

Marianne Kjendseth Wiik • Jon Are Suul •
Kyrre Sundseth • Anders Ødegård • Sofie Mellegård •
Kamal Azrague • Nils-Olav Haukaas • Jan Ivar Ibsen •
Randi Lekanger • Christina Ianssen

30 tonns utslippsfri gravemaskin

TEKNOLOGISTATUS, KARTLEGGING OG ERFARINGER



SINTEF Fag

Marianne Kjendseth Wiik, Jon Are Suul, Kyrre Sundseth, Anders Ødegård, Sofie Mellegård,
Kamal Azrøgue, Nils-Olav Haukaas, Jan Ivar Ibsen, Randi Lekanger og Christina Ianssen

30 tonns utslippsfri gravemaskin

Teknologistatus, kartlegging og erfaringer

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Fag 52

Marianne Kjendseth Wiik, Jon Are Suul, Kyrre Sundseth, Anders Ødegård, Sofie Mellegård, Kamal Azrague, Nils-Olav Haukaas, Jan Ivar Ibsen, Randi Lekanger og Christina Ianssen

30 tonns utslippsfri gravemaskin

Teknologistatus, kartlegging og erfaringer

Emneord: utslippsfri gravemaskin, anleggsmasking, grønn byggenæring

Prosjektnummer: 102017554

Foto, omslag: Næsta

ISSN 1894-2466

ISBN 978-82-536-1603-2

35 eks. trykt av AIT Bjerch

Innmåt: 100 g munken polar

Omslag: 240 g trucard

© Copyright SINTEF akademisk forlag 2018

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser.

Uten særskilt avtale med SINTEF akademisk forlag er enhver eksemplarfremstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Byggforsk

Forskningsveien 3 B

Postboks 124 Blindern

0314 OSLO

Tlf.: 40 00 51 00

www.sintef.no/byggforsk

www.sintefbok.no

Forord

Zero Emission Digger (ZED) ble innvilget finansiell støtte som et PILOT-E-prosjekt med oppstart januar 2018. Prosjektet finansieres i hovedsak av prosjekteier Nasta med bidrag i form av egeninnsats av de øvrige samarbeidspartnerne Bellona, Omsorgsbygg, Direktoratet for forvaltning og ikt (Difi) og Skanska. Prosjektet ledes av SINTEF Byggforsk.

Arbeidet med denne rapporten er utført av en flerfaglig arbeidsgruppe med deltakere fra både SINTEF og partnere. Jon Are Suul, (SINTEF Energi), Kyrre Sundseth og Anders Ødegård (SINTEF Industri), Marianne Kjendseth Wiik, Kamal Azrague og Sofie Mellegård (SINTEF Byggforsk) har ført rapporten i pennen, med tekstlige bidrag og innspill fra Nils-Olav Haukaas og Jan Ivar Ibsen (Nasta), Randi Lekanger (Skanska) og Christina Ianssen og Christian Eriksen (Bellona). Selamawit Mamo Fufa og Christoffer Venås er kvalitetssikrere i prosjektet.

Oslo, 7.12.2018

Partow Henriksen
Forskningsjef
SINTEF Byggforsk

Sofie Mellegård
Prosjektleder
SINTEF Byggforsk

Sammendrag

Prosjektet "Zero Emission Digger" (ZED) har som hovedmål å realisere en prototyp for en utslippsfri 30 tonn beltegravemaskin. Hensikten med prosjektet er å utvikle en slik maskin fra et konseptdesign til et kommersielt markedsledende produkt innen miljø- og klimavennlige anleggsmaskiner. Gjennom samarbeid mellom industri- og forskningspartnere vil prosjektet videreutvikle dagens "state of the art" for hybride og batterielektriske fremdriftssystemer slik at bruk av nullutslippsgravemaskiner i storskala kan realiseres. Den 30 tonn utslippsfrie gravemaskinen vil bli demonstrert på byggeplasser i Oslo kommune, og erfaringer fra disse bygge- og anleggsplassene vil gi føringer for det videre utviklingsarbeidet med anleggsmaskiner og nullutslippsløsninger. Denne rapporten gir en kort introduksjon til konstruksjon, virkemåte og forventet lastprofil for en tradisjonell 30 tonn gravemaskin, samt en oversikt over relevante teknologier og systemer for nullutslippsdrift av kjøretøyer og maskiner med fokus på status for bruk i anleggsmaskiner. Rapporten gir også en generell oversikt over teknologistatus for miljøvennlige anleggsmaskiner basert på direkte elektrisk drift eller batteridrift, samt en gjennomgang av pågående utvikling av batteri- og hydrogenteknologi.

I dag fins det tallrike eksempler på at nullutslippsteknologier er på full fart inn i den norske transportsektoren. Dette er først og fremst knyttet til bruken av batterier i elektriske- og hybride kjøretøyer. En betydelig andel (> 35 %) av personbilene som selges som nye i Norge i dag, er basert på batteriteknologi – enten som rene elbiler eller som plug-in-hybride kjøretøyer. Flere produsenter av tyngre kjøretøyer har også utviklet batteridrevne lastebiler for varetransport. De siste årene har også utviklingshastigheten og bruken av hydrogenteknologier økt betraktelig. På global basis var det i 2017 rapportert over 7 000 hydrogen(person-)biler på veien. Innen tungtransport er utviklingen også positiv, og flere aktører vil tilby kjøretøyer i løpet av de neste årene. Hos ASKO i Trondheim er det planlagt å innføre de første hydrogendrevne lastebilene i Nord-Europa, og det første kjøretøyet vil demonstreres i løpet av 2018. Distribusjonsbilene utvikles og bygges hos Scania, der hydrogentankene kommer fra norske Hexagon og brenselcellesystemet fra Canadiske Hydrogenics. I samarbeid med Bosch utvikler amerikanske Nikola Motor semitrailere med brenselceller og opptil 200 miles rekkevidde. Ølprodusenten Anheuser-Bosch er den første store offentlig kjente kunden. De har bestilt 800 trailere og får de første i 2020.

Bruken av batterier i transportsektoren har økt kraftig de siste årene. Det har medført store kostnadsreduksjoner, blant annet som følge av storskalafordele ved masseproduksjon. Dette er først og fremst knyttet til bruken av batterier i elektriske- og hybride kjøretøyer. Hydrogenteknologi har også fått en økende interesse, og er spesielt tatt i bruk i tyngre kjøretøyer og i maritim sektor, hvor flere pilotprosjekter i Norge er på trappene. Produksjonsvolumet og kostnadsreduksjonen har ennå ikke hatt den samme utviklingen som for batterier. Det er likevel ikke urimelig å forvente en liknende kostnadskurve også for hydrogenteknologi, nå som denne tas i bruk i større grad. Spesielt kan dette forventes med tanke på Kinas sterkt økende engasjement innen hydrogen.

De elektriske systemene som er nødvendig for batteridrift og/eller hydrogendrift av en gravemaskin, vil være relativt like tilsvarende systemer for andre typer elektriske og/eller hybride kjøretøyer. Elektriske maskiner og kraftelektronikkomponenter med nødvendig ytelse og hensiktsmessige driftskarakteristikker for slike systemer er allerede kommersielt tilgjengelige, men valg av systemkonfigurasjon om bord på gravemaskinen vil i stor grad avhenge av energilagringssystemet og forventet driftsprofil. Denne rapporten inneholder en generell oversikt over relevante systemkonfigurasjoner for elektrisk drift av store gravemaskiner, inkludert mulige løsninger for batterilading fra kraftnettet eller andre kilder, basert på erfaringer fra andre elektrisk drevne maskiner eller kjøretøyer. Funksjonalitet og ytelse for det elektriske energiomformingsystemet er ikke betraktet som en begrensning for utvikling av nullutslippsløsninger for gravemaskiner, men valg av systemkonfigurasjon og optimalisert dimensjonering av komponenter kan ha betydelig innvirkning på investeringskostnader og brukskarakteristikkene for slike maskiner.

Med utgangspunkt i mulighetene for nullutslippsdrift av anleggsmaskiner, og gjennom å gi en oversikt over utvikling og bruk av nullutslippsteknologi i andre sammenhenger, viser denne rapporten at det

foregår en rask utvikling av nye produkter og løsninger. Det foregår også en kontinuerlig teknologiutvikling, spesielt for batterier og brenselceller, som muliggjør nye anvendelser og forbedrede ytelser eller reduserte kostnader ved utnyttelse av nullutslippsløsninger.

For rene batteridrevne løsninger er de tekniske begrensningene stort sett knyttet til mulig driftstid og tilgjengelig ladeeffekt, mens tilsvarende begrensninger for hydrogendrevne maskiner er relatert til praktiske problemstillinger rundt lagring og tilgang på hydrogen. I tillegg er det fortsatt en del skepsis når det gjelder bruk av hydrogen og sikkerhet, noe som er med på å bremse utbredelsen av teknologien. Norge har over 100 år med gode erfaringer med håndtering av store mengder hydrogen, og dagens teknologi og løsninger er også videreutviklet sikkerhetsmessig. Utover slike praktiske forhold er det i stor grad kostnader og usikkerhet om markedsgrunnlaget for nye nullutslippsløsninger som begrenser utviklingstakten og anvendelsesområdene for nullutslippsteknologi.

Innhold

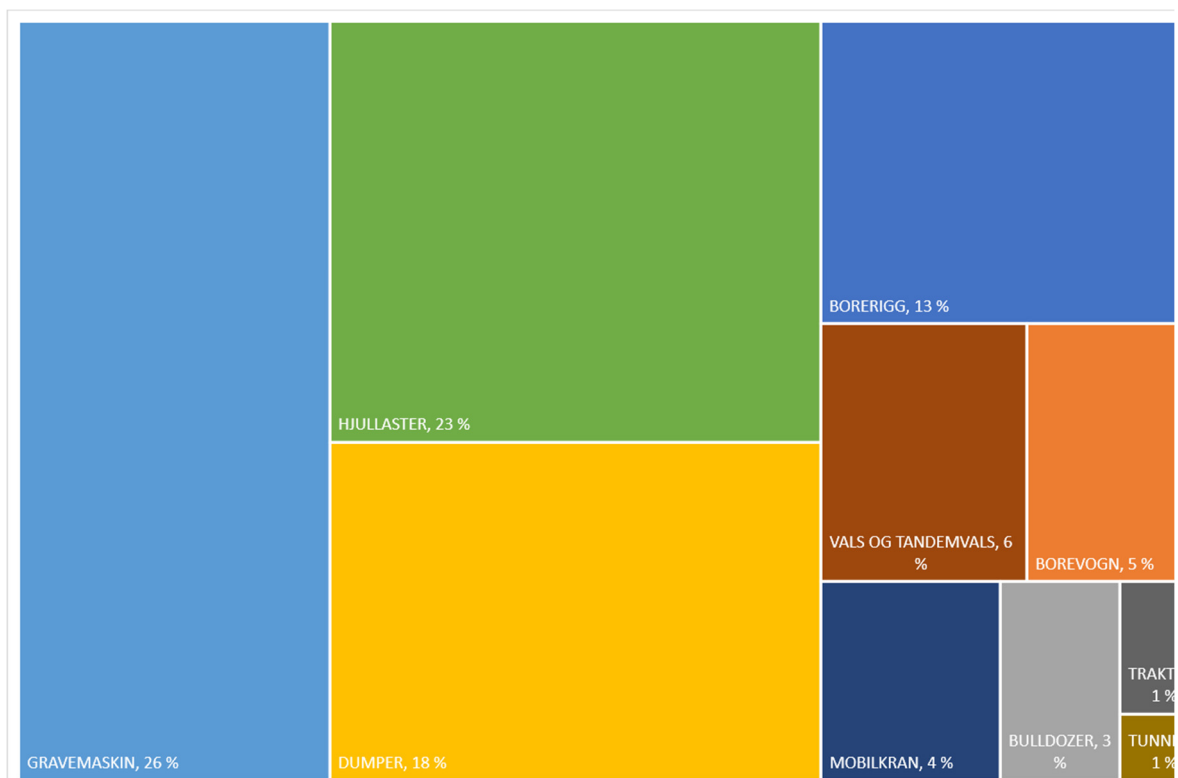
FORORD	3
SAMMENDRAG	4
1 INTRODUKSJON	7
1.1 BAKGRUNN	7
1.2 KORT OM "PILOT-E-PROSJEKT: ZERO EMISSION DIGGER (ZED)"	10
1.3 MÅL OG SENTRALE UTFORDRINGER	11
1.4 HVORDAN LESER JEG DENNE RAPPORTEN?	12
2 GRAVEMASKINER	12
2.1 GRAVEMASKINEN SOM MASSEFORFLYTNINGSMASKIN	12
2.2 HYDRAULIKKUMPENE	13
2.3 EKSEMPEL PÅ ENERGIBEHOV OG MULIG DRIFTSPROFIL FOR EN 30 TONNS GRAVEMASKIN	14
3 TEKNOLOGISTATUS FOR MILJØVENNLIGE ANLEGGSMASKINER	16
3.1 MULIGE LØSNINGER FOR MILJØVENNLIG DRIFT AV ANLEGGSMASKINER	16
3.2 OVERSIKT OVER EKSISTERENDE LAVUTSLIPPSLØSNINGER	16
3.2.1 <i>Anleggsmaskiner som drives av biodiesel</i>	16
3.2.2 <i>Hybride anleggsmaskiner</i>	16
3.3 OVERSIKT OVER MULIGE NULLUTSLIPPSLØSNINGER	18
3.3.1 <i>Kabeltilkoblede elektriske maskiner</i>	18
3.3.2 <i>Batteridrevne elektriske maskiner</i>	20
3.3.3 <i>Hydrogendrevne maskiner</i>	21
3.4 EKSEMPLER PÅ UTVIKLING AV NULLUTSLIPPSTEKNOLOGI I ANDRE ANVENDELSER.....	22
4 TEKNOLOGISTATUS FOR BATTERI- OG HYDROGENTEKNOLOGI	25
4.1 BATTERIER.....	25
4.1.1 <i>Batterityper og deres egenskaper</i>	25
4.1.2 <i>Vekt og volum</i>	27
4.1.3 <i>Pris og teknologiutvikling</i>	29
4.1.4 <i>Oppsummering – batterier</i>	31
4.2 HYDROGEN	33
4.2.1 <i>Bruk av hydrogen i dag</i>	33
4.2.2 <i>Brenselcelleteknologi, lagring og egenskaper</i>	33
4.2.3 <i>Vekt og volum</i>	36
4.2.4 <i>Pris og teknologiutvikling</i>	39
4.2.5 <i>Produksjon og forsyning av hydrogen</i>	39
4.3 FORENKLET SAMMENLIKNING MELLOM BATTERIER OG HYDROGEN	41
4.4 KORT OM SIKKERHET VED BRUK AV HYDROGEN OG BATTERI	42
5 ELEKTRISKE SYSTEMKONFIGURASJONER FOR NULLUTSLIPPS- MASKINER	45
5.1 INTRODUKSJON TIL ENERGIOMFORMINGSSYSTEMER FOR NULLUTSLIPPSMASKINER.....	45
5.1.1 <i>Kraftelektroniske energiomformere</i>	45
5.1.2 <i>Relevante funksjoner og sammenlikningskriterier for kraftelektronikkomformere</i>	47
5.1.3 <i>Tilgjengelige komponenter og kraftelektronikkomformere for elektriske drivlinjer</i>	48
5.2 KRAFTOMFORMINGSSYSTEMER FOR ULIKE NULLUTSLIPPSLØSNINGER.....	49
5.2.1 <i>Direktedrift med kabel</i>	49
5.2.2 <i>Batteridrift med lading direkte fra lokalt kraftnett</i>	50
5.2.3 <i>Mobilt batterisystem for hurtiglading</i>	54
5.2.4 <i>Hydrogendrift</i>	56
5.2.5 <i>Plug-in-hybrid hydrogendrift eller batterilading støttet av hydrogenbrenselcelle</i>	57
6 DISKUSJON OG OPPSUMMERING	60
REFERANSER	61

1 Introduksjon

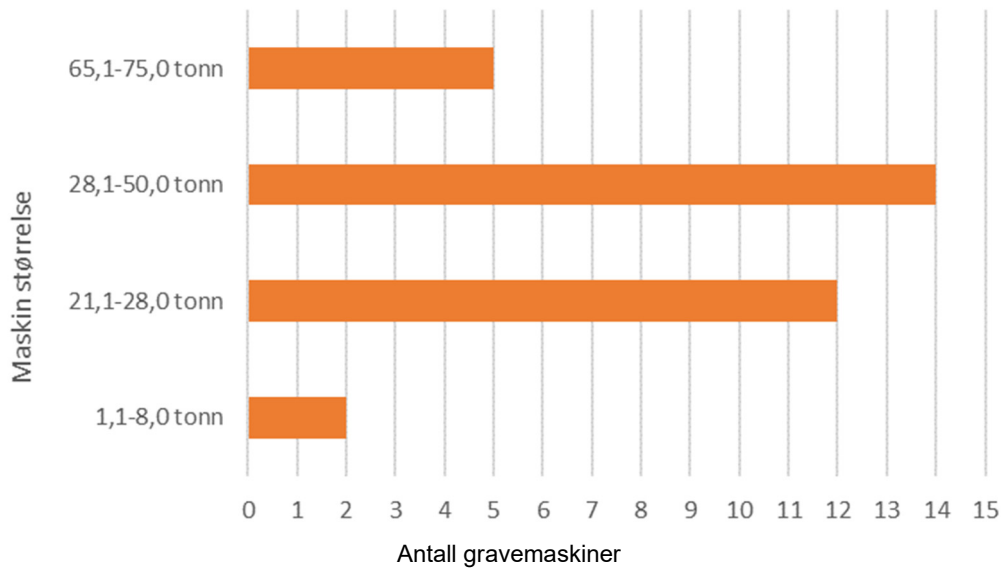
1.1 Bakgrunn

I dag står den norske bygg- og anleggsnæringen for ca. 1,2 % av landets totale klimagassutslipp, noe som tilsvarer om lag 660 000 tCO_{2eq} [1]. Utslippene kommer i hovedsak fra fossilt brensel i anleggsfasen. Rundt 5 % av utslippene kommer fra oppvarming og uttørring av bygninger, mens det resterende (95 %) kommer fra transport og drift av maskiner. Oslo med omegn er en av de raskest voksende regionene i Europa og har høy byggeaktivitet. Byggeaktivitetene forventes å øke samtidig som utslippene skal reduseres. I forbindelse med den første juridisk bindende globale klimaavtalen signert i Paris i 2015 (COP21) har bystyret i Oslo nå innledet "det grønne skiftet" med mål om en halvering av CO₂-utslippene innen 2020 og en reduksjon av klimagassutslippene med 95 % innen 2030 sammenliknet med 1990-nivå [2]. Hovedfokus er rettet mot transportsektoren som er ansvarlig for 61 % av de totale klimagassutslippene fra Oslo [2]. Av disse kommer 30 % fra anleggsmaskiner, 39 % fra privatbiler (inkludert transport av byggearbeidere til og fra byggeplasser), 15 % fra lastebiler og 10 % fra varebiler (inkludert transport av byggevarer til og fra byggeplasser) [2]. En overgang fra bruk av tradisjonelle dieseldrevne anleggsmaskiner til elektriske anleggsmaskiner kan bidra til en betydelig utslippsreduksjon på om lag 99 % for CO₂ og til om lag 96 % for NO_x [3]. En slik reduksjon av utslippene forutsetter også bruk av alternative energikilder for oppvarming, tork og herding av betong.

Beltedrevne gravemaskiner er blant maskintypene som brukes mest i bygge- og anleggsprosjekter. Figur 1.1 og 1.2 viser Skanskas fordeling av maskintyper og antas å være representativ for større entreprenører. Beltedrevne maskiner utgjør ca. 26 %, tett etterfulgt av hjullastere på 23 % og dumpere på 18 %. Derfor antas det også at en betydelig del av utslippene kommer fra beltedrevne gravemaskiner.








Figur 1.1. Skanskas fordeling av maskintyper per 2018. Kilde: Skanska



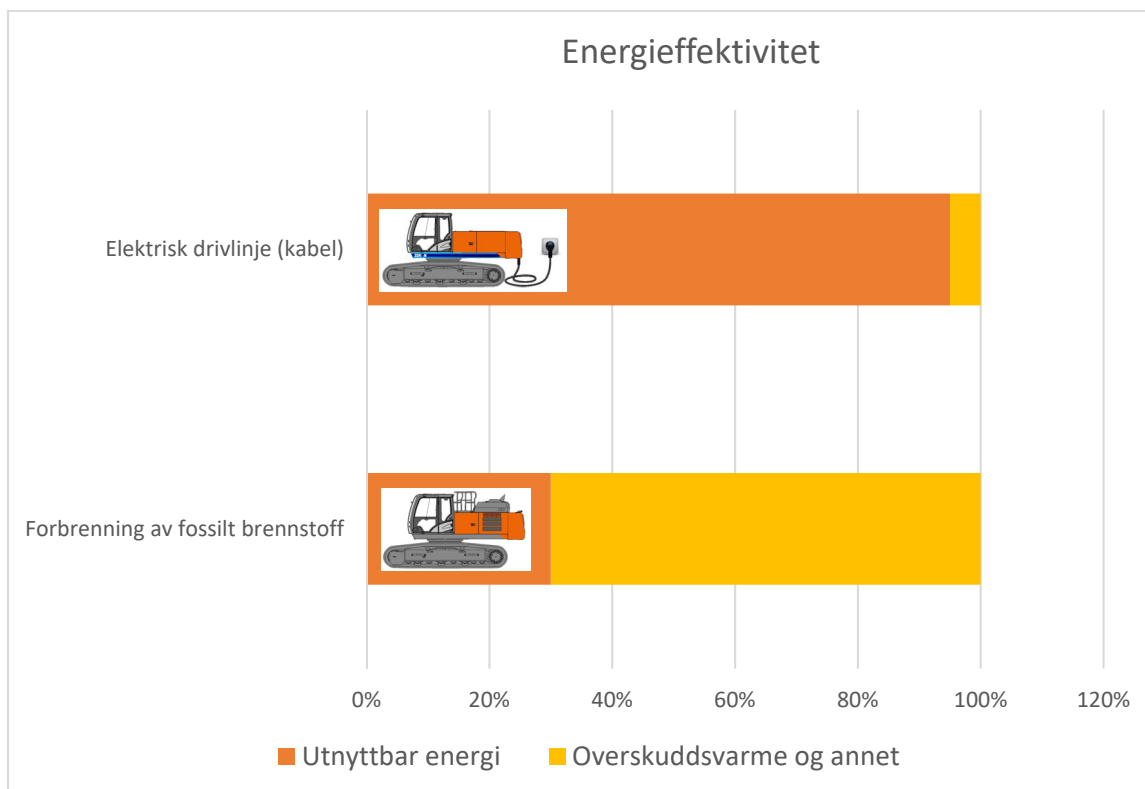
Figur 1.2. Skanskas fordeling av gravemaskiner basert på størrelser 2018. Kilde: Skanska

Utviklingen av utslippsfrie anleggsmaskiner er rask [4]. Likevel er det behov for mer forskning og videreutvikling [3]. Økonomiske og tekniske utfordringer er identifisert som den største barrieren for å ta i bruk utslippsfrie anleggsmaskiner. Bakgrunnen er at store gravemaskiner har høyt forbruk i drift sammenliknet med andre typer anleggsmaskiner. En 30 tonns gravemaskin vil for eksempel behøve opp mot 300 kWh for opptil fire timers drift. I tillegg har en aktiv byggeplass behov for at flere maskiner brukes samtidig, noe som betyr at det kan oppstå begrensninger gitt av tilgjengelig kapasitet på strømmettet og/eller stor kostnad forbundet med bruk av batterier for lokal mellomlagring.

I figur 1.3 er de tilgjengelige fossilfrie og utslippsfrie teknologiene for anleggsmaskiner listet opp og delt inn i fem hovedkategorier. Det fossilfrie alternativet er representert med forbrenningsmotoren. Denne er lik den tradisjonelle gravemaskinen, men det benyttes biodiesel istedenfor diesel som drivstoff. De fire andre teknologiene er utslippsfrie, og i oversikten anslås det hvor kommersielt tilgjengelige teknologiene er. Legg merke til begrensningen i rekkevidde for maskinene som er koblet til elektrisitetstettet med en strømkabel. I kapittel 3 i denne rapporten går vi i dybden på teknologistatusen for anleggsmaskiner.

Drivlinje	Tilgjengelig i klasser								
	Unyttbar energi	Årlig utslipp av CO2	Rekkevidde	Mini	Små	Middels	Store	Ekstra store	Gigantiske
	Estimert	Estimert	Estimert	30kW	30kW-60kW	60kW-100kW	100kW-200kW	200kW-400kW	400kW+
 Forbrenning	30%	100 tonn	To skift	2018	2018	2018	2018	2018	2018
 Elektrisk	95%	0	Kabelens lengde	Prototype kan lages	Prototype kan lages	Prototype kan lages	Prototype kan lages	2019	2018
 Batteri-elektrisk	92%	0	Kabelens lengde ++	Prototype kan lages	Prototype kan lages	2019	2019	Forskningsprosjekt ferdig 2020	Foreløpig uegnet?
 Batteri	85%	0	5 til 7 timer	2019	2019	2019	Prototype kan lages	Forskningsprosjekt ferdig 2020	Foreløpig uegnet?
 Batteri-brenselcelle	50%	0	Ett skift	Foreløpig uegnet?	Foreløpig uegnet?	Foreløpig uegnet?	Prototype kan lages	Forskningsprosjekt ferdig 2020	Foreløpig uegnet?

Figur 1.3. Energieffektivitet, direkteutslipp, rekkevidde og antatt egnethet av beltedrevne maskiner i ulike størrelsesklasser per 2018. Kilde: Nasta



Figur 1.4. Energieffektivitet for gravemaskin med elektrisk drivlinje sammenliknet med en maskin som bruker fossilt brennstoff. Kilde: Nasta

Dagens tradisjonelle gravemaskiner er utstyrt med dieselmotor og et hydraulisk system for fremdrift og bevegelse. I alle ledd av maskinens kjede av energiomformende elementer er det muligheter for forbed-

ringer som vil redusere utslipp av skadelige gasser, ressursforbruk og støy. For tradisjonelle dieseldrevne maskiner utnyttes kun en liten del av energien som tilføres for å gjøre selve gravearbeidet. Det største energitapet finner sted i forbrenningsmotoren (se figur 1.4). Hydrauliske pumper, oljemotorer, sylindre, ventiler, slanger etc. medfører også store tap av energi til annet enn produktivt arbeid.

1.2 Kort om "Pilot-E-prosjekt: Zero Emission Digger (ZED)"

ZED er et Pilot-E-prosjekt finansiert av Norges forskningsråd, Innovasjon Norge og ENOVA. Prosjektet er et samarbeid mellom partnerne Bellona, Nasta, Difi, Omsorgsbygg, SINTEF og Skanska. Hensikten er å bidra til en betydelig reduksjon av klimagassutslipp i den norske byggenæringen. Prosjektet "30 tonns utslippsfri gravemaskin" (Zero Emission Digger (ZED) på engelsk) har som mål å bygge om en eksisterende dieseldrevet 30 tonns beltegående gravemaskin til utslippsfri drift. Prototypen som utvikles, skal demonstrere at store anleggsmaskiner kan drives utslippsfritt og miljøvennlig. Nullutslippsdrift av den ombygde gravemaskinen skal oppnås ved elektrisk drift med strøm fra batteri og/eller hydrogen-drevet brenselcelle. Maskinen skal tas i bruk på byggeplasser i Oslo og skal demonstrere at det er teknisk mulig å fullstendig fjerne de lokale utslippene fra større anleggsmaskiner. En slik gravemaskin vil kunne spare miljøet for et årlig klimagassutslipp på ca. 100 tCO₂eq, samt være helt uten utslipp av hydrokarboner, svevestøv og nitrøse gasser. I tillegg vil støy fra byggeplasser i hovedstaden reduseres.

ZED ønsker å bidra til et teknologiskifte innen bygge- og anleggssektoren, noe som vil være en betydelig bidragsyter til at Norge kan oppfylle sine klimamål. Ideen om en utslippsfri gravemaskin skal tas et skritt videre – fra å være et konseptdesign til å bli et kommersielt markedsledende produkt innen miljø- og klimavennlige anleggsmaskiner. Gjennom samarbeid mellom industri- og forskningspartnere vil det skje en videreutvikling fra dagens teknologi for hybride og batterielektriske fremdriftssystemer slik at man skal kunne starte produksjon av store nullutslippsgravemaskiner. Den nyutviklede prototypen på en 30 tonns utslippsfri gravemaskin vil bli demonstrert på utvalgte byggeplasser i Oslo kommune.

Tidligere befaring av aktivitetene på byggeplass

Tidlig i ZED-prosjektet gjennomførte konsortiet et besøk på en byggeplass for å danne seg et bilde over aktiviteter og se på hvilke forutsetninger som må være til stede for å kunne utnytte en utslippsfri gravemaskin mest mulig effektivt (se figur 1.5).

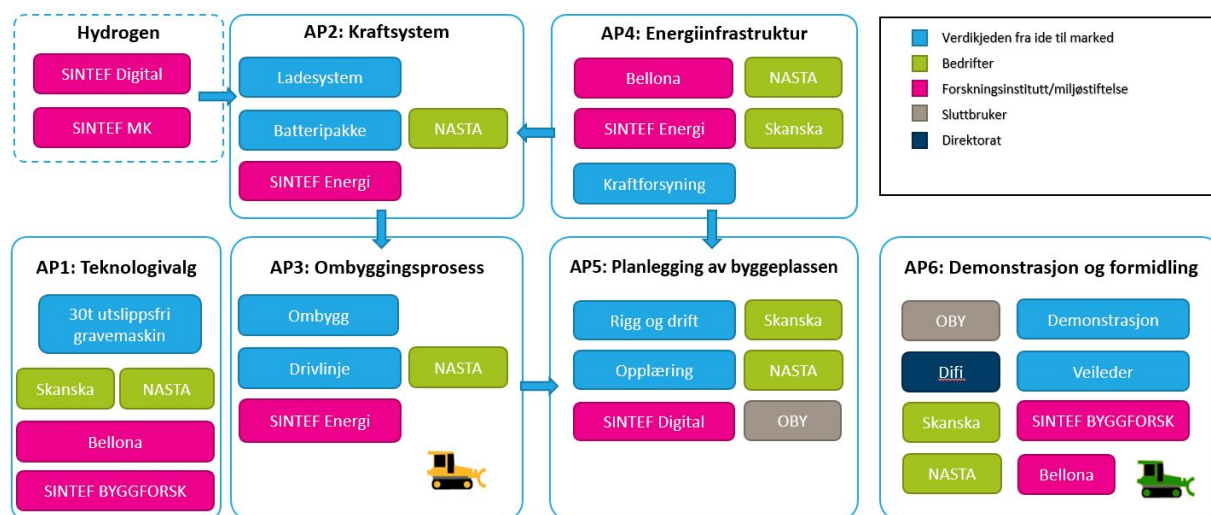


Figur 1.5. Bilde fra befaring hos Skanskas prosjekt Ensjø Torg, 24.1.2018. Foto: SINTEF

Selv om mange er kjent med hovedaktivitetene som pågår på en byggeplass, er det vanskelig å definere en "typisk" byggeplass med tilhørende aktiviteter. Alle byggeplasser er forskjellige og inkluderer en rekke aktiviteter. I noen tilfeller er det innledningsvis bruk for anleggs- og gravemaskiner med et stort energibehov. På tidspunktet for befaringen var det fem operative gravemaskiner i tillegg til pumper og tre kraner på den aktuelle byggeplassen. Ifølge entreprenøren er det aktivitet på byggeplassen mandag til torsdag mellom kl. 6 til 19. Lunsjpausen kan finne sted mellom kl.10:30 og 12:00, og varer ca. en halvtime. Varierende tider og aktiviteter innebærer også behov for en gravemaskin med fleksibel driftstid. Den aktuelle byggeplassen hadde 1,5 MW elektrisk effekt tilgjengelig. Begrensningen krevde derfor god planlegging for å unngå strømmangel for de ulike aktivitetene i pågående prosjektutviklingsfaser. Hafslund, som deltok på befaringen, opplyste at det i byggeperioden vanligvis er behov for opptil 1 000 V spenning, mens det i driftsfasen, når bygget står ferdig, vanligvis bare vil være 230/400 V tilgjengelig. Når man skal få elektrisitet levert til en byggeplass, er det derfor viktig å være tidlig ute og vurdere eksisterende kabler og behov for byggestrøm og/eller transformator for å få tilgang til nok effekt. Det ble også nevnt at det er store lokale variasjoner i tilgangen på elektrisitet i Oslo, og at det noen steder har oppstått kapasitetsproblemer. Situasjonen i dag tillater ikke effektstyring på områdenivå. Nyere bygg har ofte lavere strømforbruk og høyere effektopper, slik at det er et behov for smarte energisystemer.

1.3 Mål og sentrale utfordringer

Prosjektets hovedmål er å bygge om en konvensjonell dieseldrevet 30 tons beltegående gravemaskin til utslippsfri drift, for slik å demonstrere at også store anleggsmaskiner kan drives utslippsfritt og miljøvennlig. Prosjektet ønsker å bidra til et teknologiskifte innen bygge- og anleggssektoren som vil være en betydelig bidragsyter til at Norge kan oppfylle sine klimamål. Aktiviteter i ZED-prosjektet inkluderer: 1) teknologivalg, 2) designe, bygge og teste kraftsystemet, 3) designe, bygge og teste prototyp av en 30 tons gravemaskin, 4) utvikle energiinfrastruktur og installasjoner for å sikre effektiv nullutslippsenergiutnyttelse og sikker energitilgang til gravemaskinen, 5) planlegging av byggeplassen med relevante aktiviteter knyttet til bruk av utslippsfri gravemaskin og 6) demonstrere en fullskala løsning for utslippsfri gravemaskin og kommunisere resultater til byggherrer, entreprenører, leverandører, politikere og media. Se figur 1.6.



Figur 1.6. Prosjektorganisasjon og temaer i ZED

De sentrale utfordringene i prosjektet er å 1) velge den mest kostnadseffektive tekniske løsningen for en utslippsfri gravemaskin i størrelsen 30 tonn som gir tilstrekkelig driftsmessig fleksibilitet, 2) integrere en utslippsfri drivlinje i en eksisterende dieseldrevet gravemaskin og 3) undersøke og tilpasse planlegging, logistikk, drift, energiforsyning og vedlikehold for best mulig utnyttelse av maskinens driftskarakteristikker. Dette arbeidet er utført i AP 1: Teknologivalg, med hovedfokus på å identifisere og velge den kommersielt mest levedyktige utslippsfrie tekniske løsningen. Arbeidet vurderte teknologi-

status for miljøvennlige anleggsmaskiner basert på direkte elektrisk drift eller batteridrift, status og pågående utvikling av batteri- og hydrogenteknologi og relevante systemkonfigurasjoner for elektrisk drift av store gravemaskiner basert på generelle erfaringer fra andre elektrisk drevne maskiner eller kjøretøyer.

1.4 Hvordan leser jeg denne rapporten?

Rapporten skal gi innblikk i nåværende status for miljøvennlige anleggsmaskiner og hvilke alternativer for energiforsyning (for eksempel elektrisitet og hydrogen) som kan gi mulighet for nullutslippsdrift og samtidig opprettholde samme ytelse og driftsflexibilitet som konvensjonelle dieseldrevne maskiner. Rapporten skal dermed identifisere hvordan man kan utnytte utslippsfrie energialternativer på best mulig måte i en 30 tonn gravemaskin. Det vil også danne et grunnlag for dimensjonering av energibehovet på byggeplassen når det gjelder vanlige byggeaktiviteter og driftstid, vurdering av effektbehov, samt dimensjonering av energilagringmuligheter (for eksempel batteri, hydrogentank). Etter en kort beskrivelse av en typisk gravemaskin (kapittel 2) følger en teknologistatus for miljøvennlige anleggsmaskiner i kapittel 3. Kapittel 4 gir en oversikt over teknologistatus for batteri- og hydrogenteknologi, og kapittel 5 presenterer ulike elektriske systemkonfigurasjoner som kan være relevante for nullutslippsmaskiner. Kapittel 6 diskuterer og oppsummerer rapporten i korthet.

2 Gravemaskiner

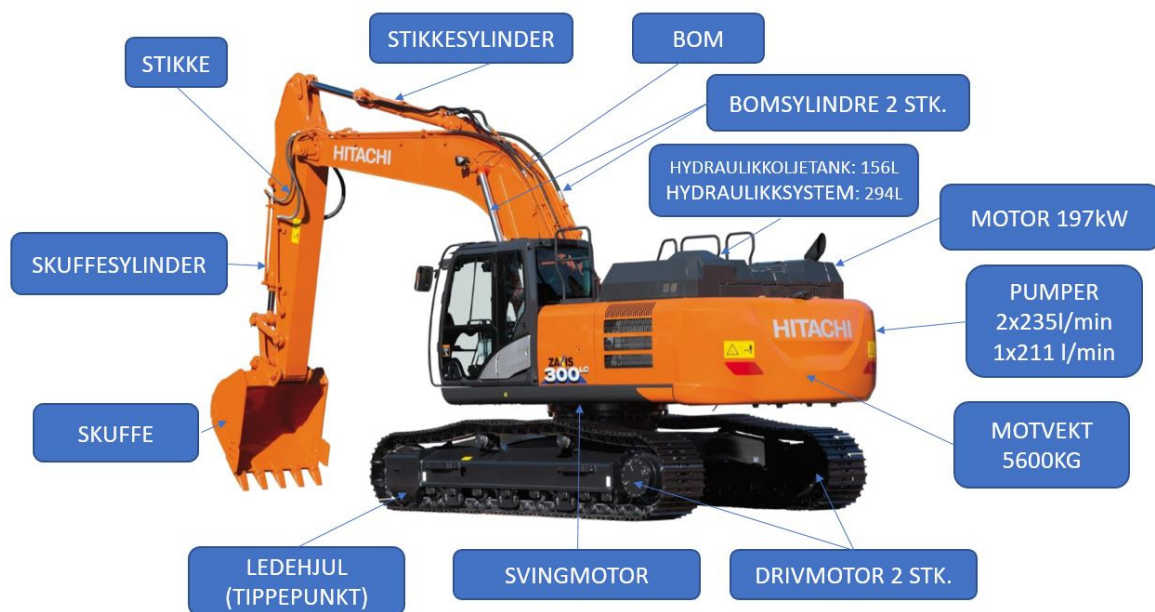
2.1 Gravemaskinen som masseforflytningsmaskin

En gravemaskin er en fleksibel arbeidsmaskin som kan brukes til en lang rekke oppgaver, inkludert masseforflytning, planering og/eller arbeid med ulike typer spesialredskaper. Derfor fins det gravemaskiner med relativt lik konstruksjon i mange ulike størrelser – fra små minigravere med totalvekt på 1–2 tonn til store spesialbygde maskiner med totalvekt på langt over 100 tonn. På byggeplasser bruker man vanligvis gravemaskiner i vektclassene fra 10 til 40 tonn, avhengig av hvilke arbeidsoppgaver som skal utføres. For grunnarbeid og/eller rivningsarbeid på store byggeplasser benyttes det oftest gravemaskiner med totalvekt på omkring 30 tonn, mens mindre maskiner i vektclassene under 20 tonn ofte brukes til planeringsarbeid og liknende i forbindelse med ferdigstilling av et område etter at grunnarbeidet og/eller byggearbeidet er avsluttet.

Selv om en gravemaskin kan utnyttes til en lang rekke arbeidsoppgaver, er den i første rekke konstruert for å være en fleksibel masseforflytningsmaskin. Figur 2.1 viser en typisk gravemaskin. Gravemaskiner som brukes til anleggsarbeid og for grunnarbeid på byggeplasser, er vanligvis beltegående, som vist på figuren: Det gir god framkommelighet og mulighet for å arbeide på grovt og/eller ujevnt underlag. Det fins også hjulgående gravemaskiner, men de brukes vanligvis til arbeidsoppgaver på fast underlag, eksempelvis vedlikeholdsarbeid langs eksisterende veier. En stor del av fleksibiliteten til en gravemaskin sammenliknet med andre arbeidsmaskiner skyldes at hovedkroppen er festet til understellet via en svingkrans, som gir frihet til 360° rotasjon. En gravemaskin kan dermed stå i ro på samme punkt under arbeid og likevel ha stor fleksibilitet for å utføre effektiv masseforflytning innenfor sin rekkevidde. Armen som skuffen for masseforflytning er festet i, består vanligvis av to (eller tre) deler, "bom" og "stikke", der bomsylindrene er konstruert for heving/senking av hele løftearmen, mens stikkesylindren gir horisontal bevegelse av skuffefestet. Skuffesylindren brukes for å regulere vinkelen mellom stikke og skuffe via en mekanisk føring. Selv om maskinen som er vist i figur 2.2. bare har en skuffe festet direkte til stikka, kan en gravemaskin utstyres med mange ulike redskaper, og det er også mulig å montere skuffa på en innfesting som kan gi sideveis vinkelforskyvning og/eller rotasjon ("rototilt"). I tillegg til innfesting av selve løftearmen bærer hovedkroppen til en ordinær gravemaskin en førerhytte, motor og hydraulikksystem med tilhørende tanker for drivstoff og olje, samt en motvekt festet lengst bak på kroppen.

Når en gravemaskin arbeider med masseforflytning, fungerer konstruksjonen som en vektstang, der vekten av massen som løftes i skuffen og utlegget av stikka definerer det nødvendige løftemomentet. I riktig graveposisjon er ledehjulene på beltene vektstangens tippunkt. Når maskinen arbeider, vil nødvendig løftemoment på bommen for å håndtere en gitt masse i skuffen, og dermed de mekaniske kreftene

på maskinen samt effektbehovet i det hydrauliske systemet, endre seg kontinuerlig som en funksjon av posisjonene til skuffesyliner, stikkesyliner og bomsylindrene. Under stasjonær graving vil maskinen ha størst effektbehov ved store bevegelser av bom, stikke og eventuelt svingmotor mens det er tung last i skuffen (siden effekt for hver bevegelse er gitt av kraft ganger hastighet, eller strømning ganger trykk i den hydrauliske kretsen). Maskinen må derfor levere høyest effekt ved store armbevegelser for masseforflytning (spesielt når flere hydrauliske sylindere og/eller motorer er i bevegelse samtidig), og ikke når maskinen brukes til å gi maksimal kraft (eksempelvis ved maksimal brytekraft på skuffen). Fordi en tradisjonell gravemaskin vil drives av en dieselmotor må motoren og hele drivsystemet dimensjoneres for maksimaleffekten som kreves fra det hydrauliske systemet, selv om denne effekten bare leveres i svært korte perioder og det gjennomsnittlige effektbehovet til maskinen er betydelig lavere.



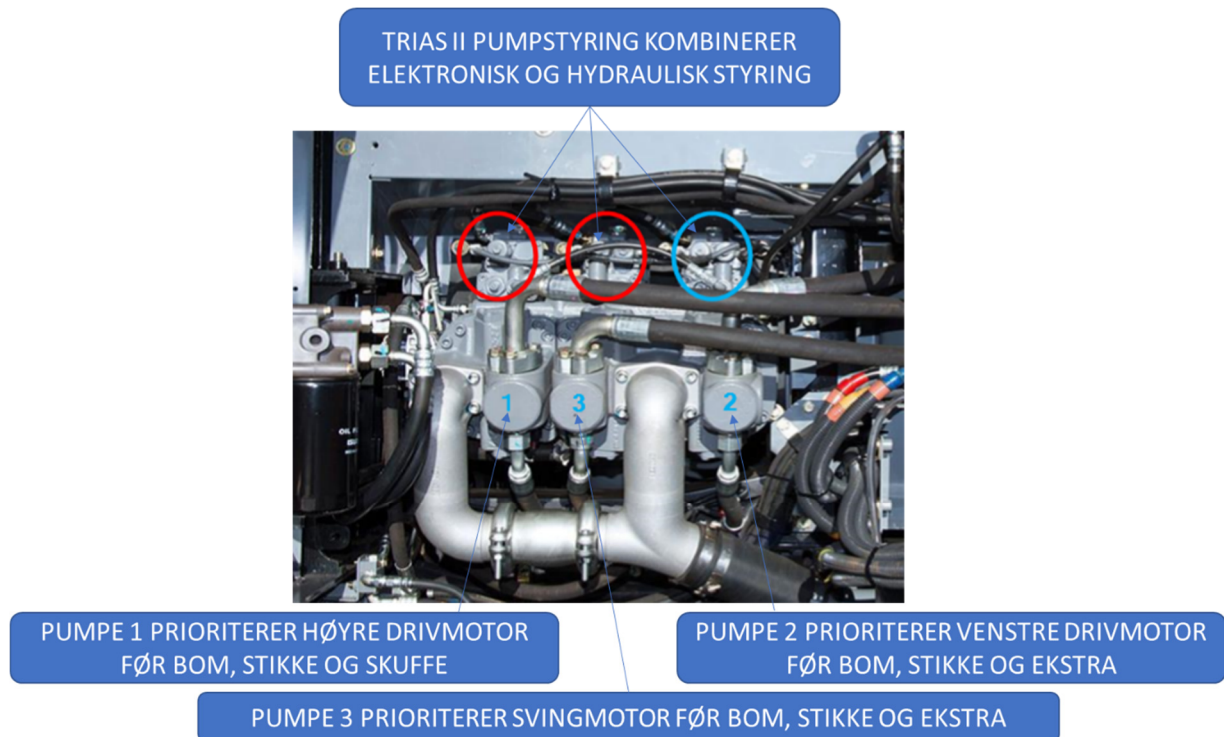
Figur 2.1. Eksempel på en 30 tonn gravemaskin med de viktigste komponentene identifisert. Kilde: Nasta

2.2 Hydraulikkpumpene

Nesten alle funksjoner på en tradisjonell gravemaskin drives hydraulisk, via hydraulikkpumpene som omformer motorens rotasjon til hydraulisk kraft i form av oljestrøm og oljetrykk. Store gravemaskiner er vanligvis utstyrt med tre separate pumper som drives av et pumpegir fra motoren. Figur 2.2 viser pumpekonfigurasjon for gravemaskinen i figur 2.1. Figuren inkluderer en beskrivelse av hvordan de ulike pumpene har ulik prioritet av oljestrøm. Pumpene har variabelt volum som kontrolleres mekanisk/hydraulisk og elektronisk, og hver pumpe kan styres uavhengig av de andre. Pumpene kan reguleres fra maksimal mengde til maksimalt trykk i løpet av fragmenter av et sekund, avhengig av hvilke signaler de mottar fra føreren via pilotspakene. Tekniske feil i pumpestyringen vil kunne føre til nedsatt effektivitet, dårlig drivstofføkonomi eller til og med motorhavari.

Størst effektbehov fra hydraulikksystemet på en gravemaskin oppstår ved drift av beltene og ved store, raske, bevegelser av bom og/eller stikke. Samtidig vil effektbehovet kunne endre seg svært raskt, eksempelvis ved start/stopp av beltene og/eller ved overgang mellom heving og senking av bommen. På millisekund-nivå vil det være hydrauliske trykkakkumulatorene og/eller motorens svinghjul og indre masse som reagerer på variasjonene i belastning, før motorens dieseltilførsel rekker å kompensere for effektbehovet.

I tillegg til energitapet i dieselmotoren og den mekaniske drivlinjen er det mange kilder til energitap i det hydrauliske systemet på en gravemaskin – fra pumper og pumpestyring til ventiler, oljemotorer og sylindre med bevegelsessymmetri. Samtidig er gravemaskinen i stor grad utformet for å overføre kraft, og det maksimale effektbehovet oppstår som nevnt bare i korte intervaller. Energien som utnyttes til å utføre arbeid med arm/skuffe på en tradisjonell gravemaskin, vil dermed være bare en liten del av den totale energien som tilføres dieselmotoren via drivstoffet. Samtidig er hydraulikk-systemet vanligvis utformet med mange undersystemer for intern regenerering av hydraulisk energi for å øke effektiviteten og redusere forbruket av drivstoff. Dermed vil eksempelvis energien som kan gjenvinnes når bommen senkes, vanligvis utnyttes til å returnere stikka, og sørger slik for at det hydrauliske systemet ikke må tilføres energi fra pumpene når løftearmen senkes og strekkes ut samtidig i én bevegelse.



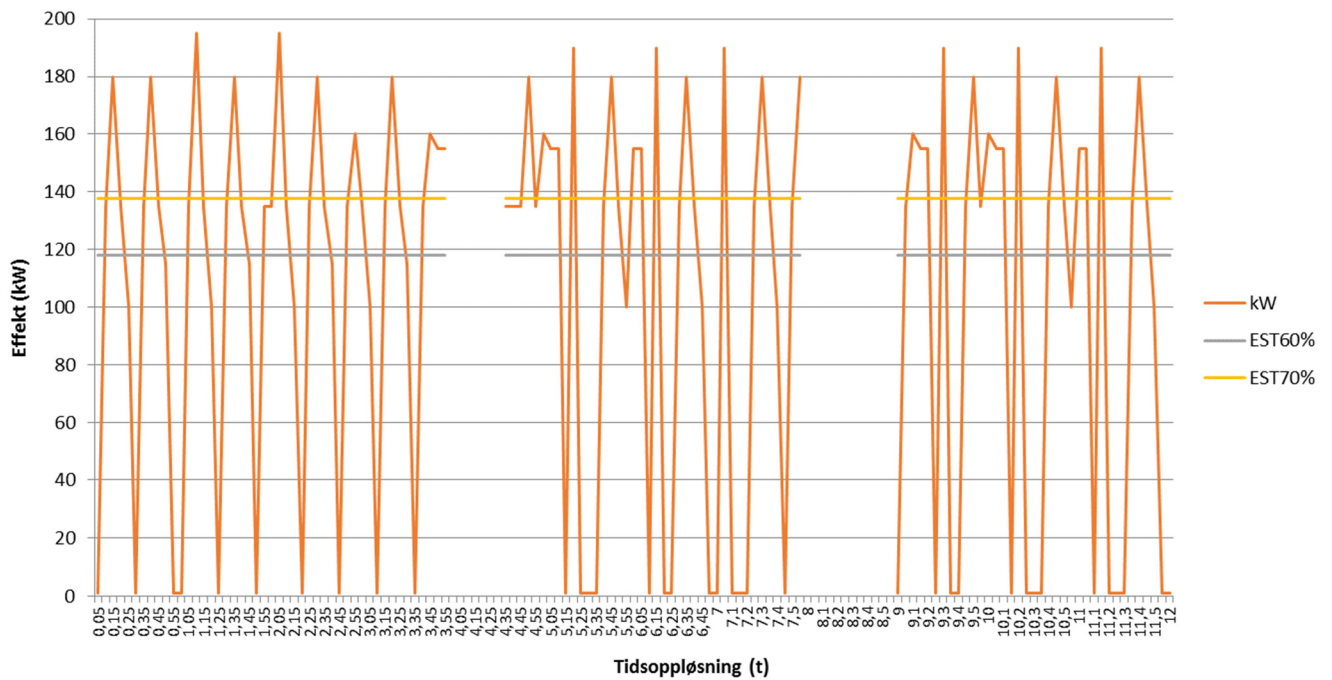
Figur 2.2. Eksempel på hydraulisk pumpeystem for en 30 tonns gravemaskin. Kilde: Nasta

2.3 Eksempel på energibehov og mulig driftsprofil for en 30 tonns gravemaskin

Maksimal motoreffekt for en elektrisk drevet Hitachi ZE300LC 30 tonns gravemaskin er ca. 200 kW. Som nevnt vil belastningen likevel variere kontinuerlig, og erfaringsdata tilsier at gjennomsnittlig effektbehov over kortere tidsrom vil bli omkring 60–70 % av maksimalytelsen ved lett kontinuerlig arbeid. Ved estimering av energibehov for en slik maskin er det vanlig å benytte konseptet "short-time", det vil si at hver time har 50 effektive minutter. Dersom en lang dag er 10 timer netto og en kort dag 6 timer netto, vil dagsbehovet for energi kunne estimeres til opp mot 1,2 MWh for en lang dag med tungt arbeid eller ca. 600 kWh for en vanlig dag med lett arbeid. Fordelt over et døgn vil dette energibehovet tilsvare ca. 50 kW kontinuerlig lading for en lang, tung dag, mens ca. 50 kW natlading vil være tilstrekkelig for å dekke energibehovet etter en kort og lett dag.

Den nøyaktige driftsprofilen for en tradisjonell gravemaskin er vanligvis ikke direkte tilgjengelig, og vil i stor grad være avhengig av hvordan pumpestyringen er implementert og hvilke løsninger som er tatt i bruk for hydraulisk lastutjevning og energigjenvinning. Som nevnt kan det likevel antas at maskinen vil måtte levere maksimal effekt ved store og raske armbevegelser med tung last. Samtidig vil energibehovet raskt synke mot null når bommen senkes, eller hvis alle bevegelser stopper for å vente på andre aktiviteter (eksempelvis skifte av lastebil ved lasting av masse). En illustrasjon av en mulig generell

driftsprofil som kan forventes ved normalt arbeid for en Hitachi ZX300LC-6 30 tonns gravemaskin er gjengitt i Figur 2.3. Denne maskinen har en maksimaleffekt på 197 kW, og den antatte lastprofilen er gitt for 12 timer med 5 minutters tidsoppløsning. I løpet av tidsserien er det antatt en pause på 30 minutter og en pause på 1 time. Kurvene i figuren viser tydelig hvordan effektbehovet kan forventes å variere mellom en lav verdi som kan være konstant i korte perioder, og topper med ulik kurveform og ulik maksimalverdi som kan nå nært opp mot maksimalt tilgjengelig effekt. Figuren indikerer også forskjellen mellom en forventet kontinuerlig varierende belastning og en forventet gjennomsnittsbetasting på 60–70 % av maksimal effekt.



Figur 2.3. Antatt lastprofil for en Hitachi ZX300LC-6 gravemaskin med maksimal effekt på 197 kW, gjengitt med minutters tidsoppløsning. Kilde: Nasta

3 Teknologistatus for miljøvennlige anleggsmaskiner

3.1 Mulige løsninger for miljøvennlig drift av anleggsmaskiner

Skarpere fokus på forskning og teknologiutvikling, spesielt i løpet av de siste 20 årene, har resultert i økende bruk av miljøvennlige kjøretøyer. Teknologiutviklingen har vært størst og fått størst utbredelse for privatbiler, men har også hatt betydning for anleggsmaskiner. Ulike løsninger for miljøvennlig drift er derfor allerede (delvis) kommersielt tilgjengelig for enkelte typer maskiner, mens det pågår utviklingsaktiviteter og prototypedemonstrasjoner basert på flere ulike konsepter. Generelt sett kan de mest aktuelle løsningene for miljøvennlige anleggsmaskiner deles inn i følgende fem kategorier:

1. Maskiner som drives av biodiesel
2. Hybride maskiner med forbrenningsmotor
3. Kabeltilkoblede elektriske maskiner
4. Batteridrevne elektriske maskiner
5. Hydrogendrevne anleggsmaskiner

De to første kategoriene kan generelt sett omtales som lavutslippsløsninger siden de kan bidra til å redusere utslippene sammenliknet med tradisjonell dieseldrift, mens de tre siste kategoriene kan eliminere alle utslipp fra maskiner i normal drift på en anleggsplass. I dette kapitlet er det gitt en kort statusoversikt over disse ulike kategoriene, etterfulgt av relevante eksempler på teknologiutvikling (også for andre anvendelser) som kan benyttes i anleggsmaskiner.

3.2 Oversikt over eksisterende lavutslippsløsninger

Lavutslippsløsninger inkluderer i første rekke løsninger med tradisjonell drivlinje og forbrenningsmotor som drives med biodiesel, samt ulike strategier for hybridisering av maskiner med forbrenningsmotor. En kort oppsummering av teknologistatus for slike løsninger er i det følgende presentert som en generell bakgrunn for videre diskusjon av løsninger for nullutslippsdrift. En mer detaljert beskrivelse av de elektriske energiomformingssystemene som er nødvendig for hybride eller full-elektriske drivlinjer, er presentert i kapittel 5.

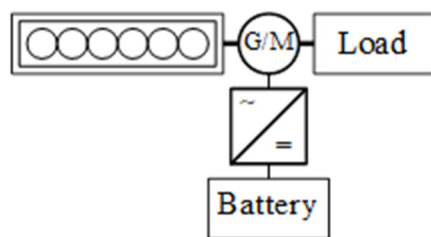
3.2.1 Anleggsmaskiner som drives av biodiesel

Bruk av biodiesel kan gjøre det mulig å redusere utslipp fra eksisterende maskiner med dieselmotorer. Løsningen innebærer derfor begrensede investeringskostnader. Dette alternativet er ikke utslippsfritt, men fossilfritt, og kan være en midlertidig løsning som støtter overgangen fra dieseldrevne maskiner til utslippsfrie alternativer [5]. Bruk av biodiesel er også det enkleste alternativet for anleggsmaskiner i tilfeller der det foreløpig ikke fins elektriske alternativer, men der motorene er godkjent for å kunne benytte HVO biodiesel [6]. Caterpillar og Volvo har allerede godkjent at deres maskiner benytter HVO diesel. Hitachi avventer en endelig godkjenning og beskrivelse av drivstoffet fra EUs side før de godkjenner bruken [7].

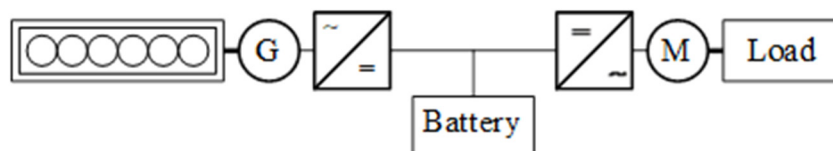
3.2.2 Hybride anleggsmaskiner

Hybride maskiner har vanligvis en forbrenningsmotor og bruker ordinært drivstoff som energikilde, men har delelektrifisert eller fullstendig elektrifisert drivlinje med innebygd elektrisk energilager som kan bidra til å bedre drivstoffutnyttelsen. Det elektriske energiomformingssystemet utnyttes dermed slik at forbrenningsmotoren kan drives med høyest mulig virkningsgrad, mens et batteri og/eller en superkondensator utnyttes som elektrisk energilager for å balansere lastvariasjonene. Forbrenningsmotoren trenger dermed ikke å dimensjoneres for å dekke maksimalt lastbehov, og kan i enkelte tilfeller slås av ved lav last for å spare drivstoff.

Hybride drivlinjer for anleggsmaskiner vil vanligvis være basert på enten parallell- eller seriehybride systemtopologier som skissert i henholdsvis Figur 3.1 og 3.2. Lasten skissert i figurene vil for anleggsmaskiner oftest være en hydraulisk pumpe. Med delvis elektrifisering kan det også være relevant å skille ut enkelte funksjoner som kan drives direkte fra det elektriske systemet, men for enkelthets skyld er ikke dette inkludert i disse generelle skissene.



Figur 3.1. Generell struktur for en parallellhybrid drivlinje



Figur 3.2. Generell struktur for en seriehybrid drivlinje

Som indikert i figur 3.1, er parallelhybride løsninger vanligvis basert på en elektrisk maskin som er koblet til samme mekaniske drivlinje som forbrenningsmotoren. Ved lavt effektbehov brukes maskinen som generator slik at deler av effekten fra forbrenningsmotoren kan overføres til energilageret. Ved høyt lastbehov brukes den samme maskinen som motor og driver det mekaniske systemet sammen med forbrenningsmotoren. Toyota Prius er kanskje det best kjente eksemplet på bruk av parallelhybride løsninger i privatbiler, og den generelle systemarkitekturen for anleggsmaskiner med parallelhybrid drift kan ha en liknende struktur, selv om det kan være relevant å velge ulike løsninger for integrasjon av elektrisk generator/motor, energilager og energiomformingstopologier avhengig av anvendelsen. Den generelle fordelene med parallelhybride løsninger er at noe av den mekaniske effekten fra forbrenningsmotoren kan brukes direkte til å drive systemet. Dette kan vanligvis gi best utnyttelse av drivstoffet ved høy gjennomsnittlig belastning.

I seriehybride løsninger blir all energien fra forbrenningsmotoren omformet til elektrisk energi, og lasten drives direkte med en kraftelektronikkomformer som styrer en elektrisk motor, som indikert i Figur 3.2. Ulike teknologier for energilager kan dermed integreres direkte i det elektriske systemet. Siden all effekt i en seriehybrid løsning må omformes fra mekanisk til elektrisk effekt, og deretter til elektromekanisk drift av maskinen, må det elektriske fremdriftssystemet være dimensjonert for den maksimale effekten. Det kan gi et mer kostbart elektrisk system enn for parallelhybride løsninger, men det mekaniske systemet kan gjøres enklere. Vanligvis vil et seriehybrid system kunne gi bedre drivstoffutnyttelse enn parallelhybride løsninger ved store variasjoner i lastbehovet.

For elektriske gravemaskiner med hybrid drivlinje er drivstoffbesparelsen vanligvis i størrelsesorden 20–30 % sammenliknet med tradisjonelle dieseldrevne maskiner. Et eksempel på analyse av forventet drivstoffbesparelse for parallell- og seriehybride løsninger i en 5 tonns gravemaskin er presentert i [8]. Tilsvarende løsninger fins også allerede kommersielt tilgjengelig. Eksempelvis leverer Komatsu to hybride beltegravere på omtrent 23 og 27 tonn [9]. Det bør også nevnes at hybride maskiner som kan kjøre med biodrivstoff, vil kunne gi fossilfri drift. Siden biodrivstoff også vil bære basert på begrensede ressurser, vil dermed hybridisering for drivstoffbesparelse og reduksjon av lokale utslipp være like relevant ved bruk av biodiesel som for fossile drivstoff.

Det kan også nevnes at hybride systemer med betydelig batterikapasitet kan gjøre det relevant med plug-in-hybrid drift. Slike løsninger har de siste årene blitt relativt vanlige for privatbiler, men kan også utnyttes for anleggsmaskiner. Muligheten for batterilading fra kraftsystemet kan dermed utnyttes til å

reduere utslipp fra vanlig drift innenfor begrensningene av batterikapasiteten om bord og tilgjengelig ladeeffekt, samtidig som bruken av maskinen ikke vil begrenses av muligheten for batterilading.

3.3 Oversikt over mulige nullutslippsløsninger

Den følgende oversikten omfatter løsninger som ikke gir direkte utslipp under vanlig drift. Informasjonen er presentert som bakgrunn for videre evaluering av hvordan mulige løsninger kan videreutvikles for å få bredere bruksområde. En mer detaljert beskrivelse av de elektriske energiomformingsystemene som er nødvendig for batterilading og/eller integrasjon av hydrogenbrenselceller for å oppnå nullutslippsdrift, er presentert i kapittel 5. Kostnader ved de ulike løsningene vil ikke bli direkte diskutert i den følgende oversikten, men et estimat for kostnader ved ulike strategier for nullutslippsdrift er gitt i [10].

3.3.1 Kabeltilkoblede elektriske maskiner

Maskiner med kabeltilkobling kan drives direkte fra strømmettet og vil vanligvis stå fast på en lokasjon eller bevege seg innenfor et begrenset område. Kabeldrift er allerede vanlig for mange typer utstyr som brukes til stasjonære oppgaver. For eksempel går de fleste tårnkraner og mange mindre maskiner på strøm. Unic har også tatt i bruk en batteridrevet mobilkran med løftekapasitet på tre tonn [11]. Videre har Veidekke tatt i bruk elektriske betongsprøyterigger, som i praksis har lavere innkjøps- og driftskostnader enn tradisjonelle dieseldrevne rigger [12]. En oversikt over andre relevante maskiner med direkte elektrisk drift via kabeltilkobling som er tilgjengelig i Norge, er gitt [13], og det er forventet at flere slike løsninger vil bli tilgjengelig i de kommende årene.

Eksempler på maskiner som kan drives fra to ulike energikilder, uten fullstendig integrert hybridisering, er også tilgjengelig. Eksempelvis leverer Wacker Neuson en 1 tonns gravemaskin som i tillegg til dieselmotoren om bord kan kobles til et eksternt elektrohydraulisk aggregat [14]. Tilkoblingen til maskinen er da hydraulisk, selv om systemet drives med elektrisk kraft. Denne maskinen har dermed mulighet for nullutslippsdrift for arbeid som kan utføres med tilkobling til det eksterne elektrohydrauliske aggregatet, men kan også operere som en vanlig dieseldrevet gravemaskin.

For gravemaskiner og andre store maskiner er energiforsyning via kabeltilkobling en relevant og godt kjent løsning for spesielle anvendelser, selv om det ikke kan betraktes som en vanlig og lett tilgjengelig standardløsning. Arbeidsoppgaver på steder med begrenset luftsirkulasjon som tunneller eller gruver kan eksempelvis kreve bruk av maskiner som drives på strøm for å unngå direkte utslipp fra dieselmotorer. Spesialkonstruerte maskiner er likevel mindre relevante for bruk til generelle formål, som på byggeplasser. For slike anvendelser er det mer relevant med maskiner som kan leveres som en form for serieproduksjon. Eksempelvis har Nasta utviklet en gravemaskin på ca. 17 tonn med drift via kabeltilkobling på basis av en standard 17 tonns gravemaskin fra Hitachi [15]. Maskinen vil i første rekke bli levert i en serie på fem maskiner som skal benyttes til avfallshåndtering og kildesortering. Maskinene vil da vanligvis drives med strømkabelen tilkoblet nettet, men skal også ha et batteri om bord som kan balansere strømbehovet ved maksimal belastning, og som kan gjøre det mulig for maskinen å arbeide i 30–60 minutter uten å være tilkoblet strømmettet. Flere detaljer om denne maskinen er gitt som et eksempel underkapittel 3.3.1.1. Nasta undersøker også muligheten for å utvikle en kabeltilkoblet gravemaskin i 35 tonnsklassen. I august og september 2018 har også Volvo demonstrert en ombygd 75 tonns gravemaskin med mulighet for kabeltilkoblet drift i et steinbrudd, som en del av et demonstrasjonsprosjekt for elektrifisert anleggsdrift [16]. Gravemaskinen er i dette tilfellet også utstyrt med en tradisjonell dieselmotor for å ha full mobilitet, og drives bare via kabel ved stasjonært arbeid.

For byggeplasser, vil introduksjon av kabeltilkoblede maskiner generelt sett medføre en del utfordringer knyttet til praktisk bruk og sikkerhet. Det omfatter spesielt begrensninger i fleksibilitet og bevegelighet hvis det er flere maskiner med kabeltilkobling i drift samtidig. Bruk av flere kabeltilkoblede maskiner samtidig på en byggeplass vil også være begrenset av tilgjengelig strømforsyningskapasitet.

3.3.1.1 Eksempel på ombygd gravemaskin: Hitachi ZX160LC med kabel og batteri

Nasta AS har i løpet av 2017 og 2018 bygd om en Hitachi ZX160LC 17,5 tonns beltegravemaskin til elektrisk drift med kabel direkte fra strømmettet. Maskinen er konstruert for bruk til kildesortering, men vil kunne ha mange bruksområder og har en gunstig balanse mellom driftsøkonomi, sikkerhet og fleksibilitet. Valget av væskekjøling ble definert av krav til stabil drift under mange forhold, inklusive støv/forurensning. Plassering av hovedkomponenter på donormaskin er opprettholdt i stor grad.

Tekniske data:

- *Visedo/Danfoss væskeavkjølt AC permanent magnetmotor: 75 kW*
- *Visedo/Danfoss væskeavkjølt kraftelektronikk*
- *Væskeavkjølt batteri med forvarming: 44 kWh*
- *Kjølevifte med separat motor*
- *Kabeltilkobling 130 A – 400 V kontinuerlig*
- *Autonom drift ca. 30 minutter*



Figur 3.3. Hydraulikkpumpe Kilde: Nasta

Elektrifisering: ombygging til nullutslipp

Steg 1 – Plug-in electric: Ombygging av en hydraulisk gravemaskin til plug-in elektrisk drift omfatter demontering av original dieselmotor og dieseltank, som erstattes med elektrisk motor og elektrisk kabling. Man må etablere systemer for varme/kjøling av hydraulikk og førerhus.

Steg 2 – Plug-in battery electric: Batterier defineres ut fra brukssituasjon og ønsket autonom driftstid. Batteristyringssystem integreres med elektrisk motordrift.



a)

b)

c)

Figur 3.4. a) Kraftelektronikk, b) Drivmotor, c) Viftomotor. Kilde: Nasta



Figur 3.5. Skap for styreelektronikk. Kilde: Nasta



Figur 3.6. Krafttilkobling via slepinger bak på maskinen beregnet for overhengende tilkobling Kilde: Nasta

3.3.2 Batteridrevne elektriske maskiner

Batteridrevne maskiner kan i utgangspunktet bevege seg fritt på samme måte som tradisjonelle dieseldrevne maskiner. Bruken er dermed kun begrenset av batterikapasitet og lademulighetene. Det fins allerede flere tilgjengelige batterielektriske maskiner – både lastere, dumpere og gravemaskiner. Eksempelvis tilbyr leverandører som Wacker Neuson, Weidemann og Kramer, Atlas Copco og Avant allerede elektriske lastere i ulike størrelser. Den største av disse er Atlas Copcos Scooptram ST7 Battery grovelaster med en løfteevne på opptil sju tonn, og med over fire timer driftstid [17]. Et eksempel på en mindre maskin er Wacker Neusons Kramer 5055e hjullaster, som har en løfteevne på opp til 2,5 tonn, og en driftstid på omtrent fem timer [18]. For dumpere og gravemaskiner har det fram til 2018 først og fremst vært mindre maskiner tilgjengelig. Eksempelvis tilbyr Wacker Neuson, Messersi, Fort, TUFFTRUK og Ecovolve både beltegående og hjulgående elektriske minidumpere. Den største versjonen til Ecovolve har en lasteevne på opp til 1,5 tonn og driftstid tilsvarende "en typisk arbeidsdag" [19].

For gravemaskiner har det etter hvert kommet et noe større utvalg av batteridrevne maskiner, men i første rekke i vektclassene under 10 tonn [13]. Eksempelvis tilbyr Suncar HK elektriske beltegravere på to og sju tonn med driftstid opp til 5–8 timer, forutsatt én times batterilading i løpet av arbeidsdagen [22]. Tilsvarende tilbyr Nasta ombygde Hitachi minigravere på 2 og 3,5 tonn med estimert driftstid på ca. 4,5 timer [20]. Det kan også nevnes at Volvos utviklingsavdeling for små gravemaskiner har designet

en prototype på en liten batteridrevet gravemaskin der alle funksjoner er elektrifisert og det meste av hydraulikk er eliminert [21]. Det kan gi høyere energieffektivitet og dermed mindre behov for stor batterikapasitet, men demonstrasjonen fra Volvo har først og fremst vært en del av en generell konseptutvikling, og det er ingen informasjon som tilsier at den presenterte prototypen vil bli videreutviklet til en produktserie i nær framtid.

Foreløpig er det relativt få tilgjengelige gravemaskiner med ren batteridrift i vektclassene over 10 tonn, men det er flere løsninger under utvikling og det forventes at flere typer maskiner vil bli tilgjengelig i løpet av de kommende årene. Foreløpig leverer Suncar en beltegående batteridrevet gravemaskin på 16 tonn, med en driftstid på opptil fem timer forutsatt én times batterilading i løpet av arbeidsdagen [22]. I Norge har også Nasta lansert batteridrevne gravemaskiner på 9 og 16 tonn under merkenavnet Zeron [20]. Disse maskinene har batterikapasitet på henholdsvis 180 kWh og 300 kWh, som tilsvarer estimert driftstid på henholdsvis 7,5 og 5 timer. Tilsvarende har Pon startet utvikling av en 25 tonns batteridrevet gravemaskin som er ombygd fra en standard Caterpillar gravemaskin, og som skal kunne leveres i løpet av 2018 [23]. Denne maskinen skal ha batterikapasitet til 5–7 timers normal drift, som kan forlenges med ca. én time hvis batteriene kan lades én time i løpet av dagen.

Selv om det fins flere eksempler på batteridrevne gravemaskiner i vektclassen under 20–25 tonn, er batteridrevne gravemaskiner som kan utføre tunge oppgaver på en byggeplass, fortsatt ikke tilgjengelig. Ettersom etterspørselen etter slike alternativer vokser, forventes det at tilgangen på utslippsfrie maskiner framover vil øke. Selv om det må forventes at batteridrevne maskiner vil bli dyrere i innkjøp enn tradisjonelle dieseldrevne maskiner, spesielt på grunn av batterikostnaden, er det likevel mulig at slike løsninger etter hvert vil bli lønnsomme som følge av at strøm er billigere som drivstoff, lavere vedlikeholdskostnader og at elektrisk drevne maskiner vil kunne være mer energieffektive og dermed få betydelig lavere energibehov for samme type arbeid. Bruk av rene batteridrevne maskiner vil likevel kunne begrenses av ladekapasitet, og spesielt muligheten for hurtiglading og drift med flere skift vil bli avhengig av nettkapasitet på anleggsplasser og kapasitet på ladeutrustning.

3.3.3 Hydrogendrevne maskiner

Bruk av hydrogen som energibærer/drivstoff og hydrogen-drevne brenselceller for energiforsyning under drift eliminerer lokale utslipp fra maskiner. En av de store potensielle fordelene med hydrogendrift i stedet for ren batteridrift eller kabeldrift er at hydrogen kan lagres og fylles like raskt som konvensjonelt, fossilt, drivstoff. Hydrogendrift kan dermed unngå de fleste begrensningene gitt av ladetid og nettkapasitet som man har ved ren batteridrift. Det fører også til at hydrogendrift kan være egnet for større maskiner med lang driftstid og høyt gjennomsnittlig effektbehov der det er vanskelig å installere tilstrekkelig batterikapasitet om bord til å dekke energibehovet for en normal arbeidssyklus.

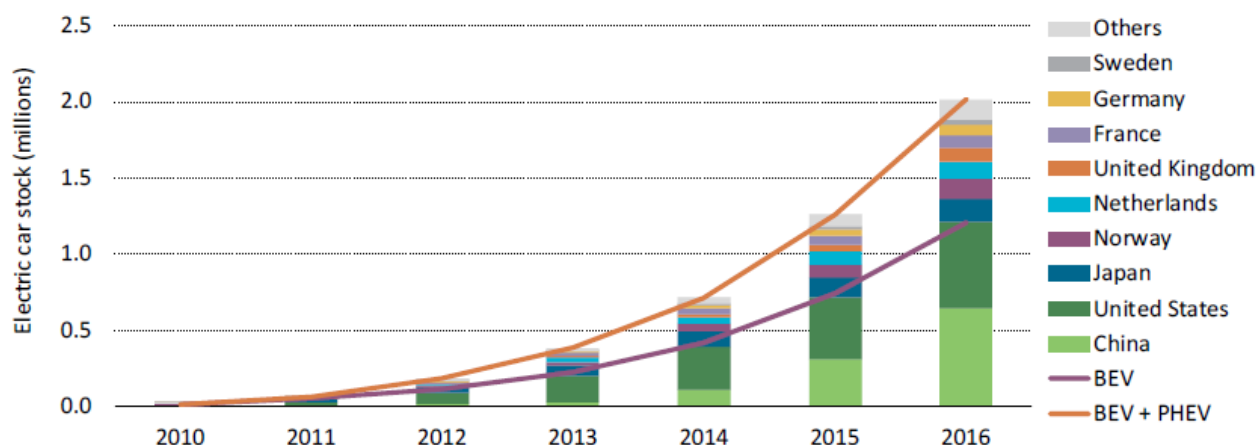
Hydrogendrift har lenge blitt sett på som en mulighet for utslippsfri veitransport der man har behov for lang rekkevidde, men kan også være en relevant løsning for energiforsyning til arbeidsmaskiner. Eksempelvis fins det i USA allerede over 10 000 hydrogendrevne gaffeltrucker som opererer på lager- og distribusjonssentre [5]. Ellers foregår det for tiden utvikling av mange ulike systemer og løsninger for hydrogendrift for å dekke ulike transportbehov. Eksempelvis satser fire regioner i Tyskland på å introdusere 100 hydrogendrevne passasjertog. I Norge jobber ASKO med introduksjon av hydrogendrevne lastebiler for å eliminere utslipp fra varetransport over lange distanser [5]. Foreløpig fins det likevel ikke tilgjengelig store anleggsmaskiner med hydrogendrift, selv om ulike løsninger for brenselcelledrift har blitt vurdert i designstudier og forskningsartikler. Eksempelvis har Volvo presentert en konseptanalyse av framtidig gravemaskindesign som er basert på antakelsen om framtidig overgang til hydrogendrift [24]. Det foregår også forskningsaktiviteter, eksempelvis i Korea, relatert til analyse og dimensjonering av komponenter og systemer for hydrogendrevne gravemaskiner [25].

Det kan også nevnes at siden løsninger med hydrogen-drevne brenselceller i praksis er seriehybride energisystemer, så kan systemdesign og kapasitet på de ulike delene tilpasses ulike formål. Løsninger med relativt stort batteri kan også muliggjøre plug-in-hybrid drift med strøm fra kraftnettet som energikilde i tillegg til hydrogen. Videre kan stasjonære installasjoner med brenselceller være en mulighet for

å gi tilstrekkelig effekt til batterilading av rene batteridrevne maskiner ved mangel på tilgjengelig nettkapasitet for strømforsyning. Slike løsninger har hittil ikke blitt presentert for konkrete prototyper eller konsepter for anleggsmaskiner, men vil kunne designes med utgangspunkt i eksisterende teknologi og komponenter. Dersom spillvarmen fra et slikt hydrogenanlegg utnyttes på byggeplassen eller via et fjernvarmeanlegg, vil totalvirkningsgraden øke betraktelig.

3.4 Eksempler på utvikling av nullutslippsteknologi i andre anvendelser

Det eksisterer i dag tallrike eksempler på at nullutslippsteknologier er på full fart inn i det norske markedet, først og fremst knyttet til bruken av batterier i elektriske og hybride kjøretøyer. En oversikt over den globale salgsutviklingen av elbiler er vist i figur 3.7. Figuren viser at det globale elbilsalget har økt betraktelig de siste årene, samt at elbilsalget i Norge er betydelig, også i internasjonal sammenheng. En betydelig andel (> 35 %) av nybilsalget av personbiler i Norge i dag, er basert på batteriteknologi – enten som rene elbiler eller plug-in-hybride kjøretøyer [26]. Videre er det et økende utvalg og økende salg av elektrisk drevne varebiler i ulike størrelser, og store transportaktører som Posten har begynt å ta i bruk slike kjøretøyer [27]. Flere produsenter av tyngre kjøretøyer har også utviklet batteridrevne lastebiler for varedistribusjon. Eksempelvis tilbyr Daimler en elektrisk lastebil med 212 kWh batterikapasitet og forventet rekkevidde på ca. 200 km, og Volvo har lansert to ulike lastebilmodeller for leveranse fra 2019, med totalvekt på henholdsvis 16 og 17 tonn, batterikapasitet opp til 300 kWh og rekkevidde på 200–300 km [28]. Dessuten har Tesla lansert sine planer for utvikling og produksjon av Tesla Semi, som skal bli en fullelektrisk lastebil for langtransport, med rekkevidde på opptil 800 km [29].



Notes: The electric car stock shown here is primarily estimated on the basis of cumulative sales since 2005. When available, stock numbers from official national statistics have been used, provided good consistency with sales evolutions.

Figur 3.7. Global salgsutvikling av elbiler. Kilde: IEA [30]

I Norge er det også stor interesse for utnyttelse av nullutslippsteknologi i maritim transportsektor, og i dag fins det flere demonstrasjonsprosjekter hvor man tester ut nullutslippsløsninger. Verdens første batteridrevne ferge, "Ampere", er et godt eksempel på uttesting av slik teknologi i norske fjorder. Fergen har plass til 120 biler og 360 passasjerer, og går i rute mellom Lavik og Oppedal, med en overfart på omlag 20 minutter [31]. Skroget er bygd i aluminium, noe som betyr at vekten halveres sammenliknet med en ferge bygd i stål. Batteripakken om bord benytter litium-ion-teknologi som kan vise til en energitetthet på omlag 100 Wh/kg, mot tradisjonelle blybatterier med en energitetthet på 24 Wh/kg. En elektrisk ferge vil bruke omlag to millioner kWh i året, mens en vanlig ferge som går på diesel, ville brukt én million liter diesel i året. Ved å bruke elektrisitet reduserer man altså "drivstoffkostnadene" med 80 prosent. Mange nye ferger med batteridrift eller plug-in-hybride systemer er nå under planlegging, bygging eller idriftsettelse i Norge, og det forventes at det vil være minst 60 ferger med batterier i drift innen 2021 [32].

Den elektriske sjarken "Karoline" er et annet eksempel på uttesting av batterier til fremdrift i maritime fartøy. Bruken av batterier i "Karoline" resulterte i et sju år langt samarbeid mellom Selfa, SINTEF og Siemens, og viser at målet om å skape en banebrytende farkost som kan gi en av Norges mest tradisjonsrike næringer muligheten til å drastisk redusere klimautslipp, nå er nådd. Norsk fiskeflåte bruker 400 millioner liter med olje og diesel i året. Elektrifisering vil gjøre det mulig å kutte opp mot 80 prosent av drivstofforbruket samt redusere CO₂-utslipp med 80 000 tonn i året. Selfa E1-Max [33] har en batteribank på 30 batterier, og sammen med Siemens har de tilpasset et avansert fremdriftssystem. Med elektrisk fremdrift blir det mindre støy, vibrasjon og eksos. Dermed vil miljøet bedres både for fisk og fiskere. Dieselmotoren som er installert, aktiveres kun i nødsituasjoner. De fleste turer for denne typen fiskebåter varer i åtte til tolv timer. Batteriene lades ved kai om natten. Dette skal være et mer miljøvennlig, og betraktelig billigere alternativ enn de tradisjonelle dieseldrevne båtene. Samtidig vil vedlikehold bli både billigere og enklere på batterisjarken. "Karoline" skal operere i kalde farvann i Nord-Norge, og om vinteren må fiskeflåten tåle ekstreme temperaturer (minusgrader). Det betyr at fartøyene også må holdes varme ved kai. Batterikapasitet har derfor vært et viktig fokus i prosjektet. Batteriene som er brukt i Siemens' fremdriftsmaskineri, kan lades opp til 30 000 ganger før de må byttes ut.

De siste årene har også utviklingshastigheten og bruken av hydrogenteknologier økt betraktelig. I følge Hydrogenforum eksisterer det per i dag omtrent 120 hydrogenbiler i Norge, og trenden er sterkt økende [34]. På global basis var det i 2017 rapportert over 7 000 hydrogen(person)biler på veien. Nesten halvparten av det totale antallet hydrogenbiler er solgt i USA, mens Norge ligger på en 7. plass. Det eksisterer planer for en utstrakt satsning på hydrogenbiler i nærmeste framtid, der blant annet Japan har ambisjoner om en utrulling av 800 000 hydrogenbiler innen 2030.

Innen tungtransport er det hos ASKO i Trondheim planlagt å innføre de første hydrogendrevne lastebilene i Nord-Europa, og første lastebil vil demonstreres i løpet av 2018. Distribusjonsbilene utvikles og bygges hos Scania, der hydrogentankene kommer fra norske Hexagon og brenselcellesystemet fra Canadiske Hydrogenics. I samarbeid med Bosch utvikler Amerikanske Nikola Motor semitrailere med brenselceller og opptil 200 mil rekkevidde. Ølprodusenten Anheuser-Bosch er den første store offentlig kjente kunden. De har bestilt 800 trailere og får de første i 2020.



Figur 3.8. Skisse av hydrogenlastebil fra Hyundai. Kilde: Trucks [35]

Hydrogenbusser blir også mer og mer utbredt over hele verden. Så langt fins det omtrent 100 busser på verdensbasis. De neste par årene er det planlagt flere hundre nye busser bare i Europa, mens Kina snakker om tusentalls kjøretøyer. Selv om dagens kostnader ved bruk av hydrogenbusser er en del høyere enn med konvensjonell forbrenningsteknologi, er det forventet at forskjellen vil krympe betraktelig med større produksjonsvolum av brenselcelleteknologi og økt bruk og tilgjengelighet av hydrogen. Videre er det økende interesse rundt marin anvendelse av hydrogenteknologi, og det er for tiden flere initiativer på gang. Et godt eksempel er Fiskerstrands initiativ for å bygge en hydrogenferge, der en

kombinasjon av hydrogen og batteri vil sørge for at det er mulig å operere et samband med driftstid lengre enn hva som er grensen for batterier (det vil si > 35 min.). Statens Vegvesen har i tillegg utlyst en utviklingskontrakt for hydrogenferge som skal i drift i 2021. Det er også ulike initiativer rundt etablering av passasjerbåter (hurtigbåter) drevet av hydrogen, blant annet i Sogn og Fjordane og i Trøndelag [36]. Hurtigbåten som drifter Trondheim–Kristiansund-strekningen i Trøndelag (3,5 timer reisetid) vil i løpet av en overfart fra endestopp til endestopp forbruke omtrent 400 kg hydrogen. I et slikt tilfelle er det foreslått en lagringsløsning med tre høytrykk komposittanker, hver med plass til 150 kg hydrogen ved 250 bars trykk. Det tilsvarer en totalvekt på lagringssystemet på omtrent sju tonn. Til sammenlikning vil et batterisystem med tilsvarende kapasitet veie omtrent 54 tonn, noe som utelukker ren batteridrift dersom målet er å opprettholde nødvendig marsjfart [36].

I togtrafikken er det også en økende interesse for hydrogen som drivstoff. Alstom har bygd det første togsettet som snart settes i kommersiell drift i Tyskland [37]. Siemens jobber også med utvikling av hydrogentog, og flere regioner i EU har vist interesse for å ta i bruk disse. Til sammen over 100 tog forventes på skinnene de nærmeste årene, blant annet i Tyskland, Frankrike, England og Sveits.

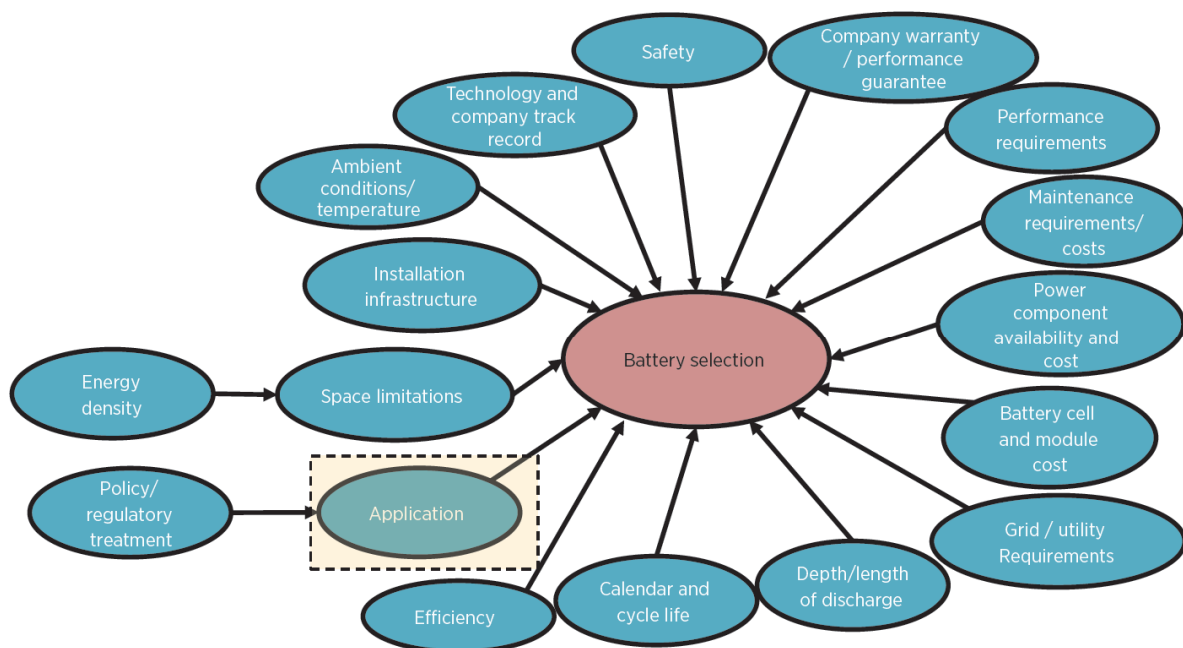
Det jobbes med hydrogen og brenselceller for mange flere anvendelser. Noen av disse er nevnt i kapittel 5.2. Gravemaskiner med brenselceller er også bygd, men lite er kjent om detaljer og erfaringer. Blant annet har Volvo vært involvert i to prosjekter [38], men det er snakk om små maskiner.

4 Teknologistatus for batteri- og hydrogenteknologi

4.1 Batterier

4.1.1 Batterityper og deres egenskaper

Det fins ulike batterityper med ulik batterikjemi, noe som gjør det viktig å velge batteritype ut fra behovet som skal dekkes. Valg av batteritype avhenger typisk av hvor stor energimengde man ønsker å lagre, over hvor lang tid man ønsker å lagre energien, virkningsgrad, egnet plassering, vekt/størrelse, kostnader knyttet til batteritypen, hvor sikker og moden teknologien er, samt miljøgevinst i form av reduserte klimagassutslipp. International Renewable Energy Agency (IRENA) har listet opp viktige parametre som spiller inn ved valg av batterier, se Figur 4.1.



Figur 4.1. Viktige parametre ved valg av batterier for en anvendelse. Kilde: IRENA [39]

Levetid og ytelse er viktige parametre ved valg av batteritype, der antall mulige ladesykluser varierer avhengig av hvordan batteriet benyttes. Raskere opp- og utladingshastighet og dypere utlading vil typisk gi redusert antall ladesykluser og dermed kortere levetid, men siden kjemien i de ulike batteriteknologiene er forskjellige, er det store forskjeller i antall mulige opp- og utladninger mellom batteritypene og/eller batterikjemiene. Forskjellige batterikjemier har dessuten forskjellig ytelse ved ulike temperaturer.

Egnet plassering av batteritypen er viktig da det kan forekomme plassbegrensninger samt restriksjoner med hensyn til infrastruktur eller andre omliggende forhold. *Størrelse og vekt* på batteriet vil være viktig, noe som i mobile operasjoner ofte favoriserer batterityper med høy energitetthet, men som ikke nødvendigvis er like viktig ved bruk på en gravemaskin, da batteriet kan benyttes som motvekt.

Kostnadene knyttet til batteritypen er en annen viktig faktor som ofte kan være avgjørende ved valg av batteritype. Her vil batterisystemkostnader og vedlikeholdskostnader spille inn. Det kan tenkes at bruk av en moden og etablert teknologi vil gi lavere økonomisk risiko enn nye batterityper fordi det fins etablerte produsenter og leverandører.

De siste årene har det skjedd en rask utvikling på batterifronten, og enkelte batterityper er i ferd med å bli mer robuste, mer effektive og billigere – dette som følge av utstrakt bruk i transportsektoren og til en viss grad i energisektoren, men også som følge av forskning på området. Utviklingen er dessuten støttet av ulike regulatoriske virkemidler som bidrar til at batterier i økende grad erstatter fossilt brensel.

I dag tilbys det mange pålitelige batteriteknologier fra en rekke produsenter og leverandører. Ved anvendelse av batterier i en gravemaskin er det kun sekundære batterier, det vil si oppladbare batterier, som er av interesse. Strømningsbatterier ("redox flow") og høytemperaturbatterier (natrium-svovel; Na-S) er først og fremst utviklet for stasjonær bruk og/eller større energilagring, noe som gjør disse uaktuelle for en mobil enhet. Det betyr at følgende sekundære batterityper er aktuelle:

- Blybatterier
- Nikkel-kadmiumbatterier (Ni-Cd)
- Nikkel-metallhydridbatterier (NiMH)
- Litium-ionbatterier (Li-ion)

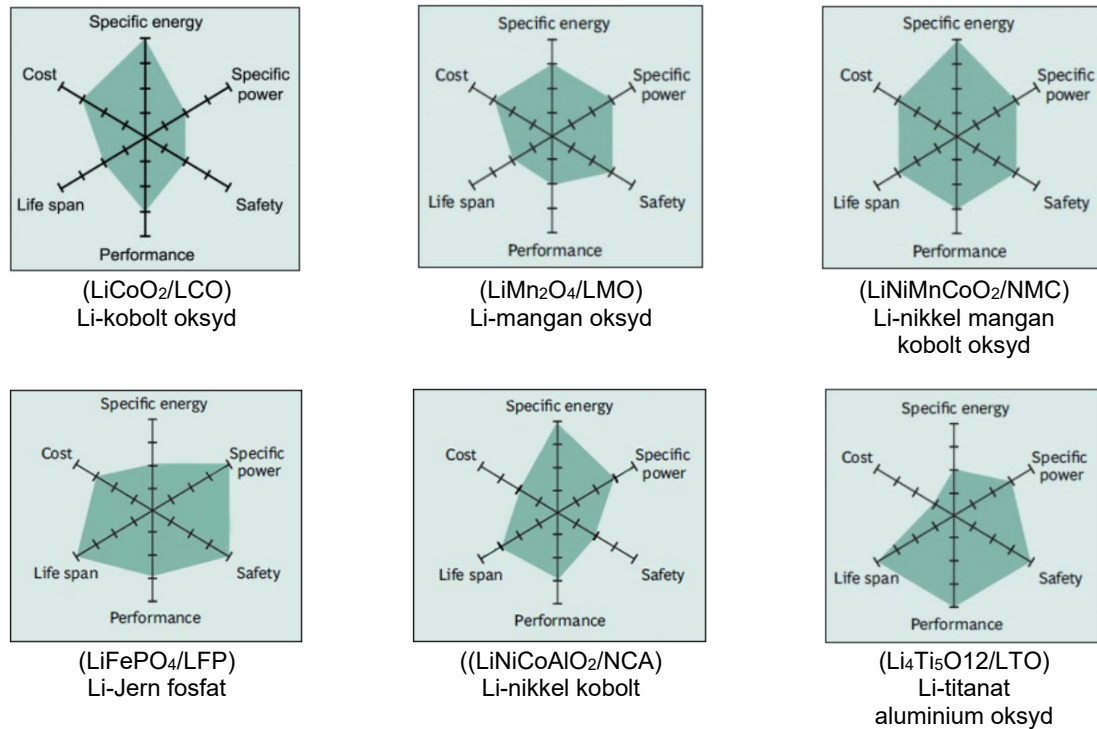
Ulike fordeler ved de forskjellige batteritypene sammenliknet med andre batterityper er summert i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Ulike fordeler ved de forskjellige batteritypene sammenliknet med andre batterityper (basert på Avicenne Energy, 2017 [40])

I forhold til- fordel	Blybatterier	Nikkel-kadmiumbatterier	Nikkel-metall hydridbatterier	Litium-ionbatterier
Blybatterier		Energitetthet Driftstemperatur Selvutladning Pålitelighet	Gravimetrisk energitetthet Volumetrisk energitetthet Selvutladning	Gravimetrisk energitetthet Volumetrisk energitetthet Spenning Selvutladning
Nikkel- kadmiumbatterier	Antall ladesykler Pris Spenning		Gravimetrisk energitetthet Volumetrisk energitetthet	Gravimetrisk energitetthet Volumetrisk energitetthet Spenning Selvutladning
Nikkel-metall hydridbatterier	Antall ladesykler Pris Spenning	Driftstemperatur Antall ladesykler Pris Sikkerhet		Energitetthet Driftstemperatur Antall ladesykler Spenning Selvutladning
Litium-ionbatterier	Antall ladesykler Pris Sikkerhet	Operativ temperatur Antall ladesykler Pris	Pris Sikkerhet Utladingshastighet	
Absolutte fordeler	Antall ladesykler Pris	Driftstemperatur Pris	Volumetrisk energitetthet	Energitetthet Antall ladesykler Spenning Selvutladning

Ni-Cd batterier er potensielt miljøskadelige og det eksisterer restriksjoner rundt salg av kadmiumholdige batterier. NiMH batterier er mindre miljøskadelige, men har til gjengjeld høy selvutladning og kan ha noe utilfredsstillende levetid. Denne batteritypen benyttes ofte i hybridbiler, noe som står for omtrent 70 % av bruken av denne batteritypen. Blybatterier anses, sammenliknet med andre batterityper, som en moden og rimelig teknologi som i dag brukes i stort omfang i transportsektoren, da fortrinnsvis som startbatteri. Batteriet har god ytelse under ulike temperaturforhold og er sikkert i bruk. Ulempen med blybatterier er at de, sammenliknet med litium-ion batterier, har lavere energitetthet samtidig som de har en langsom opplading kombinert med kort levetid.

Litium-ion batterier er den batteritypen som det er mest interesse for og som foretrekkes i transportsektoren i dag. Litium-ion batterier har sammenliknet med andre batterityper høy energitetthet både når det gjelder volum og vekt. I tillegg har litium-ion batterier lang levetid ved at de tåler mange ladesykler. For litium-ion batterier fins det en stor variasjon i sammensetninger av katode-materialer som gir forskjellige katodeegenskaper. Dette vil, sammen med de andre komponentene i et Li-ion batteri, gi stor variasjon i batteriegenskapene, noe som igjen resulterer i at man kan designe batteriet etter behov/bruksområde. Et eksempel på hvordan forskjellige batterikjemier kan påvirke litium-ion batteriets egenskaper er vist i figur 4.2.

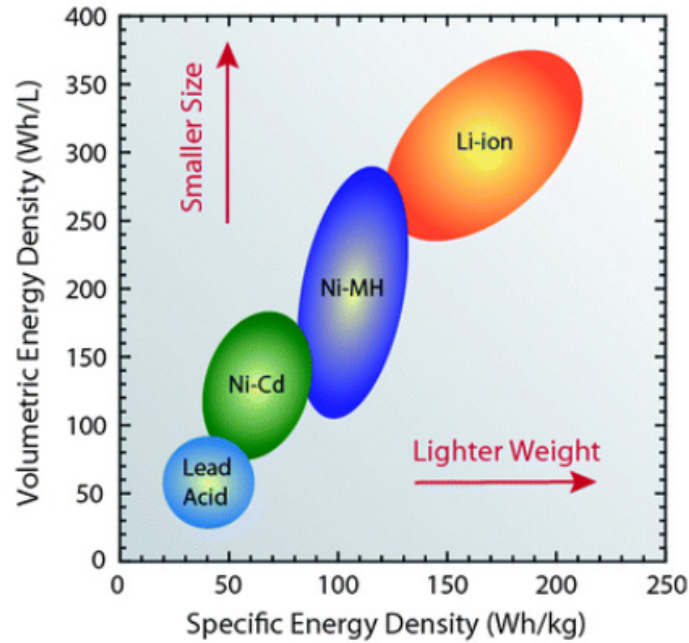


Figur 4.2. Eksempler på hvordan forskjellige batterikjemier kan påvirke batteriets egenskaper Kilde: Battery university [41]

Litium-kobolt oksyd (LCO) batterier benyttes ofte i bærbare applikasjoner, men har relativt kort livstid og er kostbare som følge av høy pris på kobolt. Litium-mangan oksyd (LMO) batterier blandet med Litium-nikkel mangan kobolt oksyd (NMC) er den batteritypen som er vanligst å benytte i elektriske biler (for eksempel Nissan Leaf og BMWi3), da denne blandingen øker batteriets energikapasitet og levetid sammenliknet med rene LMO batterier. Litium-nikkel kobolt aluminium oksyd (NCA) batterier benyttes i Tesla, mens Litium-titanat (LTO) batterier benyttes blant annet i Mitsubishi i-MiEV og i Honda Fit EV. Mens NCA batterier har typisk høyest lagringskapasitet, kommer LMO og LFP batterier bedre ut med tanke på effekt og termisk stabilitet. LTO batterier har høyest livstid og best ytelse i ved lave temperaturer, men har samtidig noe lavere kapasitet.

4.1.2 Vekt og volum

Bruk av ulike batterikjemier vil kunne resultere i ulik vekt og volum på batteripakken. En oversikt over volumetrisk og spesifikk energitetthet er vist i figur 4.3.



Figur 4.3. Volumetrisk og spesifikk energitetthet hos forskjellige batterityper. Kilde: IRENA [37]

Vekt og volum på batteripakken bestemmes av ønsket batterikapasitet. Batterikapasiteten reduseres etter et visst antall ladesyklus, mens antallet ladesyklus bestemmes av til hvilken grad batteriet dybde(ut)lades. Levetiden er dermed en funksjon av prosent dybde(ut)ladning, noe som betyr at det vil være viktig ikke å benytte gravemaskinen slik at batteriet lader helt ut. Ved anvendelse som krever hurtig opp-/utladning (høy C-rate), vil det være viktig å dimensjonere større batterikapasitet fordi det vil forlenge levetiden og dermed bedre økonomien.

Batteripakken til en Tesla Model S75 (75 kWh) veier ca. 530 kg (141 Wh/kg), noe som tilsvarer ~4–8 tonn dersom man antar et energibehov for en gravemaskin på 600–1 200 kWh. Volummessig ligger en Tesla batteripakke på 0,4 m³, noe som gir omtrent 3–6 m³ for en gravemaskin med et antatt energibehov på 600–1200 kWh [42, 43].

For marin bruk, oppgir battericelleprodusenten Kokam [44] omtrent tilsvarende vekt og volum for deres 11,4 kWh NMC batterimodul som veier 75 kg (152 Wh/kg). PBES oppgir at et 100 kWh NMC batteripakkesystem (1 000 V) medregnet batterimodul, batteristyringsenhet og løfteenhet for marin bruk (XALT Energy battericeller) veier 950 kg. Dimensjonene på systemet tilsvarer et volum på 1,4 m³, noe som betyr i overkant av 8–16 m³ justert for 600–1200 kWh på en gravemaskin [45]. Til sammenlikning er en PBES 1,4 MWh stasjonær CanPower basert på en 20-fot konteiner, som vist i figur 4.4. Høyeffektsbatterier vil gi en plassbesparelse sammenliknet med tradisjonelle batterier.

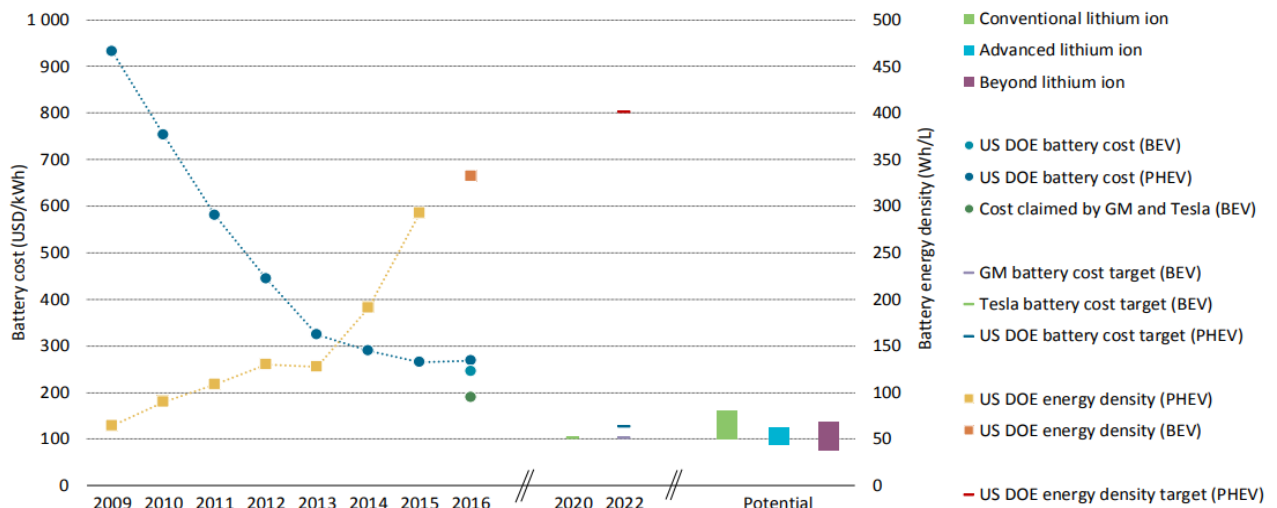


20ft. Container - 1.4MWh

Figur 4.4. 1,4 MWh stasjonær CanPower konteinerløsning fra PBES. Kilde: PBES [46]

4.1.3 Pris og teknologitviking

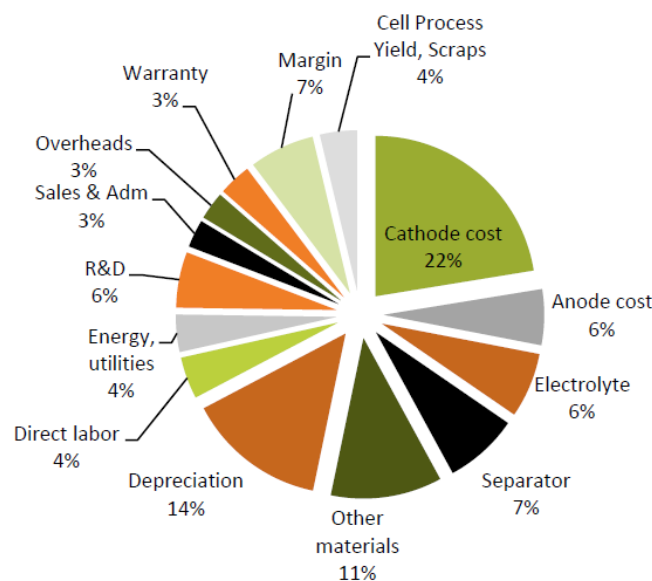
Gjennomsnittspris for elektrisk batteri (\$/kWh) har sunket med 73 % siden 2010 [47], og det spekuleres i om prisnedgangen vil vedvare. Selve Arctic, som blant annet har bygd fiskebåten Karoline, oppgir \$ 500–700/kWh batterimodul med NMC batterier, mens McKinsey har antatt prisene for Li-ion batterier til \$ 200/kWh i 2020 og \$ 160/kWh i 2025. US DOE estimerer på sin side at produksjonskostnaden for (høy-volum) litium-ion batteripakker som benyttes i elbiler, er høyere enn hva som opplyses av den amerikanske bilbransjen (GM og Tesla), men samtidig fallende til under \$ 300/kWh i løpet av de senere årene. Dette er vist i Figur 4.5.



Figur 4.5. Senere års utvikling i batterikostnader og energitetthet. Kilde: IEA EV Outlook 2017 [30]

Det er imidlertid viktig å bemerke at størsteparten av kostnadene for innkjøp av Li-ion batterier er knyttet til råvarekostnader (omtrent 60 %), hovedsakelig nikkell og kobolt, noe som betyr at det ikke kan forventes en revolusjonerende reduksjon i batteriprisene i nærmeste framtid. Også når det gjelder energitetthet er det utfordrende å framstille nye materialer med samme pris. En oversikt over gjennomsnittlig kostnadsstruktur for en Litium-ion celle- og kobolt-priser (kUSD/tonn) er vist i henholdsvis Figur 4.6 og 4.7.

Average cost structure of Li-ion cell in 2016



Figur 4.6. Gjennomsnittlig kostnadsstruktur for en Litium-ion celle. Kilde: Avicenne, 2017 [48]



Figur 4.7. Historiske koboltpriser. Kilde: London Metal Exchange, 2018 [49]

Innen nye materialer er trenden nå "høyspennings-katoder" som gir høyere energi hvis kapasiteten til å lagre samme mengde Li-ioner er til stede. Høyere Ni eller Li innhold i katodene er forventet å gi høyere spenning i batteriet, men det krever også at andre komponenter som bindemiddel og (spesielt) elektrolytter blir videreutviklet.

Når batterikostnader diskuteres, er det er imidlertid viktig å merke seg at det i offentlig tilgjengelig kildemateriale vanligvis ikke spesifiseres hva som inngår i kostnaden, det vil si om det er snakk om et ferdig system eller om det kun er battericellekostnaden som oppgis. Battericellekostnaden utgjør kun omtrent 20 % av all relevant kostnad forbundet med batterisystemer. Resterende kostnader består av omformersystemer, ulike materialer i batterimodulen, batteristyringssystem og andre komponenter, i tillegg til vedlikehold og andre variable kostnader [37]. Kostnaden oppgis dessuten ofte i forskjellig enhet, og det er vanlig å oppgi både kostnad fordelt på effekt (kW), kostnad fordelt på energi (kWh) eller kostnad fordelt på energi per ladesyklus. I tillegg oppgis kostnaden i noen tilfeller som livstidskostnad (LCOE) der alle relevante faste og variable kostnader, samt avhendingskostnader og diskontering er medtatt. Denne kostnaden fordeles gjerne over det totale energiuttaket over hele livstiden, noe som gjør at kostnaden vil være svært avhengig av hvor mye batteriet benyttes. På generelt grunnlag, kan man da si at det er viktig å ikke fokusere kun på pris per mengde energi når man skal velge batterier, men også ta hensyn til hvor mye av energien som er tilgjengelig og kan tas ut av batteriet, samt hvor mange sykler et batteri kan tåle. Årsaken er at forskjellig bruk gir forskjellig kostnad. Videre er det et poeng at priser på batteriene kan være satt strategisk i oppstarten fordi man ønsker å tilegne seg et relativt nytt og attraktivt marked.

Ved bruk av batterier i en gravemaskin kan man tenke seg at den variable energikostnaden vil ligge på byggestrømkostnad. Dersom man antar at en byggestrømpris (inkludert nettleie) på 1 NOK/kWh, vil energikostnaden være 1 600 NOK/dag for en 1 600 kWh gravemaskinløsning, noe som vil gi et langt lavere kostnadsnivå enn ved bruk av for eksempel avgiftsfri diesel.¹

Med tanke på teknologiutviklingen er det flere typer batterier som er under utvikling, men det er usikkert når disse teknologiene blir kommersielt tilgjengelig. Per dags dato og i de nærmeste årene vil fokuset være på katodematerialer. Deretter er det forventet at fokuset vil omfatte inkludering av silisium (Si) i anoden etterfulgt av litium-luft, litium-svovel og fast stoff batterier. Det er forespeilet at fast stoff batterier for anvendelse i transportsektoren vil gi sikrere batterier, da det ikke brukes en brennbar elektrolytt. Selv om det er interesse rundt fast stoff batterier, er teknologien fremdeles ikke på plass, og det kan konkluderes med at denne typen batteri ikke vil komme på markedet innen de neste fem årene.

Sammenliknet med tradisjonelle blybatterier er det forventet at avanserte blybatterier kan ha en forbedret levetid og ytelse. Ved bruk av aktivt karbon i én eller begge elektrodene tillater batteriet å operere lengre og mer effektivt i delvis oppladet tilstand. Denne teknologitypen, blant annet bestående av en standard

¹ Antatt 10 NOK/liter for avgiftsfri diesel og 45 % energieffektivitet for dieselmotor. 1 liter diesel tilsvarer 10 056 kWh. Det gir en kostnad på omtrent 2 400 NOK/dag.

positiv bly-elektrode sammen med en superkondensator negativ karbon-elektrode, er testet i hybrid-kjøretøyer [39].

Det er likevel lite sannsynlig at det kommer nye batteriteknologier på markedet innen få år, men det vil trolig komme noen modifikasjoner av batterikjemier, spesielt innen litium-ion batterier. Det er heller ikke forventet at energitettheten vil øke betraktelig, men innfasing av silisium i anoden forventes å gi noe høyere energitetthet i litium-ion batterier. På grunn av kostnadsreduksjoner som følge av økt etterspørsel og tilbud i transportsektoren ser man for seg at kostnaden per energi reduseres. Sikkerhet vil være en viktig parameter som delvis kan være til hinder for utviklingen.

4.1.4 Oppsummering – batterier

Det er stor variasjon i litteraturen når det kommer til spesifikasjonene for de ulike batteriteknologiene og deres kjemier. En sammenstilling av ulike spesifikasjoner for blybatterier, NiCd batterier, NiMH batterier og litium-ion batterier er presentert i Tabell 4.2.

Tabell 4.2. Ulike spesifikasjoner for batterityper og kjemier

Spesifikasjoner	Litium-ion								
	Bly	Nikkel kadmium (Ni-Cd)	Nikkel metall hydrid (NiMH)	Kobolt (LCO)	Mangan (LMO)	Nikkel mangan (NMC)	Jern fosfat (LFP)	Nikkel kobolt (NCA)	Titanat (LTO)
Energitetthet (Wh/kg)	25–50 [50]	45–80	60–120	140–200 [39]	100–150	120–140 [39]	90–120	120–160 [39]	80–95 [39]
Ladesyklus (80 % utlading)	200–300	1 000	300–500	500–1 000	500–1 000	1 000–2 000	1 000–2 000	300–800 [39]	3 000–7 000
Varmetap				150 grader C	250 grader C	210 grader C	270 grader C	150 grader C	
Nominell spenning	2 V	1,2 V	1,2 V	3,6V	3,7 V	3,6 V	3,3 V	3,6 V	2,4 V
Spenning, fulladet	2,4 V			4,2V	4,2 V	4,2 V	3,6 V	4,2 V	2,8 V
Ladetemperatur	-20 til 50 grader C	0 til 45 grader C							
Utladingsstemperatur	-20 til 50 grader C	-20 til 65 grader C		-20 til 60 grader C					
Kostnad	Lav	Moderat		Høy					
Typisk bruksområde	Biler (startbatteri), energilagring av solcellestøm	Faset ut fra markedet	Hybridbiler, elektronisk utstyr	Mobiltelefoner, nettbrett, bærbar PC, kameraer	Batteridrevne verktøy	Elsykler, elbiler, medisinsk utstyr, industri	Stasjonær med høy strøm og motstand	Elbiler (Tesla), medisinsk utstyr	Elbiler, buffer for strømforsyning
Kommentar	Høy vekt, lang ladetid	Uaktuell av miljøhensyn	Begrenset levetid	Høy effekt, begrenset kapasitet, stabil markedsandel	Høy effekt, mindre kapasitet, sikrere enn Li-kobolt	Høy effekt og stor kapasitet, markedsandel øker	Høy effekt, lav kapasitet, trygg	Høyest effekt med moderat kapasitet Prisgunstig	Lang levetid, hurtig lading, sikker, lav kapasitet, kostbar

4.2 Hydrogen

4.2.1 Bruk av hydrogen i dag

Bruken av hydrogen er i dag først og fremst knyttet til industrielle prosesser som oljeraffinering og kunstgjødselproduksjon. På verdensbasis produseres det omtrent 50 millioner tonn hydrogen årlig. Av dette benyttes mer enn 90 % i kjemisk storindustri, mens kun 10 % fordeler seg i segmenter innen matvarer og medisiner, elektronikk og metallurgisk industri, samt transport og energilagring [51, 52].

Bruk av hydrogen som drivstoff gjør overgangen til utslippsfri transport mulig i flere segmenter enn det rene batteri-elektriske kjøretøyer kan bidra til. Transport over lengre avstander, også med større kjøretøyer, kan gjøres utslippsfritt når hydrogen benyttes som drivstoff. På verdensbasis ser man nå en økning i bruken av hydrogenteknologi som nullutslippsdrivstoff, og markeder for hydrogenteknologi etableres i en rekke land, med land som USA (California), Tyskland og Japan i spissen. Norge har etter hvert inntatt en pionerrolle når det kommer til å implementere hydrogenteknologi i forskjellige transportsegmenter – fra testing av hydrogenbiler til anskaffelse av tyngre kjøretøyer og, i løpet av kort tid, fullskala hydrogenbåter.

I det norske personbilmarkedet er det i dag Hyundai og Toyota som tilbyr kommersielle hydrogenbiler. Det er imidlertid forventet at flere bilfabrikanter vil tilby nye modeller om få år. Dagens kommersielt tilgjengelige personbiler er vist i Figur 4.8, sammen med to prototyper av renovasjonsbil og truck.



Hyundai NEXO [53]

- Rekkevidde: ~800 km
- Tilgjengelig i Norge fra høsten 2018



Toyota Mirai [54]

- Rekkevidde: 550 km (NEDC),
- I salg i Norge siden 2016



Kalmar truck [55]



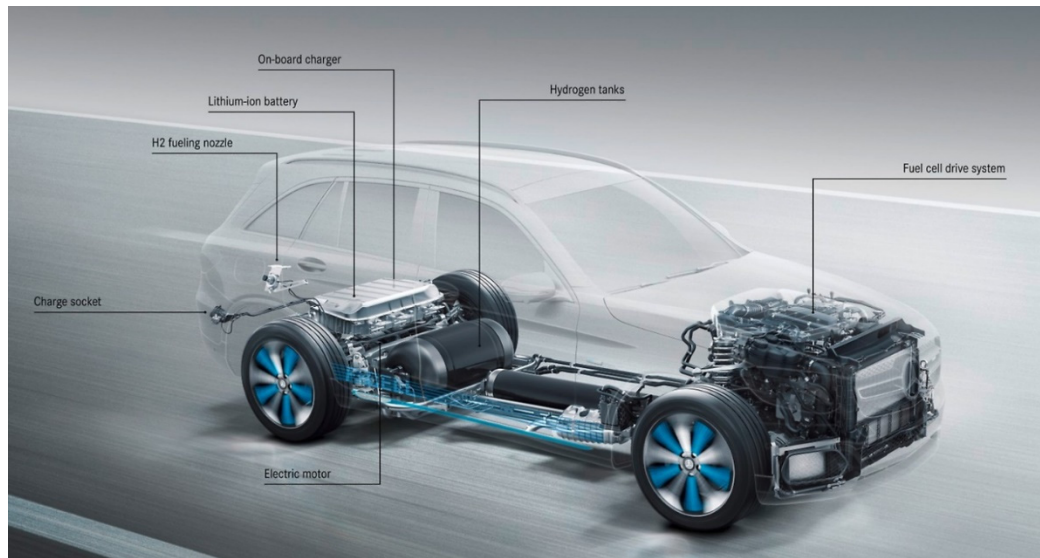
E-trucks renovasjonsbil

Figur 4.8. To kommersielt tilgjengelige hydrogenpersonbiler i Norge og to prototyper for hydrogenkjøretøyer

4.2.2 Brenselcelleteknologi, lagring og egenskaper

Mens energilageret (kWh) og "omformerer" (kW) representerer én enhet i batterier, er hydrogensystemer derimot mer lik konvensjonelle energisystemer ved at energilagringen skjer i hydrogentank(er), mens brenselcellen ("fuel cell drive system") fungerer som omformer. De forskjellige komponentene er illustrert i Figur 4.9. Nesten alle brenselcellesystemer inkluderer et batteri. Batteriet er

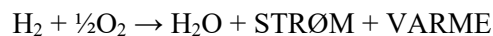
mye mindre enn i et rent batterielektrisk kjøretøy, men bidrar til at den hybride konfigurasjonen vil kunne utnytte regenerativ bremseenergi og samtidig oppnå bedre dynamiske egenskaper, noe som øker levetiden og reduserer total kostnadene for energisystemet.



Figur 4.9. Daimler GLC som viser komponentene i en hydrogenbil. Kilde: Daimler [56]

Brenselcelleteknologi

I brenselceller blir kjemisk energi omformet til elektrisk strøm og varme ved tilført hydrogen og oksygen (fra luften), noe som resulterer i vann som eneste utslipp:



Strømmen som genereres, kan benyttes til å drive en elektrisk motor, tilsvarende et batteri-elektrisk kjøretøy. Varmen kan utnyttes for eksempel til oppvarming av kupéen på vinterstid.

Når det kommer til ulike tilgjengelige brenselcelleteknologier, klassifiseres disse typisk etter driftstemperatur, elektrolytt og ladningsbærende ion. Disse kan oppsummeres som følgende:

- Polymer-elektrolytt-membran (eng. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) brenselceller
- Fosforsyre (eng. Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) brenselceller
- Alkaliske (eng. Alkaline Fuel Cell, AFC) brenselceller
- Fastoksid (eng. Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) brenselceller
- Smeltekarbonat (eng. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) brenselceller

De tre førstnevnte teknologiene er i kategorien lavtemperatur-brenselceller (opp til $\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$), mens de to siste er høytemperaturbrenselceller ($500\text{--}1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$). Sistnevnte brukes mest i store, stasjonære systemer, mens det av lavtemperatur-brenselcellene er PEM-teknologien som er mest utbredt innen transportsektoren. PEM-teknologien er derfor nå mest tilgjengelig på det kommersielle markedet. Den videre beskrivelsen av teknologien fokuserer derfor på PEM-brenselceller, som anses som mest aktuell for bruk i anleggsmaskiner.

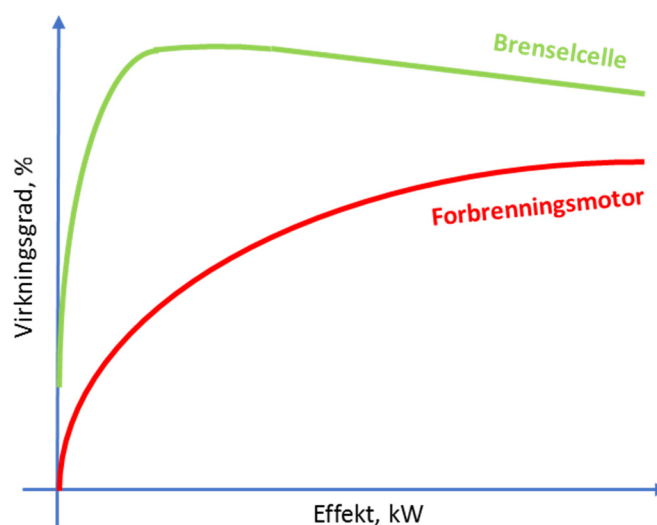
De kanadiske selskapene Ballard og Hydrogenics er i dag de to ledende leverandørene av PEM brenselcellesystemer. Deres systemer har vært på markedet i lang tid og de kan vise til stabil ytelse og pålitelighet. For eksempel har et av Ballards systemer per i dag over 28 000 driftstimer i en hydrogenbuss i London. I tillegg til disse to selskapene, er flere andre i gang med utvikling og demonstrasjon av komponenter og komplette brenselcellesystemer. PowerCell Sweden, Proton Motor, Nedstack, ElringKlinger og SymbioFC er bare noen eksempler. De har levert (prototyp)systemer til forskjellige demonstrasjonsprosjekter, men ingen har like lang driftserfaring å vise til som Ballard og Hydrogenics. Eksempler på brenselcellesystemer fra Ballard og Hydrogenics er vist i Figur 4.10.



Figur 4.10. Brenselcellesystem fra Ballard [57] (venstre) og Hydrogenics [58] (høyre)

Brenselcellesystemene til Ballard og Hydrogenics er modulbaserte og kan fås i forskjellige størrelser. De mest vanlige produktene og effektene spenner fra 60 til 100 kW, men de fleste kombinasjoner er tilgjengelige.

For å kunne sammenlikne egnetheten til de forskjellige drivstoffene ved forskjellige applikasjoner og driftsmønstre er både energitetthet og virkningsgrad i de forskjellige systemene viktige. Brenselceller har en høy virkningsgrad sammenliknet med forbrenningsmotorer, noe som er spesielt utpreget ved lav belastning, hvor for eksempel bensin- og dieselmotor har veldig dårlig virkningsgrad. Konseptuelt er dette vist i Figur 4.11.



Figur 4.11. Virkningsgrader for brenselceller og forbrenningsmotorer

Kommersielle brenselcellesystemer har en systemvirkningsgrad på omtrent 50–60 %. Mesteparten av energitapet gir varme som enten utnyttes en annen plass i applikasjonen, eller som må kjøles. En liten del av den tilgjengelige energien brukes til å drifte nødvendige systemkomponenter som pumper, vifte og vannstyringsenhet.

Lagring

Hydrogen kan lagres i form av komprimert gass, som nedkjølt flytende væske eller i metallhydrider. Andre løsninger er kjemisk bundet hydrogen i metanol eller andre organiske væsker, men disse anses ikke som alternativer ved bruk i utslippsfrie gravemaskiner. Komprimert gass er mest utbredt i transportapplikasjoner og det er også her utvalget av lagringstanker er størst. 350 og 700 bar er mest vanlig. 700 bar benyttes mest i personbiler, mens 350 bar benyttes i busser og lastebiler. Flytende hydrogen er først aktuelt ved bruk av store mengder, det vil si gjerne opp mot flere tonn per dag, eller ved transport av hydrogen over store avstander. Metallhydrider er i bruk i blant annet ubåter, men har ellers liten utbredelse.

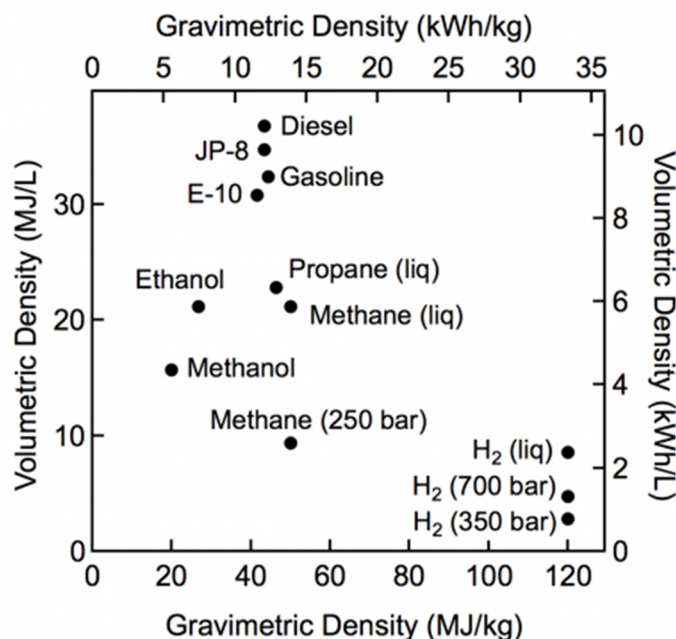
Når det gjelder hydrogentanker for komprimert gass, er det flere kommersielle leverandører. Den mest aktuelle typen for mobile applikasjoner er komposittbasert, og mange av disse produktene er opprinnelig utviklet for lagring av naturgass. Norske Hexagon Composites, som blant annet leverer tanker til Daimlers hydrogenbiler, er av de ledende produsentene i verden. Umoe Advanced Composites er en annen norsk aktør, og Luxfer er en internasjonal konkurrent til disse. Slike tanker består av en innvendig liner som former strukturen på tanken. Utenpå vikles glassfibertråder for å oppnå styrken som trengs ved 700 bar gasstrykk, før denne armeres av et resin som herdes i ovn. Se Figur 4.12 for hvordan glassfiberarmeringen for en tank ser ut.



Figur 4.12. Synlige glassfibertråder i yterste del av komposittanker. Kilde: Hexagon [59]

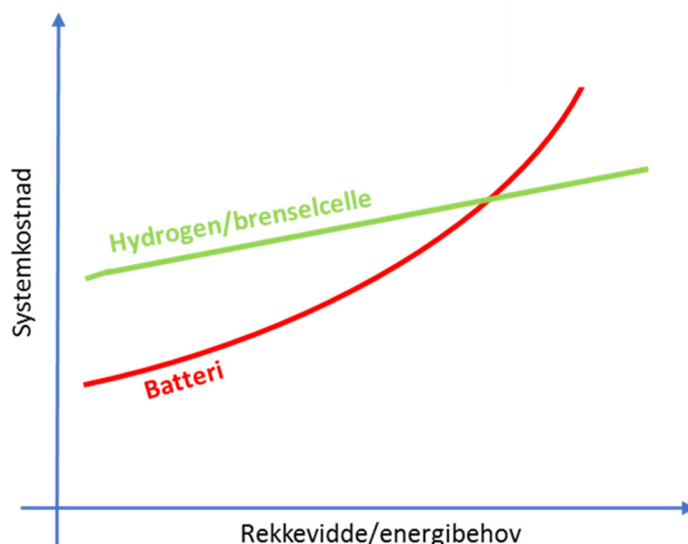
4.2.3 Vekt og volum

Energitettheten til hydrogen på volumbasis er veldig avhengig av hvilken tilstand den er i. På vektbasis er den 33 kWh/kg. Som vist i figur 4.13 er dette veldig høyt sammenliknet med konvensjonelle fossile drivstoffer som bensin og diesel. På volumbasis derimot, er de fossile kildene overlegne. På systemnivå er disse sammenlikningene avhengige av hvor stor mengde energi som lagres. En liten hydrogentank har mindre hydrogen per vekt og volum enn en stor tank.



Figur 4.13. Energitettheter for forskjellige drivstoffer. Kilde: USDOE [60]

Figur 4.14 viser den konseptuelle forskjellen på batteri- og hydrogenteknologi når det gjelder lagring av energi. For å doble rekkevidden med batteriteknologi må man ha dobbelt så mange batterier, i praksis enda flere fordi energibehovet øker når systemvekten øker. Med et hydrogensystem er det kun tanken som må dobles, mens brenselcellen og resten av systemet forblir som før. Det resulterer i at vekt, volum og kostnad øker i mindre grad med økt energibehov, sammenliknet med batterier. Skissen under (Figur 4.14) viser systemkostnad skjematisk som funksjon av rekkevidde (energi-behov) for batteri- og hydrogensystemer. Her ser man at hydrogenteknologi er bedre egnet (gir lavere kostnad) ved behov for lengre rekkevidder og/eller større energibehov. Hvor skjæringspunktet kommer, er avhengig av type applikasjon (bil, båt, buss osv.), lokale forhold og ikke minst markeds- og teknologiutvikling.



Figur 4.14. Systemkostnad som funksjon av rekkevidde/energi-behov for batteri- og hydrogenteknologi

Vekt og volum knyttet til lagring av komprimert hydrogen vil avhenge av materialvalg samt lagrings-trykk. Som nevnt vil tanker/sylindere lagd av komposittmateriale kunne motstå et høyere lagrings-

trykk og vil gi en lavere vekt enn hva ståltanker/stålsylindre vil gi. For å kunne transporteres effektivt kan sylindrene stables i en transportmodul/konteinerchassis. For eksempel består transportmodulen til Hexagon Composites (Mobile pipeline, X-STORE) av kompositt-tanker/-sylinder montert i et vanlig ISO-standard chassis. Spesifikasjoner for Hexagon Composites' kompositt-tanker/-sylinder og UMOEs mobile konteinerbaserte hydrogentanksystem er vist i Tabell 4.3.

Tabell 4.3. Spesifikasjoner for Hexagon Composites' og UMOEs hydrogentanker. Kilde: Hexagon [59] og Umoe

Produsent	Transport/konteiner-løsning	Vekt, konteiner chassis	Vekt, sylinder	Antall, sylinder	Volum, lagring	Kapazität, lagring			
						200 bar	250 bar	300 bar	350 bar
Enhet		Kg	Kg	#	L	Kg	Kg	Kg	Kg
Hexagon Composites	A		16	1	46	0,7			
	B		164	1	450		8,0		
	C		94	1	350		6,0		
	D		112	1	350			7,2	
	E		101	1	312				7,5
	F		112	1	350				8,4
UMOE	20' MEGC m/krok	1 940		9	14 850	218	275	319	353
	20' ISO standard	2 000		9	14 850	218	275	319	353
	20' ISO high cube	2 340		11	18 150	267	336	390	432
	40' ISO standard	3 600		18	30 600	450	566	658	728
	40' ISO high cube	4 230		22	37 400	550	692	804	890
	45' ISO standard	4 200		18	34 650	509	641	745	825
	45' ISO high cube	4 770		22	42 350	623	783	911	1 008

Som det kommer fram i tabellen, eksisterer det flere tilgjengelige kompositt-tanker/-sylinder med ulik lagringskapasitet under gitt trykk. Sylindrene fra Hexagon er eksempler på tanker som kan monteres på gravemaskinen, mens konteinerløsninger, slik som disse fra UMOE, kan benyttes for transport til/fra byggeplassen og for lagring av hydrogen på selve byggeplassen.

Volum og vekt for noen relevante brenselcellesystemer er oppgitt i Tabell 4.4. Tabellen viser at slike systemer typisk veier opp mot 350–400 kg dersom man medregner kjøle- og luftsystem. Design- og volummessig er det noe variasjon mellom ulike leverandører, men forskjellen er ikke nevneverdig stor. Selve brenselcellene varierer i vekt og (noe) volum etter effektbehov, mens vekt og volum av kjøle- og luftsystemet er mindre avhengig av effektbehovet.

For å kunne dekke det gjennomsnittlige effektbehovet på 140 kW (estimert 70 % av makseffekt) som framgår av lastprofilen i avsnitt 2.4 vil man ved å skalere opp Ballards HD100 brenselcellesystem havne på i overkant av 500 kg i vekt. I tillegg vil man ha behov for en batteripakke på omtrent 30 kWh, som kan ta den resterende topplasten på 60 kW, det vil si til sammen en makseffekt på ca. 200 kW. Vekten på dette batteriet vil, dersom man tar utgangspunkt i et Tesla-batteri, trolig veie omtrent 140 kg.

Tabell 4.4. Produktspesifikasjoner for relevante brenselcellesystemer fra Hydrogenics [61] og Ballard [62]

Leverandør og produkt	Effekt (kW)	Maksimal virkningsgrad (%LHV)	Dimensjoner, volum (l x b x h, mm)	Vekt (kg)
Hydrogenics, Celerity	60	53	800 x 375 x 980	275
			0,3 m³	
Hydrogenics, HD90	99	55	1582 x 1085 x 346	360
			0,6 m³	
Ballard, HD60 Kjølesystem Luftsystem	60	-	1130 x 869 x 506 + 737 x 529 x 379 + 676 x 418 x 352	244 +44 +61
SUM HD60 system			0,50 + 0,15 + 0,1 = 0,85 m³	346
Ballard, HD100 Kjølesystem Luftsystem	100	-	1200 x 869 x 506 + 737 x 529 x 379 + 676 x 418 x 352	285 +44 +61
SUM HD100 system			0,53 + 0,15 + 0,1 = 0,88 m³	390

Dersom man tar utgangspunkt i et elektrisk energibehov på 600–1 200 kWh, som tilsvarer et hydrogenbehov på 40–80 kg og Hexagons sylindertank F, blir totalvekten av lagringstankene ca. 0,5 til 1 tonn. Med brenselcellesystemet og batterier estimeres totalvekt og volum til ca. 1–1,5 tonn og et volum på ca. 4–6 m³.

4.2.4 Pris og teknologiutvikling

Selv om brenselcelleteknologien i dag blir sett på som en moden og anvendt teknologi, befinner vi oss fortsatt i en tidlig fase av kommersialisering, noe som gjør at kostnadene fremdeles er høye relativt til alternative teknologier. Derfor kan det argumenteres for at det er fullt mulig å oppnå kostnadsreduksjoner og dermed mer kostnadseffektive brenselcellesystemer samtidig med at produksjonsvolum forventes å øke.

I bygg- og anleggsmaskiner er det mest relevant å bruke brenselcellesystemer designet for busser. Kostnaden for et slikt system ligger i dag på \$ 1 700–3 700/kW [63]. Ved et litt større salgsvolum er det mulig å komme under \$ 1 000/kW allerede i dag.

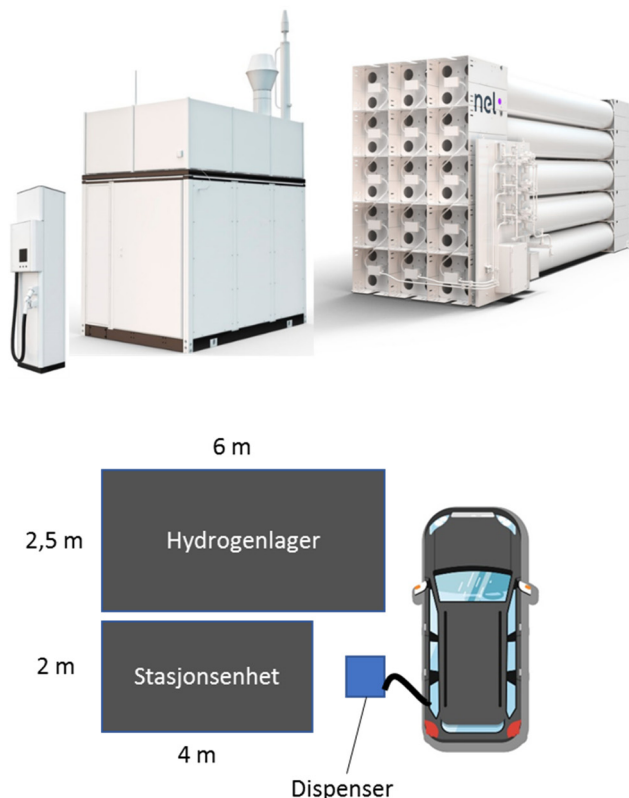
EU har satt seg kostnads mål for bruk av hydrogenteknologi i transport, der blant annet kostnaden for brenselcellesystemer er forventet å reduseres fra over € 150 per kW i 2017 til € 75 per kW i 2023, under forutsetning av henholdsvis 20 000 og 100 000 produserte enheter per år [64]. For 10 000 systemer er kostnaden forventet å ligge på € 500 per kW. Samtidig har Amerikanske DOE (noe mer optimistisk) prosjektert en kostnad på \$ 53 per kW gitt 500 000 PEM brenselcellesystemer (80 kW_e) i 2015, mens kostnads målet er satt til \$ 40 i 2020 og til syvende og sist \$ 30 per kW [65]. Dagens lave produksjonsvolum gjør at de reelle kostnadene nå er mye høyere enn dette. For lagringssystemer er EUs kostnads mål € 500 per kg i 2023 (< € 500 for hydrogenbiler), mot rundt dagens € 1 000.

På komponentnivå fokuseres det på å oppnå kostnadsreduksjoner på komponentene membran, elektroder og bipolare plater, blant gjennom redusert bruk av kostbare materialer. Platinium til elektrodene bidrar typisk til 10–15 % av stack-kostnaden, noe som gjenspeiles i de totale produksjonskostnadene. Andre kostnadsreduserende tiltak er typisk knyttet til celledesign og prosessvalg [66].

4.2.5 Produksjon og forsyning av hydrogen

Hydrogen produseres stort sett enten fra naturgass ved reformering eller fra elektrisitet og vann ved elektrolyse. For at en hydrogendrevet applikasjon skal kunne betegnes som utslippsfri, må hydrogenet enten framstilles elektrolytisk ved hjelp av fornybar kraft og vannelektrolyse, eller man må fange og lagre CO₂-en etter reformeringsprosessen (Carbon Capture and Storage, CCS). Reformering med CCS vil i praksis bare foregå på store, sentraliserte anlegg, mens man kan se for seg mindre elektrolyseanlegg desentralisert på bygge-/anleggsplasser. Det alternativet som imidlertid trolig vil være mest egnet på byggeplasser, er å få hydrogenet tilkjørt fra sentrale produksjonslokasjoner. Enn så lenge fins det ingen løsning for å fylle hydrogen direkte fra en hydrogen-"tankbil", det vil si rett

fra trykktankene på en lastebil. Derfor er det nødvendig med et mellomlager og en dispenser/stasjonsenhet på bygge/anleggsplassen. Se figur 4.15 for hvilke komponenter som behøves.



Figur 4.15. Eksempel på nødvendige komponenter i et anlegg for å kunne fylle hydrogen. Kilde: NEL Hydrogen [67]

Når det kommer til elektrolyseenheter, eksisterer det i dag flere leverandører, for eksempel den norske leverandøren NEL Hydrogen (inkl Proton Onsite). Andre kjente internasjonale leverandører er Hydrogenics (Canada og Belgia), Siemens (Tyskland), ITM Power (Storbritannia), Areva H2Gen (Frankrike) og Giner (USA). Alkalisk elektrolyse (AEL) og PEM-elektrolyse (Proton Exchange Membrane) utgjør de to typene kommersielt tilgjengelige elektrolyse-tennologiene, hvor alkalisk elektrolyse er den mest modne teknologien. PEM-elektrolyse er ennå ikke like utbredt kommersielt, men vil trolig i økende grad ta markedsandeler, da denne typen har vært gjennom en høy teknologisk utvikling de seneste årene.

Hydrogenkostnaden ved vannelektrolyse knyttes i hovedsak til investeringskostnadene og energikostnader (strøm og nettagifter). I tillegg tilfaller noen andre operasjonelle kostnader for drift og vedlikehold. Størrelsesforholdet mellom kapitalkostnader og operasjonelle kostnader avhenger i stor grad av utnyttelsesgraden til elektrolysesystemet. Her vil det være forskjell på om elektrolyseanlegget benyttes i industriell sammenheng med høy konstant hydrogenetterspørsel (høy utnyttelsesgrad), eller om anlegget driftes etter variabel hydrogenetterspørsel (lav utnyttelsesgrad). Ved høy utnyttelsesgrad vil hydrogenkostnaden domineres av variable kostnader, det vil si energikostnaden, mens ved lav utnyttelsesgrad vil kostnaden domineres av kapitalkostnadene. Ved storskalaproduksjon (flere tonn per dag) av hydrogen er det realistisk å kunne oppnå en hydrogenkostnad på 20–40 NOK per kg H₂ [51]. I mindre skala og lavere utnyttelsesgrad kan kostnaden fort ende opp på over 100 kr/kg [68].

Da det sannsynligvis vil være uforholdsmessig kostbart (og/eller upraktisk) å produsere hydrogen for én gravemaskin (opptil 100 kg/dag) på byggeplasser, vil man velge å få det tilkjørt. Transport i både nedkjølt i flytende form (minus 253 grader) og komprimert i høytrykkstanker (opp til 700 bar) er

mulig, se figur 4.16. Flytende hydrogen er kun fornuftig der det er behov for store mengder hydrogen (flere tonn per dag), og i praksis er det kun komprimert hydrogen på lastebil/i containere som er mulig i den nærmeste framtid. Transportkostnadene er veldig avhengige av mengde, frekvens og distanse, og de kan i noen tilfeller være høyere enn for selve hydrogenet.



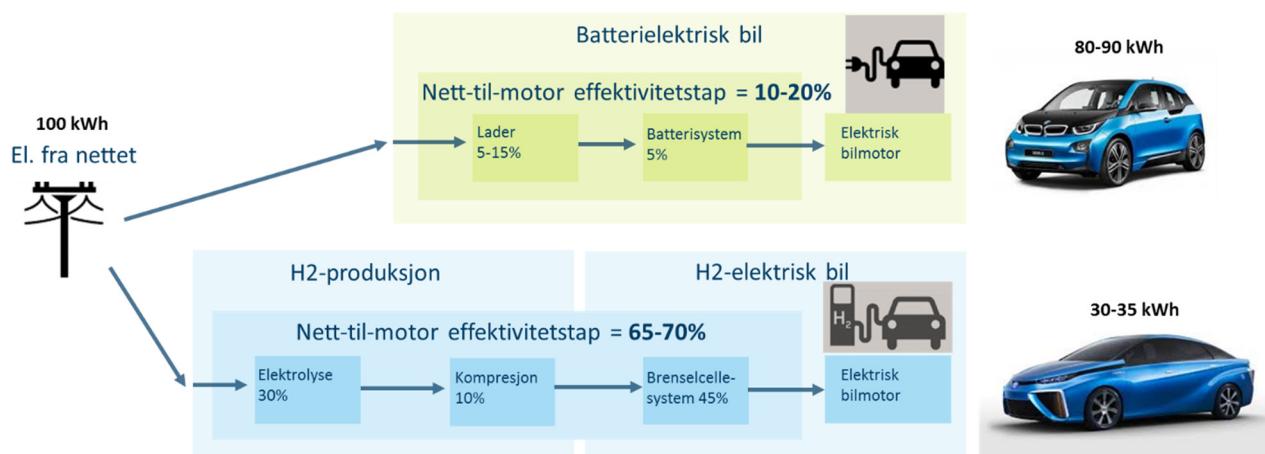
Figur 4.16. Transport av hydrogen. Til venstre, UMOE [69]: i komprimert form med trykk tanker i en container. Til høyre: flytende hydrogen på tankbil, PraxAir [70]

4.3 Forenklet sammenlikning mellom batterier og hydrogen

Bruken av batterier i transportsektoren har økt kraftig de siste årene, noe som har medført store kostnadsreduksjoner, blant annet på grunn av storskalafordele ved masseproduksjon. Hydrogenteknologi har også fått en økende interesse, spesielt i tyngre kjøretøyer og maritim sektor, men produksjonsvolumet og kostnadsreduksjonen har ennå ikke hatt den samme utviklingen som batterier. Det er dog ikke urimelig å forvente at en liknende kostnadskurve vil ses for hydrogenteknologi også, nå som denne tas i bruk i større grad. Spesielt kan dette forventes med tanke på at Kina øker sitt engasjement innen hydrogen.

En sammenlikning av de viktigste egenskapene til batterier og hydrogenteknologi kan i korte trekk oppsummeres slik:

- Bruk av batterier gir en bedre virkningsgrad, opptil tre ganger bedre enn ved bruk av hydrogenteknologi, hvis man ser på strømforbruket fra nettet/kilden, se figur 4.17. Hydrogenteknologi vil dermed er best bedre egnet ved behov for lengre rekkevidde (sammenhengende driftstid) og for tyngre kjøretøyer, det vil si større energiforbruk.



Figur 4.17. Effektivitetstap i verdikjeden til batteri- og hydrogenelektriske personbiler. Kilde: SINTEF

- Fylle hastigheten for hydrogen er mye raskere enn lade hastigheten for batterier. Det tar 3–5 minutter å fylle ca. fem kilo hydrogen, som tilsvarer omtrent 80 kWh elektrisk energi til motoren. Med en 100 kW hurtiglader tar det ca. 10 ganger så lang tid å "fylle" tilsvarende mengde energi på batteriet. Busser fyller typisk 30–40 kg hydrogen på 10 minutter, noe som tilsvarer en lade kapasitet på ca. 3 MW ved batterielektrisk drift. Dette er i samme størrelsesorden som effektbehovet for kaianlegg til batterielektriske ferger. Der er det i flere tilfeller valgt en løsning med batteripakker på land, både for å kompensere for manglende effekt-kapasitet i nettet og for å redusere effekt-tariffen.
- Uten å ta hensyn til kostnader ved nødvendig infrastruktur og utbygging av denne, vil drivstoffkostnadene (elektrisitet) ved bruk av batteriteknologi som oftest være lavere enn ved bruk av hydrogen.
- Infrastrukturbehovet for batteri- og hydrogenteknologi er ganske forskjellig. For hydrogen kan man se for seg tilkjørt drivstoff, som dagens løsning med diesel, eller egenproduksjon på en bygge-/ anleggsplass. Valget vil avhenge av fysiske forhold på lokasjonen og total-kostnaden for løsningen. For batteridrift vil det alltid være et behov for infrastruktur knyttet til lading på byggeplassen. Totalkostnaden knyttet til "drivstoff" (elektrisitet og hydrogen) vil dermed også være avhengig av behovet for investeringer i infrastruktur. Hydrogen-teknologi tilbyr i denne sammenheng en større fleksibilitet, da den i større grad er uavhengig av fysiske forhold på en byggeplass. Det kan være fordelaktig i flere sammenhenger og er relativt likt med dagens løsninger (bruk og påfylling av diesel).
- Tabell 4.5 oppsummerer estimatene på vekt og volum for et elektrisk energisystem på 600–1 200 kWh.

Tabell 4.5. Estimert vekt og volum for et elektrisk energibehov på 600–1 200 kWh

	Vekt [tonn]	Volum [m ³]	Kostnad [MNOK]*
Teslabatteri	4–8	3–6	1,5–3
Marine batterier	6–12	8–16	6–12
Brenselceller og H ₂ -tanker	1–1,5	4–6	2,5–3

*Tesla: 2 500 NOK/kWh, Marine: 10 000 NOK/kWh, brenselceller: 15 000 NOK/kW, H₂-tanker; 10 000 NOK/kg

4.4 Kort om sikkerhet ved bruk av hydrogen og batteri

En omlegging til utslippsfrie byggeplasser betyr i praksis en elektrifisering av maskiner – fra diesel-drevne og mekaniske systemer til elektrisk strøm og spenning samt hydrogengass og høyt gasstrykk. Kravene til sikkerhet for anleggsarbeidere og tredjeparter må forbli uendret. Generelt må tilfredsstillende tiltak settes inn for å sørge for dette, både innebygd i maskinene og ved utforming av byggeplassene. Dagens praksis er blant annet tilpasset erfaringer fra bruk av konvensjonelle maskiner. Ved utvikling og implementering av ny teknologi tas det hensyn til risiko og konsekvens, det vil si at

tekniske løsninger utvikles slik at man minimerer sannsynligheten for og konsekvensene av uhell. Gode eksempler på det er nylige kollisjonstester av hydrogen- og batterielektriske biler, hvor både Hyundai NEXO og Nissan Leaf har fått toppkarakterer. Se figur 4.18. Til tross for at de er fulle av mindre utprøvde teknologier og løsninger, viser testene at de er (minst) like sikre som sine fossile søsken.



Figur 4.18. Bilder fra NCAP krasjtester av Hyundai NEXO [71] (venstre, hydrogenbil) og Nissen Leaf [72] (høyre, batterielektrisk bil). Begge bilene fikk toppkarakter på sikkerhet.

Selve bruken av en elektrifisert og en fossildrevet maskin er i all hovedsak lik. Sammenliknet med håndtering av bensin-/dieseldrevne maskiner er de største forskjellene med elektrisk drift relatert til lading/fylling av drivstoff, ved eventuelle fysiske skader på maskinen samt ved service- og vedlikeholdsarbeider. Den største risikoen ved håndtering av hydrogen er at det kan oppstå en lekkasje med påfølgende antennelse. Det at stort sett alt utstyr på en byggeplass står ute i friluft er en fordel, siden hydrogenet fra en eventuell lekkasje da vil fortynnes ekstremt fort. Det dannes da heller ingen ansamlinger av betydelig mengde hydrogen som kan antennes. En utfordring når det gjelder batterielektriske systemer er håndtering av eventuelt fysisk skadde batterier, for eksempel etter et støt mot en gjenstand på byggeplassen. Det er ikke lett å se om noe er galt med batteriet, og man må sørge for å ha rutiner på plass i tilfelle varmetvikling eller brann i battericellene. På DSBs hjemmesider fins det informasjon om dette basert på erfaringer hittil [73].

Som for all annen aktivitet på en byggeplass må det gjennomføres en risikoanalyse: Man gjør en konkret risikovurdering av alle elementer ved bruk av hydrogen og/eller batterier – både innenfor og utenfor arealet hvor slikt utstyr skal håndteres eller brukes. For lenker til fornuftige nettsider med ytterligere (generell) informasjon om sikkerhet, se [74] for batterier og [75] for hydrogen. For bruk av hydrogen og elektriske systemer må man i hovedsak forholde seg til brann- og eksplosjonsvernloven og lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr, begge med tilhørende forskrifter. Nedenfor har vi listet opp de viktigste forskriftene og veiledningene med lenker.

Relevant lovverk:

- Plan- og bygningsloven, <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>
- Forskrift om trykkpåkjent utstyr, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-10-10-1631>
- Forskrift om utstyr og sikkerhetssystem til bruk i eksplosjonsfarlig område, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-11-29-1849>

- Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr, <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1929-05-24-4>
- Brann- og eksplosjonsvernloven, <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2002-06-14-20>

Temaveiledninger fra DSB:

- Temaveiledning om tilvirkning og behandling av farlig stoff, <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/veiledning-til-forskrift/temaveiledning-om-tilvirkning-og-behandling-av-farlig-stoff2/>
- Temaveiledning om omtapping av farlig stoff, <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/veiledning-til-forskrift/temaveiledning-om-omtapping-av-farlig-stoff/>
- Temaveiledning om oppbevaring av farlig stoff, <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/veiledning-til-forskrift/temaveiledning-om-oppbevaring-av-farlig-stoff/>
- Temaveiledning om bruk av farlig stoff, del 1, <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/veiledning-til-forskrift/temaveiledning-om-bruk-av-farlig-stoff-del-1---forbruksanlegg-for-flytende-og-gassformig-brensel/>

5 Elektriske systemkonfigurasjoner for nullutslippsmaskiner

5.1 Introduksjon til energiomformingssystemer for nullutslippsmaskiner

I de følgende seksjonene er det gitt en generell introduksjon til relevante energiomformingssystemer og systemkonfigurasjoner for anleggsmaskiner designet for nullutslippdrift. Noen av de presenterte systemkonfigurasjonene er allerede standardløsninger i andre typer fremdriftssystemer, mens andre er mindre vanlige for eksisterende nullutslippsteknologi. For enkelhets skyld er det bare gjengitt systemkonfigurasjoner basert på standardløsninger for kraftelektronikkomformingsstegene som er nødvendig i et elektrisk fremdriftssystem.

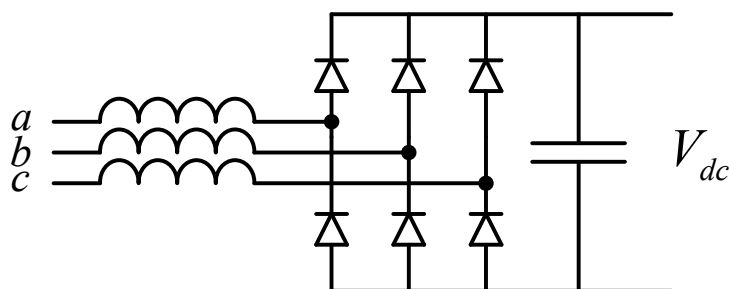
Et moderne elektrisk energisystem for nullutslippdrift av kjøretøyer eller maskiner vil være avhengig av kraftelektronikkomformere for motordrift, for omforming mellom vekselstrøm og likestrøm eller for omforming mellom ulike spenningsnivåer i likestrømsystemer. Slike kraftelektronikkomformere sørger også for styring av effektflyten mellom ulike komponenter i systemet. I det følgende er det derfor gitt en kort introduksjon til de vanligste omformertopologiene i elektriske fremdriftssystemer for kjøretøyer eller maskiner og de grunnleggende funksjonene slike kraftelektronikkomformere vanligvis må dekke. Det er forutsatt at systemene har relativt høyt effektnivå, slik et hvert energiomformingssteg er dimensjonert for spenningsnivå over 200–300 V og effekter over ca. 10 kW.

5.1.1 Kraftelektroniske energiomformere

Kraftelektronikkomformere er basert på krafthalvlederteknologi, og de grunnleggende komponentene er:

- dioder, som kan lede strøm i én retning og blokkere strøm i motsatt retning
- transistorer, som kan styres til å enten lede eller blokkere strøm i én retning ved å slå av eller på via et styresignal

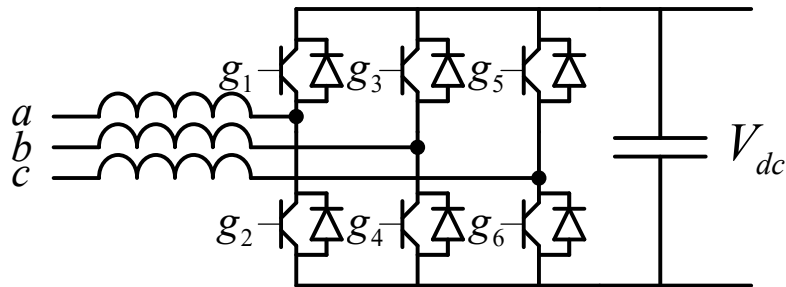
Passive diodelikerettere er den enkleste typen kraftelektronikkomformer som brukes i elektriske systemer for kjøretøyer og maskiner. Et eksempel på en slik omformertopologi med en filterinduktans som tilkobling til AC-siden og en kondensator på DC-siden er vist i Figur 5.1 for et trefasesystem (indikert med fasene a, b, c). Symbolet for dioder er gitt i figuren, og alle diodene er plassert slik at de kan lede strøm oppover (det vil si fra en fase til positiv DC-terminal eller fra negativ DC-terminal til en fase), og vil blokkere strøm i motsatt retning. En slik topologi vil likerette vekselstrøm fra et trefasesystem til en DC-strøm ved en spenning som vil være gitt av spenningen på AC-siden. En diodelikeretter omtales derfor ofte som en passiv likeretter. Effektflyten i slike likerettere kan dermed ikke styres direkte, og hvis en slik topologi brukes om bord i et kjøretøy eller en maskin vil effekten vanligvis måtte reguleres av en annen kraftelektronikkomformer på DC-siden.



Figur 5.1. Diodelikeretter i et trefasesystem

En trefase diodelikeretter er vist i Figur 5.1 siden det er forutsatt systemer med relativt høy effekt hvor det er mest relevant med bruk av trefasetilkobling for tilkobling til kraftnettet. I tilfelle det er relevant med én-fase-likerettere, kan man bruke akkurat samme type topologi som i Figur 5.1. Den eneste forskjellen er at en av fasene (dvs. en leder og de tilhørende diodene) kan fjernes.

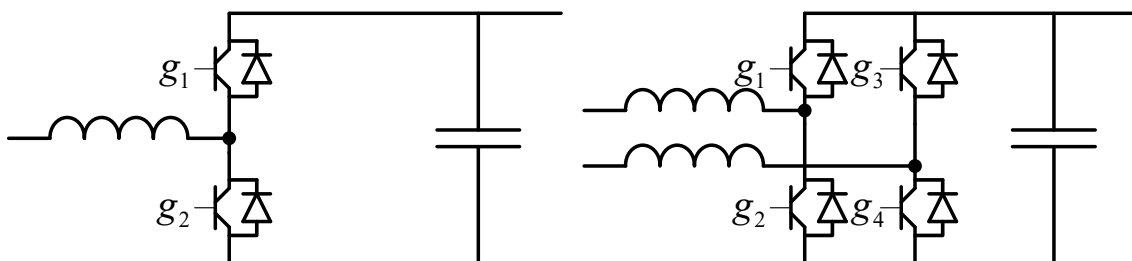
Den vanligste typen av styrbare kraftelektronikkomformere for elektriske motordrifter og for tilkobling til kraftnettet omtales ofte som en spenningsmatet omformer (Voltage Source Converter – VSC). Topologien for en trefase spenningsmatet omformer er gitt i Figur 5.2. På samme måte som en trefase passiv likeretter har denne omformertopologien en kondensator på DC-siden og en induktiv tilkobling til AC-siden (det vil si en filterinduktans eller den ekvivalente induktansen i en elektrisk maskin). Ved å slå av og på transistorene i omformeren kan strømmen styres i begge retninger, forutsatt at DC-spenningen er høyere enn den maksimale spenningen mellom to faser på AC-siden.



Figur 5.2. Trefase spenningsmatet kraftelektronikkomformer (Voltage Source Converter – VSC) som kan benyttes som vekselretter eller aktiv likeretter

For de nivåene på spenning og effekt som er relevante i denne sammenhengen, er transistorene i spenningsmatete omformere som vist i Figur 5.2 vanligvis IGBT-er (Insulated Gate Bipolar Transistor). En transistor er vanligvis integrert sammen med en diode, og en slik integrert enhet omtales vanligvis som en svitsj. Vanligvis er de to svitsjene i en fase, ofte omtalt som en brogren, integrert i en modul, men for lavere effekter kan også de tre brogrenene i en omformer være integrert i en enkelt kraftelektronikkmodul. Selv om silisium (Si)-baserte IGBT-er fortsatt er vanligst for slike kraftelektronikkomformere, har de siste årenes utvikling i halvlederteknologi ført til at silisiumkarbid (SiC)-basert MOSFET-teknologi (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) er på vei til å bli et relevant alternativ for å oppnå lavere tap og mer kompakte omformere.

Siden en spenningsmatet omformer som vist i Figur 5.2 kan styre strøm og effektflyt i begge retninger er det en grunnleggende og fleksibel komponent som kan brukes til flere formål i ulike systemkonfigurasjoner, eksempelvis for motordrift eller som aktivt regulert likeretter/batterilader. Som for diodelikeretteren i Figur 5.1 kan topologien i Figur 5.2 enkelt reduseres til en én-fase-topologi ved å eliminere en fase og den tilhørende brogrenen. Samtidig kan samme type topologi også utnyttes for omforming mellom to ulike DC-spenningsnivåer, det vil si som en DC-DC-omformer. En DC-DC-omformer kan enten baseres på en eller to brogrener, som vist i Figur 5.3, og omtales da ofte som henholdsvis en halvbro-omformer eller en fullbro-omformer. Disse topologiene kan brukes direkte for effektiv DC-DC-omforming, forutsatt at spenningsforskjellen mellom de to sidene av omformeren er begrenset og at det ikke er behov for galvanisk skille i omformingssteget.



Figur 5.3. Halv- og fullbro-omformertopologier

I konfigurasjoner der galvanisk skille er nødvendig eller der forskjellen i spenningsnivå er for stor til å gi høy virkningsgrad, kan fullbro-topologien til høyre i Figur 5.3 utnyttes til å generere en firkantspenning og kobles til en høyfrekvenstransformator. Det vil i så fall kreve enda en kraftelektronikk-

omformer for likeretting på den andre siden av høyfrekvenstransformatoren. Hvis effekten bare skal flyte i én retning, kan man bruke en passiv likeretter, men hvis man ønsker mulighet for toveis effektflyt, kan samme type fullbro-omformer benyttes på begge sider av transformatoren. En slik konfigurasjon for DC-DC-omforming med to fullbro-omformere og en høyfrekvenstransformator omtales ofte som en "Dual Active Bridge" (DAB)-omformer.

Presentasjonen av omformertopologiene vist i de foregående figurene er først og fremst inkludert for å gi en oversikt over den interne topologien i de vanligste kraftelektronikkomformertypene i et elektrisk fremdriftssystem. Dette er relevant for å ha en generell forståelse av virkemåten og de praktiske begrensningene for bruk av slike kraftelektronikkomformere. For diskusjon av generelle systemkonfigurasjoner er det likevel ikke alltid nødvendig å inkludere detaljer omkring omformertopologiene. Derfor vil den følgende diskusjonen først og fremst bruke generelle symboler for AC-DC- og DC-DC-omformere som vist i figur 5.4. For enkelhets skyld vil relevante systemkonfigurasjoner bli skissert som enlinjediagram med generelle omformersymboler, uten å inkludere filterinduktanser eller filterkondensatorer.



Figur 5.4. Generelle symboler for AC-DC- og DC-DC-omformere

5.1.2 Relevante funksjoner og sammenlikningskriterier for kraftelektronikkomformere

For evaluering av ulike løsninger for nullutslippsdrift av anleggsmaskiner vil de viktigste kraftelektronikkomformerne i en systemkonfigurasjon vanligvis måtte dekke noen av de følgende funksjonene:

- **Motordrift:** En eller flere kraftelektronikkomformere vil drive lasten om bord i maskinen, som vanligvis vil være en elektrisk maskin. For en gravemaskin vil den største lasten som regel være en hydraulikkpumpe drevet av en trefaset elektrisk maskin (oftest en asynkronmaskin eller en permanentmagnetmaskin). Lasten vil derfor vanligvis drives av en trefase spenningsmatet omformer.
- **Likeretting fra kraftnettet:** Avhengig av systemkonfigurasjonen vil det være nødvendig med en likeretter (passiv eller aktiv trefase likeretter) som grensesnitt mot kraftnettet. For en kabeltilkoblet maskin vil likeretteren mate effekt til ordinær drift, men samme type grensesnitt mot kraftnettet kan også brukes til batterilading.
- **Integrasjon av energikilde:** Hvis det skal integreres en hydrogenbrenselcelle om bord på maskinen, vil det vanligvis være nødvendig med en DC-DC-omformer for å styre effekten og tilpasse spenningsnivået til DC-siden av omformeren som driver lasten.
- **Integrasjon av energilager:** Avhengig av systemkonfigurasjonen kan det være behov for en DC-DC-omformer for å styre effektflyten inn og ut av batteriet.

Alle kraftelektroniske omformingssteg som er nødvendig i en systemtopologi vil ha en kostnad, og vil bidra til den totale vekten og volumet av installasjonen om bord på maskinen. I tillegg til å dekke de nødvendige funksjonene med tilstrekkelig ytelse og virkningsgrad er dermed volumtetthet (m^3/kW) og vektetthet (kg/kW), i tillegg til pris ($\text{€}/\text{kW}$) viktige evalueringskriterier for design og sammenlikning av kraftelektronikkomformere. Siden volumtetthet i stor grad avhenger av valg og dimensjonering av kjølesystem, som igjen henger sammen med virkningsgrad, er det vanskelig å gi generelle tall for volumtetthet for kraftelektronikkomformer for bruk om bord i anleggsmaskiner. Samtidig er vanligvis ikke høy vekt en utfordring for anleggsmaskiner, og dermed ikke en kritisk sammenlikningsfaktor. Kostnad på energiomformingssteg er også en følge av mange ulike designvalg, både på komponentnivå og systemnivå, og vil i stor grad avhenge av produksjonsvolum for

kraftelektronikkomformerne. Dermed er det vanskelig å estimere kostnader for systemer som leveres med lavt produksjonsvolum.

En analyse av hvordan produksjonsvolum påvirker kostnadene for kraftelektronikkomformere ved ulike effektnivåer er gitt i [76]. I følge analysen i [76] vil kostnaden for en trefase kraftelektronikkomformer på ca. 180 kW være omkring 1 800 € ved et produksjonsvolum på 100 enheter per år, men kan synke ned mot 1 000 € ved et produksjonsvolum på 20 000 enheter per år. Analysen i [76] indikerer at kostnaden for kraftelektronikkomformer med effekt mellom 100 og 200 kW kan være i området 10–15 €/kW ved lave produksjonsvolumer, og synke ned mot 5–8 €/kW ved høye produksjonsvolumer. For et energiomformingsystem om bord på en anleggsmaskin må man også ta hensyn til kostnadene ved de elektriske maskinene, eventuelle filtre for nettintegrasjon av likeretter for batterilading og eventuelle andre tilpasninger om bord, i tillegg til kostnader knyttet til batteri eller til brenselcelle og hydrogenlagring.

5.1.3 Tilgjengelige komponenter og kraftelektronikkomformere for elektriske drivlinjer

Som det framgår av informasjonen ovenfor, vil ulike typer kraftelektronikkomformere og elektriske maskiner være de viktigste energiomformingsenhetene i drivlinjen for en elektrisk drevet anleggsmaskin. Siden både hybride fremdriftssystemer og fullelektrifiserte løsninger blir tatt i bruk i økende grad i mange ulike anvendelser, er det allerede flere leverandører som tilbyr produktserier og modulbaserte løsninger som kan utnyttes eller tilpasses til bruk i elektriske anleggsmaskiner. Slike systemløsninger omfatter vanligvis serier av elektriske maskiner (i hovedsak permanentmagnet-synkronmaskiner eller asynkronmaskiner/induksjonsmaskiner), trefase kraftelektronikkmoduler og DC-DC-omformingsmoduler.

Som et eksempel, tilbyr Danfoss en produktserie for elektriske drivlinjer som kan tilpasses for marine systemer, elektriske kjøretøyer eller elektriske arbeidsmaskiner (off-highway systems) med effektbehov fra 30 kW til 2 MW [77]. Kraftelektronikkomformer-modulene i denne produktserien kan leveres sammen med permanentmagnetbaserte synkronmaskiner som kan brukes både som motor og generator. Denne produktserien kan dermed tilpasses både hybride systemløsninger (med dieselgenerator) og fullelektrifiserte løsninger med kabeldrift og/eller batterier. Tilsvarende tilbyr Siemens en produktserie med kraftelektronikkomformere og permanentmagnet-synkronmaskiner som har blitt utviklet for elektriske busser og andre hybride eller fullelektrifiserte kommersielle kjøretøyer [78].

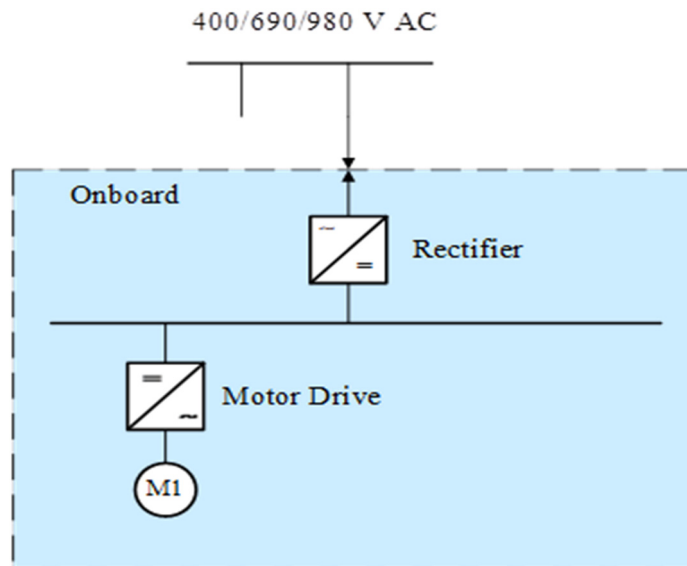
Tilsvarende som for kraftelektronikkomformere og elektriske maskiner fins det også tilgjengelige batterisystemer i modulbaserte serier som kan tilpasses til nødvendig effekt- og energikapasitet, som diskutert i seksjon 4.1. De største tilgjengelige batterisystemene har blitt utviklet for stasjonær energilagring og for maritime fremdriftssystemer, men disse løsningene er vanligvis basert på batterikjemier der høy energitetthet og høy total energilagringkapasitet er prioritert foran høy effekttetthet. Anleggsmaskiner vil vanligvis ha høye krav til effektkapasitet og robusthet for batterimodulene, og vekt vil ha mindre betydning. Derfor vil batterisystemer med høy effekttetthet som er utviklet for elektriske busser og kommersielle kjøretøyer, sannsynligvis være mest relevante for slike systemer.

Basert på en antagelse om tilgjengelige systemkomponenter, følger en kort forklaring og diskusjon av noen relevante elektriske systemkonfigurasjoner for ulike nullutslippsløsninger. I tillegg til en generell introduksjon av kjente løsninger som direktdrift fra kabel, batteridrift og hydrogendrift er det inkludert ulike muligheter for systemløsninger som kan være relevante for å gi maksimal utnyttelse av begrenset nettkapasitet, for å bidra til lokal strømproduksjon for batterilading og/eller for hydrogen-basert plug-in-hybrid drift der strømforsyning fra kraftsystemet eller andre kilder kan bidra til å redusere hydrogenforbruket.

5.2 Kraftomformingsystemer for ulike nullutslippsløsninger

5.2.1 Direktedrift med kabel

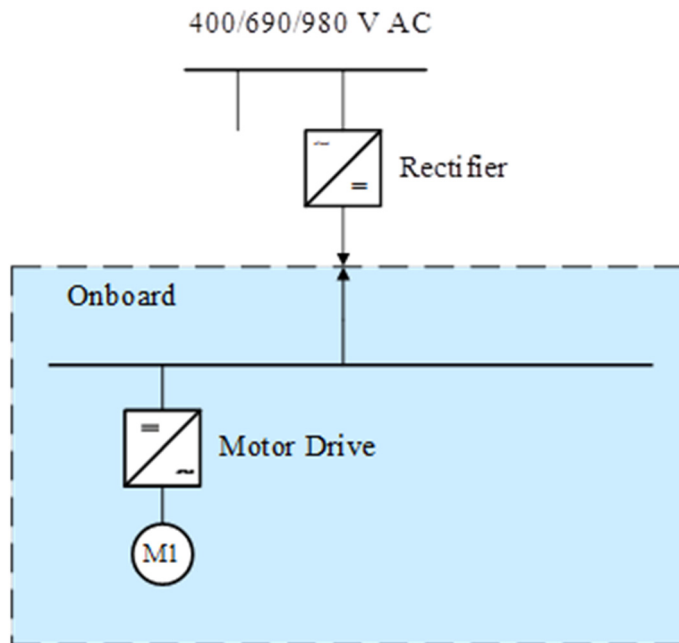
Som nevnt i seksjon 3.3.1 er direkte elektrisk drift via kabeltilkobling allerede en etablert løsning for anvendelser der dette kan være praktisk relevant. Systemkonfigurasjonen vil vanligvis være som skissert i Figur 5.5. Forutsatt at systemet har en enkelt dominerende last, består det elektriske systemet om bord vanligvis av en likeretter og en kraftelektronikk som driver lasten via en elektrisk motor. Strømforsyningen er dermed via en AC-kabel som kobles til maskinen. Vanligvis vil slike systemer ha en passiv likeretter, men en aktiv likeretter kan gi mer fleksibilitet i systemet mens kostnaden vanligvis blir høyere.



Figur 5.5. Direktedrift fra AC-kabel med likeretter om bord i maskinen

Et system som skissert i Figur 5.5 kan designes for ulike spenningsnivåer, men for effekter under ca. 200 kW vil sannsynligvis 690 V eller 400 V være mest vanlig. Hvis man benytter en aktiv likeretter, vil det også være mulig å drive systemet med lavere AC-spenning enn systemet er dimensjonert for, men tilgjengelig effekt vil da være begrenset av strømgrensene til likeretteren og vil synke proporsjonalt med spenningsnivået.

Dersom det er kritisk å redusere plassbehovet for det elektriske systemet, kan det også være mulig å designe et system med DC-tilkobling, der likeretteren ikke er plassert om bord i maskinen. En slik systemkonfigurasjon er skissert i Figur 5.6. Utfordringene med en slik løsning kan være relatert til sikkerhet, siden effektbrytere og sikringer er billigere og enklere å designe for AC-systemer enn for DC-systemer. Dessuten vil behovet for en stasjonær likeretter være en ulempe for en maskin som skal være mobil og kunne flyttes mellom ulike byggeplasser. Likeretteren må i så fall plasseres i et eget kabinett som må fraktes sammen med maskinen, og dette vil dermed være en praktisk sett mindre fleksibel løsning enn tilkobling via AC-kabel som kan plugges direkte i tilgjengelig strømforsyning på en byggeplass.



Figur 5.6. Direktedrift fra DC-kabel med stasjonær likeretter

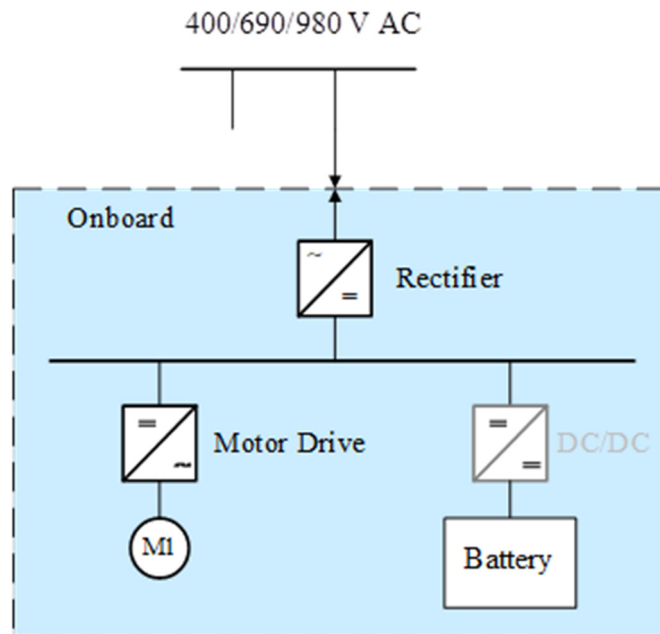
5.2.2 Batteridrift med lading direkte fra lokalt kraftnett

Introduksjon av batterilager om bord i maskinen vil gi mulighet for autonom drift gitt av batterikapasiteten. En mulig systemkonfigurasjon for en maskin med batterilager og mulighet for batterilading fra kraftnettet er gitt i figur 5.7. En slik systemkonfigurasjon kan brukes for ulike formål, og spesielt er de følgende to mulighetene relevante:

- 1) **Stasjonærlading og autonom drift fra batteri.** Som nevnt i seksjon 3.3.2 er dette en etablert løsning for mange anvendelser, og det fins allerede flere gravemaskiner opp til 25 tonn med slike løsninger.
- 2) **Direktedrift via kabel med batteri som energibuffer om bord.** En slik løsning kan gjøre det mulig å drive maskinen kontinuerlig fra en strømforsyning med lavere kapasitet enn maskinens maksimaleffekt, siden effekttopper kan håndteres med energi fra batteriet. Samtidig kan batteriet gi mulighet for drift uten kabeltilkobling i kortere perioder. En slik løsning er for tiden under utvikling ved Nasta for en 17 tonn gravemaskin.

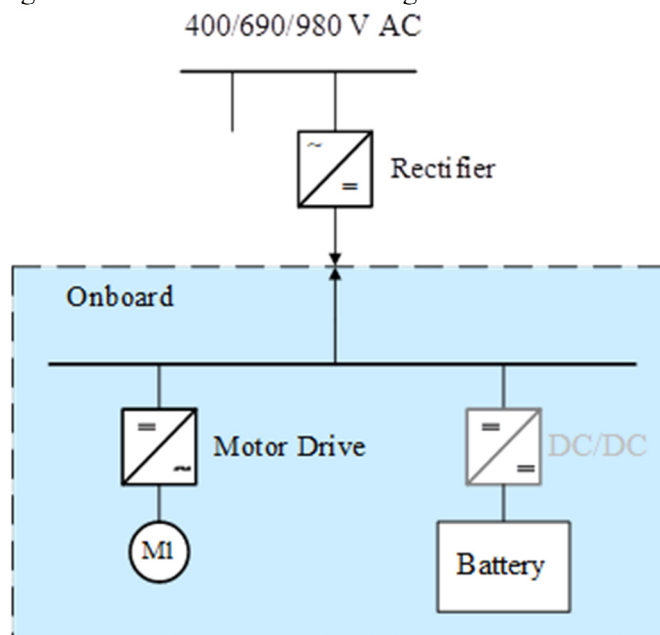
Selv om systemstrukturen vil være den samme for disse to løsningene, kan de føre til svært ulike kriterier for dimensjoneringen av batteriet og likeretteren som fungerer som grensesnitt mot kraftnettet. For en maskin som skal ha mulighet for ren batteridrift i relativt lange perioder, må batteriet ha tilstrekkelig kapasitet og likeretteren mot nettet må dimensjoneres etter hvor rask batterilading som kreves. For en maskin som til vanlig skal drives med kabeltilkobling, vil derimot batteriet kunne være betydelig mindre, og det kan være tilstrekkelig å dimensjonere likeretteren for gjennomsnittsbelastningen på maskinen.

I systemkonfigurasjonen vist i Figur 5.7 er det indikert (i grått) mulighet for å bruke en DC-DC-omformer mellom batteriet og en felles DC-bus om bord i maskinen. Det vil være mest relevant for å kunne styre ladeeffekten til batteriet hvis man bruker en passiv likeretter som grensesnitt mot kraftnettet og/eller hvis det er relevant å ha flere batterisystemer som kan styres separat. For et system designet for ren batteridrift, vil det dermed vanligvis være enklest å koble batteriet direkte til DC-bussen om bord i maskinen, selv om en løsning med DC-DC kan ha noen praktiske fordeler siden spenningen på DC-bussen og dermed omformerer som driver lasten, kan reguleres uavhengig av batterispenningen. Det vil gjøre det mulig å ha en konstant, regulert, DC-spenning under normal drift samt at spenningsnivået på batterisystemet kan velges mer uavhengig av nettspenningen som brukes for batterilading og spenningen som trengs for å drive lasten.



Figur 5.7. Generell systemkonfigurasjon med batterilager om bord og strømforsyning fra kraftnettet

Tilsvarende som beskrevet for direkte elektrisk drift via kabel i seksjon 5.2.1, kan systemet designes for å unngå å ha likeretteren om bord i maskinen. Det vil gi en systemkonfigurasjon som vist i Figur 5.8. Det vil i så fall være nødvendig med DC-tilkobling for batterilading og/eller drift via kabel. I denne sammenhengen kan det nevnes at både løsningen med likeretter om bord og muligheten for tilkobling til en ekstern likeretter via DC-kabler er vanlig for elbiler. De fleste elbiler har i dag en innebygd lader som i praksis er en regulert likeretter for saktelading av batteriet direkte fra én fase AC-tilkobling, men har også mulighet for DC-tilkobling for lading fra en hurtiglader. Hurtigladeren er da en stasjonær likeretter som kan regulere ladeeffekten direkte inn på batteriet. Selv om det vil øke kostnadene på grunn av behovet for to likerettere, kan en slik løsning også være relevant for anleggsmaskiner. Man kan i så fall bruke laderen ombord hvis maskinen har tilstrekkelig batterikapasitet til å utføre de nødvendige oppgavene i løpet av en arbeidsdag og kan lades over natten. Hvis det trengs mer energi enn det tilgjengelig batterikapasitet i løpet av en arbeidsdag, kan en eventuell ekstern hurtiglader i så fall brukes til å forlenge driftstiden.



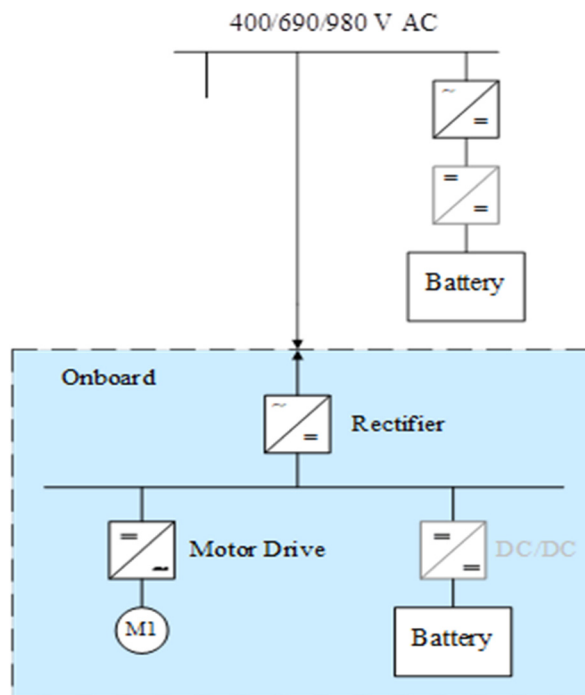
Figur 5.8. Systemkonfigurasjon med batterilager om bord og DC-tilkobling til stasjonær likeretter

Som diskutert for konfigurasjonen fra Figur 5.7, kan det elektriske systemet i Figur 5.8 også designes med eller uten DC-DC-omformer tilknyttet batteriet. Fordelene og ulempene ved en eventuell DC-DC-omformer vil i stor grad være de samme for begge konfigurasjonene.

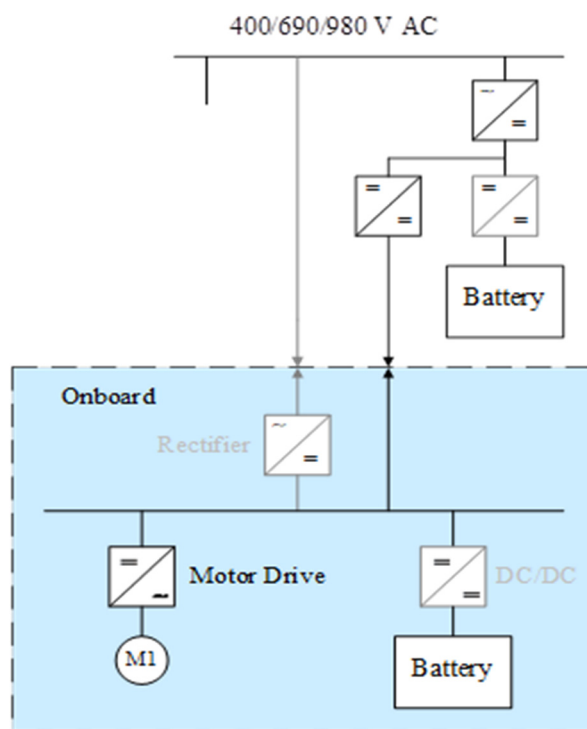
For systemer med stor batterikapasitet og/eller høyt effektbehov om bord i maskinen kan kravene til nødvendig ladeeffekt bli en utfordring med tanke på tilgjengelig effekt fra den lokale kraftforsyningen på en byggeplass. I så fall er det flere mulige konfigurasjoner som kan utnyttes for å kompensere for begrensninger i det lokale kraftnettet. Noen eksempler på slike løsninger er skissert i det følgende.

Hvis det er nødvendig med hurtiglading ved høyere effekt enn tilgjengelig fra det lokale nettet for at en batteridrevet maskin skal kunne utføre alle nødvendige oppgaver i løpet av en arbeidsdag, kan det være relevant å introdusere et stasjonært batterisystem på byggeplassen. Det vil gjøre det mulig å maksimere utnyttelsen av tilgjengelig nettkapasitet, siden det stasjonære batteriet kan lades over lengre tid avhengig av når det er ledig kapasitet i den lokale nettforbindelsen. Deretter kan den lagrede energien utnyttes til hurtiglading av batteriene om bord, ved effektnivåer som overstiger den tilgjengelige nettkapasiteten. Slike løsninger er allerede vanlig som en del av systemet for batterilading av elektriske ferger med begrenset nettkapasitet, for eksempel for MF Ampere [31], og er også et relevant alternativ for hurtigladedestasjoner for vanlige elbiler og elektriske lastebiler.

En generell konfigurasjon for et slikt system er vist i Figur 5.9. I denne figuren er det indikert at det stasjonære batteriet kan være tilkoblet nettet via en DC-DC-omformer i tillegg til en aktiv likeretter. Siden AC-DC-omformeren i denne konfigurasjonen må være en aktiv likeretter for å kunne levere effekt fra batteriet tilbake til nettet, vil DC-DC-omformeren først og fremst være relevant hvis man ønsker å ha et annet spenningsnivå på batterisystemet enn på DC-siden av likeretteren. En av de generelle fordelene med konfigurasjonene i Figur 5.9 er at det stasjonære batterilageret kan utnyttes på flere vis, eksempelvis ved å bidra til å støtte hurtiglading av flere typer maskiner. Ulempen er at en slik systemkonfigurasjon vil ha lavere virkningsgrad enn direkte lading, siden energien som blir lagret i det stasjonære batteriet, først omformes til vekselstrøm og deretter likerettes tilbake til likestrøm når batteriene om bord på maskinen skal lades. Dette kan unngås hvis man har DC-tilkobling fra det stasjonære batterisystemet til maskinen, som indikert i figur 5.10.



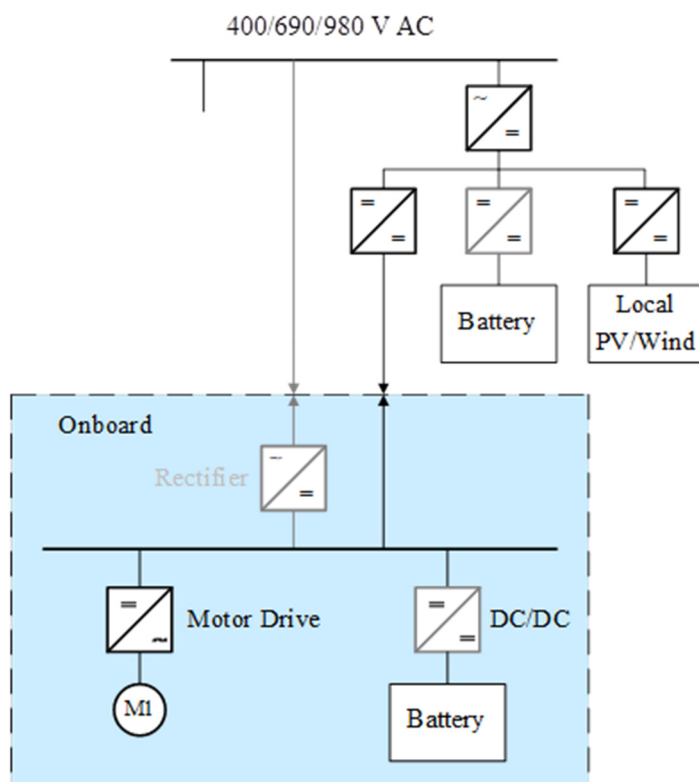
Figur 5.9. Systemkonfigurasjon med stasjonært batterilager for å støtte hurtiglading via AC-tilkobling



Figur 5.10. Systemkonfigurasjon med stasjonært batterilager for å støtte hurtiglading via DC-tilkobling

Systemkonfigurasjonen for hurtiglading direkte fra et stasjonært batterilagringssystem som vist i Figur 5.10 vil være spesielt relevant for kombinasjon med den vanlige konfigurasjonen med en likeretter om bord fra Figur 5.7. Et slikt system vil kunne være relativt fleksibelt, siden den integrerte laderen om bord i maskinen vil gjøre det mulig å utføre mindre arbeider på anleggsplasser uten tilkobling for hurtiglading ved høy effekt, forutsatt at maskinen har tilstrekkelig batterikapasitet. Hvis maskinen skal arbeide med tyngre oppgaver som medfører behov for hurtiglading i løpet av en arbeidsdag, kan det være relevant å installere et stasjonært batteri med tilkobling for hurtiglading. Det stasjonære batteriet og tilhørende omformere kan installeres i en konteiner som relativt enkelt kan flyttes til byggeplasser med behov for lokal lagringskapasitet og/eller hurtiglading ved høy effekt.

Hvis kapasitetsbegrensninger i det lokale kraftsystemet til en byggeplass medfører at det ikke er tilstrekkelig energi tilgjengelig for batteridrift av anleggsmaskiner, kan det være mulig å introdusere lokal energiproduksjon. En mulig struktur for et system der småskala kraftproduksjon integreres sammen med et stasjonært batterisystem er skissert i Figur 5.11. Mulighetene for slik lokal kraftproduksjon vil bære begrenset av tilgjengelig areal og forholdene på byggeplassen. Siden det vanligvis ikke vil være relevant med store installasjoner, av vindturbiner og/eller solcellepaneler på en midlertidig byggeplass, kan det være aktuelt å integrere den lokale energiproduksjonen med batterisystemet som et DC-mikronett, som vist i Figur 5.11. Hvis det er mulig med større og permanente installasjoner som skal fortsette kraftproduksjon etter at byggeaktiviteten er avsluttet, mens det stasjonære batterisystemet bare er en midlertidig installasjon, vil det være mer relevant å integrere lokal kraftproduksjon direkte mot det lokale AC-nettet. Eventuell lokal kraftproduksjon vil i så fall kunne mates direkte inn i AC-nettet, og installasjonen for batterilading på byggeplassen vil kunne være den samme som i Figur 5.9 eller 5.10.



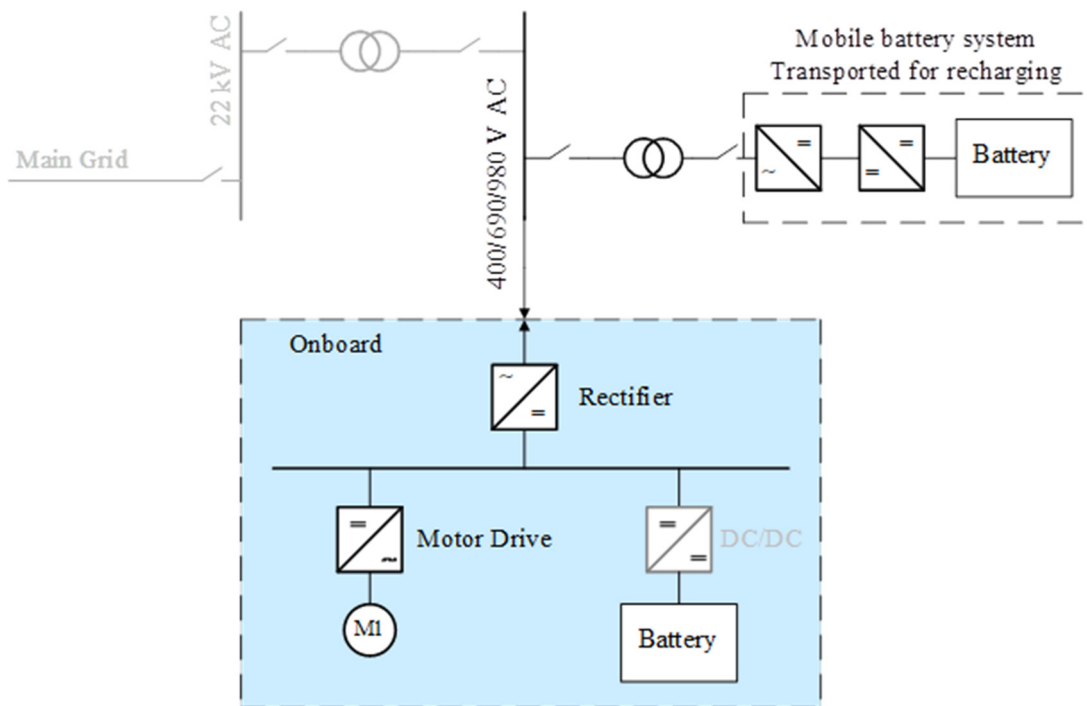
Figur 5.11. Systemkonfigurasjon med stasjonært batterilager og lokal kraftproduksjon

Det kan også nevnes at systemkonfigurasjonene for de stasjonære installasjonene på byggeplassen i Figur 5.9/5.10 eller Figur 5.11 også vil kunne brukes for løsninger basert på batteribytte. Et batteri kan i så fall lades stasjonært innenfor tilgjengelig kapasitet på strømforsyningen til byggeplassen. Selv om en av ulempene med løsninger for batteribytte vanligvis er at det trengs minst to batterier, vil ikke dette nødvendigvis medføre en betydelig ekstrakostnad hvis det uansett er nødvendig med et stasjonært batteri for å utnytte begrenset nettkapasitet på en byggeplass.

5.2.3 Mobilt batterisystem for hurtiglading

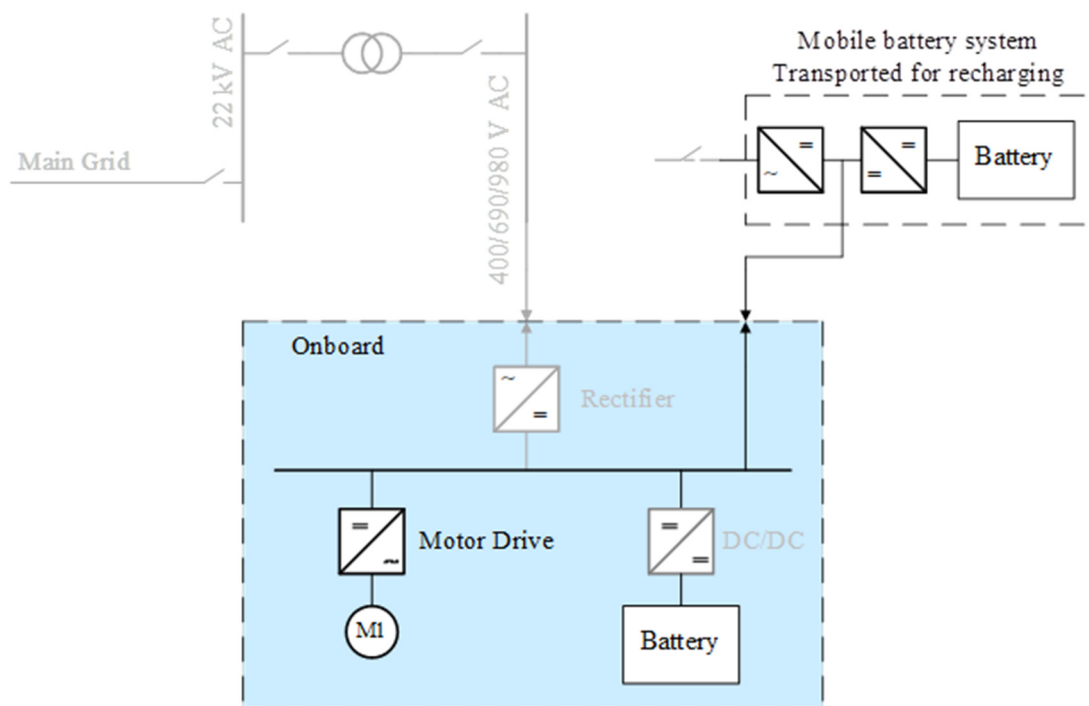
Hvis det ikke er mulig å få tilstrekkelig effekt for batterilading på en byggeplass, er det mulig å bruke mobile batterisystemer. Et slikt system kan være en konteiner med batterier og tilhørende kraft-elektronikkomformere som kan transporteres med lastebil for opplading på en lokasjon med tilstrekkelig effekt, og deretter returneres til byggeplassen for hurtiglading av batteridrevne maskiner.

En mulig systemkonfigurasjon der den mobile energilagringseenheten kobles til eksisterende kraftnett ved byggeplassen er skissert i Figur 5.12. En slik løsning vil i praksis bidra til at nødvendig energi transporteres til en byggeplass og kan brukes for alle relevante formål som krever mer elektrisk effekt enn det som er tilgjengelig fra den lokale nettforbindelsen.



Figur 5.12. Mobilt batterisystem integrert med lokalt nett på en byggeplass

En annen mulig systemkonfigurasjon er vist i Figur 5.13, der det mobile batterisystemet kobles direkte til maskinen med DC-tilkobling for hurtiglading. Siden en slik løsning vil unngå omforming fra DC til AC og deretter til DC igjen for å lade batteriene om bord på maskinen, vil den kunne gi bedre virkningsgrad enn løsningen skissert i Figur 5.12. Samtidig vil løsningen i Figur 5.13 ha et noe mer begrenset anvendelsesområde, siden det mobile batterisystemet bare vil kobles direkte til maskinen som skal lades. Som allerede diskutert for hurtiglading fra et stasjonært batterisystem, inkluderer systemkonfigurasjonen i Figur 5.13 muligheten for ordinær batterilading over natten via en likeretter installert om bord på maskinen, mens hurtiglading kan foregå via DC-tilkobling og styres av en kraftelektronikkomformer i det mobile batterisystemet. Det kan også være mulig å kombinere systemløsningene i Figur 5.12 og 5.13 ved at det mobile batteriet kobles til nettet på byggeplassen for å støtte drift av andre nullutslippsmaskiner med udekket energibehov, samtidig som maskinen med størst effekt- og energibehov kan hurtiglades via DC-tilkobling.

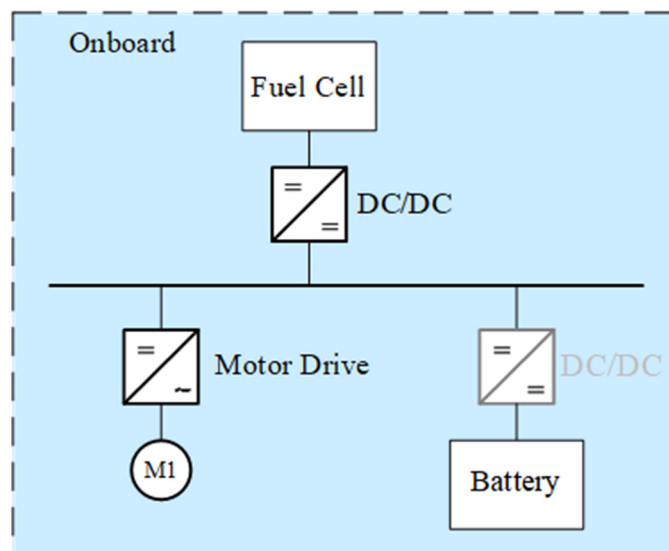


Figur 5.13. Mobilt batterisystem med mulighet for hurtiglading via DC-tilkobling

Selv om slike løsninger foreløpig ikke har vært tatt i bruk for nullutslippsdrift på anleggsplasser, fins det allerede liknende systemer under utvikling for introduksjon av mobile energilagringseenheter i kraftsystemet [79]. Løsninger som skissert i Figur 5.12 og 5.13 kan også konstrueres direkte fra tilgjengelige komponenter.

5.2.4 Hydrogendrift

En generell kraftsystemkonfigurasjon for hydrogendrift med brenselcelle kan i prinsippet være lik strukturen for et seriehybrid system som skissert i Figur 3.2. All energien for drift av maskinen vil dermed komme fra en brenselcelle drevet med hydrogen, men systemet vil vanligvis også ha et batteri som kan bidra til utjevning av lastprofilen. Den største forskjellen sammenliknet med et diesel-elektrisk hybridsystem er at en hydrogenbrenselcelle må ha en DC-DC-omformer som grensesnitt mot resten av systemet i stedet for en likeretter. En typisk systemkonfigurasjon er skissert i Figur 5.14. Som for andre systemløsninger diskutert ovenfor, kan en slik løsning designes med eller uten egen DC-DC-omformer som grensesnitt mot batteriet.



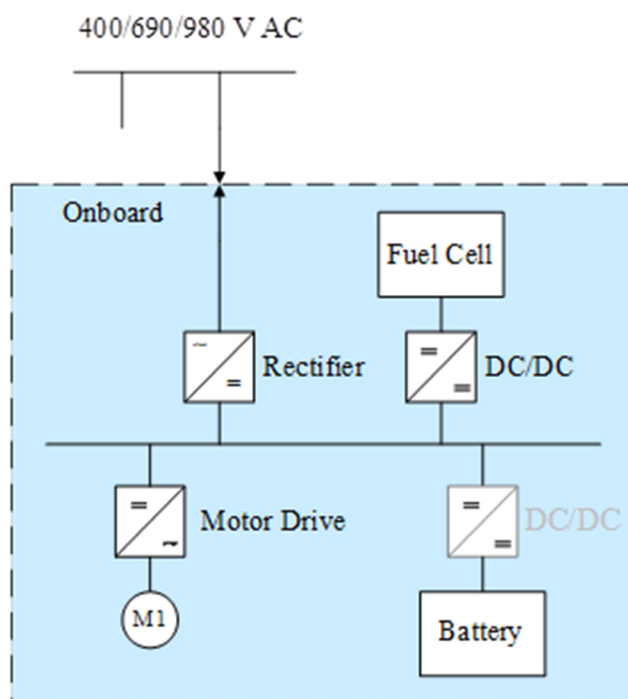
Figur 5.14. Systemkonfigurasjon for hydrogendrift med brenselcelle

Som det framgår av Figur 5.14, kan den elektriske systemkonfigurasjonen for ren hydrogendrift være relativt enkel og baseres direkte på konvensjonelle og lett tilgjengelige kraftelektronikkomformere. Utfordringene relatert til hydrogendrift av anleggsmaskiner kan derfor først og fremst forventes å være relatert til integrasjon av hydrogensystemet, inkludert sikkerhet, plassering av hydrogentanker om bord på maskinen og praktiske metoder for hydrogenfylling.

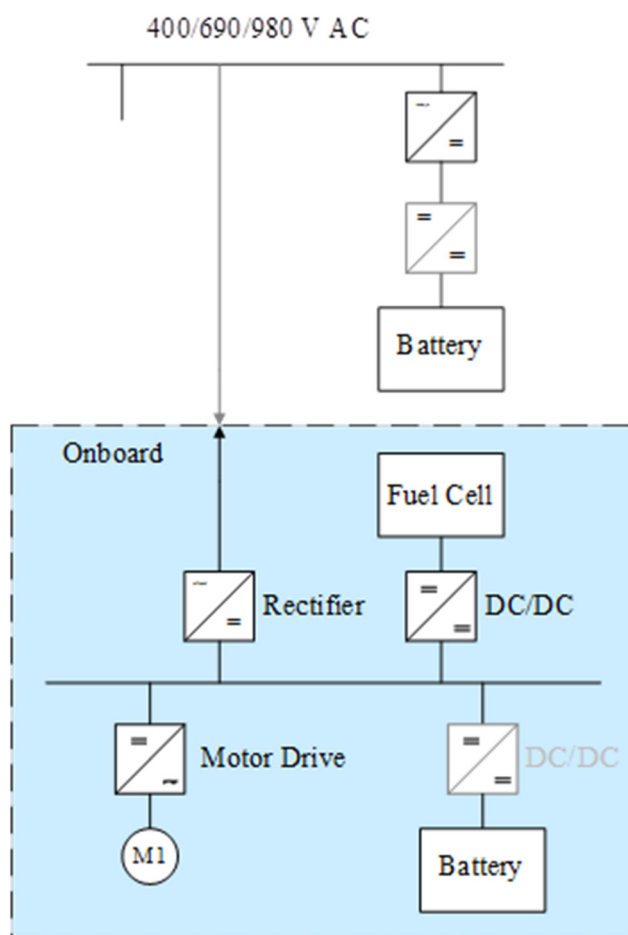
5.2.5 Plug-in-hybrid hydrogendrift eller batterilading støttet av hydrogenbrenselcelle

Hydrogen vil være et dyrere drivstoff enn strøm direkte fra kraftnettet, og i enkelte tilfeller kan det være relevant å vurdere plug-in-hybrid drift av et system med hydrogenbrenselcelle, men det forutsetter større kapasitet på batteriet om bord på maskinen enn det som er nødvendig med ren hydrogendrift. Batteriet om bord kan dermed lades fra kraftnettet når dette er mulig, men ren hydrogendrift vil også være mulig for arbeid i områder uten tilgjengelig strømforsyning. For ordinær drift ved lokasjoner med tilgjengelig kraftnett vil et slikt system kunne utnytte tilgjengelig lade-kapasitet i det lokale kraftnettet og batterikapasiteten om bord i maskinen til å redusere forbruket av hydrogen. En relevant systemkonfigurasjon er gitt i Figur 5.15.

Hvis batterikapasiteten om bord i maskinen er relativt stor og nettkapasiteten for batterilading er begrenset, kan en plug-in-hybrid hydrogendrevet maskin også utnytte kapasitet i et stasjonært energilager for hurtiglading. En mulig elektrisk systemkonfigurasjon for en slik situasjon er skissert i Figur 5.16. Siden maskinen inkludert i Figur 5.16 uansett vil ha mulighet for ren hydrogendrift, vil dette være en lite relevant løsning for en enkelt plug-in-hybrid maskin. En løsning med stasjonært energilager på byggeplassen kan likevel være aktuell hvis systemet skal forsyne mange nullutslipps-maskiner med behov for batterilading som overstiger kapasiteten i den lokale nettilkoblingen.



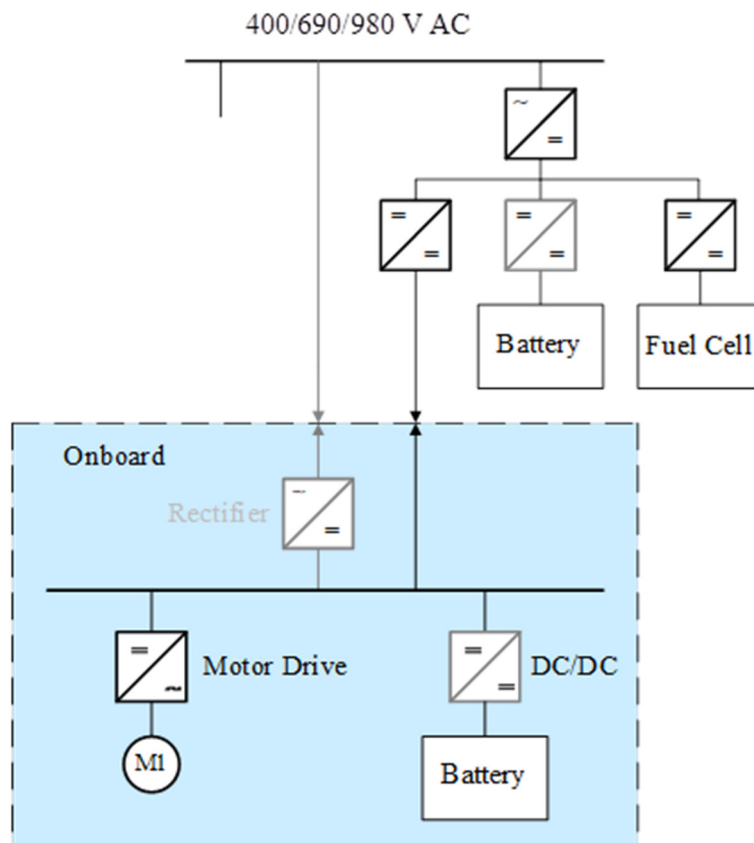
Figur 5.15. Systemkonfigurasjon for plug-in-hybrid drift med hydrogenbrenselcelle



Figur 5.16. Systemkonfigurasjon for plug-in-hybrid hydrogendrift og stasjonært batteri

Siden en av utfordringene med hydrogendrift av anleggsmaskiner kan være integrasjon av hydrogen-systemet (inkludert brenselcellen og hydrogentanker med tilstrekkelig volum) om bord på maskinen,

kan det også være relevant å vurdere andre løsninger for å utnytte hydrogen til nullutslippsdrift. Hvis utfordringen med ren batteridrift først og fremst er knyttet til begrensninger i ladekapasitet, kan en mulighet være å introdusere en stasjonær brenselcelle for lokal kraftproduksjon på byggeplassen. En mulig systemkonfigurasjon for en slik løsning er gitt i Figur 5.17. I dette systemet kan brenselcellen produsere strøm som lagres lokalt i et stasjonært batteri, og deretter utnyttes til hurtiglading av batteriet om bord på anleggsmaskinen. I figuren er det indikert mulighet for batterilading både via det lokale kraftnettet med likeretter om bord i maskinen og via DC-tilkobling med ekstern DC-DC-omformer direkte fra det stasjonære systemet med batteri og brenselcelle. I tillegg vil det være mulig å drive systemet med brenselcelle og stasjonært batteri som en egen enhet som ikke er tilkoblet kraftsystemet. Det kan eksempelvis være relevant på byggeplasser uten nettilgang.



Figur 5.17. Systemkonfigurasjon for batteridrift med stasjonær brenselcelle og stasjonært batteri

Et system som skissert i Figur 5.17 vil også kunne drives uten et stasjonært batteri i tilknytning til brenselcellen. Systemet kan i så fall styres slik at brenselcellen kun startes når batteriene om bord i maskinen skal lades, og slik at all effekt produsert av brenselcellen enten mates inn til den lokale AC-bussen for batterilading via likeretteren om bord eller overføres direkte til batteriet via DC-kabler. Dette kan være en relevant løsning hvis det er tilstrekkelig å lade batteriene om bord på maskinen over natten, og den vil da være en direkte erstatning for manglende nettilkobling eller nettkapasitet. Løsningen er derimot mindre aktuell for hurtiglading fordi det vil kreve en brenselcelle med høy effekt som vil få svært lav brukstid.

6 Diskusjon og oppsummering

For partnerne i prosjektet "Zero Emission Digger" er den langsiktige målsetningen at utvikling av utslippsfrie anleggsmaskiner også vil bidra til nye grønne arbeidsplasser, økt omsetning, reduserte kostnader og økt konkurranseevne. Selv om investeringskostnadene for batteri- og hydrogendrevne maskiner vil være høyere enn for konvensjonelle fossildrevne maskiner de første årene, forventes det reduserte driftskostnader som følge av lavere vedlikeholdsbehov – hovedsakelig på grunn av færre bevegelige deler i maskinens drivverk. Prismessig forventes den utslippsfrie teknologien å bli konkurransedyktig når den innføres som bransjestandard. Levetiden på en elektrisk drivlinje forventes å bli ca. 50 % lengre enn for en vanlig dieseldrevet maskin med hensyn til timer i drift (10 000 timer for diesel og ca. 15 000 timer for elektrisk). En overgang fra diesel til biodiesel medfører en økning i energikostnader på omtrent 30 %, mens en overgang til elektrisitet vil redusere energikostnadene. En elektrisk gravemaskin har høyere energiutnyttelse som medfører lavere energiforbruk. Potensielt vil totalkostnaden for maskinen bli lavere når batteriteknologien blir enda billigere. Det samme gjelder ved bruk av hydrogenteknologi, da store kostnadsreduksjoner forventes samtidig som produksjonsvolumet øker. Den utslippsfrie gravemaskinen gir ingen utslipp av klimagasser, og forurenses ikke lokalmiljøet med NO_x, SO_x, partikler eller tilsvarende.

Lavere utslipp av lokalforurensing fører til samfunnsøkonomiske gevinster og positive helseeffekter, et bedre arbeidsmiljø og et triveligere bymiljø gjennom kutt av utslipp og støy. Det antas at dette vil føre til lavere kostnader for HMS på grunn av mindre støy og et bedre arbeidsmiljø (bedre luft i førerhuset). En utslippsfri gravemaskin vil heller ikke måtte stå i ro på dager med sterk luftforurensing. Det er muligheter for økt omsetning for entreprenørene som tilbyr utslippsfrie løsninger, fordi slike løsninger vil etterspørres av byggherrer i økende grad framover. Det forventes en økt konkurranseevne for entreprenører som er tidlig ute med å ta i bruk nye løsninger. For maskinleverandører er det en mulighet for økt omsetning ved å levere utslippsfrie løsninger fordi de etterspørres av entreprenører og byggherrer.

Kabeldrevne elektriske anleggsmaskiner er delvis kommersielt tilgjengelig for enkelte formål i dag, men tilbudet oppleves som begrenset og slike løsninger har foreløpig størst utbredelse for noen spesielle anvendelser. Dermed er det først og fremst små batterielektriske maskiner i form av mindre hjullastere, dumpere og gravemaskiner som er tilgjengelige på markedet, og som er på vei til å bli tatt i bruk i byggenæringen. Tilgangen på miljøvennlige store maskiner med høyt effektbehov og krav om lange sammenhengende driftsperioder er foreløpig en begrensning med hensyn til reduksjon av utslipp fra byggeplasser og anleggsvirksomhet. De viktigste komponentene for kraftomformings-teknologi og energilagringssystemer som er nødvendige for utvikling av store utslippsfrie anleggsmaskiner, er likevel tilgjengelige. Dermed vil det allerede i dag være mulig å lage store anleggsmaskiner med batteri- og/eller hydrogendrift som har tilstrekkelig ytelse og driftsfleksibilitet til å erstatte konvensjonelle dieseldrevne maskiner, selv om videre forskning og utvikling kan forventes å bidra til ytterligere systemoptimaliseringer og kostnadsreduksjoner.

Med utgangspunkt i mulighetene for nullutslippsdrift av anleggsmaskiner viser denne rapporten – ved å gi en oversikt over utvikling og anvendelse av nullutslippsteknologi i andre anvendelser – at det foregår en rask utvikling av nye produkter og løsninger. Det foregår også en kontinuerlig teknologiutvikling, spesielt for batterier og brenselceller, som muliggjør nye anvendelser og forbedrede ytelser eller reduserte kostnader ved utnyttning av nullutslippsløsninger

For rene batteridrevne løsninger er de tekniske begrensningene stort sett knyttet til mulig driftstid og tilgjengelig ladeffekt, mens tilsvarende begrensninger for hydrogendrevne maskiner gjelder praktiske problemstillinger rundt lagring og tilgang på hydrogen. I tillegg er det fortsatt en del skepsis forbundet med bruk av hydrogen og sikkerhet som er med på å bremse utbredelsen av teknologien. Norge har over 100 år med gode erfaringer med håndtering av store mengder hydrogen, og dagens teknologi og løsninger er også videreutviklet sikkerhetsmessig. Utover slike praktiske forhold er det i stor grad høye investeringskostnader og usikkerhet om markedsgrunnlaget for nye nullutslippsløsninger som begrenser utviklingstakten og anvendelsesområdene for nullutslippsteknologi.

Referanser

1. NHO, *Energibruk på byggeplassen (i byggefasen)*, in *Temahefte. Næringslivets klimapanel*, P.-H. Granlund, H. Reine, and R.R. Landet, Editors. 2009.
2. Oslo kommune, *Klima- og energistrategi for Oslo. Behandlet av Oslo bystyre 22.06.2016 (sak 195/16)*. 2016.
3. DNV GL, *Fossil- og utslippsfrie byggeplasser. Energi Norge, Norsk Fjernvarme i samarbeid med Bellona, og Enova SF. Rapportnr 2017-0637, Rev.rev.o*. 2017.
4. Østfold fylkeskommune, *Fossilfrie arbeidsmaskiner*. Cited 19.03.2018 from <https://sites.google.com/site/arbeidsmaskiner/project-definition>. 2017.
5. Christina Benjaminsen, *Fuel of the future*. Gemini Research News. Retrieved from <https://geminiresearchnews.com/2017/06/fuel-of-the-future/>. 2017.
6. NS-EN 15940, *Drivstoff - Parafinsk diesel fra syntese eller hydrogenbehandling - Krav og prøvingsmetoder / Automotive fuels - Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrotreatment - Requirements and test methods* 2016, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
7. Anleggsmaskinen, *Vil ha fossilfrie maskiner*. Publisert 14. mars 2016 av Jørn Söderholm, Sist endret 16. mars 2016. Tilgjengelig på: <http://anleggsmaskinen.no/2016/03/vil-ha-fossilfrie-maskiner/>.
8. Wang, D., et al., *Performance analysis of hydraulic excavator powertrain hybridization*. Automation in Construction, 2009. **18**(3): p. 249-257.
9. Komatsu, *Komatsu beltegravere*. Retrieved from http://webassets.komatsu.eu/komatsumachine.asp?machine_type_id=1&prdt_id=481.
10. Kystverket, et al., *Muligheter og barrierer for fossilfrie anleggsplasser i transportsektoren. Kunnskapsgrunnlag til Samferdselsdepartementets handlingsplan og grunnlag for Nasjonal transportplan 2022–2033*. https://www.ntp.dep.no/Forside/_attachment/2450244/binary/1286261?_ts=1662fcae4f0.
11. Unic, *ECO-095 minikran*. Tilgjengelig på: https://www.kmaskin.no/media/1219/eco_unics_norsk.pdf.
12. Veidekke, *Miljøsatsing gir positive synergieffekter*. Tilgjengelig på: <http://veidekke.no/om-oss/nyheter-og-media/temasaker/article21476.ece>.
13. Statnett, *Pilot - Fossilfri Anleggsplass. Veileder*. 5.1.2018. Tilgjengelig på: <http://www.statnett.no/PageFiles/14459/Rapport%20Ramb%C3%B8ll-%20Fossilfri%20anleggsplass.pdf>. 2018.
14. Wacker Neuson, *Gravemaskin 803*. Retrieved from <http://www.wackerneuson.no/no/produkter/excavators/tracked-conventional-tail-excavators/model/803-dualpower-1/>.
15. Anlegg&Transport, *Nasta har produsert elektriske gravemaskiner*. Cited 12.12.2017 from <https://www.at.no/artikler/nasta-har-produsert-elektriske-gravemaskiner/425531>
16. Volvo Construction Equipment, *Testing begins at world's first 'emission-free' quarry*. Retrieved from <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-press-releases/2018/testing-begins-at-worlds-first-emission-free-quarry/>.
17. Atlas Copco, *Scooptram ST7 gruvelaster*. Retrieved from <http://www.atlascopco.no/nb-no/mrba/products/loaders-andtrucks/electric-loaders/scooptram-st7-battery>.
18. Wacker Neuson, *Kramer 5055e hjullaster*. Retrieved from <http://construction.kramer-online.com/en/zeroemission/the-kramer-5055e.html>.
19. Ecovolve, *Electric dumper*. Retrieved from <http://www.epowertrucks.co.uk/ecovolve-electric-dumper/>.
20. NASTA, *ZERON – Zero Emission Construction Machinery – Batteri-elektriske gravemaskiner fra NASTA*. Tilgjengelig på: <https://www.nasta.no/wp-content/uploads/2018/08/zeron-a5-dm-web.pdf>
21. Volvo Construction Equipment, *EX2: Prototype Electric Excavators*. Retrieved from <https://www.volvoce.com/global/en/this-is-volvo-ce/what-we-believe-in/innovation/prototype-electric-excavator/>.

22. Suncar HK, *Electric excavators*. Retrieved from <http://www.suncar-hk.com/en/electric-excavators/electric-excavators.php>.
23. Anlegg&Transport, *Pon bygger 25-tonner på batteri*. Cited 23.08.2018 from <https://www.at.no/artikler/pon-bygger-25-tonner-pa-batteri/426559>
24. Volvo Construction Equipment, *Sfinx Crawler Excavator Concept – The Excavator of Tomorrow*. Retrieved from <https://www.volvoce.com/global/en/this-is-volvo-ce/what-we-believe-in/innovation/sfinx-crawler-excavator-concept/>.
25. Yi, H.-S., J.-B. Jeong, and S.-W. Cha, *Optimal component sizing of fuel cell-battery excavator based on workload*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018. 5(1): p. 103-110.
26. Norsk Elbilforening, *Elbilstatistikk - Statistikk for elbilsalget og antall ladestasjoner i Norge*. Tilgjengelig på: <https://elbil.no/elbilstatistikk/>.
27. Norsk Elbilforening, *Posten tester elektrisk varebil*. Tilgjengelig på: <https://elbil.no/posten-tester-elektrisk-varebil/>.
28. Volvo group, *Volvo Trucks presents second electric truck model in three weeks*. Retrieved from <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2018/may/news-2912374.html>.
29. Tesla Norge, *Tesla Semi*. Tilgjengelig på: https://www.tesla.com/no_NO/semi.
30. IEA, *Global EV Outlook 2017: two million and counting*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>. 2017.
31. Wikipedia, *MF Ampere*. Retrieved from https://no.wikipedia.org/wiki/MF_%C2%ABAmpere%C2%BB
32. Teknisk Ukeblad, *I 2021 vil Norge ha 60 ferger med batterier. Nå må Vegdirektoratet finne en standardløsning for lading*. Tilgjengelig på: <https://www.tu.no/artikler/i-2021-vil-norge-ha-60-ferger-med-batterier-na-ma-vegdirektoratet-finne-en-standardlosning-for-lading/414997>.
33. Aarsaether, K.G., *Energy Savings in Coastal Fisheries: Use of a Serial Battery Hybrid Power System*. IEEE Electrification Magazine, 2017. 5(3): p. 74-79.
34. Hydrogenforum, *Hydrogenforum*. Tilgjengelig på: <https://www.hydrogen.no/>
35. Trucks, *1,000 Hyundai Fuel Cell Electric Trucks Headed for Switzerland*. Retrieved from <https://www.trucks.com/2018/09/21/hyundai-fuel-cell-electric-trucks-switzerland/>.
36. Hirth, M., et al., *Hydrogen til hurtigbåter i Trøndelag -En studie på hydrogenforsyning, kaianlegg og sikkerhet*. SINTEF Rapport. Tilgjengelig på: <https://www.sintef.no/contentassets/7a7bf0e26fd44cbfb973dd47736b056a/20180102-forsyning---kainanlegg---sikkerhet---hydrogenhurtigbat-trondelag-v1.1.pdf>. 2017.
37. ALSTOM. *Coradia range: Regional trains to suit all operator needs*. Retrieved from <https://www.alstom.com/coradia-range-regional-trains-suit-all-operator-needs>.
38. Roland Berger, *Development of business cases for Fuel cells and Hydrogen applications for regions and cities. Consolidated technology introduction dossiers*. Retrieved from http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171127_FCH2JU_BCs%20Regions%20Cities_Consolidated%20Tech%20Intro_Rev.%20Final%20FCH_v11%20%28ID%202910585%29.pdf 2017.
39. IRENA, *Battery storage for renewables: Market status and technology outlook*. International Renewable Energy Agency (IRENA), January 2015. Retrieved from http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_Battery_Storage_report_2015.pdf 2015.
40. Avicenne Energy, *Worldwide Rechargeable Battery Market 2016-2025- 2017 edition*. Retrieved from http://www.avicenne.com/reports_energy.php. 2017.
41. Battery university, *Learn about batteries. BU-205: Types of Lithium-ion*. Retrieved from https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion.
42. Wright, D., *Request for issuance of a new certificate of Conformity – Running change to add Model S 100D and New 75 kWh FW limited battery pack configuration*. Personal communication, February 22, 2017. https://iaspub.epa.gov/otaqpub/display_file.jsp?docid=39834&flag=1.

43. Wright, D., *Request for issuance of a new certificate of Conformity - 2017 MY Model S AWD*. Personal communication, December, 2016.
https://iaspub.epa.gov/otaqpub/display_file.jsp?docid=39829&flag=1
44. Kokam, *Kokam Battery Solution Transportation Application*. retrieved from http://kokam.com/data/Kokam_EV_Pack_Brochure_V_1.5.pdf
45. PBES, *PBES Specification Sheet - System Specifications for the PBES Power & Energy System*. Published 30.05.2017. http://www.pbcs.com/wp-content/uploads/2017/06/PBES_Power-Energy_2017-06-16.pdf
46. PBES, *Containerized Energy Storage*. Retrieved from <http://www.pbcs.com/containerized-ess/>
47. Teknisk Ukeblad, *Nå faller prisen på litiumionbatterier raskere enn noen gang*. Tilgjengelig på: <https://www.tu.no/artikler/na-faller-prisen-pa-litiumionbatterier-raskere-enn-noen-gang/367874>.
48. Avicenne Energy, *The Rechargeable battery market and main trends 2016-2025*. International Battery seminar & exhibit. March 20, 2017. Retrieved from http://cii-resource.com/cet/FBC-TUT8/Presentations/Pilot_Christophe.pdf 2017.
49. Quandl, *Cobalt Prices*. London Metal Exchange. Retrieved from https://www.quandl.com/data/LME/PR_CO-Cobalt-Prices.
50. Divya, K.C. and J. Østergaard, *Battery energy storage technology for power systems—An overview*. Electric Power Systems Research, 2009. **79**(4): p. 511-520.
51. Steffen Møller Holst, et al., *Hydrogen verdikjeder og potensial*. Grønn konkurransekraft. SINTEF notat. 2016.
52. IEA, *Technology Roadmap: hydrogen and fuel cells*. Paris, 2015. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>. 2015.
53. Hyundai, *Hyundai Global*. Retrieved from <https://www.hyundai.com/worldwide/en>
54. Toyota, *Toyota Motor Corporation*. Retrieved from <https://www.toyota.com/>
55. PowerCell, *PowerCell Sweden AB*. Retrieved from <https://www.powercell.se/en/markets/cases/material-handling/ssab/>
56. Daimler, *Daimler nettside for hydrogenbiler*: Tilgjengelig på: <https://www.daimler.com/innovation/case/electric/fuel-cell-hydrogen-electromobility.html>
57. Ballard (a). *Ballard nettside*. Tilgjengelig på: <http://ballard.com/>
58. Hydrogenics. *Hydrogenics*. Retrieved from <https://www.hydrogenics.com/>
59. Hexagon. *Hexagon xperion*. Retrieved from <https://www.hexagonxperion.com/home.html>
60. USDOE. *US Department of Energy*. Retrieved from <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
61. Hydrogenics. *Hydrogenics produktoversikt*. Tilgjengelig på: <http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/mobility-power/heavy-duty>
62. Ballard (b). *Ballard produktoversikt på nett*: http://www.ballard.com/docs/default-source/motive-modules-documents/fcvelocity_hd_family_of_products_low_res.pdf
63. The National Renewable Energy Laboratory. *The National Renewable Energy Laboratory data*. Retrieved from https://www.nrel.gov/hydrogen/assets/images/cdp_lab_15.jpg
64. EU. *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking 2 Multi-Annual Work plan 2014-2020*. Retrieved from http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/legal/jtis/fch-multi-workplan_en.pdf
65. USDOE. *US DoEs mål for utvikling av brenselceller for transportapplikasjoner*. Tilgjengelig på: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>
66. Ballard (c). *Ballard blogg 29. Mars 2018*. Retrieved from <http://blog.ballard.com/latest-developments-in-fuel-cell-technology>.
67. Nel. *NEL Hydrogens produktoversikt på nett*: <https://nelhydrogen.com/products/>
68. Kyrre Sundseth, Steffen Møller-Holst, and Kjetil Midthun, *Hydrogenproduksjon ved småkraftverk. Delprosjekt 2: Flerbruk av hydrogen, oksygen og varme ved Smolten settefiskanlegg*. NVE-Rapport nr 73-2017. 2017.

- 69.UMOE. *UMOE Advanced Composites*. Tilgjengelig på: <https://www.uac.no/>
- 70.USDOE. *USDOE infobrosjyre om hydrogentransport*. Tilgjengelig på: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct_h2_delivery.pdf
- 71.Bil24. *Her krasjer de for første gang en hydrogenbil*. Tilgjengelig på: <https://bil24.no/her-krasjer-de-for-forste-gang-en-hydrogenbil/>.
- 72.Teknisk Ukeblad, *Nissan Leaf imponerer i kollisjonstest. Første modell ut i ny og strengere sikkerhetstest*. Tilgjengelig på <https://www.tu.no/artikler/nissan-leaf-imponerer-i-kollisjonstest/435728>.
- 73.BatteriRetur, *BatteriReturn. Vi gjenvinner batterier. DSB. Presentasjon i Farlig Gods Konferansen 2017*. Tilgjengelig på <https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/kurs-og-konferanser/farlig-gods-konferansen/10---litiumbatterier---transport-av-store-og-skadde-batterier.pdf>.
- 74.FFI. *Forsvarets forskningsinstitutt om batterisikkerhet*. Tilgjengelig på: <https://www.ffi.no/no/Forskningen/forsvarssystemer/NFB/Sider/Batterisikkerhet.aspx>.
- 75.Hydrogen tools. *Hydrogen Compared with Other Fuels*. Retrieved from <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>.
- 76.Domingues-Olavarría, G., et al., *From Chip to Converter: A Complete Cost Model for Power Electronics Converters*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017. **32**(11): p. 8681-8692.
- 77.Danfoss. *Editron*. Retrieved from <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/power-solutions/editron/>.
- 78.Siemens. *ELFA: Zero emissions – the cost-effective and smart way: Commercial vehicles go green!* Retrieved from <https://w3.siemens.com/topics/global/de/elektromobilitaet/PublishingImages/antriebe-pkw/pdf/commercial-vehicles-elfa-siemens-en.pdf>.
- 79.Green-Tech Media, *The Business Case for Mobile Batteries in New York*. Media release 02.03.2017. Retrieved from <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-business-case-for-mobile-batteries-in-new-york#gs.Xs0JXG8>.

30 TONNS UTSLIPPSFRI GRAVEMASKIN

TEKNOLOGISTATUS, KARTLEGGING OG ERFARINGER

Prosjektet "Zero Emission Digger" (ZED) har som hovedmål å realisere en 30 tonns beltegrave-maskin. Hensikten er å utvikle en utslippsfri maskin – fra å være et konseptdesign til å bli et kommersielt markedsledende produkt innen miljø- og klimavennlige anleggsmaskiner.

Denne underlagsrapporten beskriver kort konstruksjon, virkemåte og forventet lastprofil for en tradisjonell 30 tonns gravemaskin. Videre gis det en oversikt over tilgjengelige, relevante null-utslippsteknologier og systemer for nullutslippsdrift av kjøretøyer og maskiner generelt.

Rapporten gir en bredere oversikt over teknologistatus for miljøvennlige anleggsmaskiner basert på direkte elektrisk drift eller batteridrift, samt en gjennomgang av pågående utvikling av batteri- og hydrogenteknologi.