreren som kommer klart dårligst ut på energiinnhold i tabell 4.1. Derimot er det nettopp batterier som kommer best ut på energieffektivitet. Det er



---

---

produktet av energiinnhold og energieffektivitet som sier noe om hvor mye utnyttbar energi et kjøretøy kan bære med seg. Med andre ord kan en grønn indikator i tabell 4.1 sin andre kolonne veie opp for en rød indikator i første kolonne, hvilket er tilfellet for litiumbatterier. Videre kommer batterier langt bedre ut i et livssyklus klimagassregnskap i forhold til fossil diesel. Når det gjelder kostnader forbindes batterier og elektriske motorer med lavere driftskostnader, men noe høyere investeringskostnader sammenlignet med dieseldrevne forbrenningsmotorer. I et levetidsperspektiv vil batterier i mange tilfeller være lønnsomt, men det avhenger av det konkrete prosjektet.

Hydrogen har betydelig lavere energitetthet enn fossil diesel, men på en annen side langt høyere spesifikk energi. Sammenlignet med dieseldrevne forbrenningsmotorer er energieffektiviteten til hydrogen bedre dersom det benyttes i brenselceller til elektriske motorer, men noe dårligere dersom det benyttes i forbrenningsmotorer. Hydrogen er det alternativet som gir lavest livssyklus klimagassutslipp. Det bør påpekes at betegnelsen «e-hydrogen» er brukt i tabell 4.1 for å presisere at det har snakkes om grønn hydrogen, ikke fossilbasert hydrogen. Når det gjelder kostnader kreves det store investeringskostnader mens driftskostnadene er usikre.

Ammoniakk har lavere energitetthet og lavere spesifikk energi enn fossil diesel. På lik linje med hydrogen er energieffektiviteten til ammoniakk bedre dersom det benyttes i brenselceller til elektriske motorer, men noe dårligere dersom det benyttes i forbrenningsmotorer. Som beskrevet i delkapittel 4.2 har ammoniakkdrevne forbrenningsmotorer veldig lav teknologimodenhet, og energieffektivitetsindikatoren til ammoniakk i tabell 4.1 er derfor markert med stor usikkerhet. Videre gir bruk av ammoniakk en kraftig reduksjon i klimagassutslipp sammenlignet med fossil diesel. Også her er betegnelsen e-ammoniakk brukt for å presisere at det er grønn ammoniakk som omtales. Grønn ammoniakk er på nåværende tidspunkt mer kostbart å benytte enn fossil diesel.

Kjernebrensel, representert med uran-235 i tabell 4.1, er den energibæreren med soleklart høyest energiinnhold. Energieffektiviteten til kjernebrensel er ikke vurdert, i tråd med argumentene som gis mot slutten av delkapittel 4.2. Videre har energi fra kjernekraft betydelig lavere livssyklus klimagassutslipp enn fossil energi. Driftskostnadene forbundet med kjernebrensel er lavere enn fossil diesel, men investeringskostnadene forventes å være betydelig høyere. Her går den teknologiske utvikling raskt og små kjernekraftmoduler blir stadig billigere. Kostnadsindikatoren til kjernekraft i tabell 4.1 er derfor markert med stor usikkerhet.

Metan har noe lavere energitetthet enn fossil diesel, men tilnærmet lik spesifikk energi. Energieffektiviteten til metandrevne forbrenningsmotorer er noe dårligere enn dieseldrevne motorer. Metan produsert fra biologisk materiale og syntetisk e-metan representerer begge alternativer som kan gi en reduksjon av klimagassutslipp. Infrastruktur og teknologi for utnyttelse av naturgass er godt etablert, så investeringskostnadene forbundet med bruk av metan som energibærer antas å være på lik linje med fossil diesel. Dersom metan skal benyttes i allerede eksisterende materiell vil det derimot påløpe en betydelig investeringskostnad for tilpasning av materiellet. Driftskostnadene er det største usikkerhet rundt. Biometan var billigere enn fossil diesel i Norge i 2022, mye grunnet energikrisen i Europa, men det er usikkert om det vil vedvare. Syntetisk drivstoffproduksjon er energikrevende og kostbart, og dermed er driftskostnadene tilknyttet e-metan langt høyere enn fossil diesel.

Bio- og e-diesel har tilnærmet like egenskaper som fossil diesel når det gjelder energiinnhold og energieffektivitet. Ved bruk av bærekraftig biologisk råmateriale har biodiesel potensiale til å redusere klimagassutslipp, men mye av dagens biodrivstoffproduksjon kan ikke ansees som bærekraftig og klimaeffekten er forbundet med stor usikkerhet. E-diesel vil kunne redusere

---

---

klimagassutslipp sammenlignet med fossil diesel, da CO<sub>2</sub> benyttet i produksjonen kompensere for CO<sub>2</sub>-utslippene ved forbrenning. Bio- og e-diesel kan brukes direkte i eksisterende materiell og investeringskostnadene er på nivå med fossil diesel. Driftskostnadene er derimot betydelig høyere grunnet økte drivstoffkostnader. Kostnadsindikatoren til biodiesel i tabell 4.1 er markert med stor usikkerhet grunnet rask utvikling i biodrivstoffmarkedet og et fluktuerende europeisk energimarked.

Metanol har lavere energitetthet og lavere spesifikk energi enn fossil diesel. Metanoldrevne forbrenningsmotorer har noe lavere energieffektivitet enn dieseldrevne motorer, men teknologien er i stadig utvikling og energieffektiviteten til moderne motorer strekker seg mot nivået til dieselmotorer. Bruk av bio- eller e-metanol vil kunne gi en betydelig reduksjon i livssyklus klimagassutslipp sammenlignet med fossil diesel. Det er forventet at driftskostnadene med bio- eller e-metanol er høyere enn fossil diesel, men på lik linje med biodiesel er det også her stor usikkerhet rundt prisnivået til biometanol. For å kunne benytte rene alkoholer kreves tilpasninger på eksisterende materiell, men for nytt materiell er det ikke forbundet med vesentlig økte investeringskostnader i forhold til fossil diesel.

Skaderisiko, diskutert i delkapittel 4.5, har ikke blitt vurdert i like utfyllende grad og er derfor ikke tatt med i tabell 4.1. Det er allikevel verdt å nevne at de historiske dødstallene presentert i figur 4.8 indikerer at fornybar energi, kjernekraft og bioenergi er mye mindre skadelig enn fossil energi. I tillegg gir den økende etterspørselen etter grønne alternativer insentiv til videre forskning på materialteknologi og robuste energiløsninger, noe som vil gjøre bruk av grønne energibærere stadig sikrere og mer attraktivt. Energibærere som diskuteres her vil alle kunne bidra til å redusere skader på mennesker og miljø.

Den samlede vurderingen presentert i tabell 4.1 tar utgangspunkt i nåværende status for de ulike energibærere. Tabellen sier derimot ikke noe om framtidsutsikter. Mange av de grønne alternativene diskutert i denne rapporten har lav teknologimodenhet sammenlignet med fossildreven teknologi som Forsvaret benytter i dag. Spesielt kostnader framstår som en barriere for grønn omstilling. Etter hvert som de ulike teknologiene modnes vil kostnadene, og de øvrige parameterne, svinge stadig mer i favør av grønn teknologi. Storskala produksjon av grønne energibærere vil gjøre løsningene mer kosteffektive og terskelen for en grønn omstilling vil bli lavere for hvert år som går. For at Forsvaret skal kunne realisere en slik omstilling må det først vurderes hvilke av løsningene som er best tilpasset Forsvarets behov. Dette er tema i neste kapittel.

---

---

## 5 Mulige anvendelser i Forsvaret

Hvis et NATO-land kan velge mellom en klimavennlig panservogn og en sterk panservogn, så velger de den sterke. Da taper klima.

---

*NATOs Generalsekretær Jens Stoltenberg*  
Verdens Gang  
26. juni 2023

Sammenligningen av energibærernes egenskaper presentert i kapittel 4 danner grunnlag for å kartlegge hvilke bruksområder de ulike teknologiene er egnet for. I dette kapitlet vurderes det om teknologiene er aktuelle å benytte til drift av Forsvarets plattformer, baser og systemer.

### 5.1 Energibærere for framdrift

Forsvarets ulike plattformer er helt avhengige av å kunne frakte med seg energi som kan transformeres til framdrift. En vurdering av hvilke energibærere som er aktuelle å benytte til framdrift på militære plattformer i land-, sjø- og luftdomenet er presentert i tabell 5.1. De energibærerne som er aktuelle til hver enkelt plattform er markert med en hake i tabellen. I tillegg er hakene gitt en farge for å indikere hvordan rekkevidden til plattformen påvirkes sammenlignet med en dieseldrevet plattform. Påvirkningen på rekkevidde er basert på energitettheten til hver enkelt energibærer i forhold til diesel, som evaluert i tabell 4.1. En mørkegrønn hake indikerer at energitettheten er høyere enn diesel<sup>35</sup> og at plattformen får økt rekkevidde, mens en gul hake indikerer at energitettheten er lavere enn diesel og at plattformen får redusert rekkevidde.

Inndelingen i tabell 5.1 er basert på operasjonsdomene og plattformstørrelse/-tyngde. Størrelse er en kontinuerlig variabel, og det fastslås ikke her et klart skille mellom store og små plattformer. For å sikre en felles forståelse av begrepene kan det gis noen eksempler. Eksempler på tunge/pansrede kjøretøy er stridsvogner, stormpanservogner og lastevogner, mens eksempler på lette/upansrede kjøretøy er feltvogner, biler og ubemannede kjøretøy. Eksempler på store fartøy er fregatter, korvetter og ubåter, mens eksempler på små fartøy er stridsbåt 90 og mindre båter, herunder ubemannede fartøy. Eksempler på store luftfartøy er kampfly, overvåkningsfly, transportfly og helikoptre, mens eksempler på små luftfartøy er droner og småfly<sup>36</sup>.

Batteridrevet framdrift preges sterkt av batterienes lave energiinnhold. I alle domenene vurderes batterier som uaktuelle for de tyngste og største plattformene. Tunge/pansrede kjøretøy, store fartøy og store luftfartøy krever så mye framdriftsenergi at bruk av batterier medfører svært dårlig plassutnyttelse og en urimelig høy totalvekt. I sivil sektor benyttes batteridrevet framdrift på

---

<sup>35</sup>I dette delkapitlet bruker vi begrepet diesel, men vi snakker i praksis om flytende hydrokarboner, herunder flydrivstoffet NATO F-34.

<sup>36</sup>En vanlig definisjon på småfly er fly med en maksimal avgangsvekt på 5700 kg eller mindre (*Light aircraft* 2023).

		Energibærere						
		Batterier	Hydrogen	Ammoniakk	Kjernebrensel	Metan	Diesel	Metanol
Land	Tunge/pansrede kjøretøy	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	Lette/upansrede kjøretøy	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Sjø	Store fartøy	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Små fartøy	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Luft	Store luftfartøy	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	Små luftfartøy	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓

Tabell 5.1 Vurdering av hvilke energibærere som er aktuelle for ulike militære plattformer. Fargene mørk grønn, lys grønn og gul indikerer om plattformen får henholdsvis økt, uendret eller redusert rekkevidde sammenlignet med en dieseldrevet plattform. Vurderingen inkluderer ikke hybride driftsalternativer.

enkelte tunge kjøretøy og store fartøy, men disse opererer med faste kjøreruter og/eller forutsigbare ladesykluser. En slik forutsigbarhet er ikke hensiktsmessig i forsvarssammenheng. Videre bør det påpekes at vurderingen presentert i tabell 5.1 ikke innebærer hybrid drift hvor en plattform veksler mellom å hente energi fra batterier og én eller flere andre energibærere. Hybrid drift kan være svært fordelaktig og er definitivt aktuelt også for de tyngste og største plattformene. For mindre plattformer er derimot ren batteridrift aktuelt i samtlige operasjonsdomener. Her er behovet for framdriftsenergi mindre og batterier er aktuelle grunnet høy energieffektivitet og andre operative fordeler, for eksempel fordelen med lav signatur fra elektriske motorer.

Hydrogendrevet framdrift vurderes som aktuelt i samtlige plattformkategorier i tabell 5.1, men lagring av hydrogen er så teknisk krevende at det slett ikke er egnet for absolutt alle plattformer. Spesielt for de aller minste plattformene er det lite gunstig at hydrogen enten krever tunge og robuste lagringstanker med ekstremt høyt trykk eller avanserte kjølesystemer for lagring i væskeform. Veldig høy spesifikk energi er det som skiller hydrogen fra flere av de andre energibærerne diskutert i denne rapporten. Denne egenskapen kan potensielt nyttiggjøres på plattformer hvor lav vekt er viktigere enn lite volum. Vekt er kritisk for luftfartøy, og det kan vurderes om eksempelvis overvåkningsfly skal drives på hydrogen. Et fly som benytter hydrogendrevne brenselceller vil være svært energieffektivt, ha lav signatur og bare avgir vanndamp til atmosfæren. Noe av utfordringen med å velge et drivstoff med lav vekt og stort volum er at en økning i volum indirekte også medfører en økning i vekt. Hvis konstruksjonen består av tunge, robuste materialer vil man ende opp med en høyere totalvekt til tross for at drivstoffet i seg selv veier betydelig mindre.

I likhet med hydrogen vurderes ammoniakkdrevet framdrift som aktuelt i alle plattformkategoriene i tabell 5.1. Ammoniakk er ikke veldig teknisk krevende å lagre, men det forutsetter noe større lagringstanker og veier mer sammenlignet med diesel. Med andre ord vil rekkevidden til en ammoniakkdrevne plattform være noe redusert kontra en tilsvarende dieseldrevet plattform. I sivil sektor er fokuset i stor grad rettet mot skipsfart når det snakkes om ammoniakk som drivstoff. For Forsvaret kan det derfor tenkes at teknologien i første omgang er mest aktuell for store fartøy, hvor

---

---

batterier og hydrogen ikke strekker til på grunn av for lav energitetthet. Ammoniakk kan enten forbrennes direkte eller benyttes som en hydrogenbærer. Det mest energieffektive alternativet er å benytte ammoniakk direkte i en brenselcelle som forsyner en elektrisk motor, men en slik løsning er teknisk krevende blant annet fordi brenselcellene krever høy driftstemperatur. Den dag i dag er lav teknologimodenhet en av de største utfordringen knyttet til ammoniakk. Til gjengjeld er søkelyset og forskningsaktiviteten så stor at ammoniakk om noen år trolig vil være et aktuelt drivstoff for store og små plattformer både på land, til sjøs og i luften.

Kjernebrensel er det alternativet med flest røde kryss i tabell 5.1. Det er med andre ord er det drivstoffet som er aktuelt i færrest plattformkategorier. Til tross for et svært kompakt drivstoff er teknologien relativt plasskrevende som en følge av krav til støttesystemer og sikringstiltak. Derfor vurderes kjernebrensel som uaktuelt i de minste plattformkategoriene. Videre krever teknologien stabile operasjonsforhold. Plattformer som opererer på land og i luften kan oppleve store vibrasjoner og forhold som gjør det svært utfordrende å operere med mobil kjernekraft. Konklusjonen blir dermed at framdrift basert på kjernekraft kun er aktuelt for store fartøy. Ved å ta i bruk kjernebrensel kan miljøutslipp fra Forsvarets fartøy reduseres betraktelig, samt at fartøyene i seg selv kan bli mindre avhengige av drivstofflogistikk.

Svært mange av Forsvarets plattformer drives i dag på drivstoff bestående av hydrokarboner, og det er av den grunn lett å argumentere for at metan og diesel er aktuelt i alle plattformkategoriene i tabell 5.1. En metandrevet plattform vil ha noe redusert rekkevidde sammenlignet med en tilsvarende dieseldrevet plattform. Til gjengjeld vil bio- og e-metan trolig være både mindre kostbart og mer miljøvennlig enn bio- og e-diesel. Bio- og e-diesel er de alternativene som er mest lavterskel å satse på, siden det ikke involverer noen betydelige strukturelle endringer for Forsvaret. Imidlertid har bio- og e-diesel utfordringer knyttet til bærekraft og kostnader som må tas i betraktning. Den primære energibæreren for framdrift bør derfor bare være bio- eller e-diesel dersom ingen av de andre alternativene strekker til. Dette vil typisk gjelde kompakte plattformer med høyt energiforbruk, som for eksempel kampfly.

Metanol er den siste energibæreren som er vurdert i tabell 5.1. Metanol har lavere energiinnhold enn diesel og rekkevidden til en metanoldrevet plattform vil derfor være noe redusert sammenlignet med en tilsvarende dieseldrevet plattform. En stor fordel med metanol kontra metan, hydrogen og ammoniakk er at det er en væske ved romtemperatur og atmosfærisk trykk. Dette forenkler kravene til lagring og gjør at metanol er svært aktuelt for både små og store plattformer i alle operasjonsdomener. Metanol kan benyttes direkte i forbrenningsmotorer og brenselceller, eller indirekte som drivstoff til hydrogendrevne framdriftssystemer. Hydrogen kan hentes ut relativt energieffektivt, hvilket tyder på at metanol kan være en mer gunstig hydrogenbærer enn for eksempel ammoniakk.

Et aspekt ved tabell 5.1, som man raskt legger merke til, er dominansen til de gulfargede markørene som indikerer redusert rekkevidde. Det er viktig å nyansere disse betraktningene for ikke å undergrave alle alternativene til fordel for diesel. Som beskrevet over er redusert rekkevidde her basert på at energibæreren har lavere energitetthet enn diesel. I praksis betyr ikke lavere energitetthet nødvendigvis redusert rekkevidde. Det betyr bare at plattformen må utformes annerledes for å oppnå tilsvarende rekkevidde, enten ved å vie større plass til drivstoff eller ved å redusere plattformens totalvekt. I tillegg må drivstofflogistikk tas med i betraktningen når det snakkes om rekkevidde. I teorien kan en plattform med dårligere lagringskapasitet ha minst like god rekkevidde dersom plattformen evner å produsere sitt egen drivstoff mens den opererer. Dette er enkelt å

praktisere for batteridrevet framdrift med for eksempel solceller, men det vil også kunne være aktuelt for hydrogendrevet framdrift og andre kjemiske stoffer etterhvert som teknologien for e-drivstoffproduksjon videreutvikles.

## 5.2 Energikilder for base- og systemdrift

Forsvaret er også avhengig av store mengder energi som benyttes til andre formål enn framdrift. For å kunne drifte baser og systemer er det kritisk å ha kontinuerlig tilgang til energi. I mange tilfeller er kilden til energi det nasjonale strømmettet, men dette er ikke en kilde som er tilgjengelig overalt. I tillegg er det en sårbarhet dersom viktige systemer er fullstendig avhengige av tilgang til strømmettet. Ved fysisk sabotasje av strømmettet og/eller cyberangrep mot systemene som drifter nettet er det svært verdifullt om Forsvarets systemer evner å være selvforsynte med energi. I dag bruker Forsvaret dieselaggregater for nødstrøm. For at et system skal være selvforsynt trenger det energiproduksjon og energilagring. En rekke nullutlippsteknologier for produksjon og lagring som kan understøtte selvforsyning er omtalt i denne rapporten. I tabell 5.2 presenteres en vurdering av hvilke teknologier ulike militære systemer kan dra nytte av. For energiproduksjon vurderes her fornybar kraft og kjernekraft. Med kjernekraft mener vi her ikke bare konvensjonelle reaktorer, men også potensielt nukleære batterier som beskrevet i boks 3.2. For energilagring vurderes batterier og kjemisk lagring. Med kjemisk lagring siktes det her til energilagring ved bruk av hydrogen, ammoniakk, metan, metanol eller tilsvarende kjemiske stoffer. Som beskrevet i avsnitt 3.1.2 finnes det langt flere energilagringmetoder, deriblant mekanisk og termisk lagring, men disse har ikke blitt omtalt ytterligere i denne rapporten og er derfor ikke tatt med i tabell 5.2.

	Energiproduksjon		Energilagring	
	Fornybar kraft	Kjernekraft	Batterier	Kjemisk lagring
<b>System</b> Stasjonær infrastruktur/EBA	✓	✓	✓	✓
Mobil infrastruktur/EBA	✓	✓	✓	✓
Stasjonære bakkesensorer	✓	✓	✓	✗
Satellitter	✓	✓	✓	✗

Tabell 5.2 Vurdering av hvilke teknologier for energiproduksjon og energilagring som er aktuelle for å drifte ulike militære systemer.

Det er naturligvis aktuelt å produsere energi til stasjonær infrastruktur og EBA<sup>37</sup> med fornybar kraft. Avhengig av lokasjon og størrelsesorden kan både sol-, vind- og vannkraft vurderes. Topografi og lokale forhold spiller en viktig rolle. Langt mot nord er solkraft dårlig egnet på grunn av lite sol gjennom vinterhalvåret. Vindkraft er velegnet på svært mange lokasjoner, forutsatt at systemet evner å lagre energi til perioder uten vind. Vannkraft er mer forutsigbart, men kun aktuelt på lokasjoner hvor topografien tillater det. Jo mer nærliggende kraftproduksjonen kan være, jo lettere er det å beskytte mot fysisk sabotasje på kraftforsyningen. Kjernekraft er et alternativ som ikke avhenger like sterkt av topografi og lokale forhold. Med egen kjernekraft kan stasjonær infrastruktur

<sup>37</sup>EBA: Eiendom, bygg og anlegg.

---

---

og EBA være selvforsynt med energi over svært lang tid. Når det gjelder energilagring er både batterier og kjemisk lagring aktuelt. Dersom det er snakk om infrastruktur og EBA med relativt stort energibehov og/eller behov for langtidslagring av energi er det ikke hensiktsmessig med batterier alene. En stor batteribank vil være kostbar, plasskrevende og over tid lite energieffektiv. Kjemisk lagring er bedre egnet for storskala energilagring over lengre tid. Hydrogen vil her være en av de energibærerne som mest energieffektivt kan transformeres til og fra elektrisitet, men valg av energibærer må gjøres basert på tilgjengelig lagringsplass og teknologisk egnethet i forhold til systemets energibehov, bruksmønster og operative krav. Det kan også tenkes at valget av energibærer for base- og systemdrift bør gjøres basert på hvilken energibærer tilknyttede plattformer benytter til framdrift. Om et system og en plattform benytter samme energibærer vil man oppnå energilagring og drivstoffproduksjon i samme prosess. Det kan gi stordriftsfordeler, økt forsyningssikkerhet og en helhetlig struktur med bedre operativ evne.

For mobil infrastruktur og EBA er mulighetsrommet noe mindre sammenlignet med stasjonære systemer. For å kunne forflytte seg effektivt stilles det strengere krav til energiteknologiene som benyttes, deriblant at de ikke må være for plasskrevende eller for komplekse. Kompleksitet spiller en rolle i den forstand at energiløsningene må være enkle å sette opp og enkle å drifte. Fornybar kraftproduksjon i form av sol- og vindkraft er aktuelt for mobile systemer. Solceller og vindturbiner blir stadig mer energieffektive og tilpasningsdyktige. Videre er kjernekraft en alternativ kilde til energi for mobile systemer. Aktualiteten til kjernekraft demonstreres blant annet gjennom mikroreaktorsatsningen til det amerikanske forsvarsdepartementet, omtalt i avsnitt 3.4.4. For energilagring er både batterier og kjemisk lagring aktuelt. På lik linje med stasjonære systemer er batterier alene ikke tilstrekkelig for mobile systemer med behov for langtidslagring av store mengder energi. Et slikt behov kan i større grad imøtekommes med kjemisk lagring. Også her må valget av energibærer gjøres basert på systemets operative krav, og eventuelt hvilken energibærer tilknyttede plattformer benytter seg av.

For avsidesliggende og stasjonære bakkesensorer er fornybar kraftproduksjon aktuelt. Avhengig av lokasjon kan både sol-, vind- og vannkraft benyttes. Når det gjelder kjernekraft har ikke en enkeltstående sensor stort nok energibehov til å berettige en mikroreaktor. Derimot er nukleære batterier et alternativ som kan gi konstant energitilførsel over svært lang tid, men det er store begrensninger på hvor dette kan anvendes for ikke å risikere spredning av radioaktivt materiale. Videre må sensoren ha en batteribank for energilagring som er tilpasset energibehovet og -produksjonen. Jo mer variabel energiproduksjonen er, jo større lagringskapasitet må batteriene ha. Som vist i tabell 5.2 er kjemisk lagring vurdert til ikke å være aktuelt. Det er ikke hensiktsmessig å opprette et eget anlegg for kjemisk lagring til en enkeltsensor. Dersom behovet for energilagring er så stort at batterier ikke strekker til vil det være mer hensiktsmessig å velge en annen type energiproduksjon eller å bygge ut kraftforsyning til sensoren fra det mest nærliggende strømmettet.

Satellitter et det siste militære systemet som er vurdert i tabell 5.2. Det bør påpekes at det her siktes til mindre satellitter og for eksempel ikke bemannede romstasjoner. Eventuelle framdriftssystemer en satellitt kan ha ombord vurderes heller ikke. Til energiproduksjon kan fornybar kraft fra solceller benyttes samt kjernekraft i form av nukleære batterier. Til energilagring benyttes batterier. Kjemisk lagring er ikke hensiktsmessig, blant annet grunnet lavere energieffektivitet og høyere systemkompleksitet i forhold til batterilagring.

Tabell 5.2 demonstrerer at svært mange av Forsvarets baser og systemer kan dra nytte av grønn teknologi. Sett i sammenheng med tabell 5.1 dannes et bilde av de utallige teknologiske mulighetene

---

---

og de aktuelle bruksområdene for Forsvaret. Spørsmålet videre blir da hvilke av mulighetene som bør prioriteres. Hvilke satsningsområder kan gi Forsvaret størst gevinst? Dette er diskusjonsgrunnlaget i neste kapittel.



---

---

## 6 Diskusjon

Som vi har sett er det mange aktuelle anvendelsesområder for nullutslippsteknologi i Forsvaret. I dette kapittelet diskuterer vi noen mulige operative konsekvenser og legger opp til en diskusjon rundt hvilke teknologier Forsvaret burde satse på i framtiden.

### 6.1 Kan nullutslippsteknologi redusere Forsvarets logistikkbehov?

Logistikkjeden<sup>38</sup> er et attraktivt mål i en militær konflikt. Suksessfulle angrep mot logistikkjeden kan gi store utslag på slagmarken, og beskyttelse av logistikkjeden binder store militære ressurser som ellers kunne vært brukt til andre formål. En militær styrke som greier å redusere logistikkbehovet sitt vil derfor oppnå en stor operativ fordel.

Det å erstatte fossile drivstoff med ikke-fossile energibærere reduserer ikke nødvendigvis logistikkbehovet. Tvert om kan dette øke dersom det alternative drivstoffet har lavere energiinnhold og må transporteres til felt i større kvanta på samme måte som fossilt drivstoff. For å redusere logistikkbehovet må Forsvaret enten: 1) redusere energibruken, eller 2) produsere deler av energien/drivstoffet selv:

- 1) En reduksjon i energibruken på Forsvarets mobile plattformer vil redusere drivstofforbruket og dermed logistikkbehovet. Dette kan gjøres direkte på eksisterende materiell gjennom batterihybridisering eller modifikasjoner som reduserer luft-/vannmotstand med mer. Det kan også gjøres ved å benytte alternative operasjonskonsepter. Et eksempel på dette kan være de nye mineryddesystemene som beregnet å kunne kutte drivstofforbruket fra minerydding med 80 % (Arnfinnsson og Kirkhorn 2021).
- 2) Hvis målet er å eliminere behovet for drivstofflogistikk må energien og drivstoffet produseres lokalt der det trengs. For luftfartøy blir dette hovedsakelig på flystasjonene, mens det for landmateriell blir i felt. For maritime fartøy blir det ombord på fartøyene. Mulighetene for selvforsyning av energi til luft-, land- og maritime operasjoner diskuteres videre i avsnittene som følger.

#### 6.1.1 Luftoperasjoner

Flydrivstoff i form av e-drivstoff kan tenkes å produseres lokalt på en flystasjon ved bruk av CO<sub>2</sub>-fangst fra luften (DAC) og Fischer-Tropsch-prosessen. Dette er imidlertid svært energikrevende, så det krever tilgang på store mengder lokalprodusert energi i form av fornybar energi eller kjernekraft. Kjernekraft vil gi mest stabil energitilgang. Av de fornybare energikildene vil vannkraft og bølgekraft også kunne gi stabil energitilgang, men disse vil være avhengige av lokale geografiske forhold og vil kanskje være utenfor flystasjonens sikringsområde.

---

<sup>38</sup>Drivstofflogistikk er en stor del av den operative logistikken, men langt i fra alt. Dette delkapittelet dreier seg utelukkende om drivstofflogistikk.

---

---

Videre er det mulig å produsere biodrivstoff med lokale avfallsressurser fra flystasjonen, men det er svært tvilsomt at dette alene kan dekke behovet for flydrivstoff. En form for fiksering av karbonet i lufta via fotosyntese, for eksempel ved bruk av alger, kan også være et alternativ i framtiden.

Et slikt konsept med egenprodusert flydrivstoff vil ikke bare kunne gjøre luftfartøyene klimanøytrale, det vil også sikre den operative evnen gjennom redusert sårbarhet i drivstofforsyningen.

### **6.1.2 Landoperasjoner**

For å dekke behovet for strøm, varme og kjøling kan mobile energiforsyningssystemer baseres på sol, vind og batterier. Flere steder i verden vil det kunne fungere godt til å levere energi til en mobil operasjonsbase. I mørketida i Nord-Norge er det derimot tvilsomt at dette vil gi tilstrekkelig forsyningssikkerhet alene. Et alternativ til energikilde i felt kan være en mobil mikroreaktor plassert i en container, slik som det amerikanske Project Pele skal utvikle. En slik løsning er væruavhengig og gir dermed god forsyningssikkerhet.

På samme måte som for flydrivstoff på en flystasjon kan drivstoff i teorien også produseres i felt. Dersom målet er å redusere behovet for drivstofflogistikk må produksjon av drivstoff i felt baseres på råvarer som er tilgjengelig lokalt i felt. Som minimum trengs luft og vann for å produsere hydrogen og ammoniakk. For å produsere hydrokarboner og alkoholer trengs også en karbonkilde, enten i form av biologisk materiale eller fanget CO<sub>2</sub> fra lufta. Biologisk materiale, som matavfall, kan benyttes, men vil være begrenset i volum. Mest sannsynlig vil man da trenge et mobilt system for å fange CO<sub>2</sub> fra lufta, og mobile energikilder. Det er tvilsomt/vanskelig å se for seg at det store energibehovet som dette medfører skal kunne dekkes av mobile fornybare energikilder alene, som solceller og mobile vindturbiner, selv om dette selvsagt er mulig i teorien. Et slikt konsept vil derfor trolig måtte være avhengig av energi fra en eller flere mikroreaktorer. Ikke bare vil dette gjøre landoperasjonene klimanøytrale, det vil innebære en stor operativ fordel ved å eliminere behovet for drivstofflogistikk.

Det er altså teoretisk mulig å redusere/eliminere behovet for drivstofflogistikk i felt, men det må gjøres grundigere analyser før man kan konkludere om hva slags drivstoff, råmaterialer og produksjonsmetoder som er mest hensiktsmessig. Det er også for tidlig å vurdere kostnadskonsekvenser av et slikt konsept.

### **6.1.3 Maritime operasjoner**

Egenprodusert energi fra sol og vind ombord på fartøy kan bidra til å dekke deler av energibehovet til Forsvarets fartøy og dermed redusere drivstofforbruket. Det er ikke realistisk at fornybare energikilder alene dekker hele energibehovet til Forsvarets fartøy. Dersom behovet for drivstofflogistikk skal elimineres til sjøs er det kun kjernekraft som har tilstrekkelig energitetthet til å kunne oppnå dette. Et mulig konsept kan være et forsyningsfartøy drevet av kjernekraft som produserer drivstoff ombord og opererer i en fartøysgruppe og forsyner denne med egenprodusert drivstoff. En mer direkte tilnærming vil være at alle fartøyene av tilstrekkelig størrelse selv er drevet av kjernefysisk framdrift. Dette vil gi større operativ fleksibilitet og eliminere behovet for drivstofflogistikk.

---

---

## 6.2 Viktige veivalg for Forsvaret

Forsvarssektorens klima- og miljøstrategi sier at klima og miljø skal vurderes på lik linje med tid, kostnad og ytelse (Forsvaret et al. 2022). Dette gir opphav til nye viktige og vanskelige avveininger.

### 6.2.1 Hvilke framdriftssystemer skal ny maritim overflatestruktur benytte?

Beslutning om ny maritim overflatestruktur er den enkeltbeslutningen som får størst konsekvens for forsvarssektorens direkte klimagassutslipp i tiårene framover (Skjelland et al. 2023). En videre satsning på hydrokarbonbasert framdrift gir fleksibilitet på kort og mellomlang sikt, men innebærer stor risiko for forsyningsikkerhet og kostnader på lang sikt. Forsvaret risikerer å bli stående igjen som den eneste eller én av svært få brukere av hydrokarboner til framdrift, og må muligens ta ansvar for forsyning av dette selv, for eksempel gjennom egne produksjonsanlegg for e-drivstoff.

En satsning på kjernefysisk framdrift for ny overflatestruktur innebærer en risiko knyttet til tid og kostnader. Imidlertid gir denne løsningen best operativ evne på lang sikt.

En satsning på alternative energibærere som hydrogen, ammoniakk eller alkoholer framstår prematurt for Forsvaret i dagens situasjon, men det kan ikke utelukkes på lengre sikt. Her blir utviklingen i sivil sektor en avgjørende premissleverandør. Selv om disse drivstoffene reduserer operativ evne i form av utholdenhet (mindre energi per volumenhet drivstoff) kan det muligens veies opp for av lavere kostnader, økt tilgjengelighet og robusthet i forsyningskjeden en gang i fremtiden. Med andre ord, hvis karbonbasert drivstoff blir veldig dyrt og utilgjengelig er det ikke sikkert at det har noen betydning at drivstoffet har litt høyere energiinnhold. Et alternativ som er verdt å vurdere er muligheten for *dual-fuel*-framdriftssystemer, det vil si framdriftssystemer som kan gå på to ulike drivstoff, for eksempel både dagens fossile MGO og enten ammoniakk eller metanol.

### 6.2.2 Hvordan skal Forsvaret forsynes med flydrivstoff?

For flydrivstoff er flytende hydrokarboner i form av e-drivstoff eller biodrivstoff de eneste hensiktsmessige alternativene til fossile drivstoff i overskuelig framtid. Her er det viktige avveininger mellom forsyningsikkerhet og kostnader som må gjøres. Skal forsvarssektoren lene seg på sivile leverandører som i dag, eller ta et større ansvar for å produsere eget drivstoff selv, og slik kunne sikre både forsyningsikkerhet og bærekraft i verdikjeden? Hvor mye mer er Forsvaret villige til å betale per liter drivstoff for et slikt konsept?

### 6.2.3 Er det aktuelt med drivstoffproduksjon i felt?

Skal forsvarssektoren satse på et konsept for drivstoffproduksjon i felt? Dette kan gi store operative fordeler hvis det lar seg realisere, men det gjenstår framdeles mye utredningsarbeid før et slikt konsept kan besluttes og realiseres. Trolig blir kjernekraft en nødvendig brikke i et slikt konsept.

---

---

#### 6.2.4 Er det aktuelt med militær bruk av kjernekraft?

Kjernefysisk framdrift, mobile mikroreaktorer og produksjon av drivstoff ved bruk av kjernekraft kan gi store operative fordeler, men kostnadene for slike system er foreløpig ukjent. Å ta i bruk kjernefysisk teknologi i militær sammenheng krever også avveininger av andre faktorer enn de rent teknologiske som diskuteres i denne rapporten.

#### 6.2.5 Vil NATO endre drivstoffpolicy?

NATO har en drivstoffpolicy som går ut på at det skal være ett og samme drivstoff, et enhetsdrivstoff, som benyttes av alle land og systemer. Dette refereres til som NATOs *single fuel policy*. Enhetsdrivstoffet har NATO-betegnelsen F-34<sup>39</sup>. For eksempel stilles det som krav i anskaffelsesprosjekter at materiellet kan benytte dette drivstoffet. I praksis er det ikke alltid det blir brukt, for eksempel bruker norsk landmateriell som regel et drivstoff betegnet F-35<sup>40</sup>, og norske fartøy går som regel på sivilt MGO.

Teknisk sett kan biodrivstoff og e-drivstoff godkjennes som enhetsdrivstoffet F-34, så lenge riktig innhold og ytelse kan dokumenteres. Andre alternative energibærere, som ammoniakk, hydrogen og metanol, vil ikke være forenelig med NATOs drivstoffpolicy. Imidlertid er det viktig å være bevisst på at dette ikke nødvendigvis er en begrensning som er umulig å fravike. Eksempelvis vil de tysk-norske ubåtene som er i ferd med å anskaffes, få to framdriftssystemer, ett for fossilt drivstoff/hydrokarboner, og ett for hydrogen. Sistnevnte benyttes for såkalt *air-independent propulsion* (AIP). Så lenge volumet og bredden av alternative drivstoff er lav er trolig dette noe NATO kan leve med. Ved større inntog av flere alternative drivstoff kan det imidlertid bli et reelt operativt problem. Derfor kan det bli nødvendig at NATO justerer sin drivstoffpolicy for å styre innføringen av alternative drivstoff, slik at man unngår at nasjonene velger ulike løsninger.

---

<sup>39</sup>Omtales også som Jet fuel JP-8.

<sup>40</sup>F-35 tilsvarer sivilt flydrivstoff, JET A1. F-34 består av F-35 + additiver.

---

---

## 7 Oppsummering og anbefalinger

I denne rapporten har vi vurdert elektrisitet, hydrogen, ammoniakk, hydrokarboner og alkoholer som mulige alternative energibærere, og elektrisitet fra fornybar energi og kjernekraft som alternative energikilder.

Av de kjemiske alternative energibærerne er det kun hydrokarboner (biodrivstoff og e-drivstoff) som har tilsvarende energiinnhold som de fossile drivstoffene Forsvaret benytter i dag. Ammoniakk og metanol har lavere energiinnhold målt både per masseenhet og per volumenhet. Hydrogen har høyere energiinnhold per masseenhet, men krever kraftig nedkjøling eller komprimering for ikke å okkupere et enormt volum. Dette bidrar til økt vekt, som i praksis reduserer energiinnholdet per massenhet for hydrogen. Lavere energiinnhold resulterer i dårligere rekkevidde og dermed redusert operativ evne. Biodrivstoff og e-drivstoff framstår dermed som de mest praktiske løsningene for Forsvaret, men det er store utfordringer knyttet til bærekraft, oppskalering av produksjon og kostnader. Vi anbefaler at forsvarssektoren iverksetter forskning, utvikling og eksperimentering med bærekraftig biodrivstoff og e-drivstoff, og vurderer egne produksjonsanlegg for økt forsyningssikkerhet. I tillegg anbefaler vi at forsvarssektoren vurderer *dual-fuel*-framdriftssystemer som kan benytte både dagens drivstoff og alternative drivstoff.

Kjernefysisk energi og framdrift skiller seg ut med et enormt høyt energiinnhold sammenlignet med alle alternativene, inkludert dagens fossile drivstoff. Imidlertid er det kun praktisk egnet for bruk til framdrift på relativt store fartøy. Det kan også tenkes å utnytte kjernekraft til energiforsyning i felt og til produksjon av drivstoff. Vi anbefaler en grundigere utredning av militær bruk av kjernekraft som inkluderer tekniske, samfunnsmessige og sikkerhetspolitiske forhold. Samtidig anbefaler vi at kjernefysisk framdrift vurderes i arbeidet med ny overflatestruktur, og at dette sees i sammenheng med den anbefalte utredningen.

Fornybare energikilder som sol- og vindkraft kan bidra til lokal energiproduksjon på baser og i felt. Væravhengigheten til disse energikildene gjør at man er avhengig av flere komplementære energikilder, energilagring og/eller elektrisitetsnettet for å oppnå tilfredsstillende energiforsyning. Vi anbefaler at det utvikles konsepter og gjennomføres forsøk med fornybar energiforsyning i felt.

Elektrisitet lagret i elektrokjemiske batterier som driver elektriske motorer representerer det mest energieffektive alternativet for å konvertere energi til framdrift. På grunn av det lave energiinnholdet til batterier er det imidlertid store begrensninger på hva som utelukkende kan gå på elektrisitet i Forsvaret, selv om det finnes flere anvendelser hvor det er godt egnet. I tillegg er batterihibridisering svært aktuelt for de fleste typer plattformer, og kan potensielt både øke operativ evne og redusere kostnader. Vi anbefaler en økt satsing på batteriteknologi i forsvarssektoren, særlig knyttet til batterihibridisering av eksisterende og nytt materiell, og for energilagring i felt.

Den teknologiske utviklingen går fort innen klimavennlig teknologi. Vurderingene vi har gjort i denne rapporten vil ikke stå seg til evig tid. Det er derfor viktig å følge den teknologiske utviklingen nøye. Sivilsamfunnets overgang til alternative energikilder og energibærere vil endre Forsvarets rammebetingelser i form av tilgjengelighet og kostnader for drivstoff. Til syvende og sist er Forsvaret nødt til å endre seg. Spørsmålet som gjenstår er om Forsvaret skal vente på resten av samfunnet, eller innta en proaktiv holdning og være med å påvirke når og hvordan endringene skjer.

---

---

## Referanser

- Acar, Canan og Ibrahim Dincer (2019). «Review and evaluation of hydrogen production options for better environment». I: *Journal of Cleaner Production* 218, s. 835–849.
- Adhikari, Umesh, Marianne S. Eikeland og Britt M. Halvorsen (2015). «Gasification of biomass for production of syngas for biofuel». I: DOI: 10.3384/ecp15119255. URL: <https://ep.liu.se/ecp/119/025/ecp15119025.pdf>.
- Adolf, Jörg, Wolfgang Warnecke, Christoph Balzer, Xiao Fu, Gerd Hagenow, Yasmin Hemberger, Andreas Janssen, Mark Klokkenburg, Alexander Made og Tyrone McKnight (2018). *The route of sustainable fuels as the basis for zero emission mobility – Has PtX a chance?* Paper presented at the 39th International Vienna Motor Symposium. Shell Global.
- Airbus (2003). *Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. Cryoplane*. Teknisk sluttrapport. Airbus Deutschland GmbH.
- Akhlaghi, Neda og Ghasem Najafpour-Darzi (2020). «A comprehensive review on biological hydrogen production». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 45, s. 22492–22512.
- Alves, Mariana Pimenta, Waseem Gul, Carlos Alberto Cimini Junior og Sung Kyu Ha (2022). «A Review on Industrial Perspectives and Challenges on Material, Manufacturing, Design and Development of Compressed Hydrogen Storage Tanks for the Transportation Sector». I: *Energies* 15. Artikkel 5152.
- Analysgruppen (2005). *Uran - en uthållig energikälla*. 1. URL: <https://analys.se/wp-content/uploads/2015/05/uran-en-uthallig-energikalla-bakgrund2005-1.pdf>.
- AP og SP (2021). *Hurdalsplattformen. for en Regjering utgått fra Arbeiderpartiet og Senterpartiet*.
- ARES (2022). *Advanced Rail Energy Storage – The Power of Gravity*. Advanced Rail Energy Storage LLC. URL: <https://aresnorthamerica.com/> (lest 04.08.2022).
- Arnfinnsson, Brynjar og Simen A. Kirkhorn (2021). *Hvordan kan Forsvaret redusere utslipp av drivhusgasser? – en funksjonell studie*. FFI-rapport 21/01488. Forsvarets forskningsinstitutt. URL: <https://www.ffi.no/publikasjoner/arkiv/hvordan-kan-forsvaret-kutte-utslipp-av-drivhusgasser-en-funksjonell-studie>.
- Arvesen, Anders, Ingrid Bjerke Hauan, Bernhard Mikal Bolsøy og Edgar G. Hertwich (2015). «Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway». I: *Applied Energy* 157, s. 144–151.
- Asghari, Elnaz, Muhammad Imran Abdullah, Faranak Foroughi, Jacob J. Lamb og Bruno G. Pollet (2022). «Advances, opportunities, and challenges of hydrogen and oxygen production from seawater electrolysis: An electrocatalysis perspective». I: *Current Opinion in Electrochemistry* 31. Artikkel 100879.
- Ayub, Hafiz Muhammad Uzair, Sang Jin Park og Michael Binns (2020). «Biomass to Syngas: Modified Stoichiometric Thermodynamic Models for Downdraft Biomass Gasification». I: *Energies* 13. DOI: 10.3390/en13205383.

- 
- 
- Aziz, Muhammad (2021). «Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety». I: *Energies* 14. Artikkel 5917.
- Aziz, Muhammad, Agung Tri Wijayanta og Asep Bayu Dani Nandiyanto (2020). «Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization». I: *Energies* 13. Artikkel 3062.
- Bargiacchi, Eleonora, Marco Antonelli og Umberto Desideri (2019). «A comparative assessment of Power-to-Fuel production pathways». I: *Energy* 183, s. 1253–1265.
- Baroutaji, Ahmad, Tabbi Wilberforce, Mohamad Ramadan og Abdul Ghani Olabi (2019). «Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, s. 31–40.
- Betz, Albert (2013). «The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor». I: *Wind Engineering* 37.4, s. 441–446. Oversettelse av: «Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren». Zeitschrift für das gesamte Turbinwesen, heft 26, seiten 307 bis 309, 1920.
- Boateng, Emmanuel og Aicheng Chen (2020). «Recent advances in nanomaterial-based solid-state hydrogen storage». I: *Materials Today Advances* 6. Artikkel 100022.
- Botha, C.D. og M.J. Kamper (2019). «Capability study of dry gravity energy storage». I: *Journal of Energy Storage* 23, s. 159–174.
- Breuer, Janos Lucian, Juri Scholten, Jan Christian Koj, Felix Schorn, Marc Fiebrandt, Remzi Can Samsun, Rolf Albus, Klaus Görner, Detlef Stolten og Ralf Peters (2022). «An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany». I: *Energies* 15. Artikkel 1443.
- Brown, Adam, Lars Waldheim, Ingvar Landälv, Jack Saddler, Mahmood Ebadian, James D. McMillan, Antonio Bonomi og Bruno Klein (2020). *Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction*. Task 41: 2020:01. IAE Bioenergy. URL: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41\\_CostReductionBiofuels-11\\_02\\_19-final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf).
- Brynnolf, Selma, Maria Taljegard, Maria Grahn og Julia Hansson (2018). «Electrofuels for the transport sector: A review of production costs». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, s. 1887–1905. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309358>.
- Buchmann, Isidor (2021). *Learn About Batteries*. Battery University. URL: <https://batteryuniversity.com/articles> (lest 08.12.2022).
- Budinis, Sara (2022). *Direct Air Capture. Technological deep dive*. URL: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>.
- Bøeng, Ann Christin (19. okt. 2022). «Utfordringer med fornybart drivstoff». I: URL: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/artikler/utfordringer-med-fornybart-drivstoff> (lest 07.02.2023).
- Cai, Andrew og Zoe Rozario (2022). «Direct Ammonia Fuel Cells – A general overview, current technologies and future directions». I: *Johnson Matthey Technology Review* 66, s. 479–489.

- 
- 
- CGSB (2020). *Aviation turbine fuel (Military grades F-34, F-37 and F-44)*. National Standard of Canada CAN/CGSB-3.24-2020. Canadian General Standards Board.
- Choubey, Gautam, Yuvarajan D, Wei Huang, Li Yan, Houman Babazadeh og K.M. Pandey (2020). «Hydrogen fuel in scramjet engines - A brief review». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 45, s. 16799–16815.
- Christiansen, Petter N. og Julie Alexandra Lie Pau (5. jan. 2023). *Hva lønner seg egentlig mest av elbil og fossilbil?* KlimaOslo. URL: <https://www.klimaoslo.no/2023/01/05/hva-lonner-seg-egentlig-mest-av-elbil-og-fossilbil/> (lest 24.02.2023).
- Colthorpe, Andy (2022a). *Expansion plan to take world's biggest battery storage project to 3 GWh capacity*. Nyhetsartikkel, Energy Storage News. Solar Media Limited. URL: <https://www.energy-storage.news/expansion-plan-to-take-worlds-biggest-battery-storage-project-to-3gwh-capacity/> (lest 30.06.2022).
- Colthorpe, Andy (6. des. 2022b). *Lithium battery pack prices go up for first time since BloombergNEF began annual survey*. Energy Storage News. URL: <https://www.energy-storage.news/lithium-battery-pack-prices-go-up-for-first-time-since-bloombergnef-began-annual-survey/> (lest 24.02.2023).
- Contreras, Eva, Javier Herrero, Louise Crochemore, Ilias Pechlivanidis, Christiana Photiadou, Cristina Aguilar og María José Polo (2020). «Advances in the Definition of Needs and Specifications for a Climate Service Tool Aimed at Small Hydropower Plants' Operation and Management». I: *Energies* 13. Artikkel 1827.
- CORDIS (2005). *Liquid hydrogen fuelled aircraft - system analysis (CRYOPLANE)*. Community Research og Development Information Service. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/G4RD-CT-2000-00192> (lest 14.10.2022).
- Dawood, Furat, Martin Anda og G.M. Shafiullah (2020). «Hydrogen production for energy: An overview». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 45, s. 3847–3869.
- Dehghani-Sanij, A.R., E. Tharumalingam, M.B. Dusseault og R. Fraser (2019). «Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104, s. 192–208.
- Deng, Jiao, Jesus A. Iñiguez og Chong Liu (2018). «Electrocatalytic Nitrogen Reduction at Low Temperature». I: *Joule* 2, s. 846–856.
- DNV (apr. 2023). *Alternative Fuels Insight Platform*. URL: <https://afi.dnv.com/> (lest 24.05.2023).
- DNV GL Energy (2020). *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet*. Rapport 2020-0919. DNV Group AS.
- Dumont, Olivier, Guido Francesco Frate, Aditya Pillai, Steven Lecompte, Michel De Paepe og Vincent Lemort (2020). «Carnot battery technology: A state-of-the-art review». I: *Journal of Energy Storage* 32. Artikkel 101756.
- Edlund, Dave (26. mai 2021). *Methanol-to-Hydrogen Generators*. The Methanol Pathway to Hydrogen Webinar. Methanol Institute. URL: <https://www.methanol.org/fuel-cells/> (lest 31.05.2023).



- 
- 
- El Kharbachi, A., O. Zavorotynska, M. Latroche, F. Cuevas, V. Yartys og M. Fichtner (2020). «Exploits, advances and challenges benefiting beyond Li-ion battery technologies». I: *Journal of Alloys and Compounds* 817. Artikkel 153261.
- Elberry, Ahmed M., Jagruti Thakur, Annukka Santasalo-Aarnio og Martti Larmi (2021). «Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 46, s. 15671–15690.
- El-Emam, Rami S. og Hasan Özcan (2019). «Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production». I: *Journal of Cleaner Production* 220, s. 593–609.
- Enova (22. jun. 2023). *Kostnader for hydrogenproduksjon fra kraft i Norge. En studie basert på modne prosjekter fra markedet i 2022*. Innsiktsrapport.
- EPA (2022a). *Overview of Greenhouse Gases*. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (lest 20.03.2023).
- EPA (2022b). United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator#results> (lest 19.01.2023).
- ETIP Bioenergy (2023). *Methanol from Biomass Fact Sheet*. European Technology og Innovation Platform. URL: [https://www.etipbioenergy.eu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=331](https://www.etipbioenergy.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=331) (lest 24.05.2023).
- European Defence Agency (2017). *The use of alternative and synthetic fuels in the military*. Fact sheet. URL: <https://eda.europa.eu/docs/default-source/events/eden/phase-i/information-sheets/cf-sedss-information-sheet-use-of-alternative-and-synthetic-fuels.pdf>.
- Fairley, Peter (17. nov. 2022). «The biofuel course correction». I: *Nature*, S15–S17. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-03649-w>.
- Felseghi, Raluca-Andreea, Elena Carcadea, Maria Simona Raboaca, Cătălin Nicolae Trufin og Constantin Filote (2019). «Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications». I: *Energies* 12. Artikkel 4593.
- Forsvaret, Forsvarsbygg, Forsvarsmateriell og Forsvarets forskningsinstitutt, (2022). *Forsvarssektorens klima- og miljøstrategi*.
- Fujikawa, Shigenori og Roman Selyanchyn (2022). «Direct air capture by membranes». I: *MRS Bulletin* 47.4, s. 416–423. ISSN: 0883-7694. DOI: 10.1557/s43577-022-00313-6.
- Fulcrum BioEnergy (22. des. 2022). *Fulcrum BioEnergy Successfully Produces First Ever Low-Carbon Fuel from Landfill Waste at its Sierra BioFuels Plant*. Press release. URL: <https://www.fulcrum-bioenergy.com/news-resources/first-fuel>.
- GE (2021). *GE Renewable Energy's Haliade-X prototype starts operating at 14 MW*. Pressemelding. GE Renewable Energy. URL: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-renewable-energy-haliade-x-prototype-starts-operating-at-14-mw> (lest 30.05.2022).
- Grahl-Nielsen, Otto (2017a). *Alkoholer 2: Syntese og egenskaper til metanol*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6XfXF5DyH-4> (lest 24.05.2023).

- 
- Grahl-Nielsen, Otto (2017b). *Alkoholer 3: Etanol - Syntese og bruk*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tyxh-vCSrEE> (lest 24.05.2023).
- Gravitricity (2022). *Gravity energy storage – A new form of renewable energy storage to power a cleaner world*. Gravitricity Ltd. URL: <https://gravitricity.com/> (lest 04.08.2022).
- Haeussler, Anita, Stéphane Abanades, Anne Julbe, Julien Jounnaux og Bruno Cartoixa (2020). «Solar thermochemical fuel production from H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> splitting via two-step redox cycling of reticulated porous ceria structures integrated in a monolithic cavity-type reactor». I: *Energy* 201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117649>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220307568>.
- Handwerker, Michael, Jörg Wellnitz og Hormoz Marzbani (2021). «Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy». I: *Hydrogen* 2, s. 76–100.
- Heireng, Hege Schultz (2015). *Uranets vei til kjernekraft og kjernevåpen – en innføring i kjernefysisk fterbruksteknologi*. FFI-rapport 2015/01688. Forsvarets Forskningsinstitutt.
- Henriksen, Mette Eltvik, Nanna Moland Wahl, Carl Andreas Veie og Fredrik Arnesen (2020). *Turbinopprustinger kan øke produksjonen i norske vannkraftverk med fire terawattimer*. NVE fakta 3/2020. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- HFTO (2015). *Fuel Cells Fact Sheet*. Hydrogen og Fuel Cell Technologies Office. United States Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet> (lest 06.01.2023).
- Hill, Sir Robert, C. G. Hodge og T. Gibbs (2020). *The potential of the molten salt reactor for warship propulsion*. BMT Defence Services LTd, UK. URL: <https://thoriumenergyalliance.com/wp-content/uploads/2020/02/bmtdsl-molten-salt-reactor-confpaper-inemay12.pdf>.
- Hofstad, Knut (2022a). *Brennverdi*. I: *Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/brennverdi> (lest 18.01.2023).
- Hofstad, Knut (2022b). *Energivare*. I: *Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/energivare> (lest 08.12.2022).
- Hofstad, Knut (2022c). *Standard atmosfære*. I: *Store norske leksikon*. URL: [https://snl.no/standard\\_atmosf%C3%A6re](https://snl.no/standard_atmosf%C3%A6re) (lest 22.08.2022).
- Holtebekk, Trygve og Knut Hofstad (2022). *Mol*. I: *Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/mol> (lest 17.08.2022).
- HyDeal (2022). *Hydeal Ambition – Mass-scale green hydrogen hubs*. URL: <https://www.hydeal.com/hydeal-ambition> (lest 19.08.2022).
- Hänggi, Severin, Philipp Elbert, Thomas Bütler, Urs Cabalzar, Sinan Teske, Christian Bach og Christopher Onder (2019). «A review of synthetic fuels for passenger vehicles». I: *Energy Reports* 5, s. 555–569.
- IAEA (2017). *Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy*. Teknisk rapport NP-T-4.1. International Atomic Energy Agency.

- 
- 
- IAEA (2020). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Teknisk brosjyre. International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022 Edition*.
- IEA (2021a). *Ammonia Technology Roadmap*. Teknologirapport. International Energy Agency.
- IEA (2021b). *Global Hydrogen Review 2021*. Teknologirapport. International Energy Agency.
- IEA (2021c). *Hydropower Special Market Report. Analysis and forecast to 2030*. Brenselrapport. International Energy Agency.
- IEA (2021d). *Renewables 2021. Analysis and forecasts to 2026*. Brenselrapport. International Energy Agency.
- IEA (2022). *Electricity Market Report – January 2022*. Brenselrapport. International Energy Agency.
- IEA Bioenergy (2020). *Green methanol from biogas in Denmark. A versatile transport fuel. Case Story*. IEA Bioenergy: Task 37: 11 2020. URL: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/12/Case-Story-DK\\_-Green-Methanol\\_web-1.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/12/Case-Story-DK_-Green-Methanol_web-1.pdf).
- IRENA (2019). *Future of wind. Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Rapport. International Renewable Energy Agency.
- IRENA and Methanol Institute (2021). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. International Renewable Energy Agency. URL: [https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA\\_Innovation\\_Renewable\\_Methanol\\_2021.pdf](https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf).
- Ishaq, Haris, Ibrahim Dincer og Curran Crawford (2022). «A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 47, s. 26238–26264.
- Ji, Mengdi og Jianlong Wang (2021). «Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 46, s. 38612–38635.
- Joint Research Center, (2019). *Sustainable advanced biofuels. Technology development report*. DOI: doi:10.2760/95648. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118317>.
- Kakoulaki, G., I. Kougias, N. Taylor, F. Dolci, J. Moya og A. Jäger-Waldau (2021). «Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables». I: *Energy Conversion and Management* 228. Artikkel 113649.
- Kanchiralla, Fayas Malik, Selma Brynolf, Elin Malmgren, Julia Hansson og Maria Grahn (2022). «Life-Cycle Assessment and Costing of Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Shipping». I: *Environmental Science and Technology* 56, s. 12517–12531.
- Khalid, Muhammad (2019). «A Review on the Selected Applications of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Microgrids». I: *Energies* 12. Artikkel 4559.

- 
- 
- Klein, Tammy (feb. 2020). *Methanol: A Future-Proof Fuel. A primer prepared for the Methanol Institute. Future Fuel Strategies*. URL: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Future-Fuel-Strategies-Methanol-Automotive-Fuel-Primer.pdf>.
- Kofstad, Per K., Bjørn Pedersen, Trine Gravdal og Allkunne (2022a). *Hydrogen. I: Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/hydrogen> (lest 15.08.2022).
- Kofstad, Per K., Bjørn Pedersen, Trine Gravdal og Allkunne (2022b). *Nitrogen. I: Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/nitrogen> (lest 11.11.2022).
- Kouchachvili, Lia, Wahiba Yaïci og Evgueniy Entchev (2018). «Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles». I: *Journal of Power Sources* 374, s. 237–248.
- Köpke, Michael og Séan D Simpson (2020). «Pollution to products: recycling of ‘above ground’ carbon by gas fermentation». I: *Current Opinion in Biotechnology* 65, s. 180–189. ISSN: 0958-1669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.02.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166920300343>.
- Lanz, Andre, James Heffel og Colin Messer (2001). *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies – Module 1: Hydrogen Properties*. Course manual. College of the Desert.
- Li, Mengxiao, Yunfeng Bai, Caizhi Zhang, Yuxi Song, Shangfeng Jiang, Didier Grouset og Mingjun Zhang (2019). «Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 44, s. 10677–10693.
- Li, Xiaojun og Alan Palazzolo (2022). «A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities». I: *Journal of Energy Storage* 46. Artikkel 103576.
- Light aircraft* (2023). I: *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Light\\_aircraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Light_aircraft) (lest 31.05.2023).
- Lilliestam, Johan, Lana Ollier, Mercè Labordena, Stefan Pfenninger og Richard Thonig (2021). «The near- to mid-term outlook for concentrating solar power: mostly cloudy, chance of sun». I: *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy* 16.1, s. 23–41.
- Lovering, Jessica R., Arthur Yip og Ted Nordhaus (2016). «Historical construction costs of global nuclear power reactors». I: *Energy Policy* 91, s. 371–382. ISSN: 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516300106>.
- Ma, Jianmin, Yutao Li, Nicholas S Grundish, John B Goodenough, Yuhui Chen, Limin Guo, Zhangquan Peng, Xiaoqun Qi, Fengyi Yang, Long Qie, Chang-An Wang, Bing Huang, Zeya Huang, Linhui Chen, Dawei Su, Guoxiu Wang, Xinwen Peng, Zehong Chen, Junliang Yang, Shiman He, Xu Zhang, Haijun Yu, Chaopeng Fu, Min Jiang, Wenzhuo Deng, Chuan-Fu Sun, Qingguang Pan, Yongbing Tang, Xianfeng Li, Xiulei Ji, Fang Wan, Zhiqiang Niu, Fang Lian, Caiyun Wang, Gordon G Wallace, Min Fan, Qinghai Meng, Sen Xin, Yu-Guo Guo og Li-Jun Wan (2021). «The 2021 battery technology roadmap». I: *Journal of Physics D: Applied Physics* 54. Artikkel 183001.
- MacFarlane, Douglas R., Pavel V. Cherepanov, Jaecheol Choi, Bryan H.R. Suryanto, Rebecca Y. Hodgetts, Jacinta M. Bakker, Federico M. Ferrero Vallana og Alexandr N. Simonov (2020). «A Roadmap to the Ammonia Economy». I: *Joule* 4, s. 1186–1205.

- 
- 
- Mahmoud, Montaser, Mohamad Ramadan, Abdul-Ghani Olabi, Keith Pullen og Sumsun Naher (2020). «A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications». I: *Energy Conversion and Management* 210. Artikkel 112670.
- Małachowska, Aleksandra, Natalia Łukasik, Joanna Mioduska og Jacek Gębicki (2022). «Hydrogen Storage in Geological Formations – The Potential of Salt Caverns». I: *Energies* 15. Artikkel 5038.
- Manoharan, Yogesh, Seyed Ehsan Hosseini, Brayden Butler, Hisham Alzhahrani, Bhi Thi Fou Senior, Turaj Ashuri og John Krohn (2019). «Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect». I: *Applied Sciences* 9. Artikkel 2296.
- Mat Aron, Nurul Syahirah, Kuan Shiong Khoo, Kit Wayne Chew, Pau Loke Show, Wei-Hsin Chen og The Hong Phong Nguyen (2020). «Sustainability of the four generations of biofuels – A review». I: *International Journal of Energy Research* 44, s. 9266–9282.
- Matos, Catarina R., Júlio F. Carneiro og Patrícia P. Silva (2019). «Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification». I: *Journal of Energy Storage* 21, s. 241–258.
- Miljødirektoratet (2021). *Nitrogenoksid (NOx)*. Miljøstatus. URL: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/forurensning/sur-nedbor/nitrogenoksid-nox/> (lest 12.10.2022).
- Moradi, Ramin og Katrina M. Groth (2019). «Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 44, s. 12254–12269.
- Morlanés, Natalia, Sai P. Katikaneni, Stephen N. Paglieri, Aadesh Harale, Bandar Solami, S. Mani Sarathy og Jorge Gascon (2021). «A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies». I: *Chemical Engineering Journal* 408. Artikkel 127310.
- Mwasilu, Francis og Jin-Woo Jung (2019). «Potential for power generation from ocean wave renewable energy source: a comprehensive review on state-of-the-art technology and future prospects». I: *IET Renewable Power Generation* 13, s. 363–375.
- NAF (2023). *Alt du må vite om drivstoff*. URL: <https://nye.naf.no/bilhold/kostnader/alt-du-ma-vite-om-drivstoff> (lest 20.01.2023).
- NASA (2021). *Space Applications of Hydrogen and Fuel Cells*. National Aeronautics og Space Administration. URL: <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells> (lest 13.10.2022).
- NATO (2022). *Strategic concept*. URL: <https://www.nato.int/strategic-concept/>.
- NCBI (2022). *PubChem Compound Summary for CID 222, Ammonia*. National Center for Biotechnology Information. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonia> (lest 11.11.2022).
- Nguyen, T., Z. Abdin, T. Holm og W. Mérida (2019). «Grid-connected hydrogen production via large-scale water electrolysis». I: *Energy Conversion and Management* 200. Artikkel 112108.
- Norges vassdrags- og energidirektorat (2004). *Naturgass - en generell innføring*. 12.

- 
- 
- NREL (2021). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update*. National Renewable Energy Laboratory. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf> (lest 28.02.2023).
- NSF (2022). *Om solenergi – Solceller*. Norsk solenergiforening. URL: <https://www.solenergi.no/solstrm> (lest 31.05.2022).
- Nuclear accidents* (2022). I: *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_nuclear\\_and\\_radiation\\_accidents\\_by\\_death\\_toll](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nuclear_and_radiation_accidents_by_death_toll) (lest 15.02.2023).
- Olabi, A. G., Abdul Hai Alami, Shamma Alasad, Haya Aljaghoub, Enas Taha Sayed, Nabila Shehata, Hegazy Rezk og Mohammad Ali Abdelkareem (2022). «Emerging Technologies for Enhancing Microalgae Biofuel Production: Recent Progress, Barriers, and Limitations». I: *Fermentation* 8.11, s. 649. ISSN: 2311-5637. DOI: 10.3390/fermentation8110649.
- Our World in Data (2022). *Carbon intensity of electricity*. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity> (lest 15.06.2023).
- Our World in Data (2023a). *The price of batteries has declined by 97% in the last three decades*. URL: <https://ourworldindata.org/battery-price-decline> (lest 24.02.2023).
- Our World in Data (2023b). *What are the safest and cleanest sources of energy?* URL: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy> (lest 13.02.2023).
- Our World in Data (2023c). *What was the death toll from Chernobyl and Fukushima?* URL: <https://ourworldindata.org/what-was-the-death-toll-from-chernobyl-and-fukushima> (lest 13.02.2023).
- Park, Eun Soo og Tai Sik Lee (2021). «The rebirth and eco-friendly energy production of an artificial lake: A case study on the tidal power in South Korea». I: *Energy Reports* 7, s. 4681–4696.
- Pedersen, Bjørn (2022). *Ammoniakk*. I: *Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/ammoniakk> (lest 08.11.2022).
- Qin, Pengcheng, Hongmei Xu, Min Liu, Liangmin Du, Chan Xiao, Lüliu Liu og Brian Tarroja (2020). «Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation». I: *Journal of Hydrology* 580. Artikkel 123922.
- Rao, Linfeng (mar. 2010). «Recent International R&D Activities in the Extraction of Uranium from Seawater». I: DOI: 10.2172/1000969. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1000969>.
- Riede, Moritz, Donato Spoltore og Karl Leo (2021). «Organic Solar Cells – The Path to Commercial Success». I: *Advanced Energy Materials* 11. Artikkel 2002653.
- Riksgälden (31. jan. 2022). *Regeringen har beslutat kärnavfallsavgifter för 2022-2023 enligt Riksgäldens förslag*. URL: <https://www.riksdagen.se/sv/press-och-publicerat/pressmeddelanden-och-nyheter/pressmeddelanden/2023/regeringen-har-beslutat-karnavfallsavgifter-for-2022-2023-enligt-riksgaldens-forslag/> (lest 27.06.2023).
- Ryze (2023). *Technology*. Ryze Renewables Holdings. URL: <https://ryzerenewables.com/technology.html> (lest 30.01.2023).

- 
- Sahoo, Krishna Kalyani, Gargi Goswami og Debasish Das (2021). «Biotransformation of Methane and Carbon Dioxide Into High-Value Products by Methanotrophs: Current State of Art and Future Prospects». I: *Frontiers in Microbiology* 12. ISSN: 1664-302X. DOI: 10.3389/fmicb.2021.636486. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.636486>.
- Sandquist, Judit (19. des. 2017). *Alt du trenger å vite om biodrivstoff*. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/bioenergi/alt-du-trenger-vite-om-biodrivstoff/> (lest 24.05.2023).
- Schismenos, Spyros, Michail Chalaris og Garry Stevens (2021). «Battery hazards and safety: A scoping review for lead acid and silver-zinc batteries». I: *Safety Science* 140. Artikkel 105290.
- Schäppi, Remo, David Rutz, Fabian Dähler, Alexander Muroyama, Philipp Haueter, Johan Lilliestam, Anthony Patt, Philipp Furler og Aldo Steinfeld (2022). «Drop-in fuels from sunlight and air». I: *Nature* 601.7891, s. 63–68. ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/s41586-021-04174-y. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04174-y>.
- SGS (2020). *Methanol: Properties and uses*. Teknisk rapport. SGS Germany GmbH. URL: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/SGS-INSPIRE-Methanol-Properties-and-Uses.pdf> (lest 08.03.2023).
- Shell (2022). *Military Jet Fuel*. Shell Global. URL: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/military-jet-fuel-grades.html> (lest 08.12.2022).
- Shi, Ying, An-Fei Yang, Chun-Shuai Cao og Bin Zhao (2019). «Applications of MOFs: Recent advances in photocatalytic hydrogen production from water». I: *Coordination Chemistry Reviews* 390, s. 50–75.
- Siemens Energy (20. des. 2022). «A lighthouse project at the southern tip of Chile: Production starts at the world's first industrial-scale facility for carbon-neutral fuel». I: *Press release*. URL: <https://press.siemens-energy.com/global/en/pressrelease/lighthouse-project-southern-tip-chile-production-starts-worlds-first-industrial-scale>.
- Skjelland, Espen, Brynjar Arnfinnsson, Gunn Alice Birkemo, Karsten Bråthen, Sigurd Glærum, Emil Graarud, Una Hakvåg, Karina B. Klepper, Sverre N. Kvalvik, Martin V. Larsen, Michael J. Mayer, Mathias Minos-Stensrud, Ingunn Helene Landsend Monsen, Torgeir Mørkved, Erlend U. Nordvang, Ane O. Presterud, Stig-Rune Sellevåg, Cecilie Sendstad, Kajittha Sivathas, Kari Røren Strand, Aasmund Thuv og Jan-Erik Voldhaug (2023). *Forsvarsanalysen 2023*. FFI-rapport 23/00659. Forsvarets forskningsinstitutt. URL: <https://www.ffi.no/publikasjoner/arkiv/forsvarsanalysen-2023>.
- Slameršak, Aljoša, Giorgos Kallis og Daniel W. O'Neill (2022). «Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition». I: *Nature Communications* 13. Artikkel 6932.
- Soclema (2023). *Syngas, a renewable gas from biomass gasification*. URL: <https://soclema.com/en/applications/gaz-renouvelables/syngaz-issu-de-la-gazeification-de-la-biomasse/> (lest 16.01.2023).
- Sovacool, Benjamin K., Rasmus Andersen, Steven Sorensen, Kenneth Sorensen, Victor Tienda, Arturas Vainorius, Oliver Marc Schirach og Frans Bjørn-Thygesen (2016). «Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems». I:

- 
- 
- Journal of Cleaner Production* 112, s. 3952–3965. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.059>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615009877>.
- Stensvold, Tore (3. mar. 2023). *Kraftig oppsving for metanol som drivstoff*. Teknisk Ukeblad. URL: <https://www.tu.no/artikler/kraftig-oppsving-for-metanol-som-drivstoff/527284?key=9XQfaWuT> (lest 24.05.2023).
- Synhelion (15. des. 2022). *Synhelion raises CHF 22 million investment to drive the scaling of solar fuel production*. Press release. Synhelion. URL: <https://synhelion.com/news/synhelion-raises-chf-22-million-investment-to-drive-the-scaling-of-solar-fuel-production>.
- Tandberg, Erik (2021). *Mach. I: Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/mach> (lest 27.10.2022).
- Tarhan, Cevahir og Mehmet Ali Çil (2021). «A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods». I: *Journal of Energy Storage* 40. Artikkel 102676.
- Terranova, Maria Letizia (2022). «Nuclear batteries: Current context and near-term expectations». I: *International journal of energy research* 46 (14), s. 19368–19393. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.8539>.
- The Royal Society, (2019). *Sustainable synthetic carbon based fuels for transport. Policy briefing*. The Royal Society. URL: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf>.
- Thomas, John Meurig, Peter P. Edwards, Peter J. Dobson og Gari P. Owen (2020). «Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells». I: *Journal of Energy Chemistry* 51, s. 405–415.
- Thompson, Svein (2022). *Biogass – Et marked i rask endring*. Stakeholder AS.
- Thorium* (2022). I: *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thorium> (lest 21.11.2022).
- Thorium fuel cycle* (2022). I: *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thorium\\_fuel\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Thorium_fuel_cycle) (lest 21.11.2022).
- Tornatore, Cinzia, Luca Marchitto, Pino Sabia og Mara De Joannon (2022). «Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives». I: *Frontiers in Mechanical Engineering* 8. Artikkel 944201.
- Touran, Nick (2022a). *Computing the energy density of nuclear fuel*. WhatIsNuclear. URL: <https://www.whatisnuclear.com/energy-density.html> (lest 08.12.2022).
- Touran, Nick (2022b). *What is thorium?* WhatIsNuclear. URL: <https://whatisnuclear.com/thorium.html> (lest 20.09.2022).
- Trakimavičius, Lukas (2020). *Is small really beautiful? The future role of small modular reactors (SMRs) in the military*. Energy Highlights. NATO Energy Security Centre of Excellence. URL: <https://www.ensecce.org/data/public/uploads/2020/11/02.-solo-article-lukas-smr-eh-15-web-version-final.pdf>.



- 
- Trakimavičius, Lukas (2021). *The Future Role of Nuclear Propulsion in the Military*. Energy Highlights. NATO Energy Security Centre of Excellence. URL: [https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1\\_the-future-role-of-nuclear-propulsion-in-the-military.pdf](https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1_the-future-role-of-nuclear-propulsion-in-the-military.pdf).
- U.S. Department of Defense (2022). *DoD to Build Project Pele Mobile Microreactor and Perform Demonstration at Idaho National Laboratory*. URL: <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2998460/dod-to-build-project-pele-mobile-microreactor-and-perform-demonstration-at-idah/> (lest 23.11.2022).
- U.S. Department of Energy, (2022). *Department of Energy press conference on National Ignition Facility*. URL: <https://www.llnl.gov/news/watch-doe-press-conference-nif>.
- U.S. Department of Energy (2023). *Maintenance and Safety of Electric Vehicles*. URL: [https://afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_maintenance.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_maintenance.html) (lest 24.02.2023).
- Unitrove (2022). *Natural Gas Density Calculator*. Unitrove Limited. URL: <https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density> (lest 08.12.2022).
- Uranium (2022). I: *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium> (lest 08.12.2022).
- Valentine, Harry (2021). I: URL: <https://maritime-executive.com/editorials/modular-molten-salt-nuclear-power-for-maritime-propulsion>.
- Vecchi, Andrea, Yongliang Li, Yulong Ding, Pierluigi Mancarella og Adriano Sciacovelli (2021). «Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives». I: *Advances in Applied Energy* 3. Artikkel 100047.
- Vidal, Carlos, Oliver Gross, Ran Gu, Phillip Kollmeyer og Ali Emadi (2019). «xEV Li-Ion Battery Low-Temperature Effects – Review». I: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68, s. 4560–4572.
- Waddington, I., P.J. Thomas, R.H. Taylor og G.J. Vaughan (2017). «J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi». I: *Process Safety and Environmental Protection* 112. Coping with a big nuclear accident; Closing papers from the NREFS project, s. 16–49. ISSN: 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582017300782>.
- Wentzel, Alexander (2023). *PYROCO2 - Demonstrating sustainable value creation from industrial CO<sub>2</sub> by its thermophilic microbial conversion into acetone*. SINTEF. URL: <https://www.sintef.no/prosjekter/2021/pyroco2/> (lest 03.07.2023).
- Wijayanta, Agung Tri, Takuya Oda, Chandra Wahyu Purnomo, Takao Kashiwagi og Muhammad Aziz (2019). «Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review». I: *International Journal of Hydrogen Energy* 44, s. 15026–15044.
- WNA (2021). *Nuclear-Powered Ships*. World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx> (lest 19.01.2023).

- 
- 
- WNA (2023). *How is uranium made into nuclear fuel?* World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-is-uranium-made-into-nuclear-fuel.aspx> (lest 14.03.2023).
- World Nuclear News (2023). *Operating permit issued for Chinese molten salt reactor*. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Operating-permit-issued-for-Chinese-molten-salt-re> (lest 03.07.2023).
- Wu, Di, Bin Hu og R.Z. Wang (2021). «Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138. Artikkel 110571.
- Yang, Linsen, Hongyan Xiao, Yongchao Qian, Xiaolu Zhao, Xiang-Yu Kong, Pei Liu, Weiwen Xin, Lin Fu, Lei Jiang og Liping Wen (2022). «Bioinspired hierarchical porous membrane for efficient uranium extraction from seawater». I: *Nature Sustainability* 5, s. 71–80.
- Yue, Meiling, Hugo Lambert, Elodie Pahon, Robin Roche, Samir Jemei og Daniel Hissel (2021). «Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146. Artikkel 111180.
- Zhang, Qi, Matthew Bown, Laura Pastor-Pérez, Melis S. Duyar og Tomas R. Reina (2022). «CO<sub>2</sub> Conversion via Reverse Water Gas Shift Reaction Using Fully Selective Mo–P Multicomponent Catalysts». I: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 61.34. doi: 10.1021/acs.iecr.2c00305, s. 12857–12865. ISSN: 0888-5885. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c00305. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00305>.
- Zhao, Xianhui, Babu Joseph, John Kuhn og Soydan Ozcan (2020). «Biogas Reforming to Syngas: A Review». I: *iScience* 23.5, s. 101082. ISSN: 2589-0042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101082>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004220302674>.
- Zhou, Yuanrong, Stephanie Searle og Nikita Pavlenko (mar. 2022). «Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe». I: *International council on clean transportation Working paper* 2022-14.

## Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan, med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

## FFIs formål

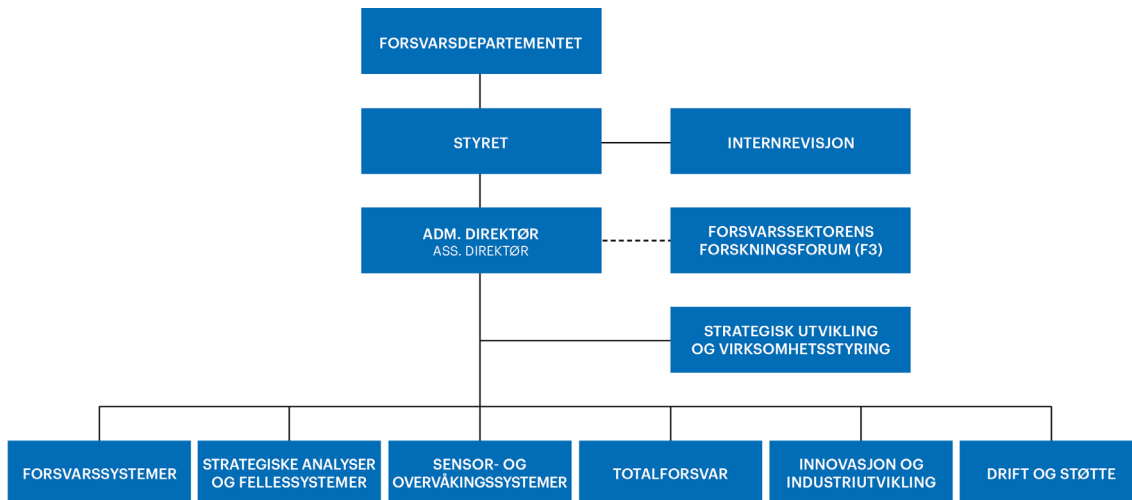
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

## FFIs visjon

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

## FFIs verdier

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.



Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)  
Postboks 25  
2027 Kjeller

Besøksadresse:  
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller  
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telefon: 91 50 30 03  
E-post: [post@ffi.no](mailto:post@ffi.no)  
[ffi.no](http://ffi.no)

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)  
PO box 25  
NO-2027 Kjeller  
NORWAY

Visitor address:  
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller  
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telephone: +47 91 50 30 03  
E-mail: [post@ffi.no](mailto:post@ffi.no)  
[ffi.no/en](http://ffi.no/en)