

Nasjonal transportplan 2025-2036

Utredning av forventet teknologi- og kostnadsutvikling for ulike transportmidler



Illustrasjon: Travel mania/AdobeStock

For å kunne ta velfunderte beslutninger om virkemiddelbruk på klimaområdet, er vi avhengige av å ha kunnskap om forventet teknologi- og kostnadsutvikling for de ulike transportmidlene. Vi ber om at virksomhetene utreder følgende:

- Forventet teknologiutvikling (batterielektrisitet og brenselcelle) for de ulike transportmidlene, herunder forventet utvikling i kostnader.
- Hvilke(n) teknologi(er) vil være ledende for ulike transportmidler i 2030 og i et lengre perspektiv (2040–2050)?

Forord

Dette arbeidsdokumentet er en del av utrednings- og prioriteringsoppdraget som Avinor AS, Bane NOR SF, Jernbanedirektoratet, Kystverket, Nye Veier AS og Statens vegvesen har satt i gang på oppdrag fra Samferdselsdepartementet og Nærings- og fiskeridepartementet. Innholdet i dokumentet vil bli brukt videre i anbefalinger til departementene.

Dette arbeidsdokumentet er et samordnet forslag til besvarelse av pkt. 3 i klimaoppdraget i prioriteringsoppdraget, vedrørende utredning av forventet klimautvikling mm. Leveransen svarer også ut punktet om salgsmål for gravemaskiner, dumpere, hjullastere og lastebiler til massetransport.

Anbefalingene i dette arbeidsdokumentet tar ikke hensyn til balansert målstyring og inneholder ikke vurderinger av hva som er mulig innen gitte økonomiske rammer.

Prosjektgruppen har bestått av følgende medlemmer:

- Sigve Jarl Aasebø – Statens vegvesen
- Maarten Lohne van der Eynden – Nye Veier AS
- Morten Kaldhussæter Flisnes – Jernbanedirektoratet
- Ingvild Nilsen – Jernbanedirektoratet
- Siri Martiradonna – Bane NOR SF
- Rune André Eriksen – Bane NOR SF
- Ragnar Skagen – Bane NOR SF
- Nora Helen Lund Lyngra – Kystverket
- Rolf Jørn Fjærbu - Kystverket
- Joachim Rønnevik – Avinor AS
- Christine Maass – Miljødirektoratet
- Anders Gram Giskemo – Kystverket, koordinator

Ut over disse deltakerne har også flere fra de respektive virksomhetene bidratt inn i arbeidet.

Ålesund, 11. september 2023

Anders Gram Giskemo

Koordinator for utredningsoppdraget av forventet teknologi- og kostnadsutvikling

Innholdsfortegnelse

1. Oppsummering og anbefalinger	4
2. Nærmere om oppdraget og leveransen	5
3. Generelt om energibærere og kjøretøYTEKNOLOGIER	6
4. Veitransport	11
5. Sjøtransport.....	15
6. Jernbanetransport.....	19
7. Luftfart.....	25
8. Teknologitviking innen anleggsmaskiner.....	29
9. Vedlegg.....	35

1. Oppsummering og anbefalinger

I dette arbeidsdokumentet beskrives den forventede teknologiutviklingen mot 2030 og 2050 for ulike transportformer: vei, sjø, jernbane, luftfart, samt for anleggsvirksomhet. Det er usikkerhet knyttet til teknologiutviklingen og kostnadsutviklingen i alle segment. For de minst modne teknologiene og segmentene er usikkerheten størst. Et transportsystem i nullutslippssamfunnet skal ikke bare ha null utslipp av klimagasser, men også være bærekraftig totalt sett. Vi beskriver derfor hvilke fremdriftsteknologier som har lavest energiforbruk og hvilke teknologier som er mer energikrevende. I tillegg har vi kort omtalt biodrivstoff (uten biogass) og andre typer bærekraftig drivstoff. Dette er drivstoff som ikke er definert som lav- og nullutslippsteknologi, men som vil ha en rolle i å redusere utslippene fra transportsektoren. Spesielt vil dette gjelde for transportformer som langdistanse luftfart der elektrifisering og hydrogen ikke kan forventes å løse behovet i overskuelig fremtid. Biodrivstoff er en begrenset ressurs med bærekraftsutfordringer og er beskrevet i tidligere leveranser i forbindelse med Nasjonal transportplan.

Kort oppsummert forventes det at batterielektrisk fremdrift blir den dominerende teknologien for veitransport, med hydrogen og biogass som supplement i enkelte segment og/eller i en overgangsfase. For sjøtransport er bildet mer sammensatt. Noen undersegment forventes å bli elektrifisert, mens andre bruksområder forventes å ha behov for hydrogen eller hydrogenbaserte drivstoff som ammoniakk, også på lengre sikt. Det er forventet at mange skip vil benytte seg av mer enn én energibærer gjennom ulike typer hybridisering. Små atomreaktorer er en mulig energikilde på sikt. Jernbane har allerede elektrisk drift på store deler av trafikken. På kortere sikt forventes de resterende dieselstrekningene å enten hel-elektrifiseres med tradisjonelt KL-anlegg eller del-elektrifiseres i kombinasjon med batterielektrisk drift. I et lengre perspektiv kan løsninger basert på kun batterielektrisk drift og/eller hydrogenløsninger være aktuelt.

Hvis en ser bort fra nye typer bærekraftig flydrivstoff (som biodrivstoff og syntetisk flydrivstoff) som kan benyttes i eksisterende flymotorer og infrastruktur, er det i hovedsak tre teknologispor som følges i luftfarten; helelektriske fly (batterielektrisk og brenselcelle), hybridelektriske fly og fly hvor hydrogen forbrennes direkte i tilpassede motorer. For ordinære fly forventes det elektrisk drift på mindre fly/på korte strekninger, mens hydrogen trekkes frem som en aktuell løsning på lengre strekninger og for større fly. Bærekraftig flydrivstoff (SAF) er den eneste fossilfrie muligheten som er tilgjengelig for luftfarten i dag, og den eneste løsningen for de lengste flygningene – trolig også på lengre sikt.

Mange maskiner i anleggssektoren og annet spesialisert utstyr for hver av transportformene forventes å kunne bli driftet elektrisk, enten med batteri eller med kabel eller en kombinasjon av disse. Hydrogen, biogass og biodrivstoff kan være aktuelle teknologier for anleggsarbeid langt unna kapasitetssterkt nett, eller der andre forhold gjør batterielektrisk drift krevende eller veldig dyrt. Det er også mulig å bruke hybride maskiner til flere anvendelser.

Utover utvikling av fremdriftsteknologi er det også behov for teknologiutvikling når det gjelder produksjonen av energi/drivstoff. Bærekraftig drivstoff produseres i dag, men det er behov for en betydelig teknologiutvikling for å øke produksjonen i form av produksjon fra nye typer innsatsfaktorer. Dette er kort omtalt i arbeidsdokumentet.

Utviklingen innen null- og lavutslippsteknologi skaper muligheter for å dekke samfunnets mobilitetsbehov med reduserte utslipp. Tiltak og virkemidler for å stimulere til null- og lavutslippsløsninger i transportsektoren, sammen med andre former for tilrettelegging i transportsektorens økosystem, vil kunne akselerere omstillingen. Tiltak og virkemidler er nærmere omtalt i transportvirksomhetenes tidligere klimaleveranse til prioriteringsoppdraget.

2. Nærmere om oppdraget og leveransen

I utredningsoppdraget fra Samferdselsdepartementet og Nærings- og fiskeridepartementet fra 6. september 2022 ble transportvirksomhetene bedt om å starte et analytisk arbeid i samråd med Miljødirektoratet for å vurdere tiltak som kan bidra til oppnåelse av Norges klimaforpliktelser og mål. I prioriteringsoppdraget fra 11. november 2022 ble det bestilt ytterligere utredninger og vurderinger knyttet til klimaoppdraget, herunder en utredning av forventet teknologiutvikling. Dette arbeidsdokumentet svarer ut denne bestillingen, jf. prioriteringsoppdraget kap. 7.1, underpunkt 3:

«For å kunne ta velfunderte beslutninger om virkemiddelbruk på klimaområdet, er vi avhengige av å ha kunnskap om forventet teknologi- og kostnadsutvikling for de ulike transportmidlene.

Vi ber om at virksomhetene utreder følgende:

- *Forventet teknologiutvikling (batterielektrisitet og brenselcelle) for de ulike transportmidlene, herunder forventet utvikling i kostnader.*
- *Hvilke(n) teknologi(er) vil være ledende for ulike transportmidler i 2030 og i et lengre perspektiv (2040–2050)?»*

Transportvirksomhetene har samarbeidet om å utarbeide arbeidsdokumentet, og Miljødirektoratet har bidratt aktivt. Kystverket har involvert Sjøfartsdirektoratet i arbeidet, mens Avinor har involvert Luftfartstilsynet.

2.1. Løseveiledning

Dette arbeidsdokumentet er en kort gjennomgang av lav- og nullutslippsteknologier som anses som aktuelle for de ulike transportformene på kort og lang sikt. Kap. 3 inneholder en forenklet introduksjon til aktuelle energibærere og kjøretøyteknologier. Kapitelet inneholder også omtale av usikkerheten i oppdraget. For å kunne sammenligne utvikling og status i teknologisk modenhet på tvers av transportformene, benytter arbeidsdokumentet TRL-kategorisering (technology readiness level). Kap. 3.4 gir en rask introduksjon til dette metodeverket. For å kunne sammenligne kostnadsutvikling på tvers av transportformene benytter arbeidsdokumentet tiltakskostnad for CO₂ (kroner per redusert tonn). Kap. 4 – 7 inneholder en omtale av teknologi- og kostnadsutviklingen innen veitransport, sjøtransport, jernbanetransport og luftfart. Kap. 8 inneholder en omtale av teknologi- og kostnadsutviklingen innen anleggsvirksomhet, hvor også spesialiserte maskiner er omtalt. Leveransen svarer ut punktet om salgsmål for gravemaskiner, dumpere, hjullastere og lastebiler til massetransport i kap. 8.6.

2.2. Avgrensinger og annet relevant utredningsarbeid

En avgrensning i arbeidet med å besvare oppdraget er at teknologiutvikling for andre maskintyper (som traktor, skurtresker mm.), fritidsbåter eller MC/moped ikke omtales. Arbeidsdokumentet omtaler heller ikke store skift i transportsystemet som «mobility as a service», delingsøkonomi, droner etc.; eller aktive transportformer som gange, (el-)sykkel og (el-)sparkesykkel.

Videre er bruk av biodrivstoff lite omtalt i dette arbeidsdokumentet. Avansert biodrivstoff (flytende og biogass) kan brukes i dagens forbrenningsmotorer, og er laget av biomasse av avfall, rester og biprodukter som per i dag ikke har mer høyverdige bruksområder. Det er betydelig energitap i produksjonsprosessen, og tilgangen på biomasse er begrenset. Biodrivstoff som klimaløsning er omtalt i tidligere leveranser i NTP, se f.eks. side 31-32 i klimaleveransen i prioriteringsoppdraget¹ eller kapittel 1.3.4 i rapporten *Klimatiltak i Norge mot 2030*². Bærekraftig flydrevstoff (SAF) er den eneste fossilfrie muligheten som er tilgjengelig for luftfarten i dag, og den eneste løsningen for de lange flygningene – trolig også på lengre sikt. Bærekraftig flydrevstoff er nærmere omtalt i kap. 6.4 i klimaleveransen i prioriteringsoppdraget.

¹ [Klimaleveransen i prioriteringsoppdraget: klima.pdf \(regjeringen.no\)](#)

² [Klimatiltak i Norge mot 2030: Oppdatert kunnskapsgrunnlag om utslippsreduksjonspotensial, barrierer og mulige virkemidler \(2023\)](#)

Grønn omstilling av transportsektoren krever tilgang til fossilfri energi. Tilgang til energi behandles i en egen prosess med representanter fra transportvirksomhetene og andre relevante myndigheter, i dialog med Samferdselsdepartementet og er ikke nærmere omtalt i dette arbeidsdokumentet.

På veien til et bærekraftig transportsystem er det viktig å ikke bare fokusere på utskifting av fremdriftsteknologi, men også jobbe med å redusere det totale transportetterspørselen og bruke de mest effektive transportformene. Rammeverket for dette omtales ofte som UFF: unngå, flytte og forbedre. Dette er viktig både med tanke på å redusere klimagassutslippene fra transport, men også for å begrense energibruken, ressursbehovet, arealforbruket og annen forurensning fra transport. Dette arbeidsdokumentet omtaler ikke UFF ytterligere, så for mer omtale av dette se kapittel 3.2 og 3.5 i klimaleveransen¹ eller kapittel 1.2 i rapporten *Klimatiltak i Norge mot 2030*². Teknologiutviklingen for anleggsmaskiner er også beskrevet i leveransen fra utredningsoppdraget, se f.eks. kapittel 4.1.7 og vedlegg 2 i sammenstillingsrapporten.³

Tiltak og virkemidler vil kunne akselerere omstillingen i transportsektoren. Transportvirksomhetenes klimaleveranse gjør rede for tiltak og virkemidler for innfasing av null- og lavutslippsteknologi i transportsektoren, og dette er derfor ikke behandlet i denne besvarelsen.

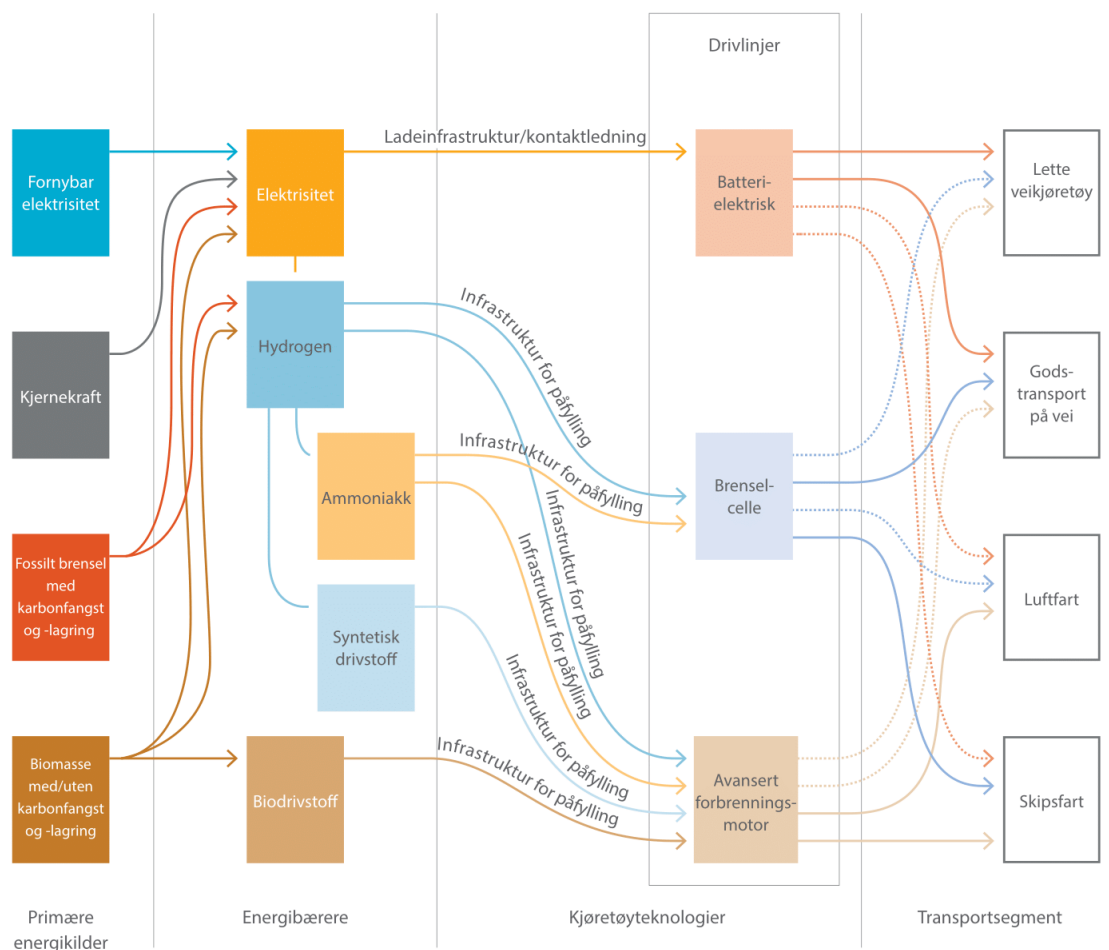
Selv om fokus i dette arbeidsdokumentet er på teknologistatus for transportmidlene, er det viktig å understreke at det er behov for å legge til rette for utvikling av hele verdikjeder, herunder også ladeinfrastruktur, etablering av nye verdikjeder for energiforsyning, regelverk, standarder, kompetanse, driftsmodeller- og operasjoner samt andre offentlige myndighetsoppgaver, for å understøtte utvikling og implementering av null- og lavutslippsteknologi i transportsektoren. Dette underbygger behov for en helhetlig tilnærming og virkemiddelbruk ved utvikling og innfasing av ny teknologi.

3. Generelt om energibærere og kjøretøyteknologier

Den sjette hovedrapporten til FNs klimapanel viser at for å nå 1,5-gradersmålet må de globale CO₂-utslippene nå toppen før 2025 og så reduseres raskt for å nå netto null rundt midten av århundret. Norge har under Parisavtalen forpliktet seg til å redusere utslippene av klimagasser med 55 prosent i 2030 sammenliknet med nivået i 1990, og lovfestet mål om å bli et lavutslippssamfunn i 2050. For at transportsektoren skal oppnå netto null utslipp av CO₂, må bruk av fossilt drivstoff erstattes med elektrisitet eller alternative drivstoff som avansert biodrivstoff, hydrogen, ammoniakk og syntetisk drivstoff. Teknologiutviklingen i transportsektoren vil derfor være avgjørende for utslippsreduksjoner.

Dette arbeidsdokumentet legger til grunn at teknologiutvikling innen transportsektoren omhandler både teknologi for fremstilling av energibærere og teknologi for omforming av energi til fremdrift. Dette henger tett sammen. Figur 1 viser at ulike former for primærenergi er aktuelle for ulike energibærerne. Elektrisitet og alternative drivstoff kan produseres fra flere ulike energikilder, og kan brukes med ulike fremdriftsteknologier.

³ [klima-og-miljo-l2254353.pdf \(regjeringen.no\)](https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo-l2254353.pdf)



Figur 1: Oversikt over mulige veier for bruk av elektrisitet og alternative drivstoff i transport. Illustrasjon fra IPCC.⁴

3.1. Nye energibærere

Den mest effektive bruken av energi til transport er *elektrifisering*, fordi det er lavt energitap når elektrisitet brukes i en elmotor. Det er forventet at forbedret batteriteknologi vil bli tilgjengelig i fremtiden. Ett eksempel er faststoffbatterier, som etter all sannsynlighet vil ta over for elbil-batterier slik vi kjenner dem i dag. I dag har litium-batterier høyest energitetthet per vektenhet og foretrekkes derfor i mange tilfeller. Den grønne omstillingen gjør at etterspørselen etter litium-batterier har økt kraftig, og IEA forventer 40 ganger så stor etterspørsel etter litium i 2040 sammenlignet med 2020. Dette kan føre til at batterier blir dyrere. For transport som ikke kan elektrifiseres, er det nødvendig med *alternative drivstoff* for å redusere utslippene.

Hydrogen (komprimert, flytende eller i andre former) kan brukes i en brenselcelle som omdanner hydrogen til strøm som driver en elmotor, eller i en tilpasset forbrenningsmotor. Det er mest aktuelt å produsere hydrogen med elektrolyse av vann (grønt hydrogen) eller fra naturgass med karbonfangst og -lagring (blått hydrogen). I dag produseres hydrogen som regel fra naturgass uten karbonfangst (grått hydrogen); men dette er ingen nullutslippsløsning. Elektrolyse krever mye strøm, og produksjonen av hydrogen vil derfor være svært følsom for prisen på elektrisk kraft. Grønt hydrogen er derfor mer kraft fra strømmettet å produsere enn blått hydrogen. For blått hydrogen er det teknisk mulig å fange opp mot 100 prosent av CO₂-utslippet med ny teknologi.⁵ Samtidig brukes det energi ved utvinning av naturgass og geologisk lagring av CO₂. Det bør også nevnes at nyere forskning peker på særskilte utfordringer mer hydrogenlekkasjer (lekkasje av ubenyttet

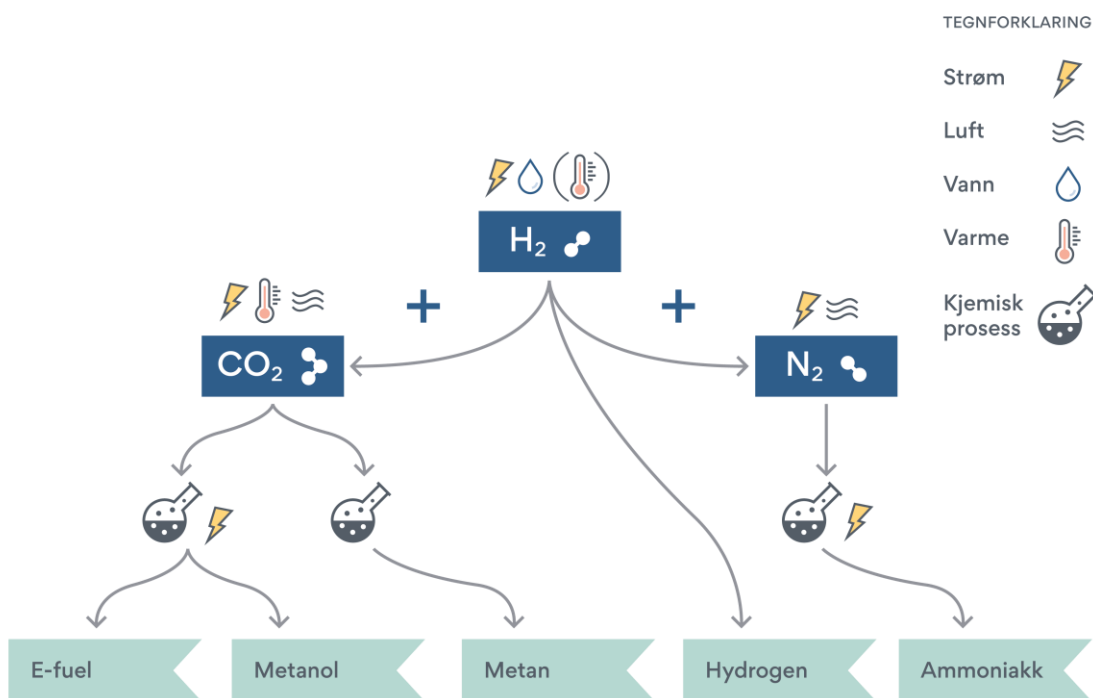
⁴ Basert på figuren i kapittel 10 (s. 24) i IPCC, 2022: [Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

⁵ Prosses21, 2021. [Veikart](#).

hydrogen) som oppstår i verdikjeden gjennom produksjon, lagring, transport og fylling.⁶ Dette representerer en ny usikkerhet for bruken av hydrogen, hvor flere undersøkelser blir nødvendig, men er ikke behandlet videre av transportvirksomhetene i denne leveransen.

Hydrogen kan brukes direkte som drivstoff, eller omdannes til andre drivstoff sammen med CO₂ eller nitrogen i ulike kjemiske prosesser, vist i figur 2. Ved å tilføre energi er det mulig å konvertere hydrogen og CO₂ til metanol, etanol eller andre flytende hydrokarboner, metan og polymerer. Slik kan man produsere syntetisk drivstoff, også kalt "elektrisk drivstoff" (e-drivstoff), og i prinsippet alt annet som i dag lages av petroleum.

Hydrogen kan benyttes til å drive en elmotor eller i en tilnærmet tradisjonell forbrenningsmotor. Forbrenningsmotoren er minst effektiv, med en virkningsgrad på rundt 30 prosent i personbil. Mesteparten av energien går tapt som varme. Dette er en svært liten energieffektiv løsning, og bør unngås hvor det er alternativer. Hydrogen bør i utgangspunktet da først tilflytte de sektorene som ikke har direkte elektrifisering som alternativ.



Figur2: Hydrogen kan brukes direkte, eller omdannes til ulike drivstoff sammen med CO₂ eller nitrogen i ulike kjemiske prosesser. E-fuel = syntetisk drivstoff (e-drivstoff). Illustrasjon fra Klimastiftelsen.⁷

Ammoniakk kan brukes i tilpasset forbrenningsmotor eller brenselcelle, og lages av hydrogen (grønt eller blått) og nitrogen. Det er betydelig energitap i produksjonsprosessen.

Syntetisk drivstoff (e-drivstoff) er tilnærmet likt fossilt drivstoff, men lages av hydrogen (grønt eller blått) og CO₂. Drivstoffet kan brukes i dagens forbrenningsmotorer. Det er store energitap i produksjonsprosessen.

Avansert biodrivstoff (flytende og biogass) kan brukes i dagens forbrenningsmotorer, og er laget av biomasse av avfall, rester og biprodukter som per i dag ikke har mer høyverdige bruksområder. Det er betydelig energitap i produksjonsprosessen, og tilgangen på biomasse er begrenset. Biodrivstoff er derfor et alternativ med begrenset potensial.

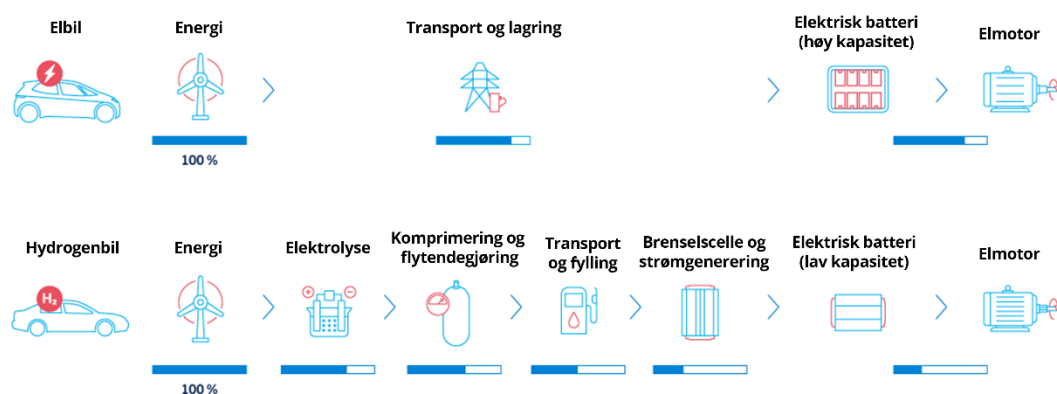
⁶ En internasjonal studie ledet av CICERO konkluderer med at hydrogen har en global oppvarmingseffekt som er inntil 12 ganger sterkere enn karbondioksid. Se blant annet Sand et al., 2023: [A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen | Communications Earth & Environment \(nature.com\)](#)

⁷ Norsk klimastiftelse, 2020. [Hva er e-fuel?](#)

3.2. Energieffektivitet

Det er betydelige energitap i både produksjon og bruk av ulike alternative drivstoff til transport. *Virkningsgrad* er et mål på hvor effektiv en prosess er, og defineres som forholdet mellom utnyttbar effekt og tilført effekt. Er virkningsgraden i en prosess på 90 prosent, kan 90 prosent av energien som tilføres utnyttes, det vil si at 10 prosent går tapt. Den mest effektive bruken av energi i transport er direkte elektrifisering. Det er lavt energitap med direkte bruk av elektrisitet (fra batteri eller ledning) i en elmotor.

I både produksjon av hydrogen og ved bruk i brenselceller er det betydelige energitap. Dette er illustrert i Figur 3, som sammenlikner en elbil med hydrogenbil. I elbilen er det noe energitap i strømmettet, når elbilen lades, og til slutt i elmotoren, hvor total virkningsgrad er mellom 80 – 85 prosent. I en hydrogenbil som går på grønt hydrogen brukes først elektrisk strøm til å spalte vann til hydrogen (elektrolyse), deretter må hydrogengassen komprimeres og gjøres flytende. Gassen må så transporteres og fylles på en tank i et transportmiddel. En brenselcelle omdanner hydrogenet tilbake til elektrisk strøm og vann, og den elektriske strømmen driver en elmotor. Den totale virkningsgraden er mellom 20–40 prosent. Med blått hydrogen ville det i stedet for elektrolyse vært utvinning av naturgass, omdanning til hydrogen og karbonfangst og -lagring, som også ville hatt betydelige energitap.



Figur 3: Energitap i en elbil og en hydrogenbil på grønt hydrogen. Illustrasjon fra Volkswagen.⁸

3.3. Usikkerhet

Vurderinger av fremtidig teknologiutvikling vil alltid være preget av betydelig usikkerhet. Det er en rekke faktorer som kan påvirke utviklingen, inkludert politiske beslutninger, økonomiske forhold, miljøhensyn og teknologiske gjennombrudd.

En av hovedårsakene til usikkerheten er den raske utviklingen av nye teknologier. Selv om det er mulig å identifisere visse trender og potensielle veier for fremtidig utvikling, er det vanskelig å forutsi nøyaktig hvilke teknologier som vil dominere og hvordan de vil påvirke transportsektoren. For eksempel har elektriske kjøretøy gjennom virkemiddelbruk økt i omfang de siste årene, men det er fortsatt usikkerhet knyttet til videre utvikling av energitetthet, aldring og ladehastighet til batteriene, infrastrukturbehov og kostnadseffektiviteten ved elektrisk transport. Det er også usikkerhet knyttet til energiprisene i tiden fremover.

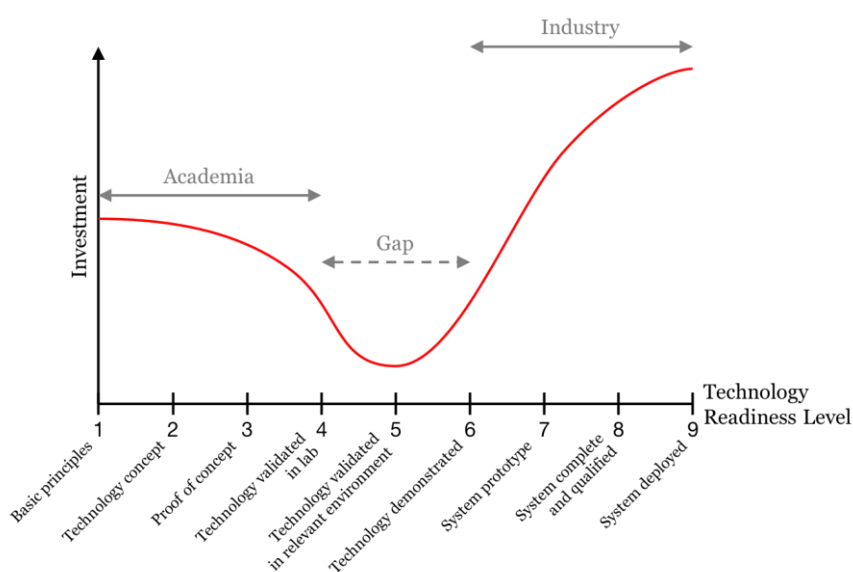
En annen kilde til usikkerhet er de komplekse samspillene mellom teknologi, samfunn og politikk. Selv om en bestemt teknologi kan være teknisk mulig og økonomisk levedyktig, kan det være utfordringer knyttet til infrastruktur, lovverk, sikkerhet og aksept fra samfunnet. For eksempel kan autonome kjøretøy ha potensial til å revolusjonere transportsektoren, men det er usikkerhet rundt juridiske og regulatoriske rammer, ansvarsfordeling og tillit fra publikum når det gjelder å stole på maskiner med å ta avgjørende beslutninger.

⁸ <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2020/03/battery-or-fuel-cell--that-is-the-question.html>

3.4. Technology Readiness Level (TRL)

Når en skal vurdere ny teknologi må man også se på hvor langt i utviklingsløpet teknologien har kommet, teknologiens iboende potensial for utvikling og de usikkerhetene som knytter seg til hvorvidt teknologien i det hele tatt vil kunne kommersialiseres. Usikkerheten i et teknologiutviklingsprosjekt vil variere med modenheten til teknologien. Teknologimodenheten kan måles på en skala for «Technology Readiness Level», TRL-skala⁹.

I de lavere nivåene av TRL-skalaen er usikkerheten knyttet til teknologiske utfordringer dominerende. Etter som de teknologiske utfordringene løses vil de økonomiske, politiske og markedsmessige utfordringene bli fremtredende i de høyere nivåene. Teknologier på TRL-nivå 4-6 har særlig stor usikkerhet knyttet til seg. Dette skyldes at forskningsinstitusjoner og academia oftest fokuserer på TRL 1-4, mens næringslivet gjerne fokuserer på teknologier nær kommersialisering (TRL 7-9). TRL 4-6 havner derfor i et gap mellom fokusområdene til academia og næringslivet, omtalt som teknologiens «dødens dal» (illustrert i figur 4). Begrepet viser til at svært mange nye teknologier kommer til TRL 4-6, men aldri lenger. Dette er også innovasjonens iboende «natur». Alt som vi forsker på og som er på et tidlig konseptstadium vil naturligvis ikke være levedyktig fra et kommersielt ståsted. Samtidig finnes det trolig et mulighetsrom her for ikke-kommersielle og langsiktige aktører, som statlige myndigheter, til å ta større risiko og jobbe mer med innovasjon og uttesting av ny teknologi, for at kommersielle aktører lettere og raskere kan vurdere hva som kan kommersialiseres videre. Virksomhetenes felles svar på utredningsoppdraget¹⁰ har foreslått justert virkemiddelbruk med nettopp dette formålet i kapittel 10.5. Ett relevant eksempel på mulighetsrommet for myndighetene er bruk av Enova sin nylig endrete støtteordning for ombygging til utslippsfrie maskiner og kjøretøy. Dette har vært et særs viktig virkemiddel for å øke tilgangen på og uttestingen av utslippsfrie alternativ.



Figur 4: «Dødens dal» for teknologier på TRL 4-6

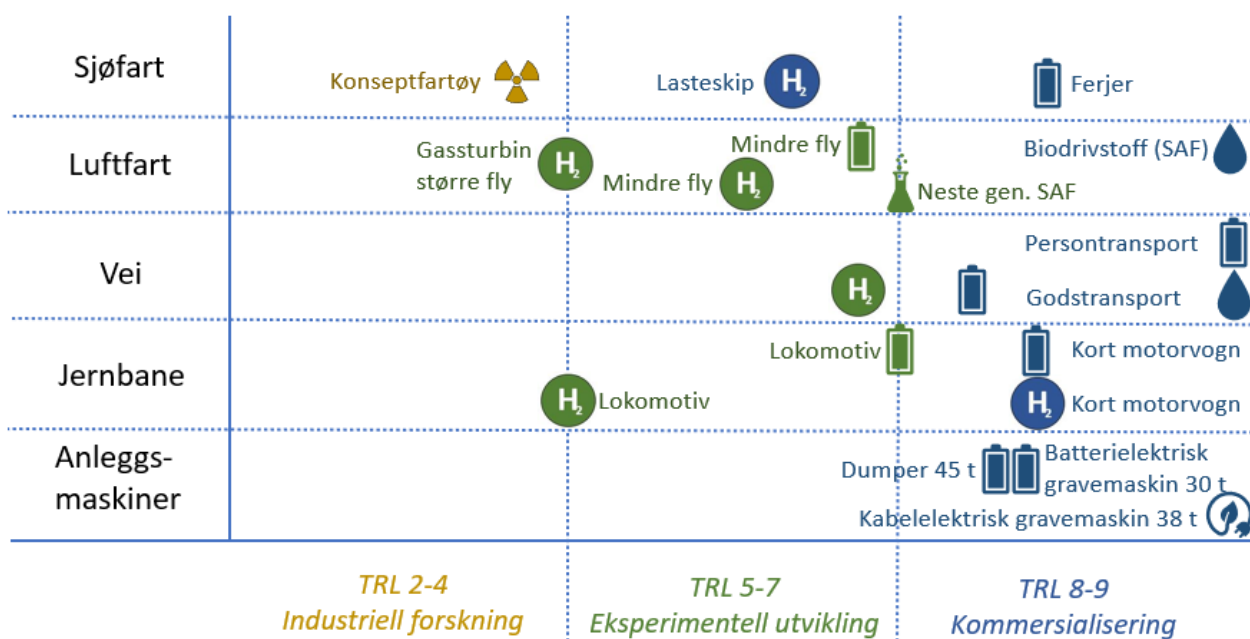
Usikkerheten innen teknologiutvikling for transportsektoren understreker viktigheten av å ha en adaptiv og fleksibel tilnærming. Det er nødvendig å være åpen for nye ideer og kontinuerlig overvåke utviklingen, samtidig som man tar hensyn til risikofaktorer og potensielle konsekvenser. Det krever også tett samarbeid mellom industrien, forskningsmiljøer, myndigheter og samfunnet generelt for å skape en bærekraftig og fremtidsrettet transportsektor.

⁹ Skalaen ble opprinnelig definert av NASA på 1970-tallet, og en tilpasset versjon ble innført av Europakommisjonen til EUs forsknings- og innovasjonsprogram «Horizon 2020». I Norge benyttes EU-kommisjonens definisjon av TRL av blant andre Norges Forskningsråd. Innovasjon Norge og ENOVA benytter lignende TRL-skalaer, jf. tabell i vedlegg til denne rapporten.

¹⁰ [Virksomhetenes svar på utredningsoppdraget.](#)

Oppsummert er det verdt å merke seg at teknologier som befinner seg i de lavere delene av TRL-skalaen vil være beheftet med en betydelig større usikkerhet om den fremtidige utviklingen enn de teknologiene som er i de siste fasene på TRL-skalaen.

I dette oppdraget har vi gjort vurderinger av TRL for ulike teknologier innen transportformene. Disse vurderingene er oppsummert i egne tabeller i kap. 4-8, og muliggjør en overordnet sammenligning av utvikling og status i teknologisk modenhet på tvers av transportformene. Det er krevende å gjøre konsistente vurderinger av TRL-nivå på tvers av transportformene, og disse vurderingene er beheftet med usikkerhet. Det er gjort forenklinger i både tabeller og figurer som det må tas høyde for. Blant annet kan ulike teknologianvendelser innenfor et segment kan variere uten at dette enkelt kan illustreres. Det er viktig å understreke at TRL-vurderingene er gjort på produkter som teknologisk kan tas i bruk, men som ikke nødvendigvis er modne i et markedspektiv. Uten å kompensere for dette framstår TRL-vurderingene i denne leveransen muligens som noe høye/optimistiske. Figur 5 gir eksempler på teknologimodenhet innen ulike transportformer.



Figur 5: Eksempler på teknologimodenhet innen ulike transportformer

4. Veitransport

Veitransporten, særlig innen personbiltransport, har vært i rask omstilling de siste 10-15 årene. Per juli 2023 er nær 16 prosent av alle norskregistrerte kjøretøy på veiene utslippsfrie. Til sammenligning var andelen knappe 2,5 prosent i 2016.

I personbilsegmentet er dagens nybilsalg rundt 80 prosent elektrisk, og tallene er på vei opp også i de andre kjøretøykategoriene. I all hovedsak er det elektriske kjøretøy som dominerer, selv om noen kjøretøy som benytter andre energibærere også finnes på veiene. For en enkelt oversikt over status og historikk for utslippsfrie veigående kjøretøy kan man se f.eks. nettsiden www.tilnull.no

På vei mot lavutslippssamfunnet er det spesielt batterielektriske personbiler som har blitt et modent produkt, som nå foretrekkes av det store flertallet av befolkningen når de velger en ny bil. Dette er delvis på grunn av godt produktutvalg som passer norske behov og en konkurransedyktig pris, støttet av kjøps- og bruksinsentiver. Det har også vært en betydelig utbygging av ladeinfrastruktur, spesielt rettet mot personbilsegmentet.

Det finnes en rekke andre produkter på markedet (hydrogen/biogass), men disse har ikke fått en tilsvarende markedsposisjon. Hydrogen er det produktet som på sikt kan etablere seg dersom kostnadsutviklingen og energitilgangen gjør denne teknologien rimeligere for sluttbrukerne. Vi har ikke vurdert biodrivstoff, da dette i dag reguleres gjennom et omsetningskrav, og fordi det er grundig beskrevet i tidligere leveranser i forbindelse med NTP, og av Miljødirektoratet i ulike sammenhenger¹¹.

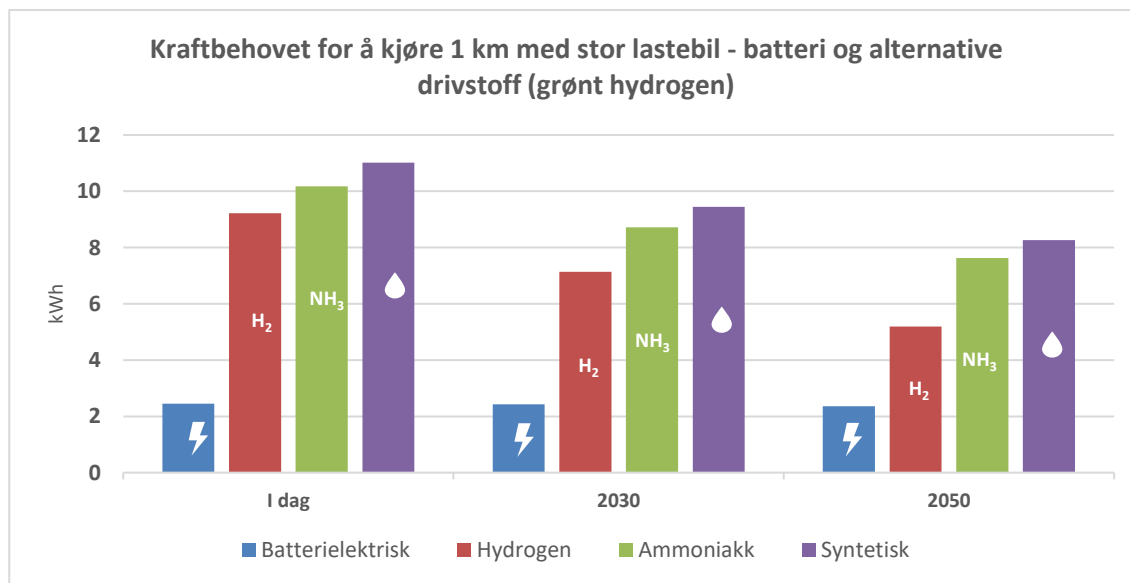
Ferger er omtalt i kapittelet om sjøtransport.

4.1. Elektrifisering

Det har i mange år vært en rask og stødig opptrapping av elektrifiseringen i veitransporten. Det har de siste årene også vært en omfattende utbygging av ladeinfrastruktur, hovedsakelig drevet av kommersielle aktører. Utbyggingen har gått saktere for ladere for tynge kjøretøy. Statens vegvesen, i samarbeid med Nye Veier og Enova, la nylig frem en overordnet plan for utbygging av ladestasjoner for tunge kjøretøy¹². Det er ventet at tilbudet for lading av tungbiler vil skyte fart i årene som kommer.

Batterielektrisk drift ser ut til å kunne bli konkurransedyktig i alle kjøretøysegmenter, forutsatt at det finnes gode nok lademuligheter. Det er også andre teknologier som kan være aktuelle, blant annet hydrogen, syntetisk drivstoff og biodrivstoff. Samtidig ser det enn så lenge ut til at disse andre teknologiene utgjør et supplement til den batterielektriske driften, som ser ut til å bli den dominerende nullutslippsteknologien i veitransporten.

En fordel med batterielektrisk drift er at det er den mest energieffektive løsningen av de aktuelle teknologiene. Dette illustreres blant annet i rapporten *Kraftbehov til transport*¹³, som Miljødirektoratet gav ut i 2022, jf. figur 6.



Figur 6: Kraftbehov for å kjøre én kilometer med stor lastebil med batteri, hydrogen (i brenselcelle), ammoniakk (i forbrenningsmotor) og syntetisk drivstoff (i forbrenningsmotor). Kraftbehovet er inkludert produksjon av drivstoffet med grønt hydrogen (fra elektrolyse). Forutsetter at elektrolyse og brenselceller blir vesentlig mer energieffektive i 2050 enn de er i dag.

¹¹ <https://www.regjeringen.no/contentassets/f517f097ff11468fbb8087f6bc981c43/felles-svar-prioppdrag-310323/klima.pdf> og <https://www.regjeringen.no/contentassets/2426a22cfef14e16b1d3028442fc78df/utredningsoppdraget-leveranse-januar-2023/klima-og-miljo-l2254353.pdf>

¹² <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/plan-for-utbygging-av-ladestasjoner-av-tunge-kjoeretoy-er-klar?publisherId=8768166&releaseId=17981014>

¹³ [Kraftbehov til transport: Nullutslippsscenerier for 2050 - Miljødirektoratet \(miljodirektoratet.no\)](https://www.miljodirektoratet.no/utredning/kraftbehov-til-transport-nullutslippsscenerier-for-2050)

4.2. Hydrogen

Hydrogen som drivstoff har den fordel at det kan gi lange kjørelengder mellom hver fylling og relativt kort tid til fylling, noe som gir fleksibilitet i kjøremønster. Både kjøretøykostnaden og drivstoffkostnaden er høyere for hydrogen enn for batterielektrisk. Videre er det liten eller ingen forventet gevinst på payload (vekt eller volum) eller vesentlig tidsbesparelse ved fylling, sammenlignet med fremtidens hurtigludere for batterielektriske kjøretøy. Det er dessuten ikke gitt at eventuell tilgang på hydrogen skal brukes til veitransport fremfor skip, fly og industri. Det er økonomisk fornuftig å benytte batterielektrifisering fremfor hydrogen, der denne teknologien er praktisk anvendbar. Hydrogen bør i utgangspunktet da først tilflyte de sektorene som ikke har direktelektrifisering som alternativ. Hydrogenprisen er følsom for prisen på elektrisk kraft.

4.3. Syntetiske drivstoff

Som beskrevet i innledningen til dette arbeidsdokumentet er syntetisk drivstoff en lite energieffektiv løsning. Teknologien har den fordel at den kan benyttes i allerede eksisterende forbrenningsmotorer. På nåværende tidspunkt fremstår energibruken fremstillingen av syntetisk drivstoff innebærer som lite attraktiv, sammenlignet med direkte elektrifisering.

4.4. Teknologistatus og kostnadsutvikling

Tabell 1: TRL-vurderinger av teknologier innen veitransport

Anvendelse	CO ₂ (tiltakskostnad 2030/2050) ¹⁴	TRL	Kommentar
Elektrifisering, veibasert persontransport	2030: 500-2 000 kr/tonn, avhengig av kjøretøykategori 2050: Negativ ¹⁵	9	Kommersielt produkt, men støttes fortsatt med insentiver
Hydrogen, veibasert persontransport	2030: Usikker 2050: Usikker	8	Brukt i mange kjøretøy, men ingen i fullskala masseproduksjon
Elektrifisering, godstransport på vei	2030: 1 000-2 000 kr/tonn, avhengig av kjøretøykategori 2050: Negativ	8	På vei inn i fullskala produksjon, dog ikke «ferdigutviklet»
Hydrogen, godstransport på vei	2030: Usikker 2050: Usikker	7	Enkelte demonstrasjoner i utlandet, på vei mot oppskalering i noen få markeder
Biogass, godstransport på vei	2030: Over 1 500 kr/tonn ¹⁶ 2050: Samme eller noe økende	9	Fortsatt produktutvikling og avhengig av støtte

4.5. Antagelser om teknologier i 2030

Det forventes at elektrifiseringstrenden fortsetter. Batteriutviklingen, systemintegrasjonen og produksjonsprosessene utvikler seg stadig videre og gir økt salgsvolum og reduserte kostnader i alle kjøretøysegmentene. Videre økning av salget i alle kjøretøykategorier, også for de tyngste kjøretøyene, forventes frem mot 2030.¹⁷ Det forventes tilgang til ladeteknologi og løsninger som på en effektiv måte kan hurtiglade alle kjøretøy innenfor rimelige pauser. Frem mot 2030 forventes det derfor at den batterielektriske salgsandelen vil øke betydelig fra dagens nivå, men avhengig av de virkemidlene som kommer for å støtte eksisterende og nye nullutslippsmål om salg av kjøretøy.

¹⁴ Estimat på tiltakskostnad for 2030 er hentet fra Miljødirektoratets rapport Klimatiltak i Norge mot 2030, dersom ikke annet er oppgitt. Sentrale antagelser og forutsetninger er beskrevet i rapporten. Rapporten kan hentes her: [Klimatiltak i Norge mot 2030: Oppdatert kunnskapsgrunnlag om utslippsreduksjonspotensial, barrierer og mulige virkemidler - 2023 - Miljødirektoratet \(miljodirektoratet.no\)](https://www.miljodirektoratet.no/utslippsreduksjonspotensial_bARRIERER_OG_MULIGE_VIRKEMIDLER_-_2023_-_Miljodirektoratet_(miljodirektoratet.no))

¹⁵ En negativ tiltakskostnad betyr at tiltaket er lønnsomt for samfunnet selv uten at klimagassutslipp er verdsatt. Det vil si at den utslippsfrie teknologien er betydelig billigere for samfunnet enn det fossile alternativet.

¹⁶ Tall fra Klimakur 2030.

¹⁷ MDir/SVV lastebilnotat 2030

Det er betydelig usikkerhet omkring fremtidige CO₂-priser, strømpriser, teknologiutvikling og kostnadsreduksjoner. De største usikkerhetene knytter seg til om annen teknologi kan få «gjennombrudd» som vi ikke har fått signaler om så langt. Nåværende forventning er at batterielektrisk drift blir ledende teknologi i de fleste kjøretøysegmenter, supplert med noe bruk av andre energibærere. Nøyaktig hvor høy andelen av andre energibærere enn elektrisitet blir i totalmiksen er usikkert. Vi forventer at mer enn 90 prosent av kjøretøyene i alle kjøretøykategorier på vei blir batterielektriske. Fordelingen mellom de andre energibærerne er vanskelig å forutsi.

4.5.1. Utfordringer for elektrifisering

Denne fortsatte økningen i elektrifisering forutsetter at sentrale utfordringer knyttet til for eksempel hurtiglading håndteres på en tidsriktig og tilstrekkelig måte. Dette gjelder blant annet mangel på nettilknytning, mangel på areal i utbygde områder og kostbar lading.

Det har vært en tydelig tilbakemelding fra markedet at nettilkopling er en av de største flaskehalsene for å etablere ladestasjoner. Dette handler om manglende kapasitet, kapasitet som er lovet vekk til andre og søknadsprosesser som tar tid. Ladestasjoner vil i all hovedsak trenge mer enn 1 MW. Minste ladestasjon som blir «godkjent» av EU er på 1,4 MW for tungbiler. Dette gjør at nesten alle ladestasjoner må søke Statnett om tillatelse. Det bør vurderes om terskelen for å måtte søke bør økes.

Konkurranse med langtidsplanlagt industri kan også være en utfordring. Industriprosjekter og omfattende reguleringsplaner har ofte lange planleggingshorisonter og melder inn behov for kraft tidlig. Ladestasjoner ønskes ofte å etablere seg på ca. ett til to års planleggingshorisont. Dette er også vanlig tidsramme for et Enova-tilskudd. Mange ladestasjoner kan derfor havne langt bak i køen. Rammene for nettselskapene er ofte slik at de ikke får bygge ut nett før kontrakter signeres, selv om det er tydelige signaler om økt behov. Dette gjør at ladestasjoner kan bli mer enn fem år forsinket i enkelte tilfeller.

Lite energieffektiv teknologi kan også føre til at nettilgangen for annen energi reduseres. Produksjon av hydrogen og syntetiske drivstoff bør ikke fortrenge prosjekter som fører til direkte elektrifisering.

4.5.2. Biogass

Biogass er et alternativ til elektrisk drift i tungbil-segmentet. Det er en god teknologi til å supplere der batterielektrisk fremdrift er for krevende, i en overgangsperiode. På sikt forventes det at teknologien vil bli utkonkurrert, spesielt i de markedene der det benyttes mye drivstoff.¹⁸ Biogassprisen forventes å ligge noe over dagens dieselpriis, mens elektrisitet har potensial til å utkonkurrere dieselpriisen. Rimeligere driftskostnader for batteri-elektriske kjøretøy er dermed forventet å føre til at biogass blir et nisjeprodukt der elektriske fremdrift ikke egner seg. Denne effekten har vi tidligere sett på personbiler, bybusser og ferjer. Vi ser at det nå registreres over 6 prosent biogasslastebiler. Dette utgjør om lag 1,5 prosent av energien i veitransporten. Dette kan vokse til ca. 2 – 3 prosent av kjøretøyparken i 2030.

4.6. Antagelser om teknologier i et lengre perspektiv

Automatisert kjøring og elektrisk vei kan påvirke veitransportsektoren i et lengre perspektiv.

4.6.1. Automatisert kjøring

Ved en fremtidig automatisert (autonom) godstransport vil tredelt kostnadsstruktur (sjåfør, bil, drivstoff) bli til en todelt kostnadsstruktur (bil og drivstoff). Bilprisene er ventet å øke som følge av mer teknologi knyttet til autonom drift. Både software og hardware vil bidra til dette. Det forventes likevel at drivstoffkostnaden for hvert enkelt kjøretøy vil øke mer, på grunn av mulighet for økte kjørelengder per trekkvogn og tralle (produksjon av tonnkilometer og volumkilometer). Det forventes derfor at ved en eventuell automatisering vil betydningen av drivstoffkostnad øke og batterielektrisk drift derfor ha potensial til å øke sin konkurransekraft i markedet. Dette vil spesielt være tilfelle ved autonome ladeløsninger.

¹⁸ [Microsoft Word - Biogass i bomringen - arbeidsdokument rapport versjon 25.1.23 \(storage.googleapis.com\)](#)

En risiko for feilinvestering knyttet til automatisert kjøring er investering i døgnhvileplasser og servicetilbud knyttet til sjåfør. I en situasjon hvor automatisert kjøring blir normalen vil disse tilbudene kunne bli lite brukt. Ladeløsningene må i så fall kunne automatiseres (induktiv lading på ladestasjon, batteribytte eller robot-arm på konduktiv lading).

Det er store usikkerheter knyttet til potensialet for automatisert kjøring på norske veier, spesielt på kort og mellomlang sikt. Dette gjelder punktene omtalt i foregående avsnitt, men også om/når det blir teknisk mulig å gjennomføre automatisert kjøring i større skala på norske veier, spesielt utenfor motorveinettet.

4.6.2. *Elektrisk vei*

Dynamisk lading av kjøretøyet under kjøring vil kunne redusere stopptid for kjøretøy og redusere batteristørrelser på bilene. Dette gjøres konduktivt eller induktivt langs veien, ved hjelp at kjøreledninger (som for tog) eller ved spoler under asfalten. Teknologien er under utprøving en rekke steder i verden og ansees for å være relativt moden når det gjelder kjøreledninger, men fortsatt på utprøvsstadiet for induktive løsninger. Kjøreledninger er en rimeligere teknologi, men kan kun benyttes at høye og tunge kjøretøy, mens induktiv teknologi kan benyttes av alle.

Når kostnaden ved en slik infrastrukturbygging kan deles på mange kjøretøy/brukere kan løsningen bli lønnsom, praktisk og ressursbesparende. Norge har imidlertid få slike strekninger som vil egne seg for stortilt utbygging. Det er derfor sannsynlig at dersom denne løsningen kommer til Norge, vil det være andre land med større transportgrunnlag som vil benytte teknologien i en tidlig fase for å utvikle den videre.

Risikoen for feilinvestering er først og fremst i ladeinfrastruktur på ladestasjonen. Denne infrastrukturen vil kunne bli lite brukt dersom induktiv og/eller konduktiv lading blir bygget ut i stor skala, men dette virker per dato lite sannsynlig på kort og mellomlang sikt i Norge.

5. Sjøtransport

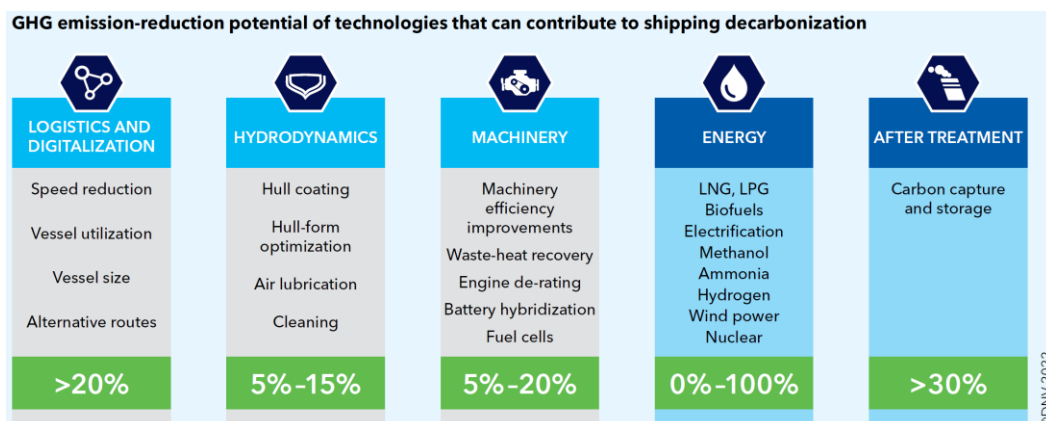
Sjøtransporten er på lik linje med øvrige transportformer i en omstillingsfase der stadig strengere krav til klima og miljøprestasjon gjøres gjeldende. Som et ledd i dette skal maritim transport for eksempel innlemmes i EU sitt klimavotesystem fra 1. januar 2024. Kvoteplikten vil i første omgang gjelde kommersiell transport av varer eller passasjerer på skip med bruttotonnasje 5 000 bruttotonn eller mer, og som er regulert under MRV-forordningen. I dette arbeidsdokumentet har vi valgt å fokusere på tre teknologier: forbrenningsmotor, batteri og brenselcelle. Drivstoff som er relevante for disse trekkes frem, men diskuteres i ikke i dybden. Målet er karbonnøytral drift og drivstoffene antas derfor å være karbonnøytrale.

Sjøtransporten bærer preg av å være en sektor sammensatt av mange forskjellige typer fartøy med ulik last, et stort spenn i skipstørrelser og operasjoner som varierer fra korte fjordkryssinger til interkontinental fart. Med andre ord er skipene bygd for mange ulike formål og i liten grad standardiserte. Teknologitvillingen gjenspeiler dette ved at en har funnet gode utslippsreducerende løsninger for enkelte segmenter, som for eksempel helelektriske ferger, mens det fremdeles er mye utvikling som gjenstår for tilsvarende reduksjon i andre segmenter, eksempelvis for havgående fiskefartøy og større godsskip. Sammenlignet med de andre transportformene skiller sjøtransporten seg ut ved at det ikke bare skal utføres et transportarbeid, men hvert enkelt skip skal også opprettholde alle nødvendige fasiliteter for en større besetning over lengre perioder (opptil uker og måneder). Flere skipstyper har også store energibehov til ulike arbeidsoperasjoner, som for eksempel tunge løfteoperasjoner eller prosessering av last om bord. Dette medfører flere og mer omfattende systemer om bord, og dermed også et høyt energibehov som ikke bare er knyttet til fremdrift (transportarbeid).

Den mangfoldige sektoren med de sammensatte systemene om bord gir på en annen side flere muligheter for avkarbonisering. DNV illustrerer dette i sin rapport *Maritime Forecast to 2050*¹⁹ med fem overordnede

¹⁹ [Maritime Forecast to 2050 – DNV](#)

kategorier som hver omfavner ett eller flere tiltak. Som vist i Figur 7 er kategoriene «Logistikk og digitalisering», «Hydrodynamikk», «Maskineri», «Energi» og «Etterbehandling». Det er mye å hente i de forskjellige kategoriene, men skal en oppnå 100 prosent reduksjon i utslipp av drivhusgasser må karbonnøytrale drivstoff benyttes.



Figur 7 Reduksjonspotensialet for klimagassutslipp for forskjellige teknologier. DNV 2022 – Maritime Forecast to 2050.

Forbrenningsmotoren har vært den ledende teknologien innen skipsfart i rundt 100 år. Den har mange fordeler. Konvensjonelle oljebaserte drivstoff er pålitelige og bruker en relativt enkel teknologi. Så langt er det elektrifisering med batterier som utgjør hoveddelen av avkarboniseringen som er gjort i innenriksflåten. Teknologien anses i dag som moden, men høy grad av elektrisk drift er i dag kun gjennomførbart på utvalgte skipstyper med spesifikke seilingsmønstre. Batterihybride systemer reduserer utslippene noe, men karbonnøytrale drivstoff må benyttes i tillegg for å oppnå full avkarbonisering. Innen brenselcelleteknologi foregår det stor utvikling, men det er få realiserte prosjekter og lite erfaring fra maritim anvendelse.

Figur 8 fra rapporten *Barometer for grønn omstilling av skipsfarten 2022* viser antall skip i innenriksflåten med grønne teknologier²⁰. Den totale innenriksflåten er oppgitt til 3 755 skip, mens 200 av disse er utstyrt med forskjellige typer «grønne teknologier». Merk at tallene ikke inkluderer mindre fartøy som for eksempel små kystfiskefartøy og små servicebåter brukt i havbruksnæringen. Særlig i havbruksnæringen er bruk av plug-in batterihybrid utbredt. Selv om den største andelen nullutslippsteknologi i innenriksflåten i dag er batterier, så jobbes det med alternativer, og det er forventet at andelsfordelingen vil endre seg i et lengre perspektiv.

LNG batterihybrid	LNG	Plug-in batterihybrid (MGO)	Helelektrisk/høy elektrifiseringsgrad	Hydrogen	Totalt
31	32	59	77	1	200

Figur 8 Antall skip med grønne teknologier og batterihybrid i seilende innenriks flåte i 2022. DNV 2023 – Barometer for grønn omstilling av skipsfarten 2022.

5.1. Helelektrisk drift med lading fra land

De helelektriske fartøyene som omtales her har batterisystemer som utelukkende lades med strøm fra land og har derfor ingen direkte klimagassutslipp. Hvor lenge et skip kan operere mellom hver lading avhenger av størrelsen på batteriene om bord, type batteriteknologi, og hvor stor effekt driften av skipet krever.

Mens det tidligere har vært en tanke om at kun ferger i kortere samband kan helelektrifiseres, ser en nå en økende grad av elektrifisering også i andre segmenter. Dette henger sammen med utvikling i batteriteknologi

²⁰ Gassteknologi (LNG), batterisystem med mulighet for lading fra land (plug-in hybrid) og teknologi for drift på hydrogenbaserte drivstoff (hydrogen, ammoniakk og metanol).

og at bruk av strøm er energieffektivt og gir de laveste energikostnadene og livssyklusutslippene. Under følger noen flere eksempler på helelektrifisering, hvor konseptene har varierende grad av modenhet:

- Hurtigbåter
- Kortdistanse lasteskip i faste ruter
- Offshoreskip
- Akvakulturanlegg og service-/arbeidsbåter

Forhold ved infrastruktur for lading (tilgjengelig effekt, tilkoblingsløsning, overføringskapasitet, totalbelastning i kraftnettet, etc.) er den dominerende barrieren for et fartøy å operere helelektrisk²¹. Ladepunktene må være plassert tett nok, på lokasjoner som passer med seilingsruten og med tilstrekkelig effekt til å minimere/eliminere tid brukt kun på lading. Med andre ord er det behov for mye kraft på lokasjoner langs kysten som er langt unna der produksjonen er i dag. Dette fører til et behov for økt kraftproduksjon, utbygging av kraftnett, og/eller etablering av kraftproduksjon lokalt der det er et behov.

Lønnsomheten ved bruk av en teknologi avhenger både av investeringskostnaden og operasjonskostnaden. Strøm har lavest energikostnad sammenlignet med hydrogen, ammoniakk og syntetiske drivstoff, noe som kan veie opp for en økt investeringskostnad, men operasjonskostnaden avhenger av hvilken pris ladetilbyderen krever.

5.2. Hybride løsninger

Majoriteten av skip kan ikke sammenlignes med kjøretøy i for eksempel landtransport, som kan ha kun én energiomformerteknologi og være nullutslipp. Eksempelvis har offshorefartøy det siste tiåret i økende grad benyttet batterihybride systemer om bord for å bedre operasjonen og redusere kostnader. Basert på erfaringene fra batterihybride fartøy ser en nå mulighet for ytterligere utslippskutt og energibesparelser ved å kombinere batteri, forbrenningsmotor og brenselceller. Kapasiteten til hver av disse tre teknologiene kan da skreddersys ulike operasjonsmønstre. Motoren og brenselcellen yter best ved jevn belastning og kan håndtere det kontinuerlige kraftbehovet om bord, mens batteriet har egenskaper som gjør det i stand til å håndtere raske endringer i kraftbehov og kan kobles inn når det trengs. Sammen kan disse teknologiene bidra til at hver enkelt teknologi opereres optimalt og har lavest mulig forbruk.

Brenselcellen og batteriet har ingen direkte utslipp og vil være å foretrekke, også på grunn av fraværet av støy og vibrasjoner, mens forbrenningsmotoren kan være nødvendig for å oppnå tilstrekkelig rekkevidde. Utslipp fra bruk av motor vil avhenge av hvilke drivstoff som benyttes og i hvor stor grad motor benyttes. Fordeling av effekt på de tre energiomformingsteknologiene vil gjenspeile operasjonsmønsteret til skipet.

En motor for kombinert drivstoff ("dual fuel") kan bruke flere drivstoff, som for eksempel LNG og diesel, ammoniakk og diesel eller metanol og diesel. En ser at en slik fleksibel løsning er å foretrekke for redere som er usikre på hvilken grønn teknologi de skal satse på. Eksempelvis er alle nye containerskip bestilt i år er enten LNG eller metanol dual fuel (internasjonal flåte), men en må merke seg at hverken LNG, ammoniakk eller metanol som selges i dag er karbonnøytrale drivstoff.

5.3. Teknologistatus og kostnadsutvikling

TRL-verdiene i denne tabellen er hentet fra Sjøfartsdirektoratet sin rapport: *Nullutslipp i 2026 for skip i verdensarvfjordene*²². Det er ikke gjort forsøk på å skille ut de ulike teknologiene etter anvendelse innenfor ulike skipssegmenter og sette separat TRL for disse enkeltvis (ICE, batterilading, batteribytte, brenselcelle osv.). Det vil dermed ikke være noen en til en sammenheng mellom tiltakskostnad og TRL.

²¹ <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/juni-2023/klimatiltak-i-norge-mot-2030/>

²² [Nullutslipp i 2026 for skip i verdensarvfjordene.](#)

Tabell 2: TRL-vurderinger av teknologier innen sjøtransport

Anvendelse	CO ₂ (tiltakskostnad 2030/2050) ²³	TRL	Kommentar
Helelektriske hurtigbåter	2030: 2 000 kroner/tonn 2050: Usikker	8	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet
Helelektriske offshoreskip	2030: Usikker 2050: Usikker	-	Per i dag ingen tall på tiltakskostnad, men dette er en segment som har fokus fremover.
Helelektriske akvakulturanlegg og service-/arbeidsbåter	2030: 1 500 kroner/tonn 2050: Usikker	8	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet
Ammoniakk og biogass til offshorefartøy	2030: 3 000 kr/tonn 2050: Usikker	5/6	TRL vil kunne variere med ulike bruksprofiler innenfor segmentet
Ammoniakk eller hydrogen til store havbruksbåter	2030: 3 000 kr/tonn 2050: Usikker	5/6	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet f.eks. om drivstoffet benyttes i en brenselcelle eller i en forbrenningsmotor
Hydrogen til lasteskip	2030: 3 500 kr/tonn 2050: Usikker	6/7	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet
Metanol eller ammoniakk til havgående fiskefartøy	2030: 3 000 kr/tonn 2050: Usikker	5/6	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet
Avansert biodrivstoff i sjøfart	2030: 5 000 kr/tonn 2050: Usikker	8	TRL vil kunne variere med ulike teknologianvendelser innenfor segmentet

5.4. Antagelser om teknologier i 2030

I norsk skipsfart antas at i 2030 vil forbrenningsmotor med fossile drivstoff fortsatt vil være den dominerende teknologien. Av nullutslippsalternativer vil trolig batterielektrifisering være det mest dominerende i 2030. Selv om innfasing av nye teknologier og drivstoff skulle akselerere betydelig til 2030, f.eks. gjennom realisering av tiltakene for sjøfarten i Miljødirektoratets rapport *Klimatiltak i Norge mot 2030*²⁴, vil fossile drivstoff fortsatt utgjøre majoriteten av energiforbruket i 2030. Etter hvert vil trolig forbrenningsmotorer for kombinert drivstoff bli mer fremtredende. På enda lenger sikt kan brenselceller bli mer aktuelt for større deler av flåten. Det blir økt behov for tilgang til kraftinfrastruktur for elektrifisering av skip. Behovet for infrastruktur for andre drivstoff er usikkert, ettersom det ikke er tydelig hvilke(t) lav- eller nullutslippsdrivstoff som blir dominerende og hvor disse vil bli produsert. Utviklingen innenfor de andre transportformene vil påvirke og kunne sette rammer for utviklingen på sjøen, eksempelvis med tanke på tilgjengelighet av infrastruktur og drivstoff. Sterke virkemidler, som en betydelig økning i karbonpris eller krav til utslipp eller drivstoff, må trolig til for at alternativene tas i bruk. Eksempler på dette er norske krav, eller krav fra EU eller IMO, som er i ferd med å bli innført.

Teknologier som batterielektrisk og brenselceller er mest kostnadseffektivt på nybygg siden systemene skiller seg betydelig fra systemene om bord på et skip med dielelektrisk eller konvensjonelt fremdriftssystem. Et skip har typisk en levealder rundt 30 år, og det vil derfor ta lang tid før hele flåten er

²³ Estimert på tiltakskostnad for 2030 er hentet fra Miljødirektoratets rapport *Klimatiltak i Norge mot 2030*, dersom ikke annet er oppgitt. Sentrale antagelser og forutsetninger er beskrevet i rapporten. Rapporten kan hentes her: [Klimatiltak i Norge mot 2030: Oppdatert kunnskapsgrunnlag om utslippsreduksjonspotensial, barrierer og mulige virkemidler - 2023 - Miljødirektoratet \(miljodirektoratet.no\)](https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/juni-2023/klimatiltak-i-norge-mot-2030/)

²⁴ <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/juni-2023/klimatiltak-i-norge-mot-2030/>

skiftet ut med nye skip med ny teknologi, spesielt siden en fremdeles ser at de aller fleste skip ikke bestilles med lav- eller nullutslippsteknologi.²⁵ For majoriteten vil enkleste løsning frem mot 2030 være å benytte forbrenningsmotorer med innblanding av lav- eller nullutslippsdrivstoff.

Utviklingen mot en lav- eller nullutslippsskipsfart handler mer om det som skjer på land enn om teknologi om bord. Konsulentselskapet University Maritime Advisory Services (UMAS) og Energy Transitions Commission (ETC) har publisert en studie²⁶ som viser at rundt 87 prosent av investeringskostnaden ved avkarbonisering av skipsfarten ved bruk av ammoniakk som energibærer gjelder investeringer i drivstoffproduksjon, mens kun 13 prosent er investeringer i teknologi på skipet.

5.5. Antagelser om teknologier i et lengre perspektiv

I DNVs rapport *Transport in Transition* trekkes batterier og elektrifisering frem som den langsiktige løsningen for kystskipsfarten. For fartøy med noe større distanse mellom anløp er det hybride løsninger som baserer seg på batterier, men med utvidet rekkevidde med bidrag fra brenselceller eller forbrenningsmotor med null- eller lavutslippsdrivstoff som vil dominere. DNV mener videre at skip i interkontinental fart vil ha forbrenningsmotorer, men benytte bio- eller syntetiske drivstoff. Bakgrunnen for dette er den høye energitettheten til disse drivstoffene. Samtidig er det en ulempe at forbrenningsmotoren ikke er spesielt energieffektiv.

DNV vurderer i *Maritime forecast 2050* at fremtidens drivstoffmarked for skipsfart vil være mer variert og avhengig av flere energikilder. Det vil også i større grad være sammenkoblet og innlemmet i regionale energimarkeder, energiproduksjon og industri. Tilgjengeligheten og prisen på energikilder som fornybar elektrisitet, bærekraftig biomasse eller fossil energi med karbonfangst og -lagring (CCS) vil være avgjørende for fremtidig drivstofftilførsel i skipsfart. Videre påpekes det at de betydelige barrierene mot opptak av karbonnøytrale drivstoff kan være en forretningsmessig begrunnelse for fortsatt bruk av fossilt brensel med CSS om bord.

«Ny kjernekraft», i form av små modulære reaktorer og fjerdegenerasjons reaktorteknologi, er noe som så langt ikke har blitt inkludert i utviklingsprognoser for skipsfarten, men som stadig får mer omtale og oppmerksomhet. World Nuclear Transport Institute (WNTI) uttalte under sin presentasjon i IMO MEPC 80 at «Nuclear ships will follow, due to the strength of the solution», og Bureau Veritas skriver i sin *Alternative Fuels Outlook for Shipping* at «Nuclear [...] might disrupt the shipping energy transition in the future». Etter hvert som barrierene mot karbonnøytrale drivstoff blir tydeligere, virker barrierene mot ny kjernekraft mer overkommelige. Utviklingen tar tid, og trygg operasjon på land må demonstreres før teknologien kan nyttes i maritim sektor. Dersom ny kjernekraft blir en realitet i sjøfarten antas teknologien mest relevant for skip i interkontinental fart, og kanskje også for større passasjerfartøy og havgående fiskefartøy. Drivstoff vil da ikke være begrensende for hvor lenge et skipet kan operere uten å gå til en havn.

6. Jernbanetransport

Store deler av jernbanenettet er elektrifisert i form av en kjøreledning som mater strøm til togene. Rundt 80 prosent av dagens jernbanetrafikk er utslippsfri da den skjer på elektrifiserte strekninger. Det er imidlertid deler av jernbanedriften som ikke er elektrifisert, og som i dag benytter fossilt brensel i form av diesel. I tillegg har vi også utslipp fra arbeidsmaskiner i forbindelse med drift og vedlikehold av jernbanen. Landets lengste jernbanestrekning, Nordlandsbanen, kjøres i dag med dieseldrevne tog, i likhet med Raumabanen og Røros- og Solørbanen (se figur 9).

²⁵ DNV 2023 – Barometer for grønn omstilling i skipsfarten 2022

²⁶ https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2020/01/UMAS-The-scale-of-investment-needed-to-decarbonize-international-shipping-2020_01.pdf



Figur 9: Oversikt over de ikke-elektrifiserte strekningene med togtilbud/transporttype.

Trafikk på dagens ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger medfører et årlig utslipp på om lag 50 000 tonn CO₂-ekvivalenter, hvor Nordlandsbanens andel er opp mot 70 prosent. Selv om jernbanens andel av klimagassutslippene er små (0,1 prosent av nasjonale utslipp²⁷), er det forventet at klimafotavtrykket fra jernbanen øker fremover som følge av kapasitetsøkende tiltak og økt transportarbeid på de ikke-elektrifiserte strekningene, særlig Nordlandsbanen. Basert på foreliggende NTP-prognose er det blant annet forventet en vekst på 36 prosent i antall togkilometer for Nordlandsbanen i perioden 2030-2060. Vekst i antall togkilometer for de ikke-elektrifiserte strekningene samlet er prognostisert til cirka 30-40 prosent, avhengig av banestrekning²⁸. Dette medfører en økning av årlige utslipp på inntil 20 000 tonn CO₂-ekvivalenter fra jernbanetrafikk (til totalt 70 000 tonn/år).

6.1. Teknologutvikling for jernbanetransport

Jernbanens infrastruktur og kjøretøy har lang levetid og strenge krav til robusthet. I tillegg er jernbanen et komplekst system sammensatt av mange fag og avhengigheter på tvers av geografi. Av den grunn er det også omfattende krav til sikkerhet og driftsstabilitet. Som et eksempel har den norske jernbanen krevende driftsforhold, hvor kjøretøy som skal nyttes i hele landet må ha krav til driftsstabilitet ned til -40 grader C²⁹. De fleste andre markeder har ikke behov for å benytte et slikt krav; dette kan for norske innkjøp medføre endrede konstruksjonskrav og krav til komponenter. Jernbanen har derfor tidkrevende prosesser for godkjenning, og store krav til dokumentasjon av sikkerhet. Igangkjøring av ny teknologi vil derfor gå langt mer langsomt i jernbaneindustrien enn for eksempel i veisektoren, som preges av svært hyppigere omsetning av kjøretøy med kortere levetid. Det er også en sterk avhengighet mellom kjøretøy og infrastruktur på

²⁷ [Utslipp til luft \(ssb.no\)](https://utslipp.til.luft.ssb.no)

²⁸ Vekst basert på prognoser i nasjonal godsmodell fra beregningsår 2030 til 2060 i KVVU Green.

²⁹ <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2022-05-25-943>

jernbane, hvilket innebærer at endringer iverksatt i infrastrukturen også må være kompatible med kjøretøyene og omvendt. Dette vil, ved en teknologiovergang, ha potensial for å utløse større investeringsbehov enn bare på selve infrastrukturen.

Det finnes allerede i dag en velutprøvd teknologisk løsning for jernbane som ikke medfører klimagassutslipp fra togfremføring (person og gods). Om lag 3/5 av det statlige jernbanenettet er i dag elektrifisert med kontaktledningsanlegg (KL), hvorpå rundt 80 prosent av all togtrafikk fremføres på de elektrifiserte strekningene. Teknologien er svært moden og har vært i bruk i over 100 år. Det pågår imidlertid kontinuerlig utvikling og forbedring av teknologien som for eksempel energieffektivisering, men denne er svært inkrementell hvilket betyr at det ikke er ventet store forbedringer hva angår egenskaper og ytelse.

De største barrierene for å etablere kontaktledningsanlegg er høye investeringskostnader i forhold til utnyttelsesgraden på de ikke-elektrifiserte strekningene. I tillegg er det store tilpasningsbehov på strekningene som driver kostnadene ytterligere opp, som blant annet utskiftning av bruer og utvidelse av tunnelprofiler. Ny teknologi må derfor forsere disse barrierene, og samtidig være kompatibel og robust nok til å imøtekomme de strenge kravene til sikkerhet og driftsstabilitet.

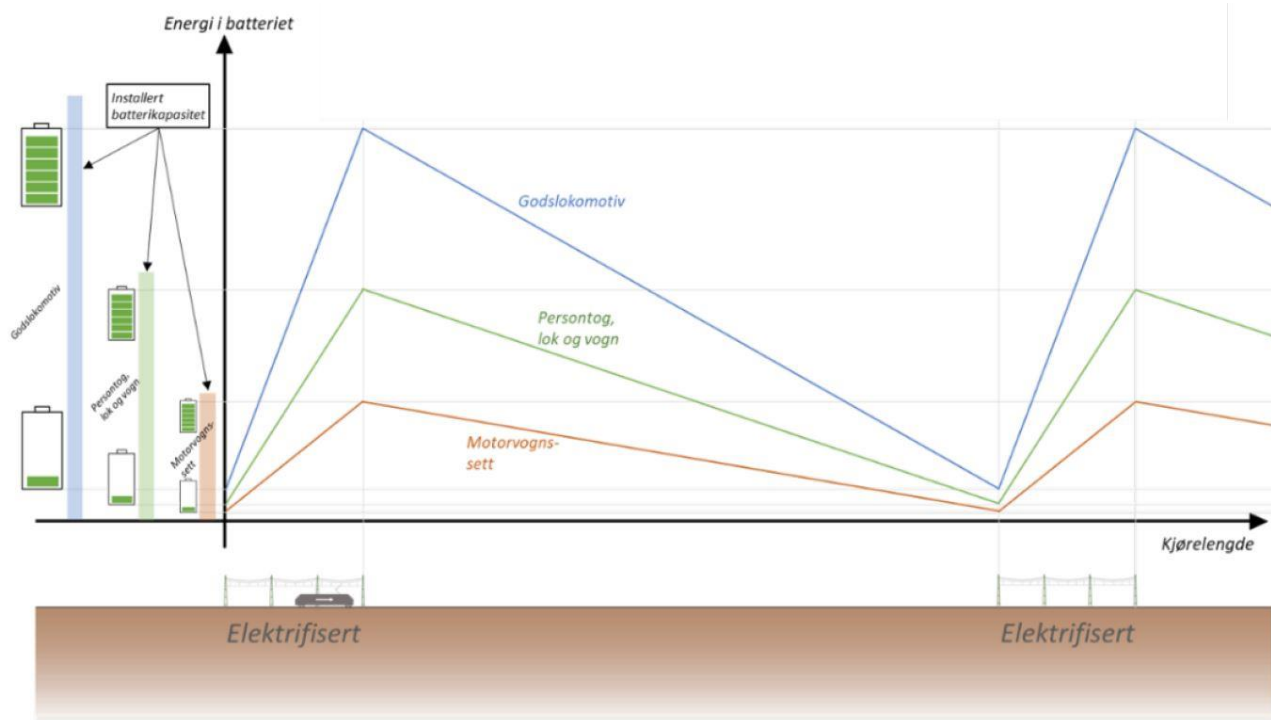
Som en oppfølging av Jernbanedirektoratets utredninger på nullutslippsløsninger for ikke-elektrifiserte strekninger (NULLFIB, 2019 og NULLFIB 2, 2021), har regjeringen bestilt en konseptvalgutredning (KVU) som skal vurdere aktuelle energibærere for den ikke-elektrifiserte driften av jernbanenettet³⁰. Jernbanedirektoratet leverer KVU Green til Samferdselsdepartementet tidlig høsten 2023, hvor inngående analyser og anbefaling av teknologisk løsning fremkommer. For konkrete anbefalinger og konklusjon om teknologivalg i jernbanedriften, henvises det derfor til KVU Green. I denne leveransen har Jernbanedirektoratet og Bane NOR lagt vekt på å beskrive batteriteknologi og hydrogen som eksempel teknologier ettersom disse energibærerne også fanger opp hybride alternativer i kombinasjon med kontaktledningsanlegg (KL). I sum vil beskrivelsen derfor dekke det meste av det teknologiske mulighetsrommet som er identifisert i tidligere utredninger av valgbare alternativer til bruken av fossile drivstoff i jernbanesektoren.

6.2. Batteriteknologi

Som følge av økt etterspørsel etter batteriløsninger for veigående kjøretøy, har utviklingen for batteriteknologi generelt skutt fart de siste ti årene. Batteridrift for jernbanekjøretøy har også vært i rask utvikling, men grunnet høye krav til levetid, kompatibilitet og robusthet er utviklingen ikke kommet like langt som i bilindustrien. Flere leverandører av jernbanekjøretøy har derimot på relativt kort tid utviklet konsepter for bruk av batterier til fremføring av jernbanekjøretøy. De fleste løsningene som er under testing og levering er av typen kortere motorvognsett for bruk i Sentral-Europa, og spesielt i Tyskland. Det finnes også løsninger og produkter som er blitt levert og testes for lokomotiver til godstrafikk. Disse er primært testet på det nordamerikanske markedet.

På bakgrunn av Jernbanedirektoratets energisimuleringer på de ikke-elektrifiserte strekningene, vil det være behov for å kombinere en eventuell batteridrift med KL. Selv om batteriene stadig blir billigere og får mer ytelse, er det likevel nødvendig å sikre tilførsel av strøm til batteriene under kjøring gitt lengden på Nordlandsbanen og Røros- og Solørbanen, samt stigningen på Raumabanen. Med dagens batteriteknologi må derfor enkelte deler av strekningene elektrifiseres med KL-anlegg, slik prinsippskissen nedenfor demonstrerer (se figur 10).

³⁰ Supplerende tildelingsbrev 2022 nr. 3 – Jernbanedirektoratet.



Figur 10: Prinsipper for hvordan installert energimengde og ladeffekt vil optimaliseres i sammenheng med deelektrifiseringen for å oppnå en gunstig utnyttelse av batterikapasiteten i de forskjellige kjøretøyene. Merk at stigningen på kurvene som viser aktuell ladestatus for de tre forskjellige kjøretøyene representerer ladeffekten og forbrukseffekten, der godstoget (trukket av godsløkomotivet) vil ha den høyeste effekten. I dette eksemplet er det illustrert en margin i den brukte batterikapasiteten i forhold til den installerte batterikapasiteten. Hentet fra NULLFIB2 (2021).

I foreliggende NULLFIB-utredninger har denne teknologiske løsningen gitt gode resultater. Mye av årsaken til det er at teknologien ansees å være robust, sikker og stabil, samtidig som at investeringskostnaden reduseres betydelig i forhold til standard KL, hvor hele strekningen må elektrifiseres. For Nordlandsbanen er det for eksempel vist gjennom utredningene at i underkant av 35 prosent av strekningen må elektrifiseres for at en batteriløsning skal fungere.

Hybride KL-batteri motorvognsett er kommersielt tilgjengelige, og det finnes forskjellige løsninger for integrering av batteriene i kjøretøyet. Valg av batterikjemi vil ha betydning for volum og vekt for batteriene og dermed påvirke rekkevidden for kjøretøyet på ikke-elektrifiserte strekninger. På en TRL-skala fra 1-9 vurderes det at TRL-nivået for motorvogner for kortere tog av typen regiontog, og regiontog i distrikt (ca. 55 meter lange), er mellom 8 og 9 per 2023. For lengre motorvognsett (fjerntog – 220 m) vurderes TRL-nivået til å være 6 i 2023. For større bimodale KL-batterilokomotiver for bruk til godstog, og som skal ha lengre rekkevidde, så er markedet for slike løsninger ikke kommet like langt som for mindre lokomotiver og motorvognsett. På en TRL-skala vurderes det at TRL-nivået for store lokomotiver ikke er høyere enn 7 per 2023, og at det vil mest sannsynlig modnes til nivå 9 i 2030. Dette gjelder for lokomotiver med batterier innlemmet i selve lokomotivet. For lokomotiv med egen batterivogn antyder opplysninger fra leverandører at teknologien ikke er kommet lenger enn TRL-nivå 6. Vurderingene av TRL-nivå er basert på informasjon som KVVU Green har fremskaffet fra leverandørsiden gjennom blant annet RFI.³¹

³¹ Vurderingene av TRL-nivå er basert på informasjon som KVVU Green har fremskaffet fra leverandørsiden gjennom blant annet RFI.

Tabell 3: TRL-vurderinger av batteriteknologier innen jernbanetransport

Anvendelse	CO ₂ (tiltakskostnad 2030/2050)	TRL 2023	Kommentar
Kortere bimodalt motorvognsett (distrikts- og regiontog)	2030: 500-1700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	8/9	Teknologi er å anse som moden, men er ikke prøvd eller tatt i bruk under norske forhold.
Lengre bimodalt motorvognsett (fjerntog)	2030: 500-1700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	6	Piloter gjennomført under relevante driftsbetingelser.
Lokomotiv med integrert batteri	2030: 500-1700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	7	Fullskala prototype i markedsrelevant skala. Antas TRL 9 innen 2030.
Vogn med batteri som kobles til lokomotiv (energivogn)	2030: 500-1700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030	6	Piloter gjennomført under relevante driftsbetingelser.

Med dagens batteriteknologi er det dokumentert i utredningene som er gjennomført at en teknologiovergang til batteridrift er mulig dersom det finnes en infrastruktur for lading. Forskning og utvikling viser at det er et vesentlig potensial for forbedring av batteriegenskaper for jernbanekjøretøy. Et konservativt anslag i NULLFIB 2-utredningen (2021) viser at mot 2030 vil energitettetheten for batteripakker til jernbanekjøretøy utvikles til å lagre det dobbelte av energimengden per liter volum. Dette demonstrerer at videre utvikling av batteriteknologi ikke er relevant for om en teknologiovergang fra diesel til batteri er *mulig*, men heller at det vil ha betydning for kostnadsbildet og hvilken robusthet det er mulig å bygge inn i de ulike trafikkoppleggene.

Når det gjelder kostnader for infrastruktur vil besparelsene fra en batteriløsning primært være et vesentlig redusert behov for investering i KL-anlegg, sammenlignet med full elektrifisering. Det er imidlertid ikke ventet at investeringskostnaden for KL-anlegg i seg selv vil reduseres. Kostnadsbesparelsene for infrastruktur vil dermed variere, avhengig av hvilken strekning som skal elektrifiseres. For Nordlandsbanen viser de siste beregningene en netto samfunnsøkonomisk kostnad på 580 kroner redusert per tonn CO₂-ekvivalenter. Det er ventet at kostnader for batteripakker ombord i kjøretøyene vil reduseres i takt med at ytelsene øker.

Prisen for høyenergi- og høyeffektpakker i 2030 er i utredningene og KVVU Green antatt å være 10 – 50 prosent lavere enn dagens prisnivå, men slike anslag er svært usikre. Selve kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader avhengig av hvilken type tog som anskaffes, og graden av elektrifisering. Samlet er det forutsatt i KVVU Green cirka 16 mrd. kroner i totale investeringsbehov for togmateriell på alle ikke-elektrifiserte strekninger med batteriteknologi. Innsparinger som følge av lavere driftskostnader sammenlignet med diesel, og lavere investeringskostnader i infrastruktur sammenlignet med hel-elektrifiseringer, veier i stor grad opp for investeringsbehovene for kjøretøy.

6.3. Hydrogen

Det er også teknologisk mulig å benytte samme hybride prinsipp på andre typer energibærere. Hydrogen i kombinasjon med del-elektrifisering er et annet eksempel på slike hybride løsninger med del-elektrifisering i form av KL-anlegg. Et slikt driftsopplegg vil kunne medføre mindre behov for KL-anlegg sammenlignet

med tilsvarende løsning med batteri. Det er i hovedsak tre grunner til å del-elektrifisere en banestrekning der kjøretøy drives av hydrogen, gitt at disse også kan fremføres med energi fra kontaktledning:

- Redusere driftskostnader ved å redusere bruken av hydrogen
- Muliggjøre økt fremføringshastighet på energikrevende deler av strekningen
- Redusere størrelsene på hydrogentankene ombord kjøretøyene

Del-elektrifisering på de riktige stedene kan dermed gi lavere driftskostnader, høyere gjennomsnittshastighet og økt transportkapasitet på strekningen i sin helhet. Disse effektene slår inn også for kombinasjonen med batteri, men hydrogenalternativet krever i snitt mindre utbygging av KL-anlegg enn batteriløsningen. I tillegg til infrastruktur langs linjen medfører hydrogenalternativet ytterligere tiltak i både infrastrukturen og kjøretøyflåten. Anlegg for produksjon, lagring, omtapping og fylling av hydrogen må etableres, i tillegg til relativt store arealer for sikkerhetssoner. I likhet med batteriløsningen må det investeres i nye eller ombygde kjøretøy, samt etablere en produksjons- og forsyningskjede som kan sikre stabil leveranse av hydrogen.

De senere årene har flere leverandører av jernbanekjøretøy utviklet hydrogendrift basert på brenselcelleteknologi. På en teknologisk modenhetsskala vurderes det at TRL-nivået for motorvogner for kortere tog av typen regiontog i distrikt, ca. 55 meter lange, er på nivå TRL 8/9 per 2023, og at det vil være på nivå 9 i 2030. For lengre motorvognsett inntil 90 meter vurderes TRL-nivået til å være TRL 8/9 i 2023. For motorvognsett som f.eks. regiontog i distrikt 110 m og fjerntog 220 m er usikkerheten stor, da det i foreliggende kunnskapsgrunnlag ikke er funnet opplysninger om at det utvikles hydrogenløsninger for lange motorvognsett. Grunnen for dette er trolig at langdistansekjøring krever mye plass til hydrogen lagringstanker, noe som vil belegge store deler av passasjerkapasiteten. Del-elektrifisering vil dermed være et gunstig botemiddel. For små lokomotiver med kort rekkevidde (skiftelokomotiv), er det allerede i dag kjøretøy i drift på TRL 8 som kan bestilles. For større lokomotiver for bruk til godstog med lengre rekkevidde viser opplysninger fra leverandørene at markedet for slike løsninger ikke kommet like langt som for mindre lokomotiver og motorvognsett. For hydrogendrift av større lokomotiver må det antas at lagringskapasiteten for hydrogen må være i egen vogn. TRL-nivået for store lokomotiver er vurdert som høyest nivå 5 for hydrogenbasert godslokomotiv og TRL-nivå 6 for energivogn med hydrogen.

Tabell 4: TRL-vurderinger av hydrogenteknologier innen jernbanetransport³²

Anvendelse	CO ₂ (tiltakskostnad 2030/2050)	TRL 2023	Kommentar
Kortere motorvognsett (distrikts- og regiontog)	2030: 1500-2700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	8/9*	Teknologi er å anse som moden, men er ikke prøvd eller tatt i bruk under norske forhold.
Lengre motorvognsett (fjerntog)	2030: 1500-2700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	6*	Piloter gjennomført under relevante driftsbetingelser.
Godslokomotiv	2030: 1500-2700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030.	5*	Teknologien er testet i laboratorieskala. Eksperimentell utvikling med høy usikkerhet gitt teknologisk kompleksitet.
Vogn med hydrogen som kobles til lokomotivet (energivogn)	2030: 1500-2700 kr/tonn, avhengig av andelen elektrifisering og banestrekning 2050: Usikkert, mest sannsynlig lavere kostnad enn i 2030	6*	Piloter gjennomført under relevante driftsbetingelser.

³² Status på regelverksutvikling inngår ikke i vurderingen av TRL, noe som er av særskilt betydning for denne teknologien.

6.4. Antagelser om teknologier i 2030 og 2050

Gitt kostnads- og teknologiutviklingen for batteriløsninger, antas det at batteri i kombinasjon med del-elektrifisering vil være aktuelt på kort sikt (2030) for å redusere bruken av fossile drivstoff til jernbanetraffikk. I dag er det ikke noe gjeldende regelverk for hydrogen spesifikt, og flere jernbanespesifikke regelverk inkluderer foreløpig ikke hydrogen. Store deler av regelverket som må tilfredsstilles er regelverk basert på at de ansvarlige for sikkerheten skal gjøre risikovurderinger som konkluderer med at risikoakseptkriteriene er oppfylt. Usikkerhet knyttet til grunnleggende sikkerhetsforhold, samt teknologi- og regelverksutvikling, medfører at det er høyere sannsynlighet for at hydrogen først på lengre sikt vil være et aktuelt alternativ for bruk i jernbanesektoren. Norge er et lite marked som er avhengig av utviklingen internasjonalt. Det finnes noen eksempler på bruk av hydrogen til relativt korte lokal- og regiontog i Europa, men aktuelle aktører som LNVG har den siste tiden gått bort fra hydrogen på grunn av for høye driftskostnader som skyldes lavere virkningsgrad enn elektrisk drift.³³ Arbeidet som pågår i Europe's Rail om standardiserte fyllegrensesnitt har videre særskilt betydning for interoperabiliteten³⁴ av norsk jernbane mot utlandet. Etablering av standardiserte fyllegrensesnitt er en forutsetning for å oppnå denne interoperabiliteten. Det henvises til anbefalinger i KVVU Green for detaljert informasjon om teknologistatus for hydrogen til bruk i jernbanedriften.

I et lengre perspektiv (frem mot 2050) er både batteri og hydrogen aktuelle teknologier, både med og uten støtte fra KL-anlegg, avhengig av teknologiutvikling. Det er ventet at kostnadene for disse teknologiene vil reduseres, men Norge er avhengig av hvordan markedet utvikler seg ellers i Europa. Samtidig som at interoperabiliteten til norsk jernbane mot det europeiske er en forutsetning, er det også et vesentlig poeng at redundansen i det norske jernbanenettet opprettholdes. Teknologier som velges på kort sikt har derfor betydning for hvilke teknologier som er valgbare på lengre sikt, uavhengig av hvor moden teknologien er. Det vil for eksempel være uheldig at enkelte jernbanestrekninger kun er mulig å operere med én spesifikk teknologi. Dette vil kunne svekke fleksibiliteten i jernbanesystemet i situasjoner med opphold hvor jernbanetraffikken må benytte seg av alternative ruter.

7. Luftfart

Det foregår en rekke utviklingsløp for innfasing av null- og lavutslippsteknologi i luftfarten, med ulike konsepter for ulike markedssegmenter. Utviklingen har skutt fart siden 2017, og ifølge konsulentfirmaet Roland Berger er det nå over 300 kjente initiativ (Roland Berger, 2021). En stor andel av initiativene er relatert til helelektriske og hybrid-elektriske løsninger, men de siste årene har flere hydrogeninitiativ kommet til, i hovedsak innenfor regional luftfart og større kommersielle fly.

Med unntak av små elektriske fly, er bærekraftig flydrivstoff (SAF) den eneste fossilfrie muligheten som er tilgjengelig i dag, og den eneste løsningen for de lange flygningene – trolig også på lengre sikt. SAF vil derfor spille en helt sentral rolle i mange år fremover ved å redusere utslipp i eksisterende flåte før null- og lavutslippsteknologier kan ruller ut i betydelig omfang.

Det kan skilles mellom to hovedkategorier av luftfartøy, hhv. ordinære fly med fastmonterte vinger (fixed wing) og luftfartøy med vertikale egenskaper (eVTOLs – electric Vertical Take-Off and Landing). Det er mye som er felles ved utviklingen av disse luftfartøyene, herunder batterier, elektriske motorer, styringssystemer osv. Luftfartøyene vil dekke ulike segmenter av markedet, og har ulike krav til infrastruktur. I denne besvarelsen vil hovedfokus være på null- og lavutslippsfly (fixed wing). For nærmere omtale av utviklingen innenfor luftfartøy med vertikale egenskaper viser vi til Avinors svar på NTP-utredningsoppdraget.

³³ [No more hydrogen trains | Rail company that launched world's first H2 line last year opts for all-electric future](#)

³⁴ Interoperabilitet betyr i denne sammenheng at norsk jernbane må kunne ha et funksjonelt grensesnitt mot det svenske og europeiske tognettet.

7.1. Teknologitviking for luftfart

Luftfarten har opplevd en gradvis forbedring av fly- og motorteknologi de siste tiårene, slik at utslipp målt per setekilometer har blitt betydelig redusert. Samtidig er det klart at det må nye teknologiske løsninger på plass for at utslippene fra luftfarten skal reduseres for å nå klimamålene.

Per i dag er det ikke én teknologi eller én type drivstoff/energibærer som peker seg ut som løsningen for luftfarten. Det er derfor et betydelig behov for forskning og innovasjon knyttet til utvikling av både teknologi og drivstoff inntil hensiktsmessige valg kan tas for å dekke behovet i ulike segmenter av markedet. Det er også viktig å understreke at det er behov for å legge til rette for utvikling av hele økoystemet, herunder infrastruktur, regelverk, standarder og andre offentlige myndighetsoppgaver, for å understøtte utvikling og implementering av null- og lavutslipps luftfartøy i det norske luftfartsmarkedet.

Hvis en ser bort fra nye typer bærekraftig flydrivstoff (som biodrivstoff og syntetisk flydrivstoff) som kan benyttes i eksisterende flymotorer og infrastruktur (SAF), er det i hovedsak tre teknologispør som følges i luftfarten i tillegg til energieffektivisering (Clean Aviation, 2022):

- Helelektriske fly (batterielektrisk og brenselcelle)
- Hybridelektriske fly
- Fly hvor hydrogen forbrennes direkte i tilpassede motorer

I helelektriske fly hentes energien fra batterier og/eller gjennom strømproduksjon ved bruk av brenselcelle som anvender flytende hydrogen eller hydrogen i gassform.

Hybridelektriske fly kan ha en rekke forskjellige kombinasjoner (tabell 1), og de har litt ulike benevninger i litteraturen. Eksempler på løsninger er parallell hybrid og serie/delvis parallell hybrid. I den førstnevnte kan kraft bli produsert både ved hjelp av en gassturbin og parallelt med batterier, og i sistnevnte produserer en termisk motor både skyvekraft og strøm til elektriske motorer. De elektriske motorene drives parallelt med strøm. Flere av designene som er skissert åpner for såkalt «distributed propulsion» med flere mindre elektriske motorer montert på vingene, samt montering av elektriske motorer på vingetipper.

I fly hvor hydrogen forbrennes direkte må dagens jetmotorer modifiseres, og ikke minst vil flytende hydrogen (-253° C) kreve nye design og tilpasset infrastruktur. I slutten av november 2022 utførte Rolls Royce tester på bruk av hydrogen på en konvensjonell jetmotor (Legget, 2022). Testene avdekket at det er mulig å starte og drifte en konvensjonell motor på lav hastighet med hydrogen, men det understrekes at det fortsatt er betydelig behov for innovasjon og investeringer før vi kan se disse løsningene i kommersiell bruk.

Tabell 1: Ulike null- og lavutslippsløsninger i luftfarten

	Batterielektrisk	Seriehybrid	Parallellhybrid	Brenselcelle	Hydrogen
Motor	Elektrisk	Elektrisk	Elektrisk + konvensjonell	Elektrisk	Gassturbin
Energilagring	Batteri	Batteri + turbogenerator eller brenselcelle/H ₂	Batteri + flytende drivstoff (+ev. turbogenerator)	Brenselcelle (+ev. batteri) og hydrogen	Hydrogen

Helelektriske fly med bare batterier til energilagring vurderes med dagens kjente teknologi til kun å være relevant for små passasjerfly (9 til 19 seter) i det nærmeste tiåret. På grunn av vektbegrensning for små passasjerfly sertifisert etter såkalt CS-23 regelverk, samt krav til drivstoff-/energireserver, vil disse flyene ha begrenset rekkevidde og dermed dekke et behov på korte ruter. Radikale nye flydesign og forbedringer i energitetthet i batterier kan endre dette, men det gjenstår mye utvikling og krevende sertifiseringsprosesser før endelige ytelser i helt nye konsepter kan bekreftes. Dette gjelder også hybridelektriske løsninger og helelektriske fly med brenselcelleteknologi, men disse skal kunne ha lengre rekkevidde og større lasteevne tilpasset det regionale markedet.

Hydrogenforbrennende løsninger skal også kunne anvendes på det regionale markedet og potensielt for enda lengre distanser. Samtlige løsninger har store behov for forskning, utvikling og innovasjon før de kan sertifiseres og tas i bruk i markedet. Fordi de har forskjellige egenskaper, vil de også kunne bidra til å løse forskjellige markedetsbehov. Felles for helelektriske og hybridelektriske løsninger er behovet for effektiv batteriteknologi og tilgang til adekvat lading og/eller hydrogen på lufthavnene.

Begrensinger ved dagens batteriteknologi forklarer også hvorfor flere utviklere ser til hydrogen som energibærer, enten i en brenselcelle eller ved direkte forbrenning i tilpassede gassturbiner. Energiinnholdet per vektighet hydrogen er stort, men det er krevende å lagre både komprimert og flytende hydrogen om bord i luftfartøylene.

Luftfarten er en strengt regulert bransje med lang ledetid når det kommer til teknologiske endringer. Mange krav må innfris for godkjenning av et fly og fremdriftssystem til kommersiell bruk, og godkjenningssjessene for konvensjonell teknologi tar i utgangspunktet flere år. I forbindelse med teknologi for null- og lavutslippsfly må kravene først identifiseres, standarder utarbeides og settes i kraft gjennom nye eller endrede regelverk.

Sertifiseringskravene i luftfarten gjør det hensiktsmessig å teste nye fremdriftssystemer i eksisterende fly, såkalt retrofit. Selskapene ZeroAvia og Universal Hydrogen utvikler eksempelvis konsepter med brenselceller og hydrogen for ombygging av fly benytter på regionale ruter, som blant annet Cessna Grand Caravan, Dash 8 og ATR 72 (Polek, 2022). Det er ikke umulig at denne type løsninger (retrofitts) kan bli satt i regelbunden rutetrafikk før nye elektrifiserte fly har gjennomgått påkrevde sertifiseringsprosesser. Det er allerede gjennomført testflygninger med komprimert hydrogen og brenselceller i ombygde fly, og enkelte selskaper har planer om oppstart av kommersielle flygninger fra 2025/2026 med mindre ombygde fly.

7.2. Teknologistatus og kostnadsutvikling

Innholdet i tabellen om TRL i luftfarten er basert på overordnede vurderinger av teknologistatus innenfor utvalgte teknologisor- og segmenter. Merk at dette er usikre anslag, og tas med her for å eksemplifisere at det arbeides med ulike teknologisor i markedet.

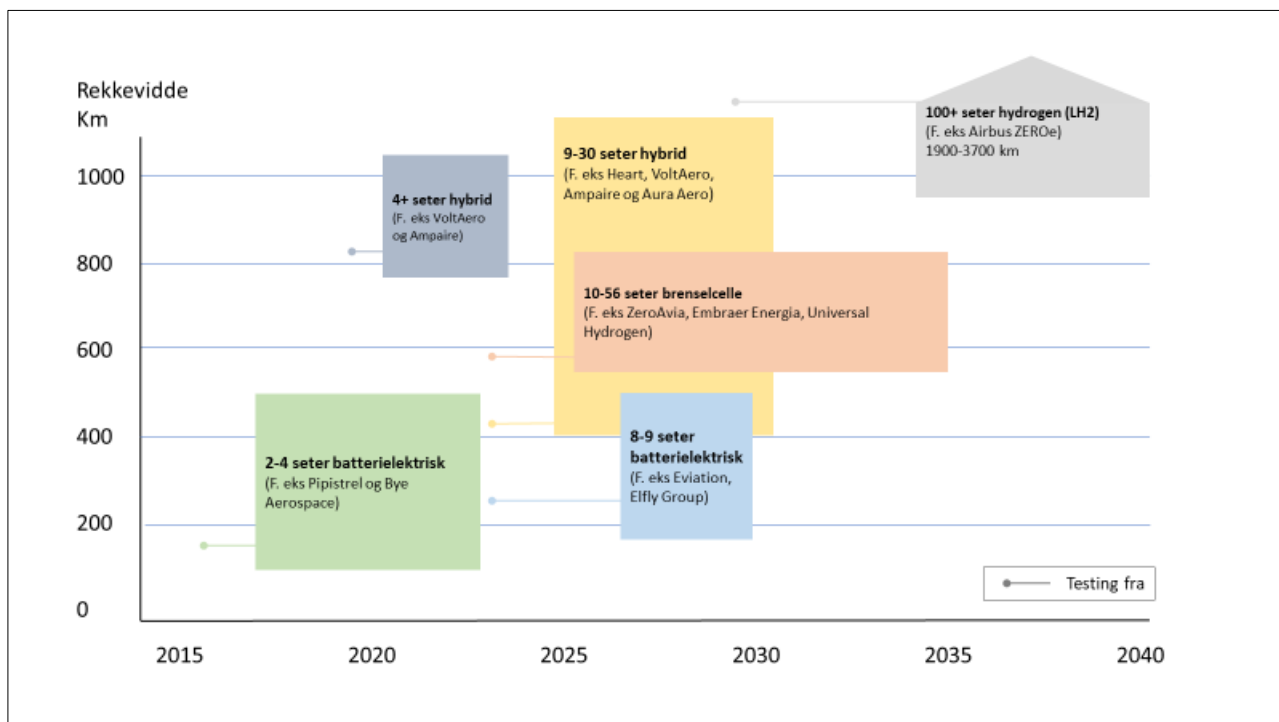
Fokus i dette arbeidsdokumentet er på teknologistatus for null- og lavutslippsfly. Det viktig å understreke at det er behov for å legge til rette for utvikling av hele verdikjeden, herunder også ladeinfrastruktur, verdikjeder for energiforsyning, regelverk, standarder og andre offentlige myndighetsoppgaver, for å understøtte utvikling og implementering av null- og lavutslipps luftfartøy i det norske luftfartsmarkedet. Utviklingen vil også kreve utvikling av et komplett nasjonalt økosystem som omfatter blant annet vedlikehold/repasasjon og pilotopplæring. Dette underbygger behov for en helhetlig tilnærming ved tilrettelegging for utvikling og innfasing av ny teknologi.

Tabell 5: TRL-vurderinger av teknologier innen luftfart

Anvendelse	CO2 (tiltakskostnad 2030/2050)	TRL	Kommentar
Dagens SAF basert på brukt matolje og slakteavfall	Ca. 5000/tonn i 2030	9	SAF er drop-in-fuel, så det kreves ingen tilpasning av fly eller infrastruktur. TRL-nivå som oppgis her er for drivstoffproduksjonen.
Morgendagens SAF basert på nye typer innsatsfaktorer (sidestrømmer fra skogen, husholdningsavfall, hydrogen, CO2)	>6000 kr/tonn i 2030.	6-8	Ulik TRL og antatt tiltakskostnad avhengig av type produksjonsprosess.
Batterielektrisk, mindre fly	-	7	Basert på overordnede vurderinger, usikre anslag. Hele økosystemet må utvikles og forberedes.
Hydrogen, brenselcelle, mindre fly	-	6	Basert på overordnede vurderinger, usikre anslag. Hele økosystemet må utvikles og forberedes.
Hydrogen, gassturbin, større fly	-	5	Basert på overordnede vurderinger, usikre anslag. Hele økosystemet må utvikles og forberedes.

7.3. Antagelser om teknologier i 2030

Basert på tilgjengelig informasjon fra fly- og motorprodusenter har Luftfartstilsynet og Avinor utarbeidet en oversikt over aktuelle null- og lavutslippskonsepter. Oversikten indikerer når de ulike null- og lavutslippsflyene vil være i test og etter hvert sertifisert. Oversikten indikerer også hva slags rekkevidde en med dagens informasjon kan anta at de vil få basert på fremdriftsteknologien som er valgt. Merk at dette er usikre anslag, og tas med her for å eksemplifisere at flere aktører utvikler ulike teknologispør i markedet



Figur 11: Grafisk fremstilling av rekkevidde for null- og lavutslippsfly samt når utvalgte aktører forventer å ha sine produkter i markedet. Basert på offentlig informasjon fra markedet. Kilde: NTP-utredningsoppdraget, januar 2023. Oppdatert september 2023.

Det er per 2022 bare ett typesertifisert batterielektrisk fly (Pipistrel Velis Electro – to seter) i markedet. Det testes både batterielektriske og hybridelektriske fly med opptil 9 seter, og det er flere aktører som har ambisjoner om å fly kommersielt i dette segmentet fra ca. 2024-2026. Det er flere selskaper som arbeider med brenselceller og hydrogen for mindre fly med under 19 seter, med sikte på sertifisering fra 2025.

Informasjon fra markedet indikerer større hybridelektriske fly, med kapasitet opp mot 30-50 seter, nærmere 2030. I dette segmentet vurderes ulike teknologiske konsepter, både hybridelektriske konsepter og hydrogen, enten med brenselceller eller gassturbin. For de største flyene til bruk på regionale ruter vurderes hydrogen som en aktuell energibærer. Utviklingsløpet for større fly er langt, og det er først etter 2030 at det er realistisk at teknologi for større regionale fly vil bli tatt i bruk kommersielt (Transport & Environment, 2022).

Uavhengig av konsept er det fokus på energieffektivisering, og mellomlagingsbatterier til bruk ved taksing og take-off blir trukket frem som et aktuelt virkemiddel for dette. Dette er også løsninger som vil kunne ha behov for lading på lufthavnene.

7.4. Antagelser om teknologier i et lengre perspektiv

Som det fremgår av tidslinjen for innfasing i figur 11 peker det seg ut tre teknologispør for fly som krever tilrettelegging på lufthavnene, men det er usikkert når teknologien fases, i hvilke segmenter, og i hvilket omfang. Incentiver for å stimulere til null- og lavutslippsløsninger i luftfarten vil kunne akselerere omstillingen. I kap. 6 i transportvirksomhetenes svar på klimaoppdraget er det gjort nærmere rede for tiltak og virkemidler for utvikling og innfasing av null- og lavutslippsløsninger i luftfarten.

Som vi har sett peker helelektriske, mindre fly og hybride batterielektriske konsepter seg ut på kort sikt, og Avinor vil legge til rette for adekvat infrastruktur på selskapets lufthavner ved behov. Samtidig arbeides det med hydrogenkonsepter, og Avinor vil også legge til rette for denne utviklingen i takt med markedets behov. Airbus hevder at hydrogenteknologi burde være moden nok til å starte testing rundt 2025, med sannsynlig innføring av hydrogenteknologi for kommersiell drift på større fly fra rundt 2035.

Avinor vil derfor lage planer for utrulling av infrastruktur for større volum på lengre sikt, i tråd med de konseptene som anses som aktuelle for det norske markedet.

Avinor planlegger for en tilnærming med tiltak for tilrettelegging for null- og lavutslipps luftfartøy og ny luftmobilitet, i et kort og lengre tidsperspektiv, hvor tiltakene på kort sikt er viktige for å bygge opp under det norske markedet som testområde og første marked for innføring av null- og lavutslipps luftfartøy.

Som nevnt er SAF den eneste fossilfrie muligheten som er tilgjengelig i dag, og den eneste løsningen for de lange flygningene – trolig også på lengre sikt. SAF vil derfor spille en helt sentral rolle i mange år fremover ved å redusere utslipp i eksisterende flåte før null- og lavutslippsteknologier kan rulles ut i betydelig omfang. Når det gjelder innfasing av SAF er det ikke behov for å utvikle nye fly eller infrastrukturløsninger, men det er et stort behov for teknologiutvikling på produksjonssiden for å få opp produksjon basert på nye typer innsatsfaktorer som sidestrømmer fra skogen, CO₂, hydrogen og husholdningsavfall.

8. Teknologiutvikling innen anleggsmaskiner

8.1. Generelt om landbaserte anleggsmaskiner

I 2023 har de aller fleste anleggsmaskiner konvensjonelle forbrenningsmotorer og benytter diesel som energibærer. Utviklingen av elektriske anleggsmaskiner er i en oppstartsfasen, og det er stor variasjon i teknologistatus og kostnader for ulike typer maskiner. De mest brukte maskintypene på land er gravemaskin, hjullaster og dumper. Elektrifiseringen har kommet lengst for små og mellomstore gravemaskiner.

Elektriske maskiner kan være både batterielektriske og kabelelektriske. Anleggsmaskinene kan også få energien fra brenselceller, ved bruk av hydrogen som energibærer. Hydrogenmaskiner er imidlertid på et

betydelig lavere modenhetsnivå enn batterielektriske maskiner. Kabelelektriske maskiner benyttes i dag en del under jord til tunneldrift og til stasjonære oppgaver i dagsone. Batterielektriske gravemaskiner under 30 tonn finnes kommersielt tilgjengelig på det norske markedet. Elektriske hjullastere på 20 tonn blir importert til Norge og ombygging av el-dumpere på 45 tonn er nettopp startet.

Norge er langt fremme når det gjelder å utvikle og ta i bruk elektriske anleggsmaskiner. Samlet sett er andelen elektriske maskiner solgt til bygge- og anleggsbransjen likevel relativt lav, og man regner med at salget av el-gravere vil kunne passere 15 prosent i løpet av 2023. Hvis ikke generelle økonomiske insentiver styrkes betydelig, vil videre utvikling være avhengig av at offentlige byggherrer stiller krav til nullutslippsløsninger i sine prosjekter.

Det vil være krevende å elektrifisere store anleggsmaskiner på kort sikt. Det er imidlertid mulig at deler av utslippsreduksjonene frem mot 2030 kan skje med ulike typer hybridmaskiner (som både har dieselmotor og elektrisk motor). Hybride maskiner kan oppnå en andel elektrisk drift på 90 prosent eller mer, men dette krever tilrettelegging, og at byggherre følger opp at krav som stilles til elektrisk drift faktisk overholdes. Alternativt kan batteri og kabeldrift kombineres.

El-lastebiler ligger i dag lenger foran i løypa enn elektriske anleggsmaskiner. Serieproduserte modeller kan benyttes til massetransport så lenge de utstyres med åpent plan og tilhenger, eventuelt semihenger.

Kabelmaskiner og hybride maskiner koster mindre enn batterielektriske maskiner. Mye arbeid i tunnel gjøres allerede kablet, etter at byggherre har stilt krav. En medvirkende årsak til at nullutslippsløsninger har kommet langt ved tunneldrift er at de både forbedrer arbeidsmiljøet og reduserer ventileringsbehovet.

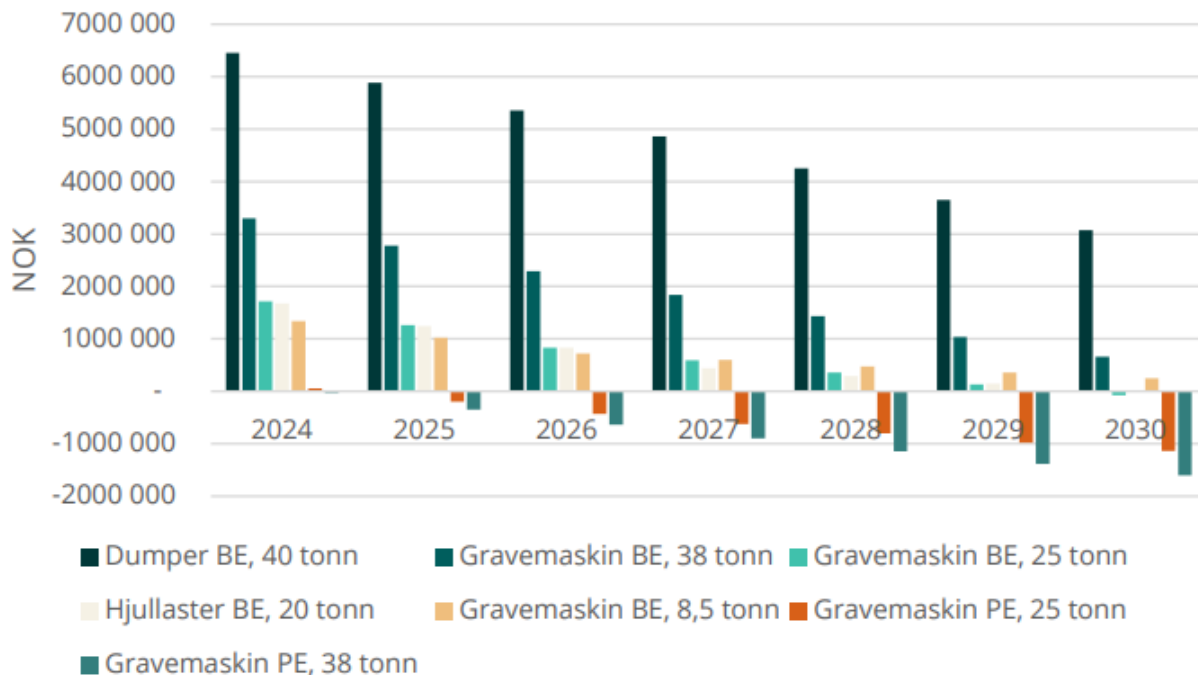
Kostnadene for elektriske maskiner er forventet å reduseres betydelig fremover. Beregninger viser imidlertid at større batterielektriske maskiner ikke vil være bedriftsøkonomisk lønnsomme i 2030 uten investeringsstøtte. Beregningene inkluderer også et estimat av kostnader for nødvendig ladeinfrastruktur på anleggsplassen. Kabelelektriske maskiner og mindre batterimaskiner vil bli lønnsomme raskere. En opptrapping av CO₂-avgiften til 2 000 kr/tonn i 2030 reduserer merkostnadene, men endrer ikke det generelle bildet.³⁵ Det er usikkerhet i disse beregningene, blant annet rundt fremtidige batterikostnader og kostnader (og utfordringer) knyttet til etablering av strømtilgang og ladeinfrastruktur. Vi tror at batteripakker mange steder vil spille en essensiell rolle for å balansere kraftforbruket og kutte effekttopper. I tillegg foreligger det transaksjons- og tidskostnader for en overgang til nullutslipp. Leveringstid er i dag en barriere og bruk av ny teknologi innebærer risiko i seg selv, blant annet i form av behov for nye prosesser og rutiner på anleggsplassene.

Alle kostander nevnt over er forventet at reduseres på sikt. Et gjennombrudd i batteriteknologien, med høyere energitetthet og lavere pris, kan være en joker som akselererer utviklingen. Et beste estimat med dagens kunnskap vil likevel være å anta en lineær reduksjon av merkostnader.

Se figur 12 for resultater av beregning av netto nåverdi av bedriftsøkonomisk merkostnad for ulike elektriske maskintyper og -størrelser. Her er det lagt til grunn en opptrapping av CO₂-avgiften til 2 000 kr/tonn i 2030.

³⁵ Se vedlegg 3 i rapporten [Kunnskapsgrunnlag om barrierer og potensial for utslippskutt i bygge- og anleggsvirksomhet](#) (Miljødirektoratet, Statens vegvesen og Nye veier) for mer informasjon om beregningene.

NNV - privatøkonomisk merkostnad, CO₂-avgift opp til 2000 kr/tonn i 2030



Figur 12 Netto nåverdi av privatøkonomisk merkostnad for ulike typer anleggsmaskiner med opptrapping av CO₂-avgift til 2 000 kr/tonn i 2030. BE står for batterielektriske maskiner og PE er kabeleletriske maskiner. Diskontering på 9,5 prosent. En negativ NNV betyr at investeringen er lønnsomt. Kilde: [Kunnskapsgrunnlag om barrierer og potensial for utslippskutt i bygge- og anleggsvirksomhet](#)

Elektrifisering er på vei i de fleste maskinkategorier. I tillegg er markedet i gang med å utvikle en rekke ulike løsninger for *energilogistikk* på anleggsplassene. Elektriske maskiner trenger strøm, og mange anleggsprosjekter foregår i områder som dekker avstander på flere kilometer, og ofte i avstand til strømmnett og annen infrastruktur. Det er derfor ventet at systemer for energilagring (mobile batteribanker) o.l. vil spille en viktig rolle på fremtidens anleggsplasser. De tidvis krevende forholdene i felt tilsier at andre energibærere som hydrogen og biogass muligens vil kunne spille en viktig rolle for enkelte maskinsegmenter og geografier, men den generelle tendensen ser ut til å være at elektrisitet er den nullutslippsteknologien som raskest skyter fart også på anleggsplasser.

Tabell 6: TRL-vurdering av teknologier for landbaserte anleggsmaskiner

Anvendelse	TRL 2023	Kommentar
Dumper, 40-45 tonn, batterielektrisk	7	Ombygging startet i Norge, import fra Kina
Hjullaster, 20 tonn, batterielektrisk	7	Import fra Kina
Frontlaster tunnel, 50 tonn, hybrid (diesel/kabel)	8	Ombygging i Norge
Gravemaskin, 25-30 tonn, batterielektrisk	8	Maskiner bygges om i Norge opp til 30 tonn, serieproduserte 22 tonns maskiner kan leveres
Gravemaskin, 38-52 tonn, kabeleletrisk og hybrider (diesel/kabel)	8	Bygges «on demand», ombygging i Norge.
Knuseverk, kabeleletrisk	8	Kommersielt tilgjengelig
Sprøyterigg, borerigg i tunnel kabeleletrisk	9	Standard utstyr per 2023

8.2. Spesifikke anleggsmaskiner innen veitransport

Anleggsmaskinene som benyttes til bygging av veiinfrastruktur er i all hovedsak de samme som benyttes i andre landbaserte anleggsprosjekter. Gravemaskiner, hjullaster og dumpere utgjør de fleste maskintimene på et typisk veiprojekt, mens en lang rekke andre maskintyper gir mindre bidrag til den totale maskinbruken. Det benyttes også maskiner i forbindelse med drift og vedlikehold, for eksempel i forbindelse med salting, snøbrøyting, kantslått og lignende. Det forventes at slike maskiner i all hovedsak vil kunne elektrifiseres i fremtiden.

8.3. Spesifikke anleggsmaskiner innen sjøtransport

Kystverkets prosjekter omhandler som regel utdyping av sjøbunn. Ofte er disse prosjektene langt fra allfarvei og uten realistisk tilgang til elektriske kraftressurser. Massene som fjernes inneholder helt eller delvis fast fjell. Det benyttes utstyr som borerigg for boring og sprengning av berg, større bakgravere, samt slepebåter for transport av mudrede masser med lektere. Bakgraverne er hovedsakelig i vektclasser mellom 120 og 250 tonn. Til sammenligning er gravemaskiner som benyttes på land typisk 20 til 75 tonn.

Dimensjonen på anleggsmidlene som benyttes i Kystverkets prosjekter og prosjektenes geografiske plassering bidrar til at investeringskostnaden for innføring av nullutslippsteknologier på utstyr som benyttes i disse prosjektene antas å være stor, med bakgrunn i at dette er spesialutstyr dimensjonert større enn mer konvensjonelle maskiner. Elektrifisering av maskiner på mellom 100 og 350 tonn anses per i dag som en relativt urealistisk løsning, basert på maskinenes kraftbehov og det faktum at de ofte opererer langt unna tilgjengelige kraftressurser. Det er få byggherrer som benytter dette utstyret i Norge, og kostnadene for modernisering vil derfor i stor grad tilfalle Kystverket. Kostnadsvurderingen av Kystverkets portefølje må inkludere kostnader for miljøkrav, herunder vurdering av kostnader for modernisering av aktuell maskinpark, for å tilfredsstille fremtidige nullutslippskrav. Sammenlignet med det europeiske markedet er kravene til egenskapene hos entreprenørenes maskinparker noe ulike for prosjekter i Norge, da det her i større grad omhandler boring, sprenging og transport av steinmasser. Entreprenørene Kystverket bruker i sine prosjekter er likevel en del av det europeiske markedet. Det norske markedet er relativt lite i denne sammenheng, og utviklingen mot reduserte utslipp vil kunne styrkes av enhetlige krav i det europeiske markedsområdet.

8.4. Spesifikke anleggsmaskiner innen jernbanetransport

Jernbanen benytter skinnegående materiell både i forbindelse med anlegg, drift inkl beredskap, vedlikehold og fornyelse som per i dag går på diesel. Bane NOR gjennomførte i 2022 en mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner frem til 2030 og 2050. Mulighetsstudien er avgrenset til Bane NORs egne skinnegående kjøretøypark brukt til drift, vedlikehold og fornyelse. Herunder lastetraktorer, ledningsmaskiner/ revisjonsvogner, lokomotiver, og spesialkjøretøy til spesifikke oppdrag, f.eks. pakkmaskiner laget for togfremføring, ballastrenseverk og slipetog. Alle skinnegående maskiner benytter diesel som energikilde og trafikkerer både elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger. Flere av arbeidsmaskinene brukes både til drift og vedlikehold og nybygging av jernbanespor. Til tross for den europeiske jernbanens økende satsing på batteridrift, viser utredningen utført av Jernbanedirektoratet³⁶ i 2022 at utviklingen innen nullutslippsløsninger for skinnegående arbeidsmaskiner kun er i en oppstartsfase. Bane Service har i 2023 investert i Skandinavias første hybride sporjusteringsmaskin, som både kan kjøres på diesel som vanlig, men også på KL-anlegget. Maskinen, som både benyttes til vedlikehold og utbygging, gir ingen lokale utslipp når den er koblet til kontaktledningsanlegget³⁷. For større skinnegående arbeidsmaskiner (for eksempel ballastfordeler, høyfjellsrydder) med et høyt effektbehov er det urealistisk med nullutslippsløsning på de ikke-elektrifiserte banestrekningene før 2040³⁸. Det er derfor mer relevant å omtale lastetraktorer, da utviklingen innen nullutslippsløsninger har kommet lengst for denne type arbeidsmaskiner.

Lastetraktor benyttes for transport av redskap og materiell ved vedlikehold og nybygging av jernbanespor,

³⁶ [CO2 utslippsreduksjon fra skinnegående arbeidsmaskiner](#)

³⁷ [Baneservice: Historisk signering: Skandinavias første hybride sporjusteringsmaskin](#)

³⁸ [mulighetsstudie-for-a-oppna-utslippsreduksjon-fra-arbeidsmaskiner.pdf \(jernbanedirektoratet.no\)](#)

samt beredskap ved snøbrøyting og er den kjøretøygruppen som brukes mest. Det finnes ikke p.t. lastetraktorer med batteridrift og disse har et estimert samlet CO₂-utslipp på rundt 2 000 tonn basert på totalt drivstofforbruk. Bane NOR startet i 2022 et pilotprosjekt hvor hensikten er å oppnå en utslippsfri bruk av lastetraktor. Med midler fra pilotprogrammet innen utslippsfrie anlegg ble det utført en mulighetsstudie³⁹ for ombygging av en lastetraktor til en batteridrevet variant. Alternativet som kom best ut i mulighetsstudien var konseptet KL/batteri, basert på investeringskostnad og utnyttelse av eksisterende infrastruktur. Mulighetsstudien pekte på ombyggingskostnader på antatte 14-20 mill. kr for samtlige konsepter. Til sammenligning kan en ny lastetraktor på den størrelsen koste rundt 30-35 mill. kr. I et miljøperspektiv kan det også være gunstig å bygge om kjøretøy med en høy restlevetid. I 2023 har Bane NOR gått ut med en RFI (request for information) for å undersøke om det er aktører som vil ta på seg oppdraget en slik ombygging utgjør, og samtidig få bekreftet kostnadsbildet.

Markedsmessig erfarer Bane NOR at utviklingen mot utslippsfrie alternativer p.t. er kundedrevet og ikke i tilstrekkelig grad leverandørstyrt for at dette skal skje automatisk. Dette betyr at Bane NOR som byggherrer må etterspørre og bestille nye løsninger for at utviklingen skal komme videre. Bane NOR ser at det er sammenlignbart med Kystverkets spesialmaskiner og at også Bane NOR er tjent med et felleseuropeisk / nordisk samarbeid. Bane NOR ser også en betydelig verdi av offentlige støtteordninger, som for eksempel pilotprogrammet for utslippsfrie anleggsplasser og Enova, for å øke kompetansen og fremskynde utviklingen.

Tabell 7: TRL-vurderinger av TRL-nivå for et utvalg skinnegående maskiner

Anvendelse ⁴⁰	TRL	Kommentar
Lastetraktorer. Benyttes til diverse arbeid på banen samt til beredskap: 1a) hybrid variant med diesel + batteri/KL	5-6	Det pågår en utvikling for denne kjøretøygruppen, men denne type maskin benyttes ofte som beredskap ved brudd i trafikkavviklingen. Det har derfor blitt fokusert på energikilder som gir robusthet og lang rekkevidde. Det forventes at batteriteknologien vil utvikle seg i retning av høyere energitetthet og da vil denne kjøretøygruppen bli meget aktuell.
Lastetraktorer: 1b) fullstendig nullutslipp med kun batteri	4-5	Se punkt over. Rene batteri-lastetraktorer er aktuelle for arbeider i begrenset geografi. For arbeid i tunneler og urbane områder kan dette være et godt alternativ.
Diesel-lokomotiv. Benyttes som beredskapstog, til å kjøre ut skinner og til å dra cargo-last: 2a) hybrid variant med diesel + batteri/KL	8	Hybride lok er tilgjengelig i markedet fra flere leverandører. Tilpassing av størrelse på lok til behovet er mulig i dagens marked.
Diesel-lokomotiv 2b) fullstendig nullutslipp med kun batteri	6-8	Rene batterilok er en utfordring for tunge tog over lengre strekninger. Markedet venter på batterier med høyere energitetthet pr tonn før dette er en mulighet. Mindre og mellomstore batteri-lok er utviklet og tilgjengelig; disse kan benyttes i beredskap og skifteoperasjoner
Ledningsvogner. Benyttes til arbeid på kontaktledningsanlegg: 3a) hybrid variant med diesel + batteri/KL	8	Denne varianten er utviklet og tilbys av flere leverandører.
Ledningsvogner: 3b) fullstendig nullutslipp med kun batteri	5	For å redusere utslipp vil det gi en gevinst å etterspørre KL/ batteri maskiner der dette kan benyttes. Batterimaskiner kan benytte KL som ladelinje frem til arbeidsted, og så gå over til batteridrift under arbeid.

³⁹ «Omlegging av lastetraktor fra diesel til batteridrift. Mulighetsstudie for Bane NOR». Desember 2022, Sweco.

⁴⁰ Skjønnsmessig vurdering av Bane NOR per august '23

8.5. *Spesifikke anleggsmaskiner innen luftfart*

Avinor har en sammensatt kjøretøypark på godt over 1 300 kjøretøy, der det er de store og tunge kjøretøysegmentene (omtrent 750 kjøretøy) som står for hovedandelen av drivstofforbruket. For at det skal være forsvarlige landingsforhold for fly ved Avinors lufthavner, brukes det sope-blåsemaskiner (sweeper), snøfresere, hjullastere og lastebiler (sandspredere og kjemikalieutleggere) for å fjerne snø og is fra rulle- og taksebaner. Brannbiler står alltid i beredskap, og feiebiler driver regelmessig rengjøringsjobb. I tillegg har Avinor over 400 vare- og personbiler.

Sope-blåsemaskiner finnes både som kompakte og trukne, og er i ulike størrelser. Dette er et kjøretøysegment som ikke finnes så mange andre steder enn på flyplasser. De største maskinene (RS 600) er spesialbygget for snørydding. Maskinene er over 28 meter lange, med en rydebredde på 7,5 meter, og har både motor i trekkvogn -og sweeperdelen som kan benytte biodiesel. Dette er et kjøretøy som grunnet kraftbehovet og til dels døgnkontinuerlig drift, ikke er sannsynlig at kan drives helelektrisk. For sope-blåsemaskiner er en løsning som involverer hydrogen og brenselcelle det mest realistiske utslippsfrie alternativet. Finavia leder nå et arbeid med å teste bruk av hydrogen på sope-blåsemaskiner (HyAirport project) og Avinor følger resultatene fra dette arbeidet. Når det gjelder hjullastere, og det segmentet av hjullastere som Avinor benytter mest (20 tonn), ser det nå ut til at flere produsenter (både Volvo, Cat og Liugong) bygger elektriske hjullastere. For lastebiler, busser og vare- og personbiler er elektrifisering tiltaket som er mest energieffektivt og elektrifisering pågår. Små feiebiler tilbys nå både med biogass og som helelektrisk.

Overgang til nullutslippsteknologi er kostnadskrevende både fordi kjøretøyene på nåværende tidspunkt er mye dyrere enn fossilt drevet kjøretøy og at det i tillegg må tilrettelegges for ny infrastruktur (enten lading eller H2). Det er derfor viktig at offentlige støtteordninger, som Enovas program for innkjøp og lading av tunge kjøretøy videreføres for å redusere barrieren det er å fase inn ny teknologi.

8.6. *Salgs mål for gravemaskiner, dumpere, hjullastere og lastebiler til massetransport*

I Klimaleveransen i utredningsoppdraget foreslo transportvirksomhetene å innføre følgende salgsmål: Alle lastebiler til massetransport, gravemaskiner, dumpere og hjullastere som selges fra 2030 skal være nullutslipp.

Etter denne leveransen har Statens Vegvesen, Nye Veier og Miljødirektoratet publisert en gjennomgang av kostnader, potensialet for utslippskutt og mulige virkemidler for bygge- og anleggsvirksomhet.⁴¹ I tillegg har Statens Vegvesen og Miljødirektoratet publisert en rapport om elektriske lastebiler, inklusive lastebiler til massetransport.⁴²

Basert på disse nye rapportene og gjennomgangen i dette arbeidsdokumentet anbefaler transportvirksomhetene fortsatt å innføre salgsmålet. Virkemidler som understøtter salgsmålet bør utredes nærmere, for å sikre en mest mulig kostnadseffektiv bruk av det samlede virkemiddelapparatet for å understøtte et slikt salgsmål. Krav i offentlig anskaffelse anses som et viktig virkemiddel i denne sammenhengen.

⁴¹ Kunnskapsgrunnlag om barrierer og potensial for utslippskutt i bygge- og anleggsvirksomhet - Miljødirektoratet

⁴² Elektriske lastebiler – teknologiutvikling, kostnader og barrierer - Miljødirektoratet

9. Vedlegg

9.1. TRL-nivå med beskrivelse

Tabell 8: TRL-skala med beskrivelse av teknologisk modenhet og usikkerhet

TRL-nivå med beskrivelse	Aggregert fremstilling med de viktigste momentene*
TRL1: Grunnleggende prinsipper observert	Grunnforskning. Svært usikkert om teknologien vil kunne fungere rent teknisk.
TRL2: Teknologikonsept er definert	
TRL3: Eksperimentelt konseptbevis foreligger	
TRL4: Teknologien er validert i laboratoriet	
TRL5: Teknologien er testet i laboratorieskala, som del av systemløsning under relevante driftsbetingelser	Eksperimentell utvikling. Teknologi valideres i representativt ideelle driftsforhold med hensikt å demonstrere teknologi før videre investering. Skjæringspunkt mellom forskningen og næringsinteresser. Selv om den tekniske usikkerheten er redusert, gjenstår det fortsatt å validere teknologi i kommersiell skala. Politiske, næringsmessige og juridiske/regulatoriske barrierer må forseres før teknologien kan oppskaleres og kommersialiseres.
TRL 6: Pilotskala systemløsning validert under relevante driftsbetingelser. Pilotanlegget oppfyller alle funksjonskrav. Tidsbegrenset testing.	
TRL 7: Fullskala prototype eller demonstrasjonsanlegg i markedsrelevant skala er testet ut under reelle driftsbetingelser.	
TRL 8: Reelt komplett systemløsning ferdigstilt og kvalifisert gjennom test og demonstrasjon. Siste utviklingstrinn, oppfyllelse av nivået representerer slutten av utvikling av systemløsningen. Drift under kommersielle rammer, fortsatt evaluering av resultater/effekter.	Kommersialisering. Teknologi er demonstrert og validert under reelle driftsbetingelser. Klart for oppskalering og utrulling. Moden teknologi. Gjenstående usikkerhet dreier seg om økonomiske, politiske og juridiske/regulatoriske barrierer som må forseres. Det kan tenkes at teknologien har bestått de fleste kvalifikasjonskrav, men at den ikke har vunnet nok tillit i samfunnet.
TRL 9: Teknologien er kommersielt tilgjengelig og har vært i drift over tid under kommersielle rammer og i alle forventede driftssituasjoner.	

*TRL-skala slik den er definert av EU-kommisjonen, Innovasjon Norge og ENOVA. Noe variasjon i hvordan trinnene aggregeres, men innhold er konsistent.