



Batteriteknologi for jernbanekjøretøy

Delrapport 1, NULLFIB2

Nullutslipp - batteridrift på jernbanen



Utarbeidet av: Atle Einarson, Henrik Karlsson, Johan Palm, Ludvig Hambro	Saksnummer 202000267
Godkjent av: Dag Aarsland og Geir Vadseth	Dokumentnummer 202000267-7
Dato 31.08.2021	Versjon 01
Endringslogg:	

Innhold

1	Sammendrag	5
2	Innledning	7
2.1	Problemstilling	7
2.2	Metode	7
2.3	Avgrensninger	7
3	Batteriteknologi	8
3.1	Grunnleggende batteriteknologi	8
3.1.1	Oppbygging av batterier til kjøretøy	8
3.1.2	Sentrale batteribegreper	9
3.1.3	Batteriegenskaper som påvirkes av teknologiutvikling	11
3.2	Historien bak kjøretøybatterier	11
3.3	Dagens kjøretøybatterier	12
3.4	Fremtidens kjøretøybatterier	14
3.4.1	Utvikling av litiumbatterier	14
3.4.2	Utvikling av litiumbatterityper med kobolt	15
3.4.3	Utvikling av litiumbatterityper uten kobolt	16
3.4.4	Generasjonsoversikt for litiumbatterier	16
3.4.5	Solid state-teknologi	17
3.4.6	Nye ikke-litiumbaserte batterier	17
3.5	Energitetthet	18
3.5.1	Energitetthet med henblikk på vekt	18
3.5.2	Energitetthet med henblikk på volum	20
3.6	Jernbanekjøretøy med batterier til fremdrift	21
3.7	Aktuelle konsepter for plassering av batterier i jernbanekjøretøy	22
3.7.1	Løsninger for batterilokomotiv	23
3.8	Bruk av dagens batterityper i jernbanekjøretøy	24
3.9	Eksempler på batteripakkevekt og -volum i jernbanekjøretøy	24
3.9.1	Vurdering av tilgjengelig volum for batterier i konseptet med lokomotiv	25
3.10	Utfordrende aspekter med batterikjøretøy og deelektrifisering	25
4	Rekkevidde	27
4.1	Forhold som påvirker energibehovet og energiforbruket for jernbanekjøretøy generelt	27
4.1.1	Hastighet	28
4.1.2	Topografi	28
4.1.3	Togets vekt	28
4.1.4	Adhesjonsvekt og elektrodynamisk bremsepåvirkning	29
4.1.5	Ombordsystemer	29
4.1.6	Traksjonssystemets effektivitet	30
4.1.7	Aerodynamisk utforming	30
4.1.8	Rullemotstand	30
4.1.9	Førerrådgivningssystem (DAS – Driver Advisory System)	30
4.2	Særlige forhold som påvirker energibehovet og energiforbruket for batteridrevne kjøretøy	31
4.2.1	Energimengde i batteriene	31
4.2.2	Valg av høyenergi- eller høyeffektbatterier	31
4.2.3	Ladeeffekt og ladet energi på ladestrekning	31
4.3	Infrastrukturens forutsetninger	32
4.3.1	Elektrifiseringsgrad	32
4.3.2	Ladestrekningenes lengde og plassering	33
4.3.3	Utnyttelse av fremtidige teknologiforbedringer	34
4.4	Mulig rekkevidde og nødvendig batterikapasitet i 2030	34
4.4.1	Grunnleggende resonnement rundt hva som påvirker lengden på ladestrekninger	35
4.4.2	Beregningsprosess for rekkevidde, batterikapasitet og elektrifisering	35

5	Pris.....	39
5.1	Pris på batterier for elektriske veikjøretøy	39
5.2	Etterspørsel og tilgjengelighet	41
5.3	Fremtidens priser på batterier for personbiler	42
5.4	Diskusjon av batteripris i en jernbanekontekst.....	43
5.5	Eksempel på batteripakkepriser for tog.....	44
6	Konklusjon	47
7	Kilder.....	48

1 Sammendrag

Denne delrapporten viser at det med dagens batteriteknologi er mulig med et driftsopplegg basert på batteridrift med ladesystem. Frem mot 2030 er det antatt at teknologiutviklingen vil gjøre den tilgjengelige rekkevidden for et batteridrevet motorvognssett basert på dagens løsninger i Sentral-Europa mulig også under norske forhold.

Det har vært en omfattende utvikling av batteriteknologi til kjøretøy i nyere tid, og dette er ventet å tilta videre gjennom 2020-tallet. Det forventes at Litium-ionbatterier med flytende elektrolytt fremdeles vil være markedsdominerende ved eventuell oppstart av batteritog tidlig på 2030-tallet, og at litium-ionbatterier med fast elektrolytt blir tilgjengelig for tog tidligst ved første batteribytte. En slik vurdering om tilgjengelig batteriteknologi vil heftes med mindre usikkerhet under utarbeidelsen av en eventuell hovedplan for infrastruktur. Ikke-litiumbasert teknologi kan bli aktuelt, men antakelig ikke når første generasjon batterikjøretøy eventuelt skal anskaffes.

Det finnes en rekke typer litium-ionbatterier med ulike egenskaper, avhengig av hvilken anvendelse batteriet er tiltenkt. Overordnet kan litium-ionbatterier deles inn i to hovedkategorier; høyeffekt- og høyenergibatterier. Førstnevnte innebærer et høyt lade- og effektforbruk og dermed blant annet raskere ladetid på bekostning av kortere mulig rekkevidde for kjøretøyet på grunn av lavere energitetthet. Høyenergibatterier har høyere energitetthet, og vil dermed gi lengre mulig rekkevidde, men på bekostning av kortere levetid og lavere ladeeffekt.

Energitettheten på pakkenivå for batterier til jernbanekjøretøy er ventet å øke vesentlig frem mot 2030. For høyenergibatterier er det ventet en 50 % økning, der den endelige energitettheten blant annet avhenger av hvorvidt kobolt vil anvendes i fremtidens batterier til jernbanekjøretøy. Dette materialet gir gunstige batteriegenskaper, men innebærer kritikkverdige utvinningsmetoder. For høyenergibatterier med og uten kobolt er det sannsynlig at en slik økning resulterer i en energitetthet på rundt henholdsvis 160-180 og 120-130 Wh/kg. Det er også ventet en forbedring av energitettheten i høyeffektbatteripakker til jernbanekjøretøy, som alle er uten bruk av kobolt. For denne batteritypen er det anslått en energitetthet på rundt 82-90 Wh/kg i 2030, forutsatt at NTO- erstatter dagens LTO-batterier, og dette tilsvarer energitettheten i dagens høyenergibatterier til jernbanekjøretøy. Med andre ord, vil fremtidens høyeffektbatterier til jernbanekjøretøy kunne betjene de samme strekningene som vil være mulig med dagens høyenergibatterier. I denne sammenheng er det vesentlig å trekke frem at høyeffektbatterier kan utnytte langt mer av sin totale lagrede energimengde uten at dette påvirker batteriets levetid. Dette vil kompensere delvis for den relativt lavere energitettheten i denne batteritypen sammenliknet med høyenergibatterier. Imidlertid vil en overgang til høyeffektbatteripakker til jernbanekjøretøy uavhengig av dette resultere i en høyere vekt på grunn av lavere energitetthet.

Rekkevidden for batteridrevne jernbanekjøretøy er i stor grad avhengig av energimengden som installeres, og dette begrenses av tilgjengelig volum og vekt. Det er mulig å øke den tilgjengelige energimengden ved eksempelvis å benytte et konsept med en ekstra batterivogn. Lengden på de ikke-elektrifiserte delstrekningene må sees i sammenheng med tilgjengelig rekkevidde for eksisterende batteridrevne motorvognssett i markedet, som i stor grad styres av etterspørselen i Sentral-Europa. Dette er forhold som er vesentlig å ta i betraktning dersom et slikt driftsopplegg skal velges for Norges ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger, der både topografi og klima krever et høyere energiforbruk enn i markedet dagens batteridrevne tog er utviklet for.

Det er heftet usikkerhet ved hvorvidt leverandørene av motorvognssett kan gjøre nødvendige tilpasninger innenfor dagens utviklede løsninger for å klare tilsvarende lengde på ikke-elektrifiserte strekninger i Norge som i Sentral-Europa. Derimot er det sannsynlig at videre teknologiutvikling vil føre til at dagens tilgjengelige rekkevidde på 80-120 km på ikke-elektrifiserte delstrekninger i Sentral-Europa også vil være mulig under norske forhold i 2030.

Lengden på ladestrekningene vil styres av godstogenes oppladingsbehov ettersom de krever et høyere energiforbruk, og dermed har de mest krevende ladeforutsetningene. Videre påvirkes lengden på ladestrekningene av linjens topografi og infrastrukturens begrensninger, men det er beregnet at en lengde på ladestrekningene på 20-40 km vil være tilstrekkelig. I tillegg til batteriets egenskaper, som i stor grad kommer an på hvilken batteriteknologi som benyttes, er det vesentlig å se på øvrige påvirkningsfaktorer for togenes energiforbruk for å optimalisere rekkevidden.

Prisen for batterier til jernbanekjøretøy vil være et viktig element i en samfunnsøkonomisk vurdering av driftsopplegget. Prisivurderingene som er gjort i dette arbeidet har til hensikt å drøfte prisutviklingen for batterier til jernbanekjøretøy.

Det er forventet en videre prisreduksjon av batteripakker til kjøretøy som følge av en markant økning i etterspørsel, og dermed et større produksjonsvolum. Prisen på batteripakker til jernbanekjøretøy vil imidlertid ligge betydelig over tilsvarende priser for batteripakker til kjøretøy på vei. Dette skyldes at antallet batteripakker som engangskostnader, kostnad til tilpasninger og godkjenning skal fordeles over, alltid vil være betydelig lavere enn hva som forventes for eksempel innen veitransport. En større utbredelse av jernbanekjøretøy med batterier til fremdrift, og et økt omfang av mer industriell bruk av store batteripakker, vil imidlertid kunne sørge for økt standardisering som bidrar til å trekke prisnivået ned. Utredningen viser at kostnaden for jernbanekjøretøy til batteridrift sannsynligvis vil være rimeligere enn til et fortsatt driftsopplegg basert på dieseldrift i et livsløpsperspektiv.

Batteriets ladeeffekt er kritisk for å kunne holde en ønsket kjørehastighet og lengde på ladestrekningene, ettersom en lav ladeeffekt vil medføre at batteriet har behov for mer tid for å lades opp. Dersom togenes hastighet skal økes, vil dette kreve en økning av ladeeffekten, forutsatt uendret lengde på ladestrekningen. Ladeeffekten begrenses av tilgjengelig energi til batteriene etter at annet utstyr i toget er forsynt. For tunge godstog som kjører i oppoverbakker vil det kreves mye energi til traksjon, noe som vil medføre lavere tilførsel av energi til togets batteri.

C-verdien er en batteriegenskap som angir tiden det tar å lade opp et batteri fra helt utladet til fullt oppladet, og denne påvirkes av batteriets kjemi. Ladeeffekten avhenger av batterienes C-verdi og den totale installerte energimengden. Dersom en av disse faktorene øker, vil dette resultere i økt ladeeffekt. Høyeffektbatterier har en høyere C-verdi enn høyenergibatterier og de kan dermed lades opp raskere. En høyere energimengde kan oppnås enten ved å øke energitettheten eller den installerte batterivekten. Den høyere installerte energimengden kan utnyttes til kortere ladestrekninger og/eller lengre ikke-elektrifiserte delstrekninger med batteridrift. Høyeffektbatterier har en høyere ladehastighet enn høyenergibatterier, og vil aktualiseres av videre teknologiutvikling, og dette vil gi mulighet for høyere ladeeffekt i fremtiden.

Batterienes levetid påvirkes i stor grad av hvilken batteritype som velges, og hvordan batteriene brukes. Helt overordnet så har høyeffektbatterier et lengre syklusliv enn høyenergibatterier, der det til enhver tid må installeres en større energikapasitet enn som reelt kan utnyttes. Ved lading og utlading kan det oppstå uønskede kjemiske reaksjoner som endrer batterikjemien noe. Disse reaksjonene kan oppstå hver gang batteriet brukes og omtales ofte som aldring. Aldringsprosessen foregår ofte slik at det skjer få endringer når batteriet er nytt og i utgangspunktet stort sett har ønsket kjemi, men at antall uønskede reaksjoner pr. ladesyklus øker i takt med omfanget av endret batterikjemi. De to viktigste driverne for aldringshastighet er intensitet på bruken av batteriet og antallet sykluser batteriet har gjennomgått. Batterilevetid vil for jernbaneapplikasjoner i Norge være vesentlig som følge av at batteriene som benyttes i trafikk trolig vil ha svært hyppige ladings- og utladingssekvenser, samt at jernbanekjøretøy i utgangspunktet har svært intensiv bruk.

De stadig forbedrede batteriegenskapene og pris på batteripakker for batteridrevne tog kan gi inntrykk av at det vil være hensiktsmessig å avvente en implementering av batteridrift av hensyn til lavere investeringskostnader. Imidlertid er det en rekke fordeler ved å ikke avvente videre forbedringer av batteriteknologi. Den økte energitettheten i batteriene kan utnyttes til en rekke fordeler. Dersom det bygges en infrastruktur basert på dagens batteriegenskaper blir det i fremtiden mulig med lengere levetid på høyenergibatteriene og dermed lavere driftskostnader, men også en raskere overgang til høyeffektbatterier. Høyeffektbatteriene har en lavere energitetthet, men vil da kunne benyttes, noe som innebærer lenger levetid, raskere ladetid og høyere ytelse for togenes batteripakker.

2 Innledning

Jernbanedirektoratet har gjennomført et utredningsprosjekt kalt *NULLFIB2: Nullutslipp – batteridrift på jernbanen*. Prosjektet har utredet teknologier og muligheter ved batteridrift av de ikke-elektrifiserte jernbanene i Norge; Nordlandsbanen, Rørosbanen, Solørbanen og Raumabanen.

Prosjektet har laget en overordnet hovedrapport, *NULLFIB2: Nullutslipp – batteridrift på jernbanen*, og to faglige delrapporter. Den ene delrapporten er utarbeidet av Bane NOR, og handler om hvilke krav batteridrift har til banestrømforsyningen, og hvordan dette påvirker utformingen av ladepunkter, ladestrekninger og matestasjoner. Den andre delrapporten er denne, som omhandler teknologiske og økonomiske forutsetninger for batteridrevne tog.

2.1 Problemstilling

Det er frem til i dag ikke samlet og systematisert tilstrekkelig kunnskap om batteriteknologi for tog til å vurdere batteridrift som alternativt driftskonsept på de ikke-elektrifiserte banestrekningene i Norge. Denne delrapporten tar sikte på å håndtere dette problemet, og gjør rede for hvordan batteriteknologien for tog kan utvikle seg frem mot 2030. Delrapporten gir en generell innføring i batteriteknologi, og drøfter batterityper og batteriegenskaper som er egnet for bruk i tog, prisutvikling og rekkevidde for aktuelle batterityper, og tilgjengelighet av disse batteritypene frem mot 2030. Ved siden av dette belyser delrapporten sammenhengen mellom og betydningen av å balansere ulike batteriegenskaper og ladesystem for å etablere hensiktsmessig energiforsyning.

Delrapporten svarer på følgende problemstillinger:

- Utviklingen av **pris** for batteripakker til tog
- Utviklingen av **energitetthet** for batteripakker, som sammen med andre forbedringsmuligheter vil påvirke **rekkevidden** til tog med batteripakker
- **Ladeeffekten**, altså hvor raskt batteriene kan lades
- Hvordan **levetid** påvirkes av bruksmåte og batteritype

2.2 Metode

Jernbanedirektoratet har arbeidet kontinuerlig siden oppstarten av prosjekt NULLFIB i 2019 med å opparbeide kunnskap om batteriteknologi og potensialet for bruk av batterier i tog. Det er arbeidet bredt med å søke etter kilder, og det er hentet informasjon fra et stort antall artikler, presseoppslag og vitenskapelige rapporter. Videre har Jernbanedirektoratet hatt samtaler med kjøretøyprodusenter, batteriprodusenter og brukere av utstyr som kan relateres til problemstillinger som er aktuelle for batterier til kjøretøy, samt at representanter fra Jernbanedirektoratet har deltatt på seminarer med blant annet MoZEEZ og UIC. Jernbanedirektoratets trendovervåkingsprogram har gitt informasjonsstøtte, og det er sendt ut en RFI (Request For Information) til kjøretøyprodusenter.

2.3 Avgrensninger

Denne delrapporten er avgrenset til å behandle de tekniske og økonomiske sidene ved bruk av batterier for fremdrift av tog. Sikkerhetsmessige aspekter er behandlet i prosjekt NULLFIB og pågående arbeid knyttet til MoZEES.

3 Batteriteknologi

Bakgrunnskunnskap om batteriteknologi som er nødvendig for å lese innholdet i denne delrapporten blir presentert i dette kapittelet, herunder forklaringer av sentrale begreper som blir benyttet ved diskusjon av batteriteknologi. Kapittelet gir også en innføring i de ulike batteritypene som er relevante for jernbanekjøretøy og dermed for jernbanedrift. Det vil også bli presentert hvordan utviklingen synes å bli innen de viktigste parameterne for batteridrevne jernbanekjøretøy.

3.1 Grunnleggende batteriteknologi

Et batteri brukes for å lagre elektrisk energi i form av kjemisk energi. Dette blir gjort gjennom en kjemisk reaksjon som involverer batteriets hovedbestanddeler som er *anode*, *katode* og *elektrolytt*. Når batteriet tilkobles så strømmer elektroner fra anoden til katoden. Dette skjer ettersom elektrodene (anoden og katoden) reagerer kjemisk med elektrolytten [1].

3.1.1 Oppbygging av batterier til kjøretøy

Anode

Anoden er en av de to batteripolene i et batteri. Når et batteri avgir energi så strømmer elektroner fra anoden og mot den andre polen som kalles *katode*. Anoder kan i likhet med katoder lages av forskjellige stoffer, slik som ulike metaller eller ioner. Valget av anodemateriale er med på å definere batteriets egenskaper, og er sammen med katodemateriale og elektrolytt det som omtales som batterikjemi [1].

Katode

Katoden er den andre av de to polene, eller tilkoblingspunktene, i et batteri. Fellesbetegnelsen for anode og katode er elektrode. Under lading går strømmen av elektroner den andre veien. Katoder kan lages av ulike materialer, som gir batteriet ulike egenskaper. Svært mange batterier som i dag brukes i ulike kjøretøy, benytter grunnstoffet litium i katodene. Batterier som bruker dette, er kjent som litium-ionbatterier [1].

Elektrolytt

Elektrolytt er det stoffet som er mellom elektroden og katoden, som hindrer direkte kontakt mellom elektrode og katode, men som blir elektrisk ledende og reagerer kjemisk med anoden og katoden under påvirkning av et elektrisk spenningsfelt. Elektrolytten kan være flytende som i dagens kjøretøybatterier, eller den kan være et fast stoff. Dersom elektrolytten er et fast stoff omtales batteriet som et faststoff-batteri, på engelsk et «solid-state battery».

Batteri, battericelle og batteripakke

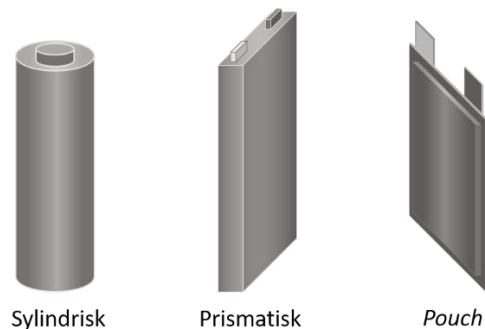
En sammensetting av en anode og en katode i en elektrolytt danner det som kalles et batteri. Dette er den enkleste formen for et batteri, og kan også kalles en battericelle. Battericellens spenning og andre egenskaper avgjøres av materialvalgene i anode, katode og elektrolytt, og mengden energi battericellen kan avgå vil avgjøres av hvor mange elektroner de materialene som er brukt har evne til å flytte på [1].

Når flere battericeller kobles sammen, kalles ofte hvert enkelt batteri for en *battericelle*. Enkeltceller settes sammen til *batterimoduler*, og et antall moduler settes sammen til en *batteripakke* [1]. Batteripakkene kan konfigureres i *serie*, *parallel* eller en blanding av begge deler for å levere ønsket spenning, effekt eller energi [2]. Det er i senere tid også foreslått løsninger der man unngår bruk av moduler, og kun har battericeller i en batteripakke.

På batteripakkenivå avgjøres pakkens fysiske egenskaper ikke bare av batterikjemien i cellene som er benyttet, men også av mekaniske og termodynamiske forhold som hvordan cellene fysisk er organisert, hvilken form cellene har og hvordan man løser behov for kjøling og mekanisk styrke/beskyttelse.

Battericelleformat

Litium-ion batterier finns i tre forskjellige celleformat; sylindriske, *pouch*-formede og prismatiske. Det finnes eksempler på batterier brukt i veikjøretøy innenfor hver type av celleformat [3].



Figur 1: Illustrasjon av de tre ulike celleformatene.

Innenfor hvert format finnes det også ulik dimensjonering, og det pågår stadig innovasjon for å få høyest mulig energitetthet. Et eksempel på dette er det sylindriske battericelleformatet, der det historisk siden 1991 har vært dimensjonen 18650 (18 mm diameter og 65 mm lengde) som har vært dominerende. I 2017 ble denne dimensjonen etterfulgt av 21700 og 20700. Det er mulig at disse to for enkelte bilmerker kan bli erstattet av dimensjonen 46800, og det finnes indikasjoner på at denne dimensjonen sammenliknet med 21700 vil gi bedre energitetthet og lavere pris.

Battery Management System - BMS

BMS er en programmerbar komponent som utfører avansert overvåking og styring av batteripakken. Det er hjernen bak batteriet og spiller en kritisk rolle i dets nivåer av sikkerhet, ytelse, ladehastigheter og levetid [4].

3.1.2 Sentrale batteribegreper

Det er en rekke begreper som diskuteres i datagrunnlaget som vil gjengis flere steder i denne delrapporten, og de er forklart i påfølgende avsnitt i dette delkapittelet.

Energimengde

Energimengden til et batteri forteller hvor mye energi som kan lagres i batteriet. Det er flere måter å angi energimengde på, men det mest vanlige for batterier er å angi det i kilowatt timer (kWh) eller megawatt timer (MWh) for enda større batterier. Gitt en batterispenning så kan det også bli presentert som ampere-timer (Ah).

Energitetthet

Energitettheten til et batteri er mengden energi pr. masseenheter eller volum. Energitettheten angir den maksimale energien som kan lagres i et batteri pr. kilogram eller pr. liter. Disse er oppgitt i henholdsvis Wh/kg og Wh/l.

Ladehastighet / C-rate

Ladehastighet oppgis som C- rate (charge rate) og er en betegnelse som brukes for å måle den maksimale oppladingshastigheten for et batteri. 1C tilsvarer 0 til 100 % på en time for opplading, mens en verdi på 3C tilsvarer at batteriene lades på 20 minutter. Eksempler på hvor lang tid det tar å lade opp 100 % av batteriets energimengde presenteres i Tabell 1.

Tabell 1: Ladehastighet (C-rate). Eksempler på hvor lang tid det tar å lade opp 100 % av batteriets energimengde.

0,5C= 120 min	1C = 60 min	1,2C = 54 min	2C =30 min	3C = 20 min	4C = 15 min	6C = 10 min
---------------	-------------	---------------	------------	-------------	-------------	-------------

Under virkelige forhold så vil C-verdien ikke være en konstant, men den vil variere avhengig av det aktuelle energinivået. Dette vil bli diskutert i kapittel 5.

Ladeeffekt

Ladeeffekten til et batteri er den maksimale effekten batteriet kan motta ved lading. Ladeeffekten avhenger av batteriets energimengde og batteriets ladehastighet. Et batteri som f.eks. har 1 MWh energimengde, og som har en C-rate på 3, vil da lade 1 MWh på 20 minutter og ha en ladeeffekt på 3 MW. Dette innebærer at batterier som skal lade en stor energimengde på kort tid, enten må ha høy C-rate eller være et batteri med stor energimengde. I begge fall vil det i en jernbanekontekst med lading av batteriene med strøm fra kontaktledningen kreve en stor strøm fra banestrømanlegget. For de batterityper som benyttes i dag er det en sammenheng mellom ladeeffekt og forventet batterilevetid som gir lavere forventet levetid ved bruk av store ladeeffekter. Dette medfører at batterier som er av typen høyenergi (forklares dypere i kapittel 3.3) ikke kan lades like hurtig som batterier av typen høyeffekt og samtidig ha lang levetid.

Utladingshastighet

Utladehastighet oppgis som D-rate og er en betegnelse som brukes for å måle den maksimale utladingshastigheten for et batteri. 1D tilsvarer en utlading fra 100 til 0 % på en time, mens en verdi på 3D tilsvarer at batteriene utlades på 20 minutter (samme prinsipp som for C-verdi). Dette vil i praksis påvirke hvor stor effekt som toget tillates å bruke og D-rate kan begrense akselerasjon og hastighet (fremst i oppoverbakker og/eller ved høye hastigheter).

Utladningseffekt

Utladeeffekten til et batteri er den maksimale effekten batteriet kan avgi til en forbruker. Utladningseffekten avhenger av batteriets energimengde og batteriets utladehastighet (D-rate). Et batteri som f.eks. har 1 MWh energimengde, og som har en D-rate på 4, vil da kunne avgi 1 MWh på 15 minutter og ha en utladningseffekt på 4 MW. Dette innebærer at et batteri som skal håndtere store effektuttak fra en forbruker enten må ha en høy D-rate eller være et batteri med stor energimengde.

Utladingsgrad

Den utladede tilstanden indikerer hvor mye batteriet er utladet i prosent av batteriets maksimale kapasitet. For de batterityper som er vanlige i dag er det en sammenheng mellom hvor ofte og hvor dypt batteriet blir utladet og hva som er forventet levetid for batteriet.

Ulike batterityper har ulike mulighet at benytte hele batterikapasiteten, hvilket i praksis innebærer at man har ulik anbefalt utladingsgrad. Typiske høyenergibatterier skal ikke utlades mer enn til omtrent 80-90 % utladingsgrad, men for høyeffekt kan hele batterikapasiteten brukes.

Syklusliv, levetid og aldring

Batteriets levetid er gitt i antall sykler. Dette er det antall ganger et batteri kan levere full energi før batteriets kapasitet reduseres til levetids slutt, det såkalte End-of-Life-punktet (vanligvis 80 prosent av den opprinnelige kapasiteten).

Ved lading og utlading skjer det uønskede kjemiske forandringer i batterikjemien som reduserer batteriets ytelser. Hvor fort og hvordan dette skjer er tett knyttet til hvilken batterikjemi det er snakk om og hvordan batteriet brukes. Antall utladinger og oppladinger, hvor dyp utladingen er, i hvilket spenn som utladingen skjer og hvor raskt det er i utlading og opplading har stor betydning for hvor raskt batteriets ytelser reduseres [5].

En fullstendig opplading og utlading av et batteri teller det som kalles for en syklus. Å bruke 75 prosent av energien én gang, deretter lade opp i kort tid for så å bruke ytterligere 25 prosent av energien, tilsvarer til sammen 100 prosent av energien, og derfor en syklus.

Selv ved det teoretiske End-of-Life-punktet, så har batteriet fremdeles mye gjenværende levetid, og kan eventuelt overhales/revitaliseres eller benyttes til andre formål.

3.1.3 Batteriegenskaper som påvirkes av teknologiutvikling

Batteriteknikken utvikles raskt, og batterienes ytelse og pris er en konsekvens av flere batteriegenskaper som stadig utvikler seg. Under presenteres kortfattet de områdene som utvikles innenfor batteriteknikk og produksjon, og hvilke konsekvenser dette får for batteriets egenskaper og pris.

Batterikjemi

Forbedrede batterikjemier og implementering av nye batterikjemier påvirker batterienes egenskaper, f.eks energitetthet, ladehastighet og behov for kjøling, og ulike egenskaper prioriteres for ulike batterier. Hvis kjemien eksempelvis utvikler mindre varme, så kan pakkingen være tettere og kjøling reduseres eller utgå.

Celleformat og pakkeformat

Battericellene kan konstrueres i ulike format, der disse har sine fordeler og ulemper. Celleformatet påvirker blant annet hvor effektivt cellene kan pakkes i en modul og pakke. Dette påvirker energitetthet i form av energi pr. vekt, men også pr. volum. Det har også påvirkning på behov av kjøling.

Det finnes indikasjoner på at visse produsenter undersøker muligheten for å ikke bruke moduler, og kun sette sammen celler til batteripakker, og at dette kan medføre høyere energitetthet pr. vekt og volum.

Battery management system (BMS)

Som tidligere nevnt så er BMS viktig for å sørge for å oppnå en god sikkerhet, ytelse og levetid. Det gjøres blant annet gjennom å overvåke temperaturen i cellene og spenningen, estimere oppladingstilstanden, styre (og begrense) effekt (både lading og utlading) og sikre jevn bruk av battericellene. Disse funksjonalitetene er noe som stadig forbedres, og spesielt siden nye batterikjemier og batteripakke-arkitekturer blir brukt.

Produksjonseffektivisering

Prisen for batterier er ikke bare avhengig av materialkostnader og utviklingskostnader, den påvirkes også av produksjonseffektiviseringer der den sterke utviklingen innenfor batteridrevne kjøretøy vil påvirke etterspørselen og produksjonskapasitet, og også produksjonseffektiviseringsmulighetene.

3.2 Historien bak kjøretøybatterier

Det er ulike typer elektriske batterier med henblikk på materialvalg, og dermed også kjemisk oppbygning av batteriene. Disse ulike typene batterier har alle sine fordeler og ulemper, hvor enkelte er mer egnet for anvendelse til elektriske kjøretøy enn andre.

Tabell 2 under sammenfatter de fire hovedgruppene av ladbare batterier, samt deres fordeler og ulemper; blybatterier, nickel-metallbatterier, nikkeldadmiumbatterier og litium-ionbatterier. *Blybatterier* er den eldste av disse typene, og er vanlig som energikilde til oppstart, belysning, tenner og nødforsyning i konvensjonelle bensin- og dieserbiler. Denne batteritypen har lav energitetthet og lavt antall sykluser (levetid). Etter blybatteriene ble *nikkeldadmiumbatteriene* (NiCd) oppfunnet, og disse har blitt benyttet i portable enheter, som for eksempel arbeidsverktøy. Denne teknologien har også en lav energitetthet (imidertid forholdsvis høyere enn i blybatteriene), og problemer med giftige substanser har medført at batteriet erstattes med nikkelmetallhybridbatterier (NiMH). Sistnevnte batterier har typisk blitt benyttet i hybridkjøretøy og gir en bedre ytelse enn blybatterier og nikkeldadmiumbatterier. Imidlertid har også denne i dag blitt erstattet av litium-ionbatterier (Li-ion), som er den mest moderne batteritypen av de nevnte. Elektriske kjøretøy blir i dag nesten utelukkende utrustet med litium-ionbatterier, og denne batteritypen har en høy energitetthet, høy effekt og lang levetid [6]. Det er litium-ionbatterier som er vurdert til å ha det største potensialet i det inneværende tiåret med henblikk på utvikling og fortsatt bruk i kjøretøyindustrien. Det er også anført at markedet for litium-ionbatterier innenfor elektriske kjøretøy er større enn innenfor mobil- og IT-applikasjoner tilsammen [7], hvilket innebærer at elektriske kjøretøy vil ha en stor påvirkning på fremtidig batteriutvikling.

Tabell 2: Oversikt over hovedgruppene av ladbare batterityper.

Batteritype	Fordeler	Ulemper	Kommentar
Blybatteri	Moden, rimelig, trygg og pålitelig teknologi [8] [9]	Kort levetid, lav energitetthet, helse- og sikkerhetsutfordringer grunnet materialvalg [9] Kort levetid både når det gjelder tid og antall sykluser [8]	Den eldste batterikjemien for ladbare batterier [6]. Batteritype som ofte benyttes for oppstart, belysning, tenning og nødforsyning i biler [6]. Teknologien antas ikke å bli helt skiftet ut, men litium-ion-teknologien vil trolig være dominerende [6].
Nikkelmetallhybridbatteri (NiMH)	Høyere energitetthet og effektuttak sammenliknet med NiCd and Blybatteri [10]. Høyere holdbarhet, og levetid/syklusliv sammenliknet med blybatteri [8] [9]. Resirkulerbart og relativt giftfri [9].	Lav energitetthet og foreldet teknologi sammenliknet med Li-ion [10]. Lav ladeeffekt og høy selvutladning [9] [8]. Høy pris [8].	Oppfunnet etter blybatteriet [6]. Den mest velutviklede teknologien anvendt for elektriske kjøretøy på begynnelsen av 2000-tallet [10]. Har vært svært utbredt til bruk i hybridkjøretøy [8].
Nikkelkadmiumbatteri (NiCd)	Robust og holdbart [6].	Svært giftig [9].	Oppfunnet etter blybatteriet, men før NiMH [6] Utdatert teknologi, og svært giftig [9]. Erstattes av NiMH batterier [6]
Litium-ion (Li-ion)	Høyere energitetthet enn andre batterityper, høy effekt, lav selvutladning, lang levetid og høy celledspenning [9] [10] [8]. Mer miljøvennlig enn flere andre batterityper ettersom litium-ionbatterier generelt bruker substanser av lavere toksisitet [11] [9].	Høy pris, batteristyring for å sikre pålitelighet og sikkerhet er avgjørende på grunn av risiko for varmeutvikling [9] [10].	Den mest moderne av de fire nevnte teknologier [6]. Den mest utbredte teknologien i dagens elektriske kjøretøy, og erstatter gradvis NiMH [6]. Kjemisk sammensetning varierer avhengig av bruksområde [8]. Har blitt den mest brukte og raskest voksende batteriteknologien, akselerert i takt med etterspørselen til elektriske kjøretøy [6].

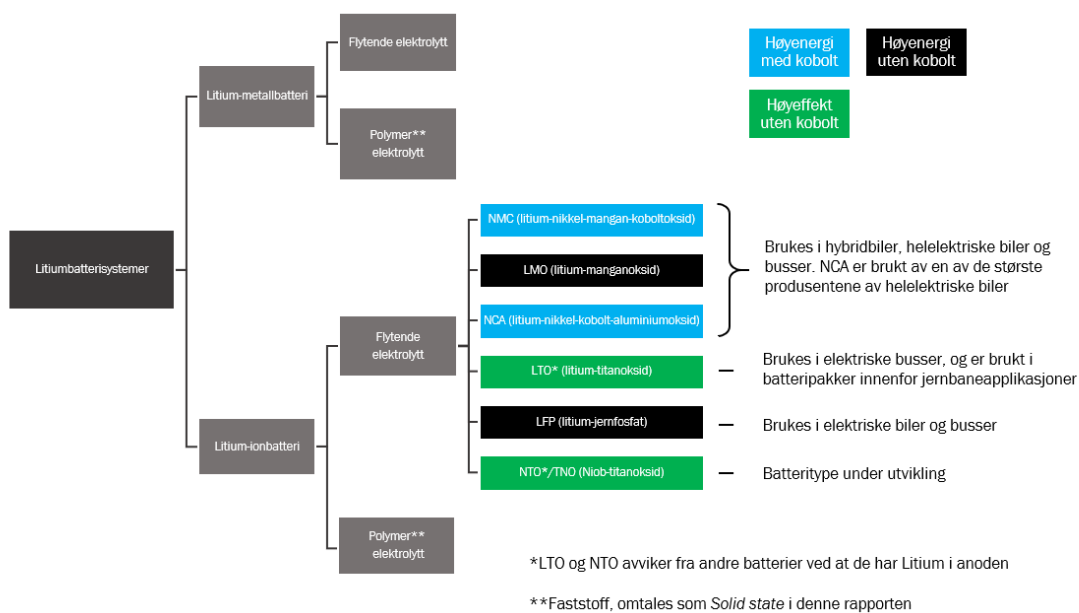
Litium-ionbatterier har flere egenskaper som er gunstige for bruk i kjøretøy, blant annet høyt energiinhold i forhold til batteriets masse, høy celledspenning, høyt antall mulige ladingssykluser og et lavt nivå av selvutladning [8], [4], [9]. Litium-ionbatterier er, med henblikk på informasjonen som fremgår i Tabell 2, den batteriteknologien som anvendes mer eller mindre utelukkende for fremdrift i dagens elektriske kjøretøy [9].

3.3 Dagens kjøretøybatterier

Det finnes ulike batterityper som kan benyttes som energikilde til kjøretøy, men i nyere tid har litiumbatterier blitt den dominerende. I dette delkapittelet blir det redegjort for hvorfor denne batteritypen er særlig egnet til kjøretøy og hvilke varianter som er på markedet eller under utvikling.

Litiumbatterier er en familie av ulike batteriteknologier, og kan inndeles i to hovedgrupper; litiummetallbatterier og litium-ionbatterier. Videre kan de begge deles inn i *flytende elektrolyttbatterier* og *litiumpolymerbatterier (solid state-batterier)*. Figuren nedenfor illustrerer de ulike typene batterier innenfor litiumbasert batteriteknologi. Det er vanligvis materialet i katoden som angir forkortelsen for litium-ionbatteriet [1].

Innenfor batteriutvikling er det også et stort spørsmål om hvorvidt også kobolt vil bli benyttet fremover. Det kan derfor være naturlig å dele opp batteriene i tre kategorier; høyenergi med kobolt, høyenergi uten kobolt og høyeffekt uten kobolt. Som det fremgår av Figur 2, så blir ikke kobolt benyttet i høyeffektbatterier.

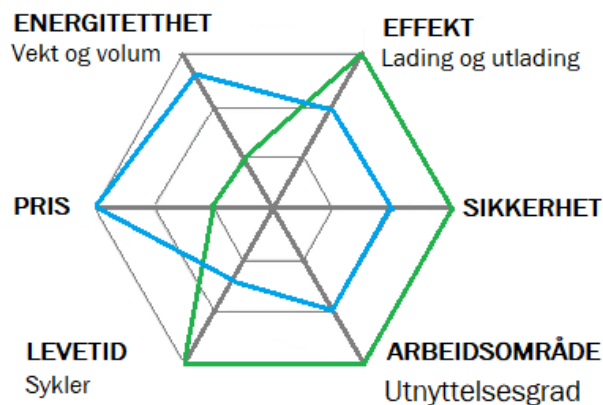


Figur 2: Ulike typer av litiumbatterier. Informasjon fra [4] og [12].

Litium-metallbatteriteknologi er lite beskrevet i det tilgjengelige datagrunnlaget som ligger til grunn for denne rapporten. Som det fremgår av generasjonsoversikten som blir vist i kommende delkapittel 3.4.4, så er det forventet at litium-metall blir et mulig anodemateriale i 4b *solid state* tidligst 2025 og 4c *advanced solid state* i 2030. Enkelte av de største batteriprodusentene har også indikert at de utvikler ny litium-metallbatteriteknologi, imidlertid i mer enn et tiårsperspektiv.

Solid state-teknologien (vist som *polymer* i Figur 2) forklares i et eget påfølgende delkapittel dels på grunn av at batteridrift av jernbanekjøretøy står seg med tradisjonell litium-ionbatteriteknologi (flytende elektrolytt) og dels på grunn av at det er heftet usikkerhet ved om teknologien vil være tilgjengelig for jernbanekjøretøy så tidlig som i 2030.

Batteriene er vanligvis optimalisert for enten å gi høy energi eller høy effekt, ettersom disse to egenskapene må veies mot hverandre. Høyenergi er for det meste brukt innenfor portable enheter med lavt effektbehov og helelektriske biler. Høyeffekt er for det meste anvendt til elektriske verktøy og annet utstyr med et høyt effektbehov, men også til hybridbiler [13] [14] og busser. Figur 3 nedenfor viser de typiske egenskapene for høyenergi- (blå) og høyeffekt (grønne) litium-ionbatterier.



Figur 3: Illustrasjon av typiske egenskaper for høyenergibatterier (blå) og høyeffektbatterier (grønn). Notere at et høyere verdi er bedre.

Valget av batteritype til kjøretøy har svært mye å si for rekkevidde, ladehastighet, energitetthet, levetid og pris. Dersom lang levetid eller høy effekt er de prioriterte egenskapene, så velges høyeffektbatterier (grønn i Figur 3) eksempelvis LTO-batterier (se navn på forkortelser i Figur 2) som har høy effekt, men da vil kjøretøyet få en kortere rekkevidde på grunn av en lavere energitetthet, dvs. en lavere energimengde pr. vekt og volum. På den andre siden kan lang rekkevidde prioriteres ved høyenergi-batterier, for eksempel NMC-batterier, men dette medfører en kortere levetid. Ladetiden er svært ulik for nevnte to batterityper, LTO-batteriene (som er av typen høyeffekt) kan lades hurtigere opp, dvs. at de kan gi mulighet for kortere tid på ladestrekning. Disse avveiningene er vesentlige å ha kjennskap til ved anskaffelse av kjøretøy for å velge type litium-ionbatteri tilpasset banestrekningene, tilpasset energibehov, andel ønsket elektrifiseringsgrad og ønskede batteridriftsegenskaper.

3.4 Fremtidens kjøretøybatterier

Som det fremgår av forrige delkapittel, så er litium-ionbatterier med flytende elektrolytt ansett som den mest aktuelle batterikategorien til anvendelse i kjøretøy dette tiåret, og av den grunn vil det i dette delkapittelet redegjøres for utviklingen og etterspørselen av de ulike batteriene innenfor denne kategorien, og hva som kan forventes av utvikling videre. Det forventes ikke at batterier med fast elektrolytt er tilgjengelig for jernbanekjøretøy ved den tidspunkt batteritog tidligst kan bli realisert i Norge.

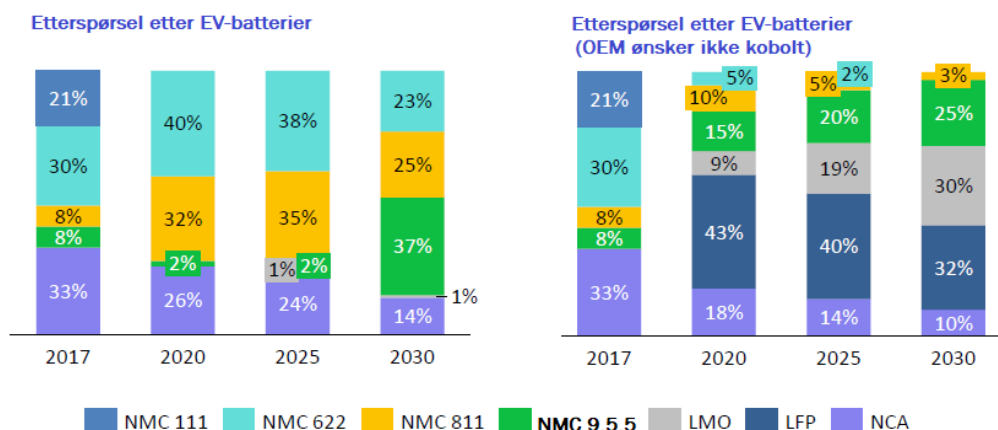
3.4.1 Utvikling av litiumbatterier

Kobolt er et både sjeldent og kostbart grunnstoff som benyttes i høyenergibatterier listet opp i Figur 2 over, med unntak av LMO- (litium-manganoksid) og LFP-batterier (litium-jernfosfat). Det finnes innvendinger fra både industrien, kundene og ulike organisasjoner mot bruk av kobolt i batterier, ettersom en stor del utvinnes under kritikkverdige arbeidsforhold i Kongo.

LFP-, LMO- og LTO-batterier (den sistnevnte et høyeffektbatteri) er alle koboltfrie. En ulempe med å ikke benytte kobolt i batteriet er at energitettheten blir lavere enn kjemier med kobolt, som eksempelvis NMC- eller NCA-batterier. NMC- og NCA-batterier er de dominerende batteritypene anvendt i kjøretøyindustrien. De nevnte koboltfrie batteriene gir på grunn av sin lavere energitetthet dermed en lavere rekkevidde. Imidlertid kan koboltfrie batterier fungere i en jernbanesammenheng med delelektrifisering som driftskonsept, på grunn av andre gunstige egenskaper der målet i større grad kan være sikkerhet, pris, ladehastighet og levetid, og ikke nødvendigvis maksimert energimengde innenfor gitt volum og vekt. Videre forventes også en forbedring av energitetthet også for koboltfrie batterier, noe som styrker argumentet for å vurdere dem til bruk i jernbanesammenheng. Figuren nedenfor illustrerer den prognoserte etterspørselen på litium-

ionbatterityper, både med og uten kobolt. Det er sterke argumenter for at marked og politikk kan forårsake at LFP og LMO vil kunne overta mye av NMC batteriene sin andel i 2030.

Batteritypene som er listet nedenfor beskrives videre i dette kapittelet. I tillegg beskrives nye batterityper som ikke blir nevnt i Figur 4.



Figur 4: Prognoser for etterspørsel etter litium-ion batterityper, med og uten kobolt. Bilde fra [15]. OEM står for Original Equipment Manufacturer.

3.4.2 Utvikling av litiumbatterityper med kobolt

- **NMC-batterier (litium-nikkel-mangan-kobolt-oksiddbatterier):** Finnes i dag i mange varianter, og numrene 111/333, 523, 532, 622, 712, 811 brukes til mange forskjellige helelektriske biler og plug-in hybrider.
 - **NMC 111** er generasjon 2a-batterier, jfr. Tabell 3: Forventes ikke å bli benyttet etter 2025 [16].
 - **Videreutvikling av NMC 622 - NMC 811 / Litium Si (silisium):** Dette er generasjon 3a og 3b utgjør store markedsandeler hvis kobolt fortsatt skal brukes [15]. Det nye er at det tilføres silisium på anoden av karbon eller grafitt. Det finnes indikasjoner at ledende produsenter av elektriske biler vil benytte silisium i anoden, noe som medfører en høyere energitetthet i- og raskere ladehastighet av batteriene. [16].
 - **NMC 9.5.5:** Batteritypen som er etterfølgeren av NMC 811 har også navnet NCM 90. Slike batterier har en høy andel nikkel, noe som resulterer i en høyere energitetthet. Minst én leverandør av elektriske personbiler har pågående samarbeid med batteriprodusentene for å se på mulighetsrommet for bruk av denne batteritypen før 2025, avhengig av i hvor utstrakt grad kobolt vil brukes i fremtiden. [17].
- **NCA-batterier (litium-nikkel-kobolt-aluminium-oksiddbatterier):** Denne batteritypen benyttes i utstrakt grad til elektriske veikjøretøy. Imidlertid er det ventet at den relative etterspørselen vil synke til fordel for NMC- og LFP/LMO-batterier, jfr. Figur 4. NCA-batterier har vanligvis en sammensetning av 80 % nikkel, 15 % kobolt og 5 % aluminium. Det er kjent at minst en av de store batteriprodusentene har planer om masseproduksjon av batteritypen, og at den er ventet å gi en rekkevidde på over 600 km for personbiler, og dette styrker batteritypens relevans i fremtiden. [18] [19].
- **NCMA-batterier (nikkel-kobolt-mangan-aluminium-oksiddbatterier):** NCMA-batterier produseres av minst én av de store batteriprodusentene, og antas å komme på markedet fra rundt år 2022. Sammenliknet mot NCA-batterier, så har denne typen batterier høyere andel nikkel (90 %) og lavere andel kobolt (5 %), mens de på samme tid har en høyere energitetthet [20].
- **Grafénbatterier:** Grafén er et nanomaterial laget av karbon. Det er i august 2021 blitt markedsført at en kinesisk produsent vil levere personbiler med grafénbatterier [21]. Batteriet vil trolig være

et NMC-batteri [22], men anoden vil endres fra grunnstoffet karbon til grafén. Ettersom dette er en type høyenergibatteri, er forbedringen av C-verdien svært sentral, og denne anslås til en verdi på 6. Dette innebærer en dobling av C-verdien sammenliknet med verdien som oppnås i dagens NMC- eller NCA-batterier. Videre så har batteriene, under testing, oppnådd en ladeeffekt på 481 kW, og det antydes at egenskaper som pris, levetid og rekkevidde vil forbedres. Det foreligger imidlertid ikke konkrete tall eller verdier på dette på det nåværende tidspunkt.

3.4.3 Utvikling av litiumbatterityper uten kobolt

- **LTO-batterier (litium-titan-dioksidbatterier):** Dette er en type høyeffektbatteri. Betegnelsen litium-titan gjelder anodematerialet. LTO-batterier har lav energitetthet som følge av lav nominell cellespenning. Batteritypen tåler rask lading og utlading og har lang levetid. Denne batteritypen er allerede testet og benyttet for fremdrift av jernbanekjøretøy.
- **NTO-batterier (niob-titan-oksiddbatterier) eller TNO-batterier (titan-niob-oksiddbatterier):** NTO- og TNO-batterier er et alternativ til karbon og LTO-batterier. De antas av produsentene å ha raskere ladetid og bedre sikkerhetsegenskaper enn grafittbatterier, og opptil tre ganger høyere energitetthet pr. volum enn LTO-batterier. Tilgjengelig underlag peker på at denne batterikjemien kan erstatte dagens LTO-batterier for jernbanekjøretøy i fremtiden [23] [24].
- **LFP-batterier (litium-jern-fosfatbatterier) og LFMP-batterier (litium-jern-mangan-fosfatbatterier):** LFP- og LFMP-batterier er to batterityper som inneholder litium og jernfosfat, og sistnevnte inneholder også mangan. Denne sammensetningen av batterikjemi øker energitettheten i batteriet. Disse batteritypene har omtrent 200Wh/kg i energitetthet, hvilket kan sammenlignes med dagens NMC- og NCA-batterier som befinner seg i området 300 Wh/kg. [16]. LFP- og LFMP-batterier har høy effekt, god sikkerhet og tåler rundt tre ganger flere sykler enn NMC-batterier. Prisen for LFP-batterier er cirka 25 % lavere enn for NMC-batterier. Det finnes underlag som anslår at LFMP-batterier kan få en stor markedsandel hos kommersielle kjøretøy, busser og ferjer, der det etterspørres en lang levetid og høy sikkerhet for batteriene. Det pekes på at denne batteritypen vil ha en høyere energitetthet i fremtiden, og dermed kan få en renessanse i kjøretøyindustrien. En av de store produsentene av elektriske veikjøretøy vil sannsynligvis i fremtiden benytte seg av LFMP-battericeller. En fordel med denne batteritypen er at den er svært sikker, og dermed kreves det et mindre komplekst temperaturstyringssystem (*Thermal Management System* - TMS) [25].
- **LMO-batterier (litium-mangan-oksiddbatterier) og LNMO-batterier (litium-nikkel-mangan-oksiddbatterier):** I disse batteritypene er katoden i batterikjemien basert på manganoksidkomponenter, som resulterer i en bedre termisk stabilitet. LNMO-batterier er en videreutvikling av LMO-batterier, som har lav energitetthet. De har imidlertid tilført rundt 30 % nikkel for å øke energitettheten. Endringene vil redusere kostnadene vesentlig sammenliknet med NMC 811-batterier. Det er en rekke store selskaper som antyder at denne batterikjemien vil bli godt egnet for tungtransport, tog og skip, og at kjemien er å betrakte som en fremtidig valgbar generasjon lithium-ionbatteri. Videre, så er det også etablert et felles europeisk samarbeid, kalt COBRA, der LNMO-batterier utvikles, og det forventes at dette vil styrke Europas markedsposisjon innen batteriutvikling [26].

3.4.4 Generasjonsoversikt for litiumbatterier

Litiumionbatteriteknologien er i rivende utvikling, og er normalt inndelt i generasjoner som vist i Tabell 3 nedenfor. Generasjon 1 til 3a representerer dagens teknologi, mens de øvrige generasjonene er forventede trinn i den videre utviklingen. Det fremgår av tilgjengelig underlag at litiumbatteriteknikken frem til generasjon 3 vil utgjøre merparten av produksjonen og markedet, og vil bestå som den sentrale teknologien de kommende 10- 20 årene frem mot 2030 og 2040 [27].

Som det fremgår av tabellen, så er litium-metallbatterier (faststoff batterier) tenkt anvendt som anodemateriale i generasjon 4a. Dette forventes senere enn 2025, og forsterker bildet av at det i de neste ti årene vil være lithium-ionbatterier med flytende elektrolytt som sannsynligvis kommer til å dominere markedet.

Tabell 3: Oversikt av batterigenerasjoner hentet fra EU-kommisjonen [28].

Battery Generation	Electrodes active materials	Cell Chemistry / Type	Forecast market deployment
Gen 1	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: LFP, NCA • Anode: 100% carbon 	Li-ion Cell	current
Gen 2a	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: NMC111 • Anode: 100% carbon 	Li-ion Cell	current
Gen 2b	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: NMC523 to NMC 622 • Anode: 100% carbon 	Li-ion Cell	current
Gen 3a	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: NMC622 to NMC 811 • Anode: carbon (graphite) + silicon content (5-10%) 	Optimised Li-ion	2020
Gen 3b	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: HE-NMC, HVS (high-voltage spinel) • Anode: silicon/carbon 	Optimised Li-ion	2025
Gen 4a	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode NMC • Anode Si/C • Solid electrolyte 	Solid state Li-ion	2025
Gen 4b	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode NMC • Anode: lithium metal • Solid electrolyte 	Solid state Li metal	>2025
Gen 4c	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode: HE-NMC, HVS (high-voltage spinel) • Anode: lithium metal • Solid electrolyte 	Advanced solid state	2030
Gen 5	<ul style="list-style-type: none"> • Li O₂ – lithium air / metal air • Conversion materials (primarily Li S) • new ion-based systems (Na, Mg or Al) 	New cell gen: metal-air/ conversion chemistries / new ion-based insertion chemistries	>2030

3.4.5 Solid state-teknologi

Solid State-teknologi vil kun omtales kortfattet i denne rapporten, dels ettersom en anbefaling om nullslipp med batteridrift står seg med tradisjonell, litium-ionbatteriteknologi og dels fordi det råder en usikkerhet om hvorvidt *solid state*-teknologien vil være tilgjengelig for anvendelse til jernbanekjøretøy. *Solid state*-batteriteknologi tilbys ikke for jernbanekjøretøy og derfor er også informasjonen svært begrenset.

Teknologien har blitt anvendt i kjøretøysammenheng i et begrenset omfang, og foreløpig har det ikke blitt oppnådd noen store forbedringer sammenliknet mot litium-ionbatterier med flytende elektrolytt og teknologien har enkelte utfordringer. De tre fremste utfordringene er høye kostnader, utfordringer ved lave temperaturer og dendrittdannelser ved lagring. Sammenliknet med dagens litium-ionbatterier med flytende elektrolytt, så forventes det at energitettheten i *solid state*-batterier i fremtiden vil doble seg og at ladehastigheten vil være forbedret sammenlignet med høyenergibatterier. Man slipper også plasskrevende varme- og kjølesystemer og eliminerer faren for brann dersom batteriene kortslutter. Varmeutviklingen er hele 70 % – 80 % prosent lavere [29]. Det er også nevnt av forskjellige selskaper at energitettheten på cellenivå for slike batterier kan nå nivåer på mer enn 350 Wh/kg og 1000 Wh/l [27].

3.4.6 Nye ikke-litiumbaserte batterier

På lengre sikt er det ifølge en rapport fra bransjeorganisasjonen VDMA i Tyskland, som adresserer batteriproduksjonsutviklingen, flere ikke-litiumbaserte batterikjemier som kan være aktuelle til bruk i kjøretøy [27]. Disse blir presentert nedenfor, men vil ikke bli diskutert dypere, ettersom utviklingen foreløpig pågår i form av forskning på cellenivåredegjort for ytterligere, ettersom utviklingen foreløpig pågår i form av forskning på cellenivå, og at det fortsatt er heftet stor usikkerhet ved tekniske løsninger og eventuelt tidspunkt for kommersialisering.

- Natrium-ionbatteri
 - Sodium dekker 2.6 % av jorden og anslås å ha rundt 90 % lavere pris enn litium.
- Metall-Svovelbatteri
 - Kan tenkes benyttes med Solid-state elektrolytt
- Metall-luftbatteri
- Redox-flowbatteri
- Bly-karbonbatterier
- Organiske batterier

3.5 Energitetthet

En økning av energitettheten i batteriene anses for å være den forbedringen som vil ha størst påvirkning på kjøretøyenes rekkevidde. Av den årsak er det av interesse å redegjøre for hvordan dagens energitetthet ser ut, og hvordan den kan komme til å se ut i fremtiden. Energitetthet måles med henblikk på både volum og vekt. Energitetthet med henblikk på vekt er vurdert som mer kritisk enn til volum, ettersom akselvekt på tog vurderes som den mest begrensende faktoren for alle typer kjøretøy. Energitetthet med henblikk på volum kan imidlertid påvirke hvilke konfigurasjoner av batteripakker i godslokomotiv som vil være mulige.

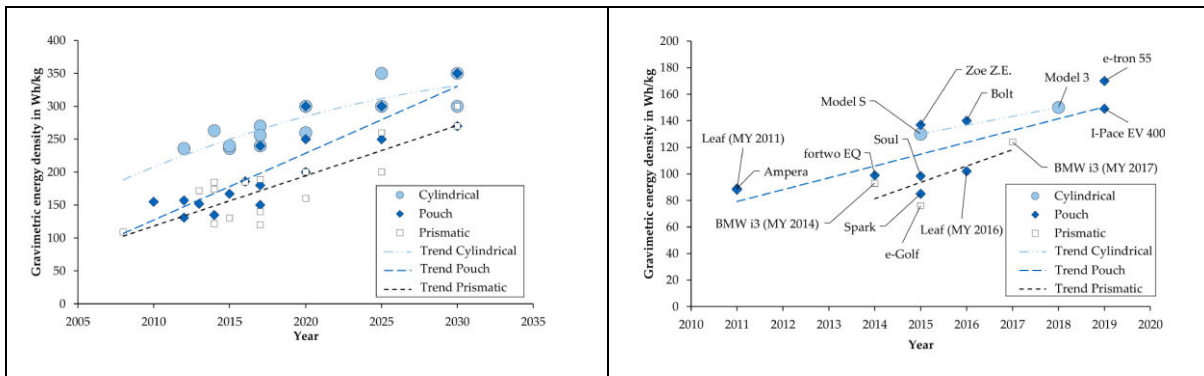
Kontinuerlig utvikling og forbedring av energitetthet er i seg selv ikke avgjørende for at konseptet batteridrift med ladesystem skal være et valgbart alternativ. Dersom infrastrukturen som blir bygget er tilpasset tilgjengelig teknologi og energitetthet på tidspunktet for idriftsettelse vil konseptet fungere, og eventuell videre utvikling og forbedring av energitettheten vil kunne bidra til å styrke konseptet med forbedret levetid for batterier, økt robusthet og lavere batterikostnader.

3.5.1 Energitetthet med henblikk på vekt

Først diskuteres dagens energitetthet på cellenivå og for år 2030. Diskusjonen er basert på data fra veikjøretøy. Det blir også diskutert relasjonen mellom energitetthet på cellenivå og pakkenivå, noe som er vesentlig ettersom det er batteripakkene som er produktene som blir installert i kjøretøyet. Dette følges av en drøfting av hvordan energitettheten spesifikt for tog ser ut i dag, og hvordan den kan komme til å se ut i 2030.

Energitettheten i batterier for personbiler frem mot 2030

Figur 5 nedenfor er hentet fra rapport av König et al. [3] og viser hvordan energitettheten har utviklet seg i bilindustrien med henblikk på helelektriske veikjøretøy innenfor NMC- og NCA-kjemi, som er de mest utbredte batterikjemiene. Figuren skiller mellom sylindriske-, prismaticke- og pouch-formater (vist med hver sin farge), og mellom battericellenivå (venstre graf) og batteripakkenivå (høyre graf).



Figur 5: Energitetthet med henblikk på vekt på cellenivå (venstre) og på pakkenivå (høyre) for NMC og NCA batterier. Bilde fra rapport av König et al. [3].

Den venstre grafen i figuren viser utviklingen på battericellenivå. Det fremgår at prismaticke celler har hatt en økning i energitetthet fra ca. 125 Wh/kg i 2010/2012 til ca. 200 Wh/kg i 2020. Pouch-battericeller viser en liknende, men noe svakere, trend. Det fremgår også at utviklingskurven er svakere for sylindriske battericelleformater. Imidlertid er det viktig å belyse at sylindriske battericeller tidligere har hatt en høyere tetthet, der det i rundt år 2012 var nesten dobbelt så høy energitetthet i sylindriske battericeller sammenliknet med de to øvrige formatene. Helt overordnet kan det fastslås, på bakgrunn av trenden man har sett historisk, at forskjellene i energitetthet mellom de tre ulike formatene minker frem mot 2030. I rapporten fra VDMA oppgis det at de mest velutviklede sylindriske cellene har en energitetthet på omtrent 270 Wh/kg, og at energitettheten forventes å være høyere enn 300 Wh/kg i fremtiden [27]. I henhold til Figur 5 varierer energitettheten på battericellenivå mellom 200 Wh/kg og 300 Wh/kg, og samme kilde peker på at en verdi opp mot 350 Wh/kg kan bli aktuell i 2030 [3].

Den høyre grafen i Figur 5 viser utviklingen på pakkenivå. Ved sammenlikning mot battericellenivået i grafen ved siden av, så fremgår det at det i 2020 samlet sett er en energitetthet på om lag 250 Wh/kg på battericellenivå og 150 Wh/kg på pakkenivå. Dette er en faktor på 0,6, og en reduksjon på rundt 40 % når perspektivet løftes fra cellenivå til pakkenivå. Löbberding et al. viser til en tilsvarende faktor på rundt 0,5 til 0,6 [30]. I samme rapport fastslås det at energitetthet på pakkenivå mellom 2010-2020 har gått fra 75 Wh/kg til 150 Wh/kg, og dermed en tilsvarende utvikling for batterier til veikjøretøy som fremgår i Figur 5 ovenfor fra König et al. Rapporten fra VDMA diskuterer også forskjellen i energitetthet mellom cellenivå og pakkenivå, og der oppgis en reduksjon på mellom 20-50 % fra cellenivå til pakkenivå, avhengig av celleformat [27].

I tillegg til å se på den historiske utviklingen for å vurdere hvilken vei trenden går, så har Jernbanedirektoratet sett på flere ulike kilder som til sammen danner grunnlaget for en prognose for videre utvikling. Som det fremgår av Tabell 4 nedenfor, så er det på bakgrunn av informasjon fra de ulike kildene fastsatt en snittverdi. Tallene gjelder på battericellenivå, og for personbiler.

Tabell 4: Energitetthet (Wh/kg) på cellenivå basert på 4 ulike kilder, og lengst til høyre er en representativ verdi.

	Hans-Böckler-Stiftung [31]	Battery2030: (November 2019) [32]	Institute of University of Munich [3]	VDMA [27]:	Rimelig anslått snittverdi
2020	150 (gen2a) 180 (gen 2b) 250 (gen 3b)	250 (Japan NEDO)	240 (snittverdi mellom formatene)	150-310 (basert på figur fra Thielmann 2017)	240
2030	300, 400, 500 (Solid state gen 4a, 4b, 4c)	500 (Japan NEDO)	311 (snittverdi mellom formatene)	275-350 (basert på figur fra Thielmann 2017)	325

Som det fremgår av tabellen, så forventes det at battericelletettheten kan forbedres med 35 % fra 2020 til 2030. Dersom det ses utelukkende på NMC- og NCA-batterier, så er dagens energitetthet på mellom 150 Wh/kg og 310 Wh/kg, avhengig av blant annet celleformat, og det er kilder som anslår at energitettheten på cellenivå i et optimistisk anslag kan være over 350 Wh/kg allerede i 2025 [3], og enkelte kilder anslår en verdi på opptil 450 Wh/kg i 2030 [28]. 350 Wh/kg i 2025 utgjør en forbedring på nesten 50 % sammenliknet med en snittverdi på 240 kWh/kg i 2020.

Mulig økning av energitetthet for batteripakker til jernbanekjøretøy frem mot 2030

Energitettheten i NMC- og NCA-batterier til elektriske veikjøretøy, i denne kontekst personbiler, er betydelig høyere enn for traksjonsbatterier i jernbanekjøretøy. Det finnes produsenter av batteripakker som har produkter utviklet spesielt for jernbanekjøretøy, og det er mulig at batteripakker for tog vil følge utviklingen som har funnet sted innenfor busstransport, men utviklingen antas å gå noe mindre hurtig ettersom markedsetterspørselen for batteridrift av busser er høyere enn for tog.

Hvis det tas utgangspunkt i høyenergibatterier med kobolt, så kan det anføres at det er i dag mulig å anskaffe batteripakker for jernbanekjøretøy med en energitetthet på rundt 80-90 Wh/kg (på pakkenivå), og basert på den mulige forbedringen frem mot 2030, som det i dette delkapittelet redegjøres for, er det antatt at en dobling til rundt 160-180 Wh/kg er et optimistisk anslag for 2030. Videre anslås cirka 120-130 Wh/kg, altså en økning på 50 %, som et mer konservativt anslag basert på at det allerede i 2020 finnes personbiler med 150 Wh/kg.

For høyenergibatterier uten kobolt så kan det anslås at energitettheten for LFP-batterier er cirka 65-70 % av det den er hos NMC-batterier, som inneholder kobolt. Dette vil, med utgangspunktet i at høyenergibatterier med kobolt har cirka 160-180 Wh/kg, resultere i at høyenergibatterier uten kobolt (antatt at LFP-batterier er representativt for denne kategori) vil ha 105-115 Wh/kg i et optimistisk anslag og 75-85 Wh/kg i et

konservativt anslag i 2030. Jernbanedirektoratet er gjort kjent med at det med stor sannsynlighet vil bli produsert LMNO-batterier for tog i det inneværende tiåret.

Høyeffektbatterier, som alle er uten kobolt, anslås å ha en celletetthet på 75-100 Wh/kg i 2019 [5], og basert på dette er det antatt en pakketetthet på 43-50 Wh/kg i 2020 og 82-90 Wh/kg i 2030. Denne økningen forutsetter at LTO- vil erstattes av NTO-batterier. Uten en slik erstatning så kan det argumenteres for et konservativt anslag på rundt 65-70 Wh/kg i 2030.

3.5.2 Energitetthet med henblikk på volum

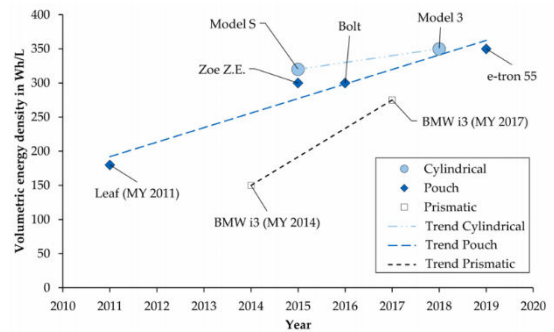
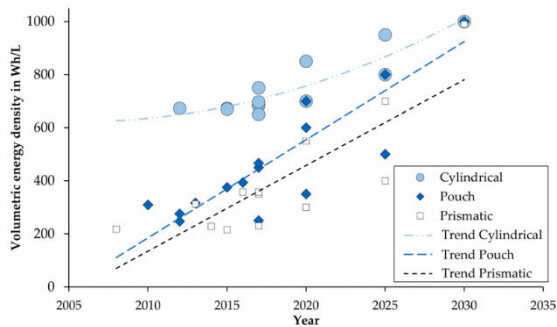
Volum vurderes av jernbanekjøretøyprodusenter til å være en mindre kritisk faktor sammenlignet med vekt for de fleste typene av jernbanekjøretøy. Imidlertid aktualiseres energitetthet pr. volum ved vurdering av de ulike plasseringene av batteripakker i lokomotiver og batterivogn, og det er av interesse å få en forståelse for hvor stort et batteri for bruk innenfor jernbanekjøretøy vil være.

Hvordan battericellene struktureres i moduler og pakker påvirker i stor grad den resulterende tettheten på pakkenivå, og dette utgjør en motivasjon for videre innovasjon hos jernbanekjøretøyprodusentene, eksempelvis innenfor forbedringer av integrasjonen av battericellene i den samlede pakken. Med andre ord så er ikke bare celleformatet av betydning for energitettheten, men også hvordan batteriene pakkes i batteripakken med eventuell bruk av ulike moduler, samt effektiv integrering av andre nødvendige system som styring og kjøling [27].

Figur 6 nedenfor viser energitettheten for NMC- og NCA-batterikjemier for personbiler med henblikk på volum på celle- og pakkenivå. Som presentert i figuren så er det en stor variasjon på cellenivå, på anslagsvis 400-800 Wh/l i 2020. Andre kilder belyser at sylindriske celler har en tetthet på opptil 750 Wh/l, mens *pouch*-baserte og prismatiske celler har nærmere 500 Wh/l [27], noe som bekreftes av verdiene i Figur 6. Det er også gjort en sammenstilling av middelverdier av König et al. som viser celletettheter på omtrent 775, 550 og 425 Wh/l for henholdsvis sylindriske, *pouch*-baserte og prismatiske celler [3]. Det kan konstateres at det er stor variasjon mellom ulike celleformater, der sylindriske har den høyeste tettheten, etterfulgt av henholdsvis *pouch*-formede og prismatiske.

På pakkenivå er tallene mindre sprikende sammenliknet med cellenivå, og de seneste veikjøretøyene viser en tetthet på omtrent 350 Wh/l i 2020, slik det også fremkommer i Figur 6. Det kan anslås at energitettheten med henblikk på volum mellom cellenivå og pakkenivå minsker med cirka 20 % for prismatiske pakker, 30-50 % for *pouch*-baserte pakker og omtrent 50 % for sylindriske pakker [27]. Dette vil, basert på tidligere nevnte celletettheter (775, 550 og 425 Wh/l), resultere i at sylindriske celler på pakkenivå gir en tetthet på cirka 380 Wh/l, *pouch*-formede celler gir 330 Wh/l og prismatiske celler omtrent den samme som *pouch*-formede i 2020.

Det finnes indikasjoner på at sylindriske celler kan nå opptil, og *pouch*-formater vil ha omtrent, 1000 Wh/l på cellenivå i 2030. For prismatiske formater vil nivået være noe lavere, og sannsynligvis rundt 800 Wh/l [27]. På pakkenivå vil dette, basert på samme reduksjonsfaktor som tidligere anvendt, resultere i en mulig tetthet på 500 Wh/l for sylindriske celler, og omtrent den samme for *pouch*-baserte celler, mulig noe høyere hvis en reduksjonsfaktor på 30 % i spennet 30-50 % blir anvendt. For prismatiske battericeller anslås energitettheten til å bli 600 Wh/l med tilsvarende utregning lagt til grunn. Imidlertid er det usikkert om dagens reduksjonsfaktorer vil holde seg gjeldende i takt med at disse batteriformatene stadig utvikles, og det er dermed usikkert hvilket batteriformat som vil gi den høyeste energitettheten i fremtiden. Uavhengig av dette, så er det rimelig å anta at det, basert på informasjonen det her har blitt redegjort for, sannsynlig at forskjellene i energitetthet på pakkenivå mellom de ulike formatene vil minske, og at et optimistisk anslag på energitetthet i 2030 vil være 500 Wh/l, og et konservativt anslag omtrent 400 Wh/l.



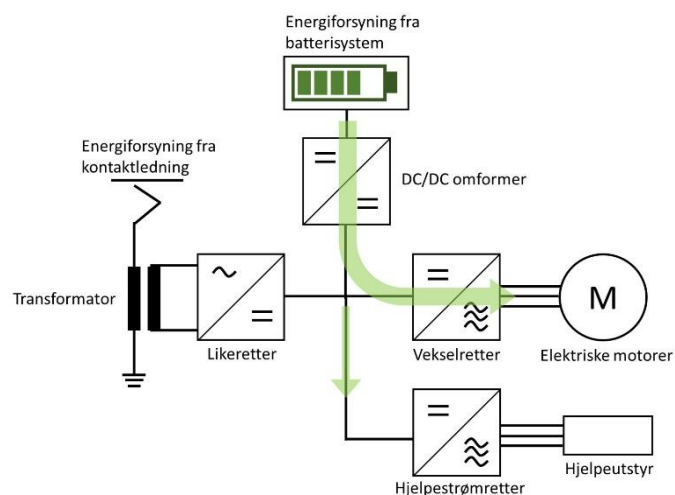
Figur 6: Energitetthet med avseende på volum på cellenivå (venstre) og på pakkenivå (høyre) for NMC og NCA batterier. Bilde fra rapport av König et al. [3].

Som tidligere redegjort for, så er energitettheten med henblikk på volum i batterier til jernbanekjøretøy langt lavere enn til personbiler. Det antas at en pakketetthet i spennet 300-400 Wh/l ikke vil kunne oppnås i dagens tilgjengelige jernbanekjøretøy, og videre er det heftet usikkerhet ved hvorvidt energitettheten vil være tilgjengelig i 2030 for jernbanekjøretøy. Basert på offentlig informasjon fra batterisystemleverandører og forankring hos jernbanekjøretøysleverandører, så er det rimelig å anslå at det i dag er mulig med en energitetthet på 100-150 Wh/l. Denne relativt lave energitettheten sammenliknet med veikjøretøy har sin forklaring i at batteripakker for tog vil ha høye krav til sikkerhet og tilgjengelighet, noe som stiller høye krav til utstyr for kjøling og styring av batteriene. Videre kreves det også volum for annet utstyr, som eksempelvis tilkoblinger. Det er heller ikke blitt analysert dypere det faktum at energitettheten pr. volum også vil variere mellom batterikjemier, så som er gjort rede for i kapittelet om energitetthet pr. vekt. Det er en korrelasjon mellom forbedringer i energitetthet med henblikk på vekt og volum, ettersom en høyere tetthet pr. vekt også vil medføre at tettheten pr. volum vil endres, og sansynligvis øke.

For energitetthet på pakkenivå i 2030 er det rimelig å legge et konservativt anslag på rundt 200 Wh/l i 2030 til grunn, og dette tilsvarer rundt 50 % av det konservative anslaget som har blitt lagt til grunn for personbiler. Dette underbygges av tilsvarende resonnement som er gjort med henblikk på energitetthet pr. vekt, der energitettheten for batterier til jernbanekjøretøy antas å stige slik at den i 2030 tilsvarer noe lavere tetthet enn det som er mulig for biler i dag.

3.6 Jernbanekjøretøy med batterier til fremdrift

Som det fremgår av prosjektets hovedrapport, så har konvensjonelle elektriske kjøretøy behov for en elektrisk infrastruktur som kontinuerlig kan forsyne energi i form av elektrisitet til kjøretøyet fremdrift. Historisk så har det vært dieseldrevne tog som trafikkerer de ikke-elektrifiserte strekningene. Batteridrevne tog som erstatning for dieseldrevne tog er prinsipielt konstruert på samme måte som konvensjonelle elektriske tog, men den elektriske energien som forsyner traksjonsutstyr og hjelpeutstyr kan komme fra enten en kontaktledning under kjøring på elektrifiserte strekninger, eller fra et batteri ved kjøring på ikke-elektrifiserte strekninger. Dette er illustrert på Figur 7 nedenfor. Det fremgår at batteripakken kobles inn mellom likeretter, traksjonsvekselretter og hjelpestrømomformer, og vil forsyne de to sistnevnte med likestrøm, på samme måte som likeretteren vil gjøre på elektrifiserte strekninger,



Figur 7: Illustrasjon av prinsippet for elektriske ombordsystemet for tog.

3.7 Aktuelle konsepter for plassering av batterier i jernbanekjøretøy

Det finnes flere historiske eksempler på batteridrevne jernbanekjøretøy som har blitt testet og utprøvd på spesifikke ruteopplegg. Disse jernbanekjøretøyene, i all hovedsak ment for passasjertrafikk, har ofte blitt forbundet med lavere hastighet, hyppige stopp underveis og korte ruter, og har gjerne en lett konstruksjon sammenliknet med hva som regnes for å være ordinære jernbanekjøretøy for hovedlinjer. Klassiske eksempler på dette kan være trikkelinjer.

Til tross for det begrensede omfanget av utvikling og testing av batteriteknologi for jernbanetraffikk historisk, så har litium-ionbatteriteknologien utløst muligheten for at batteridrevne passasjertog kan inngå som et standardprodukt i de ledende kjøretøyproduzentenes produktportefølje. I dag pågår det enten utvikling, testing eller leveranse av slike jernbanekjøretøy hos alle de store leverandørene, men fortsatt i et begrenset omfang. Helt overordnet, så er disse nyutviklede løsningene for batteridrevne passasjertog designet for en hastighet på 140-160 km/h i batterimodus, og de er så langt produsert i konfigurasjoner på 2-3 vogner i form av motorvognsett. Figur 8 nedenfor viser mulige konsepter for montering av batteripakker, der montering på taket er den vanligste løsningen som tilbys.



Figur 8: Illustrasjon av mulige løsninger for BEMU, der utstyr montert på taket er en vanlig løsning bland de produkter som tilbys på markedet pr. 2021.

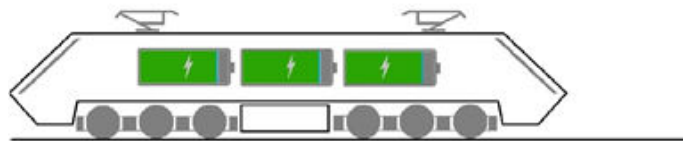
Mange av disse jernbanekjøretøyene er anskaffet av de tyske delstatene på de ikke-elektrifiserte strekningene som tidligere har blitt betjent av dieseldrevne tog. Lengden på disse ikke-elektrifiserte strekningene er i all hovedsak kortere enn 70 km, og batteridrevne tog er svært velegnet for disse avstandene. Togene har en rekkevidde på 80-120 km i batterimodus, men dette er ikke nødvendigvis overførbart til norske forhold, der topografien og klimaet kan være mer krevende. Under testing av disse togene har det blitt fastslått at noen av disse kan ha en rekkevidde på opptil 180 km under optimale forhold.

3.7.1 Løsninger for batterilokomotiv

Til tross for den relativt raske utviklingen innenfor utvikling av batteridrevne passasjertog i markedet, så har dette i all hovedsak skjedd innenfor produksjon av motorvognsett. Batteridrevne lokomotiver kan være aktuelle for passasjertrafikk, men er primært aktuelle for godstrafikk i denne sammenheng. Det har hittil vært utfordringer tilknyttet utvikling av batteridrevne godslokomotiver ettersom godstrafikk har andre forutsetninger enn passasjertrafikk, eksempelvis er energibehovet generelt mye høyere for godstog.

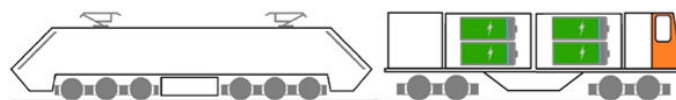
Imidlertid finnes det eksempler på batteridrevne lokomotiver både i Europa og i Nord-Amerika. Lokomotivene som tilbys på det europeiske markedet er i all hovedsak skiftelokomotiver og lokomotiver som ikke primært er ment for hovedlinjetrafikk i batterimodus, der batteriene for eksempel ikke benyttes under sammenhengende drift, men ofte som en optimalisering av energiforbruket. Med andre ord så er batterilokomotiver for hovedlinjetrafikk, som denne utredningen har til hensikt å gjøre rede for, ikke tilbudte standardprodukter hos leverandørene av jernbanekjøretøy i dag. Imidlertid har flere av produsentene antydnet at de er i stand til å utvikle og levere slike lokomotiver på bestilling.

Helt overordnet, så er det to løsninger for batteridrevne lokomotiver. Den ene løsningen innebærer en integrering av batteripakkene i selve lokomotivet, og den andre innebærer en ekstra batterivogn. Et lokomotiv med integrerte batteripakker vil ifølge flere av togprodusentene måtte være seksakslet, og er trolig tilstrekkelig for å trekke persontog.



Figur 9: Illustrasjon av konseptet med batterier i et seksakslet lokomotiv.

For godstrafikk på Norges ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger vil det sannsynligvis være behov for den andre løsningen, som innebærer en batterivogn. Dette gjør det mulig å betjene en hensiktsmessig fordeling av ladestrekninger som fremgår i delkapittel 4.4 også for de tyngste godstogene. Utformingen av batterivognen kan videre inndeles i to løsninger. Den ene løsningen innebærer at batterivognen prinsipielt ser ut som et lokomotiv med et eget førerhus i den ene enden for å kunne gi en delvis permanent formasjon med lokomotivet uten å trenge skiftning av batterivognen relativt til lokomotivet. Den andre løsningen er en godsvogn utstyrt med en container med batteripakker. I begge løsninger vil vognen være elektrisk tilkoblet til lokomotivet, og en mulig løsning er å benytte seg av en DC-kobling mellom batterivognen og DC-kobling i lokomotivet (se illustrasjon av den prinsipielle oppbyggingen av strømforsyningen i et batteridrevet jernbanekjøretøy i delkapittel 3.6). Kjøretøyprodusenter bekrefter en slik løsning, og peker på at en standard 40-fots container vil kunne gi en batteripakkevekt og energimengde som er tilstrekkelig for de største godstogene.



Figur 10: Illustrasjon av batterivogn med en førerhytte.

3.8 Bruk av dagens batterityper i jernbanekjøretøy

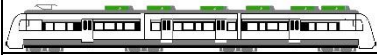

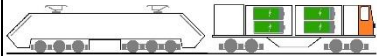
Hvilke batterikjemier som er foretrukne til anvendelse i jernbanekjøretøy fremstår noe uklart, dels ettersom leverandørene ikke ønsker slik informasjon offentlig kjent av konkurransehensyn, og dels fordi det er svært begrensede produktserier som hittil har blitt produsert. Imidlertid kan det slås fast at både NMC- og LTO-batterier benyttes, dermed både henholdsvis høyenergi- og høyeffektbatterier. Videre er det funnet at C-verdien for de to batteritypene ligger på rundt 1,0-2,5 C og 3,0-5,0 C for henholdsvis høyenergi- og høyeffektbatteriene.

3.9 Eksempler på batteripakkevekt og -volum i jernbanekjøretøy

I dette kapittelet presenteres beregningseksempler for batteripakkevekt og -volum som anses å være mulige i 2030 for motorvognsett, persontogsett med lokomotiv og vogner, samt godstog.

For å beregne den nødvendige energimengden som kreves til batteridrift av kjøretøyet, så legges gjennomsnittlige energiforbrukstall for de respektive kjøretøyene til grunn. Dette er 5 kWh/km for et trevogners motorvognsett, 10 kWh/km for et lokomotivtrukket persontog, og 20 kWh/km for et 1200 tonn godstog. Målinger som er utført på Nordlandsbanen antyder at dette er en konservativ verdi, og at det i virkeligheten sannsynligvis er noe lavere. Disse er basert på en gjennomsnittshastighet på henholdsvis 120, 100 og 80 km/h for de tre kjøretøygruppene. Utrekningene i tonn hensyntar ikke en aldringsreserve på 20 % eller det faktum at høyenergi-batterier krever en batterikapasitetsreserve på minimum 10-20 % for å ivareta batteriets levetid tilstrekkelig. Det er også behov for energi til HVAC (varme på vinter- og kjøling sommertid) som ikke er hensyntatt. Dette kan eksempelvis utgjøre et tillegg på 150 kWh for et trevogners motorvognsett pr. 100 km, men er av mindre betydning for godsløkomotivet. Det vil også være behov for energi til å holde en optimal temperatur i batteripakken. I Tabell 5 under presenteres den beregnede vekten for batteripakken for de ulike kjøretøykonseptene.

Tabell 5: Tilgjengelig volum og vekt, gjennomsnittlig energiforbruk, energibehov for en 100 km strekning og resulterende vekt for batteripakken for å klare denne strekning. Antatt energitetthet for 2030 som presentert i 3.5.

Kjøretøy	Tilgjengelig volum (m ³) og vekt (tonn)	Gjennomsnittlig kilometerforbruk (kWh/km) Gjennomsnittshastighet (km/h)	Energi-behov for en 100-kilometers strekning (kWh)	Vekt for batteripakken gitt høyenergi-batterier med kobolt (tonn)	Vekt for batteripakken gitt høyenergi-batterier uten kobolt (tonn)	Vekt for batteripakken gitt høyeffektbatterier (uten kobolt) (tonn)
Trevogners motorvognsett. Batteriplassering er kun et eksempel. 	12 m ³ 12 tonn	5 kWh/km 120 km/h	500	3,9	4,8	7,4
Lokomotiv for persontog 	15-20 m ³ 12-22 tonn	10 kWh/km 100km/h	1000	7,8	9,6	14,8
Lokomotivtrekket godstog på 1200 tonn. Batteriplassering er kun et eksempel det kan også være en godsvogn med eksempelvis en 40 fots container 	40-72 m ³ 26-45 tonn	20 kWh/km 80 km/h	2000	15,6	19,2	29,6

Som det fremgår av tabellen, så vil motorvognsettet ha en batteripakkevekt på rundt 4-8 tonn, avhengig av batteritype. Det er vesentlig å belyse at det for høyenergi-batteripakker vil kreves ekstra energi for å hindre en for rask aldring, og det må også legges til energi for annet utstyr og aldringsreserve. Imidlertid er dette

likevel innenfor mulighetsrommet som har blitt angitt av kjøretøyleverandører for en realistisk batteripakkevekt i et slikt kjøretøy. Ifølge leverandørene vil 12 tonn være teknisk mulig, men den faktiske tilgjengelige vekten vil avhenge leverandørenes valgte konsept.

For konseptet med seksakslet lokomotiv for persontog så vil konseptet være mulig gjennom å bruke høyenergibatterier. Kjøretøyleverandørene antyder at minst 12 tonn vil være tilgjengelig for batterisystemet. Disse togene er persontog, og vil derfor ha et relativt høyt forbruk til HVAC-systemer sammenlignet med godstog, noe som også krever ekstra energi som ellers kunne gått til fremdrift. Den ekstra energien som kreves til andre formål enn til fremdrift vil medføre at et høyeffektbatteribasert konsept kan ende opp med en utilsfredsstillende høy akselvekt.

For godstog med separat batterivogn så vil det være mulig å velge en løsning basert på en standard 40 fots container, og dette konseptet anses av kjøretøyleverandører til sannsynligvis å gi en mulig batteripakkevekt på cirka 40 tonn¹. Imidlertid er det også mulig med en batterivogn basert på et lokomotivchassi med førerhus. Anvendelse av høyenergibatterier vil derfor være mulig også inkludert tidligere nevnte margin på 20 %.

3.9.1 Vurdering av tilgjengelig volum for batterier i konseptet med lokomotiv

Som tidligere belyst, så er det i dag ingen leverandør av jernbanekjøretøy som har utviklet og levert batteridrevne lokomotiv for hovedlinjetrafikk. Det er derfor av interesse å analysere hvor stor energimengde som får plass i ulike konsepter med batteridrevne lokomotiv. Dette er et grunnlag for å anslå hvor mye energi som teoretisk kan få plass i en løsning for lokomotiv. Det skal poengteres at det volumet som vil bli nødvendig i praksis vil bli svært avhengig av leverandørenes løsninger, og dette kapitlet skal derfor ikke sees som en direkte overførbar anbefaling. I Tabell 5 presenteres tilgjengelig volum for de forskjellige kjøretøykonseptene, og tallene er basert på hva som er antydnet fra kjøretøyleverandører å være mulig. Det fremgår at en separat batterivogn vil gi omtrent en dobling av vekt og volum sammenlignet med et seksakslet lokomotiv.

Gitt en antatt energitetthet pr. volum på mellom 100-200 Wh/l basert på kapittel 3.5.2 lagt til grunn, så vil en batterikapasitet på 1000 kWh gi et nødvendig volum på 5-10 m³. Enkelte leverandører av lokomotiver antyder at dette vil være mulig for et seksakslet lokomotiv, men at det faktisk tilgjengelige volumet i lokomotivet vil variere basert på konseptet som velges. Det pekes også på at det er den tillatte akselvekten, og ikke batteripakkens volum, som utgjør en begrensning, ettersom lokomotiver allerede har relativt høy akselvekt på grunn av det elektriske utstyret ombord. Som det fremgår av Tabell 5, så er volumet i et seksakslet lokomotiv sannsynligvis tilstrekkelig for den energimengden som er beregnet for et godslokomotiv på 1200 tonn (15-20 kubikkmeter).

For konseptet med separat batterivogn så kan størrelsen på en standard 40 fots container, som har et volum på omtrent 70 kubikkmeter, legges til grunn. Et batteri med et volum på 70 m³ vil ha en vekt som er langt høyere enn begrensingen på 45 tonn som fremgår i Tabell 5, noe som bekrefter at det er i hovedsak vekt og ikke volum som vil være begrensende.

3.10 Utdfordrende aspekter med batterikjøretøy og deelektrifisering

Det er i forbindelse med dette arbeidet blitt avdekket noen utfordringer med batteridrevne jernbanekjøretøy, som kan påvirke hvordan konseptet vil fungere i praksis.

Ved anskaffelse av jernbanekjøretøyer for batteridrift og deelektrifisering er det viktig å kreve at togene håndterer det norske klimaet med is og frost på kontaktledninger, høye forsyningsstrømmer og hyppig senking av pantograf, og at de har redundant pantograf. Flere av disse kravene er imidlertid i hovedsak de samme kravene som for kjøretøye på fullelektrifiserte strekninger, og ikke særlige krav for konseptet batteridrift og deelektrifisering.

¹ Det skal nevnes at en fire-akslet godsvogn dedikert til å transportere slike containere kan ta en last på omtrent 60 tonn, avhengig av tillatt aksellast.

Med en konvensjonell konstruksjon på kontaktledning og strømvaktaker så er det en begrensning på 80 A pr. pantograf på strøm som kan trekkes ved stillstand. Dette har sin årsak i at kontaktpunktet vil bli skadelig varmt ved høyere strøm. Konseptet med batterilading ved stillstand kan bli aktuelt ved både deelektrifisering (med lading under kjøring, men også ved stillstand på elektrifisert strekning), ladestopp og endepunktslading. For å kunne bruke en høy ladeeffekt til batteriene ved stillstand, eksempelvis stasjonsopphold og ventetid på kryssingsspor, så vil det bli aktuelt med en løsning som tillater høyere strøm, sansynligvis tre- eller firedoblet 80 A, avhengig av installert batterikapasitet og C-verdi.

I samarbeid med NTNU i Norge så har det blitt lagt frem flere ulike løsninger som kan løse en slik utfordring. Kjøretøyet kan eksempelvis utrustes med én eller flere ekstra pantografer som går opp automatisk når toget er i stillstand. Utfordringen kan også delvis håndteres ved å bruke en pantograf som gir en større kontaktflate mellom kontaktledning og pantografens sliteflate. Dette kan for eksempel være en bredere sleider, eller flere sleider, som er i kontakt med kontaktledningen. Strømmen kan også økes ved økt kontaktrykk mellom sleider og kontaktledning. En annen mulig løsning er å bruke fler-doble kontaktledninger på kryssingsspor og stasjoner.

Det vil også være behov for et system som sørger for å heve og senke pantografen(e) ettersom hvor det er elektrifisert, slike systemer er allerede utviklet og i bruk.

4 Rekkevidde

Rekkevidde for batteridrevne kjøretøy blir ofte ansett som et resultat av energitettheten pr. volum eller vekt i battericellene. Imidlertid er dette kun en av flere faktorer som påvirker rekkevidden for batteridrevne tog, og i dette kapitlet drøftes dagens mulighetsrom for aktuelle faktorer. Innledningsvis vil det bli gjort rede for de egenskapene ved jernbanekjøretøy og infrastruktur som påvirker konseptet med batteridrevne jernbanekjøretøy. I sammenheng med dette vil eksempelvis balansen mellom elektrifiseringsgrad, energibehov, ladeeffekt og rekkevidde bli diskutert. Kapitlet omfatter også drøfting av hva som kan være en mulig felles rekkevidde for batteridrevne person- og godstog i 2030.

Batterikapasiteten øker i takt med videre teknologisk utvikling, noe som medfører at balansen mellom batteri- og ladestrekninger blir en komplisert avveining. Helt overordnet, så har batteritog behov for den andelen elektrifisering som kreves for å lade batteriene med den mengde energi som er nødvendig for å kunne kjøre på den ikke-elektrifiserte strekningen. I prosjektets delrapport 2 - *Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen* fremgår det at det innenfor dagens teknologi er mulig å ha en elektrifiseringsgrad på rundt 20-30 % i kombinasjon med batteridrift på ikke-elektrifiserte delstrekninger. Dette ved å bruke en lengde på de ikke-elektrifiserte strekningene på rundt 2-4 ganger lengden på ladestrekningene, som i sin tur er omtrent 20-40 km.

Det er rekkevidden for batteridrevne motorvognsett (BEMU) som vil være utgangspunktet for den maksimale lengden på de ikke-elektrifiserte strekningene, og tunge godslokomotiv som vil være førende for den nødvendige lengden på elektrifiserte strekninger. Dette vil bli diskutert nærmere i kapittel 4.3.3.

4.1 Forhold som påvirker energibehovet og energiforbruket for jernbanekjøretøy generelt

I dette delkapitlet redegjøres det for forhold som påvirker energibehovet og energiforbruket for jernbanekjøretøy generelt. Noen av disse er forholdsvis konstante, mens andre er mulige å påvirke. Enkelte faktorer vil kunne ha stor påvirkning på hva som kreves av batteriet, og andre vil derimot ha marginal påvirkning. I det neste delkapitlet vil det redegjøres for ytterligere faktorer som gjør seg gjeldende for batteridrevne jernbanekjøretøy.

En av de store fordelene med jernbanetransport er den mulige energieffektiviteten. Forutsetningene som ligger i jernbanesystemet innebærer høy energieffektivitet, og sammenlignet med vei har jernbane følgende fordeler relatert til energibehov:

- Rullefriksjon er redusert vesentlig for stålhjul sammenlignet med gummihjul, hvilket gir lavere energiforbruk.
- Et tog er en konvoi, og det reduserer luftmotstanden betraktelig, noe som gir lavere energitap til luftmotstand, og dermed lavere energiforbruk.
- Antall retardasjoner og akselerasjoner pr. kilometer er lavere for godstog sammenlignet med lastebil. Akselerasjoner og retardasjoner medfører uunngåelige energitap, dermed er det bedre mulighet for å bruke en lavere mengde energi pr. transportert vekt og lengde i jernbanetransport.
- Jernbanen har normalt lavere stigning enn vei. Det er normalt maks 10 ‰ og opptil 25 ‰ på begrensede lengder. Dette gjør at effektbehovet (og dermed energibehovet) pr. vektenhet fra oppoverbakker kan være mye lavere enn for vei.
- Elektrifisering og bruk av elektriske kjøretøy er enklere innenfor jernbane ettersom togene (og transportvolumene) går på et begrenset antall ruter (sammenlignet med veinettet).

Tog har også noen ulemper som er en utfordring i et energiperspektiv. Tog har høy egenvekt, noe medfører at en stor del av energien brukes for å drive frem toget i seg selv, og ikke nyttelasten. Dette forholdet gjør seg ekstra gjeldende for passasjertog, mens ulempen er mindre for godstog, avhengig av hva som transporteres.

4.1.1 Hastighet

Togets hastighet er av stor betydning for effektbehovet og energibehovet, og dermed også batteribehovet. Togets *effektbehov* til fremdrift kan forenklet beskrives som benyttet trekkraft multiplisert med hastigheten, og dersom hastighet eller trekkraft øker, så øker også effektbehovet. Togets *energibehov* kan forenklet beskrives som benyttet trekkraft multiplisert med strekningen som kraften brukes over, og dersom en høyere trekkraft blir benyttet (fra økt hastighet som resulterer i høyere kjøremotstand) over strekningen så øker også energibehovet. Ved en hastighetsøkning som tilsvarer en dobling av hastigheten, så kan det forventes at den totale kjøremotstanden øker med mer enn en faktor 2, vanligvis en faktor 3, ettersom luftmotstanden har et bidrag som øker kvadratisk med hastigheten. Dette innebærer også at energibehovet øker med en faktor 2-3, mens effektbehovet, som er hastighet multiplisert med trekkraft, blir opptil 6 ganger høyere avhengig av i hvilket hastighetsspenn doblingen finner sted.

Disse forholdene medfører at hastighet påvirker togets effekt- og energibehov i veldig stor grad. Måten toget kjøres på blir dermed like viktig som batterikapasiteten, og dette aktualiserer optimalisering av togets hastighetsprofil for å kunne redusere togets energiforbruk, og på den måten øke rekkevidden. Mer om dette i delkapittelet nedenfor. Mer om dette i kapittel 4.1.9 nedenfor.

4.1.2 Topografi

Oppoverbakker og nedoverbakker på en jernbanestrekning omtales gjerne som strekningens *topografi*. I oppoverbakker kreves det en større trekkraft for å kunne overvinne motstanden fra tyngdekraften enn ved en flat strekning. Denne forskjellen i motstand kan være svært høy, spesielt for tunge tog. Denne problemstillingen er vesentlig i et land som Norge, der det er en varierende og til dels krevende topografi.

Oppoverbakker resulterer i en oppbygging av energi (potensiell energi), som kan frigjøres i nedoverbakker. Imidlertid tapes mye av denne oppbygde energien som elektriske energitap i ombordsystemer, og dermed kan den ikke i sin helhet utnyttes til gjenbruk i nedoverbakken. For tunge godstog kan behovet for mekanisk bremsing på godsvogner resultere i at en veldig stor del av energien bremses vekk.

4.1.3 Togets vekt

Togets vekt er en av de mest premissgivende fysiske faktorene som påvirker energibehovet, ettersom en høy vekt også medfører et høyere energibehov for å kunne drive toget fremover. Høyere vekt gir høyere kjøremotstand, og vekten påvirker også energien som kreves for togets akselerasjon, og for å holde hastigheten i oppoverbakker. Togvekten, kombinert med topografien, har en stor innvirkning på energibehovet.

Togvekten er av større betydning for tog som akselererer ofte, og som kjører på baner med krevende topografi. Et eksempel der dette er svært fremtredende er tunnelbaner. Togvekten er av mindre betydning for tog som kjører i høyere hastigheter, og som ikke stopper ofte, ettersom energien som brukes for akselerasjon er mindre sammenliknet med det samlede energiforbruket, og det er ofte energien til akselerasjon som i høy grad er avhengig av togets vekt.

For persontog er togets egenvekt en vesentlig faktor som kan påvirke energibehovet. Av hensyn til optimalisering av energiforbruket kan det argumenteres for å ikke kjøre større tog enn nødvendig for de ulike trafikkoppleggene.

For godstog er kjøretøyets (lokomotivets) egenvekt mindre relevant for energibehovet, ettersom togets totalvekt i mange tilfeller er dominert av lasten. Godstog har en høy samlet togvekt, og dette innebærer generelt høyere energibehov enn for persontog.

Ved å redusere togets egenvekt vil det kreves mindre energi til fremdrift. Dette kan eksempelvis gjøres gjennom valg av lettere materialer i togets konstruksjon og ombordutstyr. Mulighetsrommet for å redusere egenvekten er vurdert å være relativt lav, men er relevant å trekke frem for toget der en redusert egenvekt kan gi mulighet for en høyere tillatt vekt for batteripakken innenfor den samlede tillatte akselvekten på toget. En vektbesparelse på ett tonn er marginalt for et tog trukket av et seksakslet lokomotiv med en vekt på 120 tonn, men vil med en energitetthet i batteriene på 120 Wh/kg gi en økt energimengde på 120 kWh. Med 20 kWh/km for godstog som utgangspunkt, så vil dette gi 6 km lengre rekkevidde, eller en noe kortere

ladestrekning. En tilsvarende vektbesparelse for et trevogners motorvognsett med utgangspunkt i et energiforbruk på 5 kWh/km vil gi 24 km økt rekkevidde.

4.1.4 Adhesjonsvekt og elektrodynamisk bremsepåvirkning

Det totale energiforbruket for batteritog påvirkes ikke bare av hvor mye energi som forbrukes til akselerasjon og for å overvinne kjøremotstanden. Det er også påvirket i stor grad av muligheten å gjenbruke den energien som har blitt benyttet for å akselerere opp kjøretøyet i hastighet og for å komme over oppoverbakker. Med andre ord, regenerativ (elektrodynamisk) bremsing er vesentlig for å optimalisere det totale energiforbruket. Dette innebærer at motorene fungerer som generatorer og genererer energi som senere forsynes tilbake til ombordsystemer og batterier, som resulterer i en bremseeffekt på kjøretøyet, ettersom kinetisk energi blir konvertert til elektrisk energi. Denne energien kan mates til annet utstyr om bord i toget, i første omgang hjelpekraft og deretter til annet utstyr som eksempelvis traksjonsbatterier. På dagens fullelektrifiserte jernbanenett, så overføres overskuddsenergien tilbake til linjen hvis det befinner seg andre tog i nærheten som kan benytte seg av den, og hvis ikke dette er tilfellet så blir den overført til bremseresistorer om bord i toget.

Hvor mye energi som kan returneres til ombordsystemet og batteriene, sett opp mot det som har blitt benyttet, kommer an på hvilken type trafikk som er utført av kjøretøyet. Som tidligere nevnt så er det kun den kinetiske energien, og energien som er lagret som potensiell energi fra nedoverbakker, som til dels kan gjenbrukes. Annet energiforbruk, som eksempelvis elektriske og mekaniske energitap i drivsystem og kjøremotstand, og forbruk fra andre ombordsystemer, kan ikke gjenbrukes. Dette betyr at kjøretøy som ofte akselererer og bremses, som for eksempel tunnelbanetog og lokaltog, har mulighet til betydelig større energibesparelser sett opp mot eksempelvis høyhastighetstog, ettersom tap til kjøremotstand utgjør en mindre del av det totale energiforbruket for slike tog.

For å kunne dra nytte av disse energibesparelsene, så kreves det at toget i størst mulig grad bruker denne type bremsing fremfor mekanisk bremsing. Dette påvirkes i sin tur av hvor stor bremsekraft som motorene kan generere. Denne kraften er proporsjonal mot den kraften som genereres i normaltstand, det vil si når motorene brukes for fremdrift. Jo kraftigere motorer som installeres, desto kraftigere bremseeffekt kan oppnås, og desto lavere behov for mekanisk bremsing utløses. Dette forholdet kan også oppmuntre til at motorene overdimensjoneres for å kunne generere en høyere bremsekraft enn det som brukes i tilsvarende trekkekraft ved akselerasjon.

Imidlertid kan bremsekraften som genereres også påvirkes av det som er kalt for adhesjonsvekten, som er den vekten som hviler på de drivende akslene. Det kreves en viss vekt på akslene slik at hjulene ikke begynner å skli. Et tungt lokomotiv vil gi høyere bremsekraft (og trekkekraft) enn et lettere lokomotiv. Dette betyr at en så stor del som mulig av togets masse bør være plassert på de drivende akslene. Tog som trekkes av lokomotiv, som kun har motorer på lokomotivets aksler, har dermed begrenset bremsekraft, avhengig av lokomotivets vekt. Lokomotivenes akselvekt er ofte fullt utnyttet i forhold til den største tillatte akselvekten på jernbanenettet.

I motorvognsett er det et større handlingsrom, ettersom traksjonsutstyr kan plasseres fordelt spredt i hele toget for å muliggjøre høy adhesjonsvekt i forhold til totalvekten, og dermed høyere andel elektrodynamisk bremsing.

4.1.5 Ombordsystemer

Energibehovet i tog er ikke bare avhengig av energien som kreves av motorene. Tog har flere andre systemer som også har et visst energibehov, og avhengig av typen tog og klimaforhold, så kan dette energibehovet være såpass stort at det har en klar påvirkning på dimensjoneringen av batterisystemet. Dette kan for eksempel være motorer til kompressorer, ventilasjon, klimaanlegg, batterikjøling og energiforsyningssystem.

Optimalisering av energiforbruket til ombordsystemer kan bidra til å senke togets samlede energibehov, og således øke rekkevidden. For å optimalisere energiforbruket til disse systemene kan virkningsgraden økes eller energibehovet reduseres.

Det kan også være aktuelt med egne batterier til hjelpeutstyr i persontog, som dimensjoneres for hele turen, og ikke inngår i togets batteripakke til fremdrift. Det vil gi mulighet for bedre fordeling av volum og vekt, og batteritypen kan være av en annen type, som er optimal for energibehovsmønsteret til denne typen utstyr.

Eksempler på store energikrevende elementer er kjøling av traksjonsutstyret og kompressorer til blant annet trykkluftsystemet. Et eksempel på effektbehov er for lokomotiver opp mot 200 kVA, og for motorvogner opp mot 50 kVA pr. traksjonsenhet. Utover dette så har også passasjervogner i nordiske forhold et energibehov på opptil 50 kVA for blant annet HVAC (Heating, Ventilation, Air Condition) og batterier som ikke er til traksjon pr. vogn. Dette betyr at det for passasjertog med ti vogner kan være et effektbehov på opp mot 0,5 MVA som mates fra lokomotivet til vognene [33]. Norges krevende klima vil særlig i vinterstid ha stor påvirkning på energiforbruket i jernbanekjøretøyet.

4.1.6 Traksjonssystemets effektivitet

Energibehovet for alle jernbanekjøretøy påvirkes av traksjonssystemets effektivitet. En forbedring av dette kan eksempelvis være gjennom bruk av nye halvledere i kiselkarbid i stedet for kisel, samt permanentmagnetmotorer. Imidlertid er en slik påvirkning på det samlede energiforbruket og forbedret rekkevidde marginal, men kan være av vesentlig betydning for det totale energiforbruket i kWh eller kroner over lengre tid.

4.1.7 Aerodynamisk utforming

Videre har en aerodynamisk utforming stor betydning for høyhastighetstog, ettersom luftmotstand er den største påvirkningsfaktoren for kjøremotstand. Påvirkningsgraden avhenger i stor grad av togets hastighetsprofil, og øker i takt med hastigheten. På landets ikke-elektrifiserte strekninger vil dette være av lavere betydning, ettersom togene sjelden overstiger 120 km/h for motorvognsett, og rundt 80 km/h for godstog. Motorvognsett er allerede i stor grad uformet aerodynamisk, og for godstog har utformingen av lokomotivet en lavere betydning ettersom vognene utgjør en stor del av den samlede kjøremotstanden.

4.1.8 Rullemotstand

Rullemotstand utgjør en mindre del av den samlede kjøremotstanden. Den påvirkes blant annet av friksjonstap i hjullager, suspensjon (fjærer og dempere), traksjonsutstyr, men også energitap i hjul-skinnekontaktpunktet. Mulige forbedringer av disse faktorene vurderes til å ha en svært lav betydning sammenliknet med de øvrige faktorene som nevnes.

4.1.9 Førerrådgivningssystem (DAS – Driver Advisory System)

En måte å optimalisere togets hastighetsprofil for å redusere togets energiforbruk og dermed rekkevidde, er å bruke et førerrådgivningssystem, som er en støtte for fører, til å kjøre toget med en energioptimal hastighet med hensyn til banetopografi, hastighetsgrenser og annen trafikk. Nedenfor er det belyst tre eksempler på typiske forhold som et såkalt førerrådgivningssystem (Driver Advisory System, DAS) tar hensyn til:

- Planlegging av turen slik at føreren slipper opp gassen og tillater toget å bremse av seg selv på grunn av kjøremotstanden og topografien, såkalt *coasting*, før stasjonsopphold og hastighetsreduksjoner, og dermed unngå bremsing med mekaniske og elektrodynamiske bremses. *Coasting* er å foretrekke fremfor elektrodynamisk bremsing, gitt at ruteplanen kan overholdes, ettersom elektrodynamisk bremsing innebærer uunngåelig energitap på grunn av påvirkningen i elektriske og mekaniske systemer. Dette medfører også lavere slitasje på mekaniske bremses og påvirker dermed også vedlikeholdskostnadene.
- Tilpasning av akselerasjonen slik at topografien utnyttes i størst mulig grad til det formålet.
- Optimalisering av hastighet og senke farten mest mulig innenfor ruteplanen. Lavere hastighet resulterer i lavere energiforbruk til fremdrift ettersom kjøremotstanden senkes.

Sett vekk fra videre optimalisering og utvikling av selve batteriene og måten de integreres i toget på, så er det største potensialet for økt rekkevidde en reduksjon av energibehovet gjennom en forbedring av førerrådgivningssystemet. Dette inkluderer også bruk av elektrodynamisk bremsing i kombinasjon med en gjennomtenkt utnyttelse av mulighetsrommet som finnes i topografi, hastighetsbegrensninger og ruteplan. Slike forbedringer er svært kostnadseffektive og potensialet for økt rekkevidde er stort, avhengig av kjøreforholdene. Det vil være vesentlig å fokusere på dette under en eventuell implementering av batteridrift på de ikke-elektrifiserte strekningene, særlig de strekningene der topografien, hastighetsprofilen og ruteplanen tilsier et høyt potensial.

På enkeltsporede strekninger med mye møtende trafikk er potensialet stort hvis et førerrådgivningssystem tar hensyn til topografien og hastigheten ikke bare for toget det er installert i, men også for møtende tog, slik at kryssinger optimaliseres. Eksempelvis kan et godstog unngå stans som ikke gir en optimal energibesparelse, men heller en lavere fart, og utnyttelse av oppover- og nedoverbakkene for bremsing og akselerasjon. I tillegg til økt energieffektivitet gir førerrådgivningssystemer andre positive effekter, blant annet ved økt punktlighet.

Førerrådgivningssystemer med hastighetsautomatikk kan også bidra til å holde lavest mulig hastighet innenfor ruteplan. Togets hastighet har som nevnt en vesentlig påvirkning på energiforbruket, også fordi en lavere mengde energi benyttes til akselerasjon og kjøremotstand. Helt forenklet kan en halvering av hastigheten med andre ord medføre mer enn en halvering av energiforbruket brukt til fremdrift. Hastighetsautomatikk i førerrådgivningssystemet anslås å ha en potensial for energibesparelse på 15-25 %.

4.2 Særlige forhold som påvirker energibehovet og energiforbruket for batteridrevne kjøretøy

I dette delkapittelet redegjøres det for de særlige egenskapene og forholdene ved jernbanekjøretøy drevet av batteripakker som påvirker energibehovet og dermed batteribehovet.

4.2.1 Energimengde i batteriene

For å kunne kjøre et tog ved hjelp en batteripakke, så må det være lagret tilstrekkelig mengde energi for fremdrift og forsyning av øvrige ombordsystemer. Dersom energikapasiteten i batteriene økes, så kan de ikke-elektrifiserte strekningene være lengre. Imidlertid vil energiforbruket over hele strekningen være likt, ettersom toget har behov for den samme energien uavhengig av kilde, såfremt den samme hastigheten skal holdes. Med andre ord, så vil toget ha behov for både strøm til lading og til fremdrift på ladestrekningen, noe som ved en økt lengde på ikke-elektrifiserte strekningene vil øke tiden toget trenger å befinne seg på ladestrekningene, for eksempel gjennom lavere hastighet under kjøring, lengere ladestrekning eller eventuelt stans under kjøringen. Det vil derfor være vesentlig for driftsopplegget at lengden på ladestrekninger optimaliseres. Størrelsen på batterier til fremdrift i tog vil dermed avgjøres av togets energibehov og valg av infrastruktur for ladesystem.

4.2.2 Valg av høyenergi- eller høyeffektbatterier

Energimengden i batteripakken avhenger av hvor mye plass og vekt som er tilgjengelig for batteriene i toget, og dette begrenses av tillatt vekt og tilgjengelig volum på togene. Som nevnt tidligere, så kan batterier helt overordnet deles inn i høyenergi- og høyeffektbatterier. Førstnevnte har en energitetthet som er godt egnet for et driftsopplegg med delelektrifisering, men har en ladehastighet og levetid som er mindre gunstig sammenliknet med høyeffektbatterier. Sistnevnte batteritype har en høyere C-verdi, dvs. at de tåler hurtigere lading og har lengere levetid enn høyenergibatterier, og de har også høyere sikkerhet. Utfordringen for disse batteriene er en lav energitetthet, men det er signaler om at eksempelvis NTO- vil kunne erstatte LTO-batterier, som er, så vidt Jernbanedirektoratet bekjent, de eneste høyeffektbatteriene som anvendes i dagens batteridrevne tog. Dersom denne overgangen finner sted vil energitettheten forbedres samtidig som de gode egenskapene som dagens LTO-batterier har blir opprettholdt. Tilgjengelig plass og vekt til batteripakken i jernbanekjøretøyet vil sannsynligvis påvirke valg av batteritype, og dette vil følgelig påvirke eksempelvis batteriegenskaper sin energimengde, ladeeffekt og levetid.

4.2.3 Ladeeffekt og ladet energi på ladestrekning

På hver ladestrekning vil det være nødvendig å tilføre batteriene nok energi til å kunne ha rekkevidde til den neste. For å ha et pålitelig, robust og fleksibelt driftsopplegg vil det være kritisk at det også lades opp noe ekstra margin med energi. Mengden energi som tilføres er avhengig av både *ladeeffekten* og *tiden toget kjører på ladestrekningen*.

Ladeeffekt

Ladeeffekten er avhengig av *tre begrensende faktorer*:

1. Den første er batterienes C-verdi, altså hvor raskt hele batteriets energimengde, som gjerne oppgis i mega wattimer (MWh), kan lades opp.
2. Den andre er batterienes energimengde (batterikapasitet), som sammen med batteriets C-verdi resulterer i en viss ladeeffekt som batteriet tåler. En C-verdi på 2, altså 30 minutters ladetid, og en batterikapasitet på 1 MWh resulterer i en ladeeffekt på 2 MW. I dette arbeidet har C-verdi blitt omtalt som en konstant verdi, mens den i virkeligheten vil variere avhengig av energinivået i batteriet.
3. Den tredje begrensende faktoren er tilgjengelig effekt fra infrastrukturen. Avhengig av hvor mye effekt som brukes av traksjonssystemet og andre ombordsystemer, og om toget er i stillstand eller fart, så kan ladeeffekten begrenses av tilgjengelig effekt. Et tog kan trekke maksimalt henholdsvis 80 A og 800 A i stillestand og under kjøring (1,2 MW og 12 MW gitt 15 kV spenning) fra infrastrukturen pr. pantograf. Med andre ord er det teoretisk mulig å trekke ti ganger så mye strøm under kjøring som under stillstand. Dette forutsetter også at togets transformator og likeretter kan håndtere så høy effekt. Det betyr også at selv om batterisystemet i kjøretøyet under stillstand kan lade med eksempelvis 2 MW, så kan det begrenses av at hver pantograf kun tillater 1,2 MW.

Disse begrensningene vil variere med type kjøretøy og driftsforhold, og i praksis vil kjøretøyets effektforbruk til traksjon og til batterilading optimaliseres med hensyn til tilgjengelig effekt.

Tid på ladestrekning

Toget vil måtte befinne seg en gitt tid på ladestrekningen for å lade opp batteriene tilstrekkelig, og dette avhenger av to faktorer; hvilken hastighet toget holder, og lengden på ladestrekningen det kjører på. En høyere hastighet innebærer at toget bruker kortere tid på ladestrekningen, og dette resulterer i mindre energi som kan bli overført til batteriene gitt at maksimal strøm trekkes. En kortere ladestrekning vil ha en tilsvarende påvirkning.

Forutsetningene i Norge

En inngående effekt på 12 MW i kjøretøyet er svært høyhøyt, og det er så vidt Jernbanedirektoratet bekjent ingen produsenter som tilbyr lokomotiver som kan håndtere en så høy effekt. Imidlertid finnes det eksempler på tog som benytter flere lokomotiver som til sammen trekker en effekt i størrelsesorden 12 MW. I beregningene lagt til grunn for analysen av elektrifiseringsbehov så er effekten for lokomotiv begrenset til 9 MW, basert på hva som er rimelig å anta at kjøretøyprodusenter har mulighet til å levere. Dette tilsvarer en strømbegrensning i kjøretøyet på 600 A, og ikke tilgjengelige 800 A. Denne strømmen skal dekke behovet for både traksjon og lading.

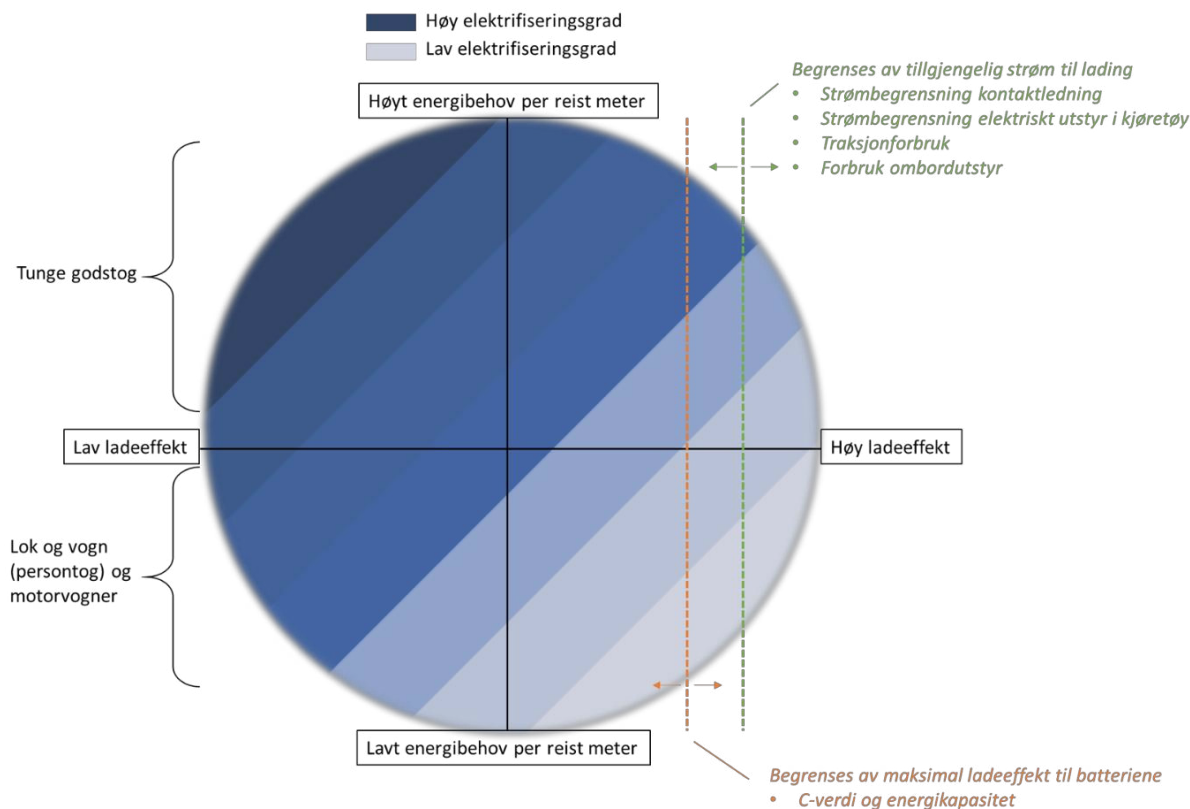
4.3 Infrastrukturens forutsetninger

I dette delkapittelet drøftes egenskapene ved infrastrukturen for deelektrifisering, og hvordan den påvirker konseptet med batteritog. Videre vil det redegjøres for forholdet mellom elektrifiseringsgrad, energibehov, ladeeffekt og rekkevidde.

4.3.1 Elektrifiseringsgrad

Elektrifiseringsgrad er forholdet mellom ladestrekningenes totale lengde og banens totale lengde. Nødvendig elektrifiseringsgrad er avhengig av flere parametere. De viktigste parameterne som påvirker elektrifiseringsgraden er hvor raskt batteriene kan lade og hvor stort energibehovet er pr. reiste meter. Dersom en stor mengde energi kan lagres, relativt sett i forhold til nødvendig energi for å kunne kjøre strekningen, så kan en lav elektrifiseringsgrad oppnås. Prinsipielt kan det også oppnås en lavere elektrifiseringsgrad ved hjelp av ladestopp. Som det fremgår av prosjektets hovedrapport, så innebærer dette imidlertid ugunstige følger for driftsopplegget.

Figuren nedenfor viser sammenhengen mellom energibehovet pr. kjørte meter og ladeeffekten, og det antas at batteriene i hovedsak lades under kjøring. Den blå graderingen viser at en høy ladeeffekt i kombinasjon med et lavt energiforbruk vil muliggjøre en lav elektrifiseringsgrad, ettersom toget vil være i stand til å lade opp den oppbrukte energien på kortere tid, og dermed også over en kortere strekning. Dersom toget har et høyt energibehov og en lav ladeeffekt medfører dette en tilsvarende høy elektrifiseringsgrad.



Figur 11: Prinsippet for elektrifiseringsgrad, og hvordan det påvirkes av ladeeffekt og energibehov. Merk at dette ikke omhandler spesifikke lengder på ikke-elektrifiserte strekninger. Det skal også merkes at figuren bygger på prinsippet at lading under kjøring brukes.

Det er to begrensende faktorer på ladeeffekten, vist i henholdsvis oransje og grønt. Den første er C-verdien i kombinasjon med batterikapasitet, altså tillatt ladeeffekt til batteriene. Den andre er gjenstående effekt etter at annet utstyr har blitt tilført nødvendig effekt.

For et motorvognsett vil det nesten utelukkende være den tillatte ladeeffekten til batteripakken (oransje) som utgjør en begrensning. For tyngre godstog vil det i krevende oppoverbakker kombinert med høyere hastigheter være den tilgjengelige effekten fra infrastrukturen som begrenser ladeeffekten og kjøretøyets elektriske utstyr (grønt), ettersom godslokomotiv med rask fart under stigning benytter rundt halvparten av banestrømmen til fremdrift. Utover dette så vil godslokomotivet ha vesentlig større mulig ladeeffekt til batteriene antatt at det er samme C-verdi som for et motorvognsett, hvilket også leder til at det blir tilgjengelig strøm fra infrastrukturen og kjøretøyets elektriske utstyr som kan bli begrensende.

4.3.2 Ladestrekningenes lengde og plassering

For å oppnå ønsket elektrifiseringsgrad kan det enten velges flere korte ladestrekninger eller færre og lengre. Mange og korte ladestrekninger vil muliggjøre en lavere energikapasitet i batteriene og gi økt fleksibilitet i samspillet mellom infrastruktur og tog.

Færre og lengre ladestrekninger vil gi lavere investeringskostnader til infrastruktur sammenliknet med like mange sporkilometer oppdelt i kortere strekninger, blant annet ettersom det vil kan redusere antallet nødvendige matestasjoner, som er svært kostnadsdrivende. Årsaken til at antallet matestasjoner øker er at

det ikke vil være en elektrisk forbindelse mellom de ulike ladestrekningene, noe som i de fleste tilfeller innebærer at hver ladestrekning vil kreve en egen matestasjon. Det fremstår dermed lite aktuelt å dele opp delelektrifiseringen i mange korte strekninger, ettersom kostnadsbesparelsen er den grunnleggende forutsetningen som gjør konseptet relevant.

Ladestrekningene bør plasseres strategisk med henblikk på linjeføringen, og ta hensyn til både tunneler, broer og topografi. Tunnelandelen i Norge er svært høy, noe som ville medført svært høye kostnader ved full elektrifisering på grunn av utvidelser av tunnelprofiler for å tilpasse seg kontaktledningen. Elektrifisering over broer er også svært kostbart.

For batteridriftens del bør ladestrekningene også plasseres der det er et stort energi- og effektbehov, for å kunne gi mulighet til å ha batteridrift på strekninger der dette behovet er lavere. Oppoverbakker er et eksempel på en delstrekning der tunge godsløkomotiv har behov for en høy effekt, og hvor det vil være en stor fordel om energien hentes direkte fra kontaktledning fremfor batteripakken. Det kan også være hensiktsmessig å forlenge ladestrekningen noe der det er et økt energibehov for å enten tillate en lavere C-verdi for batteripakken og dermed en lavere ladeeffekt, eller kunne benytte en lavere andel av installert energimengde, og dermed oppnå lenger levetid på batteriene. Med andre ord, så må kostnadsbesparelsen ved ekstra utbygging av infrastruktur for effektiv batteridrift veies opp mot investeringskostnadene i infrastruktur.

4.3.3 Utnyttelse av fremtidige teknologiforbedringer

Den stadige utviklingen av batteriteknologi fører til en kontinuerlig forbedring av energitetthet pr. volum og vekt. Imidlertid er det ikke nødvendigvis gunstig å utnytte økt energitetthet utelukkende til å installere mer energi i kjøretøyene, og på den måten øke lengden på delstrekninger med batteridrift. Årsaken er at dette ville medført at infrastrukturen, som har en estimert levetid på rundt 70 år, ville bli faset ut kort tid etter installering, og at utfasingen i seg selv har en kostnad.

Mulige kostnadsbesparelser gjennom utfasing av én enkelt matestasjon anses ikke for å være en valgbar løsning, ettersom det ikke innebærer en gevinst for driftsopplegget. Toget må dimensjoneres for den mest krevende ikke-elektrifiserte delstrekningen, og ville da kjørt med en overkapasitet på de øvrige delstrekningene. For at dette skulle gi en gevinst for driftsopplegget ville i praksis annenhver matestasjon måttet bli faset ut og en slik løsning vil også innebære kostnader. Med andre ord, så vil det ikke være mulig å spare kostnader gjennom å fjerne én matestasjon av gangen, og en halvering av antallet matestasjoner vil utgjøre en stor overgang som er avhengig av betydelige teknologiske fremskritt.

Dersom en stadig økning av energitettheten utelukkende skal benyttes til å forbedre rekkevidden, vil det til enhver tid kunne argumenteres for å avvente en introduksjon av driftsopplegget i påvente av batteriteknologiforbedringer. Fremfor å stadig øke rekkevidden og dermed redusere elektrifiseringsgraden, så kan den forbedrede batteriteknologien utnyttes til å oppnå en rekke fordeler. Ved å dimensjonere infrastrukturen for dagens tilgjengelige rekkevidde, blir det mulig å utnytte den økte batterikapasiteten til å øke driftsoppleggets robusthet og fleksibilitet, ettersom det oppnås mer fleksible lademuligheter.

En fremtidig økning av energitetthet i batteriene kan på den ene siden utnyttes ved at batterienes vekt og volum opprettholdes i togene, men med en høyere batterikapasitet enn i dag. Dette gir fordeler i form av at en lavere del av batteriets totale energi benyttes, noe som muliggjør økt levetid og dermed mulighet til lavere batterikostnader. På den andre siden kan batterienes vekt og volum i togene reduseres, noe som også senker kostnaden for batteriene. Det vil også være mulig å benytte batterier som tåler raskere lading, altså høyeffektbatterier. Denne typen batterier har lavere energitetthet, men vil i fremtiden kunne benyttes ettersom de vil ha tilstrekkelig kapasitet til å drifte delstrekningene med batteridrift. Høyeffektbatterier antas også gi bedre levetid.

4.4 Mulig rekkevidde og nødvendig batterikapasitet i 2030

Tidligere i kapitlet har det blitt redegjort for de ulike optimaliseringsmulighetene for å redusere energiforbruket og dermed øke rekkevidden for batteridrevne jernbanekjøretøy. I dette delkapitlet blir det gjort en samlet vurdering av forbedringspotensialet i energimengde og -forbruk i batteritog, og drøftet en prosess for å estimere en mulig og hensiktsmessig rekkevidde for batteridrevne jernbanekjøretøy i 2030.

Videre vil det redegjøres for de nødvendige batteristørrelsene det anslås å være behov for i de lokomotivene som trekker de mest energikrevende togene på de ikke-elektrifiserte jernbanestrekningene i landet.

4.4.1 Grunnleggende resonnement rundt hva som påvirker lengden på ladestrekninger

Som det fremgår av kapittel 3, så finnes det allerede i dag løsninger for batteridrevne motorvognsett (BEMU) som kan bestilles til de ikke-elektrifiserte strekningene i Norge, og produsenter av lokomotiver antyder at de er i stand til å utvikle og levere batteridrevne produkter på bestilling.

Motorvognsettproduktene som tilbys har begrensninger i tilgjengelig plass og vekt til batteripakker, og kan oppnå en rekkevidde på rundt 80 til 120 km med dagens batteriteknologi [34]. Imidlertid er dagens løsninger utviklet for sentraleuropeiske forhold, og det vil være nødvendig med en tilpasning til norsk klima og topografi. Det kan eksempelvis være behov for lengre ladestrekninger med en konsentrert utbygging ved de største stigningene i terrenget der energiforbruket er høyest. En rekkevidde på 120 km kan ikke i dag garanteres under norske forhold (topografi og klima), og vil sannsynligvis være betydelig lavere.

Frem mot år 2030 er det imidlertid svært sannsynlig at en slik rekkevidde kan garanteres også under norske forhold, først og fremst på grunn av videre utvikling av batteriteknologi, men også til dels på grunn av mer avanserte førerrådningssystemer og øvrig arbeid innenfor optimalisering av energiforbruk. Dette vil påvirke den nødvendige elektrifiseringsgraden for driftsopplegget.

I hovedrapporten argumenteres det for at markedet for kjøretøy med batteridrift vil påvirkes i større grad av sentraleuropeiske behov enn av særnorske behov. Det vil dermed være vesentlig å etablere en banestrømforsyning som tilsvarende lengden på de ikke-elektrifiserte strekningene i Europa, det vil si rundt 80-120 km. Lengden på de ikke-elektrifiserte strekningene vil avhenge av de topografiske forholdene, og kan ved flere tilfeller måtte bli vesentlig kortere enn dette anslaget. Dette fremgår av Bane NORs delrapport i prosjektet, *Banestrømforsyning ved deelektrifisering og batteridrift*.

Med andre ord så vil strekningene med batteridrift (ikke-elektrifiserte strekningene) ikke være lengre enn hva et motorvognsett kan klare, og det er omtrent 120 km. Utviklingen innenfor BEMU har resultert i at disse togtyper utvikles til å bli standard produkter som i stor utstrekning er utprøvd under sentraleuropeiske forhold. Batterilokomotiv med stor batterikapasitet, og batterivogn, vil være nyutvikling, og derfor er det rekkevidden for BEMU som blir førende for lengden på strekningene med batteridrift. På samme tid er det godslokomotiver som har det mest krevende energiforbruket og ladeforutsetningene, så disse togene vil påvirke lengden på både ladestrekningene og strekningene med batteridrift, gitt at 120 km maksimal batteridriftstrekning ligger til grunn.

Som nevnt tidligere er det begrensninger i hvor høy strøm som kan tilføres toget til enhver tid. Godstogene har det høyeste energibehovet og -forbruket, og blir dermed førende for minstelengden på ladestrekningene, ettersom de må være lange nok til å kunne lade opp batteriene tilstrekkelig. For motorvognsett kunne ladestrekningene vært kortere, gitt den samme kjørehastigheten og samme C-verdi (ladehastighet), ettersom de har et lavere energiforbruk pr. km, og fordi batterikapasitet er lavere og vil gi en lavere ladeeffekt. Det er dermed ikke tilgjengelig banestrøm som er begrensningen for oppladingen, men C-verdien på batteriene.

4.4.2 Beregningsprosess for rekkevidde, batterikapasitet og elektrifisering

Som tidligere redegjort for, så vil de teknologiske mulighetene for batteridrevne motorvognsett (BEMU) bli førende for lengden på de ikke-elektrifiserte strekningene. Med dette som utgangspunkt kan det analyseres hvilken batterikapasitet som er nødvendig i godstogene, og hvorvidt de ikke elektrifiserte strekningene må være kortere på grunn av godstogenes forutsetninger. Det kan være gunstig å korte ned lengden på strekninger med batteridrift, ettersom det er godstogene som krever mest energi, og dermed vil styre elektrifiseringsgraden, og videre lade- og batteridriftsstrekningenes lengde. Nedenfor redegjøres det for prosessen som Jernbanedirektoratet har gått gjennom for å beregne et anslag på hva som er en rimelig batterikapasitet og lengde på batteri- og ladestrekninger.

1. Dagens rekkevidde anslås til 55-80 km

Rekkevidden for et motorvognsett (BEMU) er som tidligere belyst rundt 80 til 120 km, og 180 under optimale forhold, altså uten Norges sterke vinterkulde som krever mye energi til oppvarming og de krevende topografiske forholdene i landet. Det er dermed rimelig å anta en langt lavere tilgjengelig rekkevidde for Norske forhold i dag.

- Det legges til grunn et trevogners batteridrevet motorvognsett (BEMU) med et effektbehov på 50 kW pr. vogn for klimaanlegg (HVAC) i vinterkulde, som kjører på en ikke-elektrifisert strekning på 100 km i 100 km/h. Toget vil bruke en time på å transportere seg mellom ladestrekningene, og HVAC vil i løpet av denne tiden ha et samlet energiforbruk på 150 kWh. Til sammenlikning har dagens trevogners BEMU omtrent 500-600 kWh batterimengde og en rekkevidde på 80-120 km. Dersom en tredjedel av energimengden brukes til HVAC, vil rekkevidden følgelig reduseres til en rekkevidde på 55-80 km. Dette er i tråd med hva som har blitt kommunisert offentlig fra flere leverandører av batteridrevne motorvognsett.
 - Det kan dermed anslås en rekkevidde for batteridrevne motorvognsett med 2018 batteriteknologi i en norsk kontekst på rundt 55-80 km under krevende vinterforhold.
 - Det foreligger antydninger fra enkelte togleverandører om at det kan være mulig å utruste togene med opptil en dobbelt så høy energikapasitet enn hva som her er lagt til grunn. Imidlertid avhenger dette i svært høy grad av spesifikke løsninger for plassering av batterier i toget, og er ikke redegjort i tilstrekkelig grad til at Jernbanedirektoratet legger dette til grunn på det nåværende tidspunkt.
2. **Rekkevidden i 2030 anslås til 80-120 km**
- Som det fremgår av kapittel 3.5.1, så er det konservativt anslått en 50 % forbedring av batterikapasitet for høyenergibatterier fra 2020 til 2030, fra henholdsvis 80-90 til 120-130 Wh/kg, og optimistisk anslått en 100 % forbedring, altså til 160-180 Wh/kg. En 50 % økning av energitettheten i dagens batteridrevne motorvognsett fra en batterimengde på 500-600 til 800 kWh i 2030 vil sikre at rekkevidden for slike tog i en norsk kontekst vil være 80-120 km.
3. **Nødvendig tilgjengelig energimengde i godstog anslås til 2 MWh**
- Hvis et godstog skal kunne klare å kjøre med batteridrift på en strekning på 80-120 km, så vil det med et konservativt antatt kilometerforbruk på 20 kWh/km ha behov for en tilgjengelig energimengde fra batteriene på 2 MWh, basert på en gjennomsnittsverdi på 100 km. En godstogvekt på 1200 tonn, basert på kvalitetssikrede data fra Bane NOR, legges til grunn.
- Et konservativt anslag på en energitetthet for batteripakker (høyenergibatterier uten kobolt) på rundt 120 Wh/kg i 2030 legges til grunn, og dermed vil batteripakken godstoget har behov for måtte ha en vekt på nesten 20 tonn. **Imidlertid er ikke dette en tilstrekkelig batterikapasitet** ettersom det også vil være behov for en margin for å unngå en uakseptabel høy slitasje på batteriene som oppstår ved utnyttelse av 100 % av batterikapasiteten. Dette aktualiserer bruk av egen batterivogn, som gir en mulig batteripakkevekt på omtrent 40 tonn, altså rundt det dobbelte av hva som får plass i et seksakslet lokomotiv. Dette gjør det mulig å kun benytte seg av rundt 50 % av batterikapasiteten mellom hver lading, noe som gir vesentlig bedre levetid for batteriene. Bruk av batterivogn kan muliggjøre bruk av høyeffektbatterier, men som til gjengjeld har en lavere energidensitet, omtrent 50 % lavere enn høyenergibatterier. Denne type av batterier krever heller ikke den samme marginen i batterikapasitet som høyenergibatterier for å opprettholde en akseptabel levetid.
4. **Lengden på ladestrekningene avhenger av ladeeffekten i godstogets batteripakke**
- Det legges til grunn at det skal lades 2 MWh på en ladestrekning samtidig som godslokomotiver i gjennomsnitt bruker 1,6 MW (20 kWh/km i traksjon og annet utstyr ved 80 km/h). Ladestrekningenes lengde vil i stor grad være avhengig av hvor stor effekt batteriene kan lades opp med, og dette vil resultere i en begrensning i effektopptak i kjøretøyet. Tabellen under viser hva som skal til av ladestrekningens lengde for å fullade et batteri med den størrelsen som ble presentert tidligere. Variasjonen av ladestrekningens lengde er helt avhengig av C-verdi, forutsatt en hastighet på 80 km/h.

Tabell 6: Ladestrekningens lengde for godstog

C-verdi som benyttes	Resulterende benyttet ladeeffekt til batteriet	Maks. effektopptak kjøretøy	Ladestrekningens nødvendige lengde, gitt en hastighet 80 km/h
1,2	2,4 MW	9 MW	67 km
2,0	4 MW	9 MW	40 km
2,5	5 MW	9 MW	32 km
3,0	6 MW	9 MW	27 km
4,0	8 MW	9 MW	20 km

I beregningseksempelen er det beregnet en nødvendig lengde på ladestrekning antatt at 2 MWh er den totale installerte energimengden og at all denne energien lades opp. Dersom det installeres mer energi enn det som er nødvendig, så reduseres kravene til C-verdien eller ladestrekningens lengde hvis C-verdien er den samme, og hvis det installeres ytterligere 50 % mer energi, 3 MWh, så vil dette gi en 50 % lavere nødvendig ladestrekning (ettersom en høyere ladeeffekt kan bli brukt) eller C-verdi. Som det fremgår av eksempelet så vil det aktuelle godsløkomotivet kreve en lengde på 32 km på ladestrekningene for å kunne klare en 100-km lang strekning med batteridrift, antatt omtrent 2,5 i C-verdi, altså en elektrifiseringsgrad på omtrent 25 %, med noe variasjon avhengig av mulig ladeeffekt til batteriene. Mulig ladeeffekt til batteriene vil begrenses av tilgjengelig effekt og batterienes C-verdi. Det er også lagt til grunn et energiforbruk som ikke tar hensyn til periodevis høyt forbruk til traksjon. Dagens LTO batterier (som er av typen høyeffekt) kan lades med høyere enn 3C. I område fra 1-3C ligger høyenergibatterier med kobolt. Med henblikk på dagens utvikling av batterier, eksempelvis LNMO og LFMP, samt *solid state*-batterier på lang sikt, forventes det at ladehastigheten vil minimum være 3C og sannsynligvis høyere.

C-verdi 4 eller høyere vil gi en anvendt ladeeffekt som vil være i konflikt med maks effektopptak til kjøretøyet, ettersom det er antatt et maks effektopptak på omtrent 9 MW basert på typisk maks effektopptak i lokomotiv. Her er det viktig å forstå at for et motorvognsett så vil C-verdi ikke være begrenset i samme utstrekning, ettersom batteristørrelsen er mindre og vil resultere i lavere ladeeffekt.

5. Nødvendig ladeeffekt for motorvognsett avhenger av ladestrekningens lengde og togets hastighet

En tilsvarende tabell illustrerer nødvendig C-verdi for å kunne lade et batteridrevet motorvognsett med 500 kWh på strekningen. Disse togene har behov for rundt en firedel av den energimengden pr. reiste meter som kreves for godstog. Det er illustrert to ulike hastigheter og lengde på ladestrekninger. Merk at kun energi benyttet til traksjon er inkludert.

Tabell 7: Ladestrekningens lengde for motorvognsett med 500 kWh energimengde i batteripakken.

Hastighet	Ladestrekningens lengde	Tid på strekning	Nød-vendig C-verdi	Ladeeffekt til batteriet
120 km/h	20 km	600s=10min=1/6t	6	3 MW
	40 km	1200s=20min=1/3t	3	1,5 MW
80 km/h	20 km	900s=15min=1/4t	4	2 MW
	40 km	1800s=30min=1/2t	2	1 MW

Tilsvarende som for godstog, så vil en økning av installert energimengde gi en lavere nødvendig C-verdi. Det kan argumenteres for at den økte hastigheten på denne typen tog vil stille krav om økt C-verdi, og avhengig av ladestrekningens lengde så kan det være nødvendig å tilpasse hastigheten for å kunne lade opp hele batteriets energimengde.

6. Persontog trukket av lokomotiver

Et liknende resonnement vil uttegne seg for persontog trukket av lokomotiver som for motorvognsett, men det antas at togene vil ha en dobling av energibehovet. Dette er i utgangspunktet uproblematisk ettersom det, som tidligere redegjort for, er plass til minst 2,4 MWh i et batterilokomotiv. Dette utgjør rundt dobbelt så mye energi som persontoget vil kreve for å kunne betjene de samme strekningene med batteridrift som godstoget. Imidlertid vil det også gi en dobbelt så høy ladeeffekt til batteriene sammenliknet med motorvognsett, og kjøretøyets hastighet må tilpasses ladeeffekten (C-verdien og installert energimengde).

Ved hjelp av beregningseksempelet ovenfor kan det konstateres at det er mulig å ha batteridrift på ikke-elektrifiserte strekninger på 80-120 km, og at det vil kreves ladestrekninger på rundt 20-40 km. Ladestrekningenes lengde vil være i det øvre sjiktet av spennet hvis C-verdien er nærmere 2C, sammenliknet mot en C-verdi som nærmer seg 4C. Imidlertid avhenger dette også av den totalt installerte energikapasiteten, der en større mengde energi vil tillate en lavere C-verdi. Det vil trolig være behov for lengre ladestrekninger der det er et høyt energibehov til traksjon i tillegg til lading, eksempelvis i oppoverbakker. En ytterligere forlengelse av ladestrekninger kan være aktuelt dersom det etter en kost-nyttevurdering anses som gunstig for å gi en lavere ladeeffekt og dermed lengre levetid på batteriene, og et lavere krav til C-verdi. Dette må veies opp mot investeringskostnadene i en samlet vurdering.

5 Pris

Markedet for batterier til kjøretøy har endret seg mye i nyere tid. For å møte den økte etterspørselen som har kommet i forbindelse med behovet for nullutslippsløsninger i transportsektoren, jobber produsenter stadig med nye teknologiske løsninger som ikke bare gir økt rekkevidde og mer effektiv lading, men også lavere priser pr. energimengde. Myndighetene i flere land, deriblant Norge, har subsidiert elektriske kjøretøy og benyttet ulike insentiver for å få fartgang i denne utviklingen gjennom økt bruk av elektriske kjøretøy.

Norge har blitt et foregangsland for overgang til elektriske biler, og har oppnådd en høy andel elektriske personbiler gjennom blant annet momsfristak, tilgang til kollektivfelt i veibanen, gratis parkering og bompengefristak [35]. Imidlertid kan det argumenteres for at slike incentivordninger, ment for å styrke konkurranseevnen for elektriske kjøretøy, snart har blitt overflødige. Statens vegvesen antyder at det mellom 2025 og 2030 er sannsynlig at batteridrevne lastebiler vil bli økonomisk lønnsomme sammenlignet med dagens forbrenningsmotorkjøretøy. Dette er avhengig av utviklingen av batterikostnader og mulige stordriftsfordeler i produksjonen når det blir større produksjonsvolumer. Statens vegvesen oppgir også at det største hinderet for en overgang til elektriske lastebiler i dag er det økonomiske aspektet, med høy investeringskostnader og økonomisk risiko, særlig for små bedrifter [36]. Med andre ord, så har det økonomiske aspektet stor betydning for å oppnå en endring i transportsektoren. Prisen for teknologien er altså en sentral del i den videre utviklingen av miljøvennlige alternativer i transportsektoren.

I dette kapitlet drøftes prisen for-, etterspørselen av- og tilgjengeligheten til batteriteknologi for kjøretøy på et overordnet nivå for dagens situasjon og for 2030. Først redegjøres det for både dagens og den historiske utviklingen av litium-ionbatteripriser. Videre presenteres den historiske, dagens og fremtidens etterspørsel og tilgjengelighet. Prisutviklingen i fremtiden er svært avhengig av hvordan markedet utvikles, og med informasjon om dagens prisnivå, markedets utvikling og sammenhengen mellom markedets utvikling og prisutvikling, så gis en indikasjon på hvordan prisutviklingen for batterier muligens kan se ut i fremtiden.

5.1 Pris på batterier for elektriske veikjøretøy

Litium-ionbatteriteknologien utvikles stadig, eksempelvis i form av battericellens og batteripakkens format og cellekjemi, og denne utviklingen påvirker prisen. Det er vesentlig å skille mellom pris og kostnad, der prisen er hva kjøperen betaler for et produkt eller en tjeneste, mens kostnaden er det som kreves for å produsere, eller levere, produktet, eller tjenesten. I kildegrunnlaget fremgår det ikke alltid tydelig hvorvidt dette skillet er ivarettatt, og dette påvirker også innholdet i denne delrapporten.

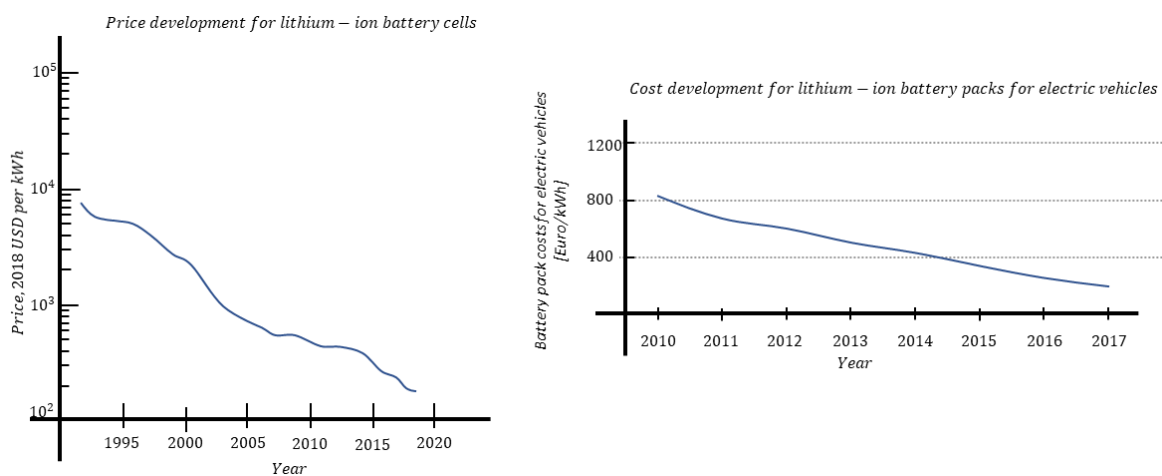
Det finnes mange rapporter og vitenskapelige artikler som tar for seg prisutviklingen av litiumbatterier, og det er variasjon i funnene blant de respektive kildene. Dette innebærer en risiko for at det ikke tegnes et representativt bilde av den faktiske utviklingen når kilden gjennomgås. I dette arbeidet har det vært tilstrebet å få et så overordnet, nyansert og vitenskapelig grunnlag som mulig, og analyse og drøfting av funnene har derfor blitt vektlagt.

Det er flere forhold som påvirker prisen pr. celle eller pr. energimengde enn kun batterienes tekniske utvikling. Den kan også påvirkes av fremstillingsmetode, produksjonsvolum og energimengden for det enkelte batteriet. Dette vil videre gi ulike prisanslag avhengig av hvilke data som ligger til grunn. Dette gjør seg særskilt gjeldende når det analyseres priser i en jernbanekontekst, der markedet er beskjedent sammenliknet med veisektoren der mye av datagrunnlaget kommer fra, og der den store batterikapasiteten som installeres pr. kjøretøy også vil påvirke prisen. Til tross for dette, så er det av interesse å analysere hele markedet for batterier til kjøretøy for å få en forståelse for den samlede utviklingen.

Kildegrunnlaget som ligger til grunn for dette kapitlet har i all hovedsak basert seg på høyenergibatterier, ettersom dette er batteritypen som i nyere tid har dominert på markedet. Prisen for høyenergibatterier er ikke direkte overførbart til høyeffektbatterier, ettersom høyeffektbatterier har en høyere kostnad for en tilsvarende mengde installert energimengde. Imidlertid kan funnene tilknyttet etterspørsel og prisutvikling for høyenergibatterier gi en innsikt i markedets utvikling og dermed ligge til grunn for antakelser om markedet også for høyeffektbatterier.

De siste 30 årene har prisen pr. installerte batterikapasitet for litium-ionbatterier på cellenivå sunket kraftig. I perioden 1991- 2018 minket prisene med mer enn 95 %. Prisen har, ifølge enkelte kilder, sunket 13 % årlig mellom 1992 og 2016 [37]. Figur 12 nedenfor viser prisutviklingen for litium-ionbattericeller og

kostnadsutviklingen for batteripakker til elektriske biler, henholdsvis til venstre og høyre, og bekrefter utviklingen funnet i det øvrige kildematerialet. Grafen til høyre fastslår at batteripakkeprisen har blitt redusert fra omtrent 800€ i 2010 til 200€ i 2017 pr. installert kWh.



Figur 12: Venstre figur: Prisutvikling for lithium-ionbattericeller mellom 1991 og 2018. Figuren er utarbeidet basert på data fra studie av Ziegler og Trancik [37]. Merk logaritmisk skala. Høyre figur: Kostnadsutvikling for lithium-ionbatteripakker mellom 2010 og 2017. Figuren er utarbeidet basert på data fra studie av Tsiropoulos et al. [38].

Dette bildet tydeliggjøres i Tabell nedenfor, der resultatene fra flere ulike kilder gjengis med henblikk på pris- og kostnadsutvikling for litium-ionbatterier de siste årene. Som i grafene i Figur 12, så fremgår det i tabellen nedenfor at prisen har falt de siste årene. Dette kan delvis forklares med en tilvekst i produksjonsvolum og nye batteridesign [39]. Som det fremgår av tabellen, så varierer tallene blant de ulike kildene, og dette skyldes blant annet at det er en forskjell på produksjonskostnad og markedspris, årstall som prisen og kostnaden gjelder, samt celle- og batteripakkeformat, der sylindriske celler har en lavere pris og kostnad [38].

Tabell 8: Pris- og kostnadssituasjonen for litium-ion batterier de siste årene.

Kilde	Forklaring	Årtall for pris	Pris/kostnad pr. kWh, pakke	Pris/kostnad pr. kWh, cell
Vitenskapelig artikkel i tidsskriftet Energy & Environmental Science, Ziegler et al. [37]	Pris pr. energimengde på cellenivå med 2021-06 valutakurs. Alle litium-ionbatterier inkludert.	2018		160-170 €
Europeisk-finansiert rapport av Tsiropoulos et al. from [38]	Kostnad pr. energimengde på pakkenivå for elektriske kjøretøy (vei)	2017	Omtrent 190-200 €	
Studie av König et al. [3]	Kostnad pr. energimengde på pakkenivå for elektriske kjøretøy (vei)	2020-2021	Omtrent 150 €	
Det Norske Veritas [40]	Kostnad pr. energimengde (troligvis pakkenivå) i \$ pr. 2020, omregnet til € med 2021-06 valutakurs	2020	Omtrent 130-140 €	
Bloomberg [39]	Kostnad pr. energimengde på pakkenivå, gjennomsnittlig, hele litium-ionbatteri markedet Omregnet til € med 2021-06 valutakurs	2020	Omtrent 110-120 €	
Bloomberg [39]	Kostnad pr. energimengde på pakkenivå og cellenivå, gjennomsnittlig, volumvektet og for elektriske kjøretøy. Omregnet til € med 2021-06 valutakurs	2020	Omtrent 100-110 €	Omtrent 80-90 €

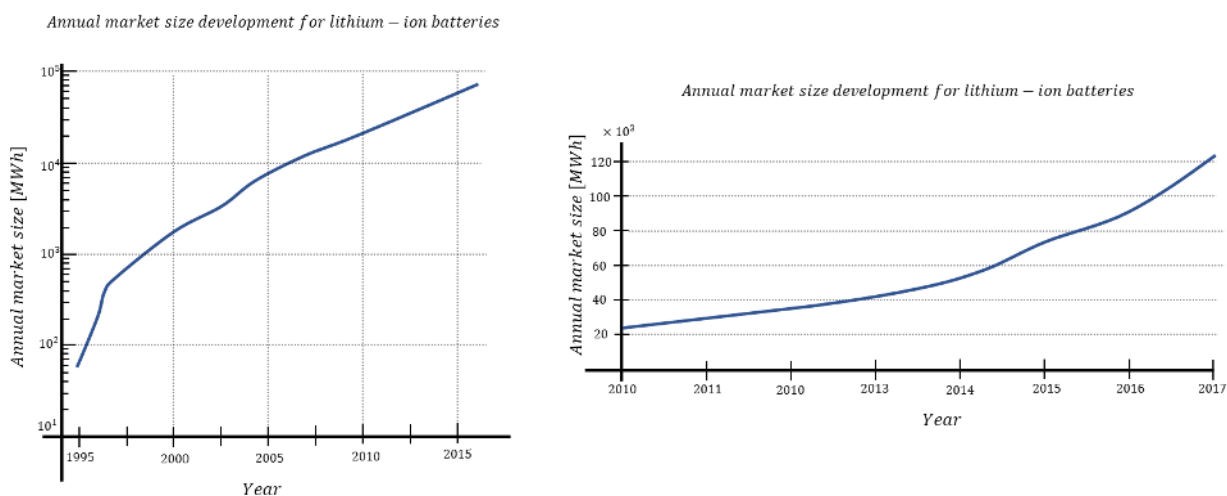
Kostnaden for installert batterikapasitet på cellenivå varierer mellom ulike kilder, men de fleste kildene peker på en kostnad som er en god del lavere enn 150 €, antakelig nærmere 100 € pr. kWh. Enkelte kilder går så langt ned som under 100 €. På pakkenivå er kostnaden pr. energimengde høyere ettersom de inkluderer mer enn bare selve battericellene. Flere kilder peker på en pakkekostnad like under 150 € pr. kWh, og enkelte så lavt som 120 €.

Prisforskjellen mellom celle- og pakkenivå fremgår ikke alltid like tydelig i kildegrunnet, men det finnes studier som antyder en rimelig prisforskjell mellom disse i form av en faktor på 1,2-2,2 i perioden 2020-2030. Prisforskjellen mellom celle- og pakkenivå er ventet å reduseres i fremtiden [3].

Det er ikke tiden i seg selv som påvirker prisutviklingen, men de teknologiske og produksjonsrelaterte fremskrittene, som videre påvirker markedet. Prisutviklingen er særlig relatert til produksjonsvolum. I den sammenheng er det relevant å gjøre rede for relasjonen mellom den kumulative produserte batterikapasiteten og prisen for teknologien. Det finnes studier som peker i retning av et historisk forhold på omtrent 20 % for litium-ion batteriteknologi, hvilket betyr at for hver dobling av den akkumulerte produserte batterikapasiteten, så reduseres prisen for teknologien med 20 %. Denne ratioen er noe høyere for sylindriske litium-ionbatterier [37] [38]. Dette forholdet vil legges til grunn for estimering av fremtidens batteripriser senere i kapittelet.

5.2 Etterspørsel og tilgjengelighet

Siden litium-ionbatterienes introduksjon på begynnelsen av 1990-tallet, så har det årlige markedet økt kraftig, og dette fremgår av figuren nedenfor. Fra den venstre grafen kan det leses at markedsstørrelsen i 20-årsperioden 1995-2015 har gått fra ca. 30-40 MWh til ca. 60 GWh [37], dvs. en faktor på mer enn 1000. Tilsvarende data i den høyre grafen viser 75 GWh i 2015 [38].

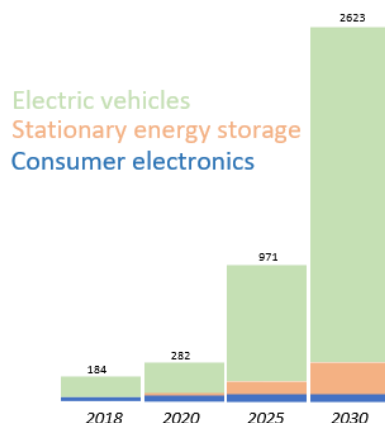


Figur 13: Venstre graf viser årlig markedsstørrelse for litium-ionbatterier. Bild skapt basert på data fra studie av Ziegler og Trancik. [37]. Notere logaritmisk skala. Høyre bilde viser også årlig markedsstørrelse. Bild skapt basert på data fra Tsiropoulos et al. [38].

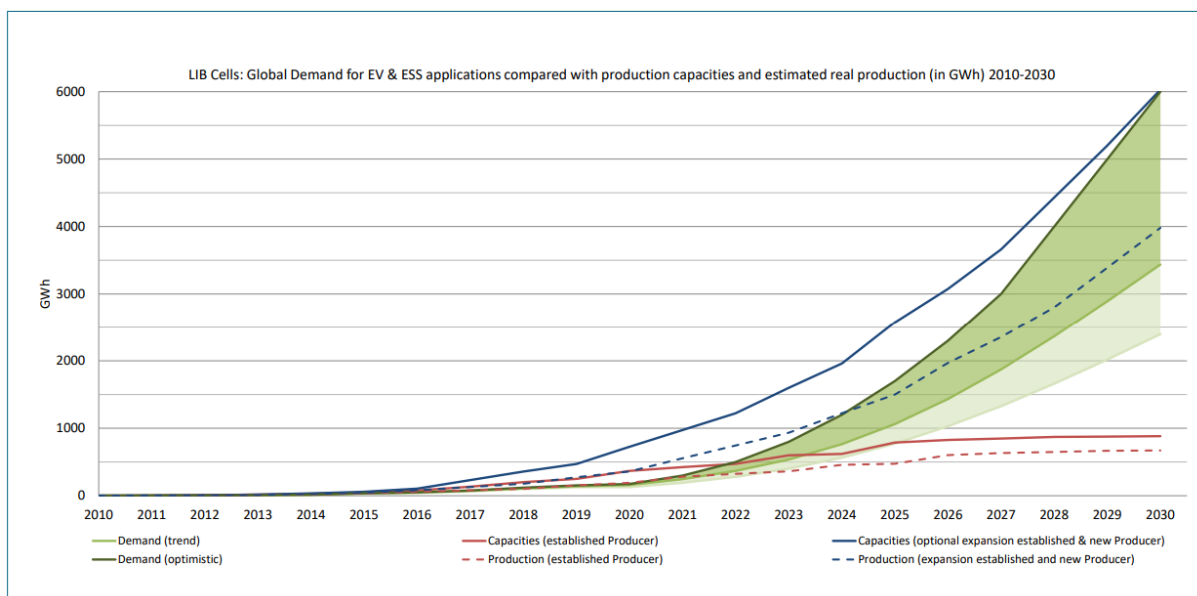
En studie fra World Economic Forum [41] viser at etterspørselen på batterier i sin helhet var 184 GWh for 2018 og 200 GWh i 2019, og der utgjorde batterier til elektriske kjøretøy en klar overvekt av etterspørselen. I 2019 anslo man etterspørselen i 2020 til 282 GWh, og det ble forventet en videre vekst i markedet på rundt 25 % pr. år frem til år 2030. Studien viser at elektriske kjøretøy utgjør mesteparten av veksten, som vist i .

Det er imidlertid også heftet usikkerhet ved omfanget av markedsveksten for litiumbatterier, som blant annet fremgår i en rapport fra bransjeorganisasjonen VDMA i Tyskland [27]. Figur 15 er hentet fra rapporten, og viser en forventet eksponentiell vekst i etterspørsel frem mot 2030, opp til mellom 2500 og 4000 GWh [27]. Videre fremgår det forskjell mellom etterspørselen og produksjonskapasiteten for ulike scenarier. I lys av dette kan det konkluderes med at det er et stort behov for å øke produksjonskapasiteten for å møte etterspørselen. Dette møtes av utbygging av batterifabrikker flere steder i både Europa og i resten av verden. Prisene kan komme til å påvirkes av hvor stor grad gapet mellom etterspørsel og produksjonskapasitet vil tettes av disse nye fabrikkene.

Lithium – ion battery demand [GWh]



Figur 14: Global etterspørsel av batterier frem til 2030. Figuren er laget basert på data fra studien av World Economic Forum [41].



Figur 15: Historisk og prognosert etterspørsel og produksjon av litium-ionbatterier. Figur fra VDMA [27].

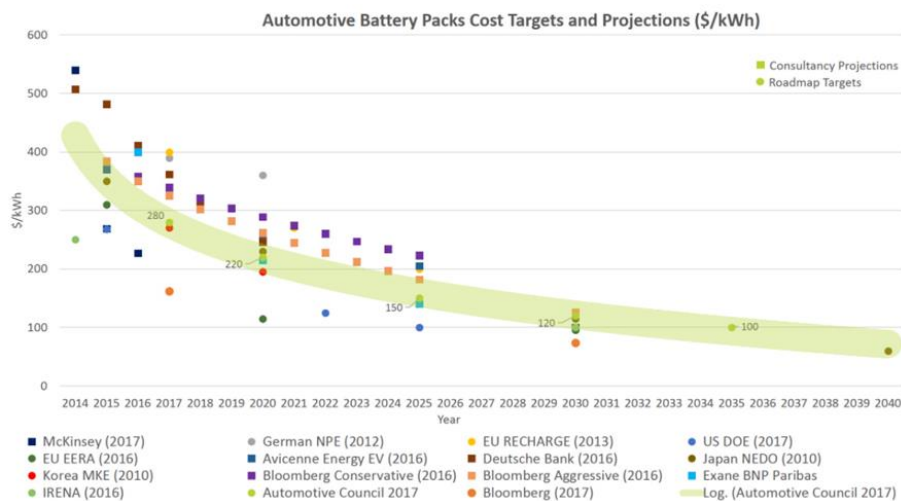
5.3 Fremtidens priser på batterier for personbiler

Historisk utvikling av- og dagens batteripriser, -etterspørsel og -tilgjengelighet blir redegjort for i de foregående delkapitlene. I dette delkapitlet drøftes den videre utviklingen av dette i fremtiden. Det anbefales å lese de foregående kapitlene for å få innsikt i utgangspunktet og usikkerhetene som ligger til grunn.

Pris- og kostnadsutvikling for battericeller innenfor personbilindustrien har en lav usikkerhet ettersom dette er godt dokumenterte analyser utført av flere aktører. Usikkerheten tilknyttet batteripakker er noe større ettersom måten de bygges opp på inkluderer flere prosesser som skal prises i tillegg til battericellene, og her er det identifisert et rom for forbedringer av produktutviklingen. For tunge veikjøretøy og jernbanekjøretøy så er usikkerheten større, og årsaken til dette er at markedet har offentliggjort mindre informasjon, utviklingen fortsatt er på et tidlig stadium og at produksjonsvolumet er lavere enn for personbiler.

Det er vesentlig å se pris- og kostnadsutvikling i sammenheng med markedsveksten. Studien fra Ziegler et al. [37] peker på at priser og kostnader i et slikt perspektiv ikke bare har sunket med 13 % årlig isolert sett, men har sunket med 20 % for hver doubling av den kumulative markedsstørrelsen for alle battericelletyper, og 24 % for sylindriske battericeller. Som det fremgår av så er det prognostisert en økning av markedet med mer enn en tredobling, og nesten en firedobling, i perioden 2020-2025 [41]. En konservativ tolkning av informasjonen som foreligger peker i retning av en prisreduksjon på omtrent 25 % i denne perioden, og med en batteripakkepris på 120-150 €/kWh i 2020 resulterer dette i et anslag på 90-113 €/kWh i 2025. I perioden 2020-2030 viser at markedet er forventet å dobles kumulativt tre ganger, noe som sammen med en pris- og kostnadsreduksjon på 20 % pr. doubling vil gi en prisreduksjon på rundt 50 % i perioden, og dermed en pris på 60-75 €/kWh i 2030. Imidlertid er dette heftet med usikkerhet dersom forholdet mellom pris og produsert kapasitet vil ha den historiske utviklingen videre i fremtiden.

I litteraturstudien utført av König et al. [3] peker forfatterne på at dagens batteripakkekostnader i hovedsak er i det lavere sjiktet av tilgjengelig datagrunnlag, om lag 150 €/kWh, og de argumenterer derfor for at kostnadene i 2030 kan synke helt ned til nær 100 €/kWh. I lys av beregningene gjort i forrige avsnitt, så vurderes dette til å være en rimelig antakelse. Utover dette er det også flere øvrige studier som peker i retning av et batteripakkeprinsnivå på rundt 100 €/kWh i 2030 [38]. Et prinsnivå for batteripakker i 2030 på rundt 100 €/kWh kan underbygges ytterligere av grafen i Figur 16, som viser kostnader for batteripakker hentet fra 16 ulike analyseselskaper.



Figur 16: Kostnad for batteripakker fra 16 ulike analyseselskaper. Figur hentet fra arbeid av Regnart [42].

5.4 Diskusjon av batteripris i en jernbanekontekst

Batteriprisene som drøftes i forrige delkapittel er basert på utviklingen innenfor elbilbatterimarkedet dvs. høyenergibatterier. Dette markedet vil være drivende for den videre utviklingen av litium-ionbatterier, men det er vesentlig å belyse at prisen for batteripakker til jernbanekjøretøy antakelig ikke vil tilsvare veikjøretøy. Det finnes flere aspekter som argumenterer for dette, som diskuteres i dette delkapittelet. Det vil også diskuteres hvorfor det er vanskelig å få pålitelig informasjon om de tekniske spesifikasjonene for batteridrevne jernbanekjøretøy.

Konfidensielle priser

Markedet for batterier til tungtransport og tog er belagt med stor grad av konfidensialitet og derfor er det et begrenset tilgjengelig kunnskapsgrunnlag. Det er derfor ikke funnet kilder som redegjør for startprisen i 2020, og nedgangen i priser for personbilsegmentet er ingen garanti for sluttprisen nå eller i 2030 for jernbanekjøretøy.

Sikkerhetskrav

Utstyr til jernbanedrift har ofte svært høye sikkerhetskrav, og det er generelt et større omfang av testing og godkjenningprosesser for dette sammenliknet tilsvarende utstyr i veisektoren. Utover dette, så vil det være utfordrende å definere en konkret prisforskjell mellom utstyr i de to sektorene, ettersom dette varierer med type utstyr og prisen for det konkrete utstyret. Helt overordnet, så er det ikke uvanlig med en mangedobling av pris, men dette avhenger av prisen for utstyret ettersom en del av økningen er et fast påslag.

Markedsstørrelse og stordriftsfordeler

Batteripakker for personbilmarkedet produseres i et vesentlig større omfang enn batteripakker for jernbanekjøretøy. Mer effektiv produksjon, og spredning av de faste kostnadene over et større samlet produksjonsvolum, bidrar til å senke prisene pr. batteripakke og bidrar til at prisnivået for batteripakker til personbiler ligger lavere enn prisnivået for batteripakker til tog. I fremtiden forventes det at stordriftsfordeler i større grad vil bidra til å redusere prisene for batteripakker for tog også.

Få store anskaffelser fremfor mange små

Innkjøp av jernbanekjøretøy er svært kostbart, og anskaffelsen skjer vanligvis gjennom en kontrakt bestående av en større serie i størrelsesordrer på flere milliarder kr. Dette er en ulempe for utvikling av batteriteknologi til jernbanekjøretøy ettersom det blir færre serier med rom for nyvinninger og videre teknologiutvikling.

Tradisjonelt har kjøretøyanskaffelser i stor grad innebåret at produktet utvikles skreddersydd fra bunnen av, etter bestillers kravspesifikasjoner. I nyere tid har imidlertid markedet i større grad blitt preget av at leverandørene tilbyr standardprodukter som i stedet tilpasses de spesifikke forholdene det skal opereres i. Denne modellen innebærer store utviklingskostnader der leverandøren tar den økonomiske risikoen, og ettersom bestillerne er få så vil utviklingskostnadene fordeles på et begrenset antall kontrakter. Denne usikkerheten for leverandørene kan hemme innovasjonen og medføre at de unngår å implementere store endringer i standardproduktene for å redusere risikoen.

Imidlertid er det vesentlig å poengtere at leverandørene, til tross for disse forholdene, har utviklet batteritog, men ved å belyse dette gis det en innsikt i hvorfor utviklingen av batteridrevne jernbanekjøretøy ikke vil skje like raskt som innenfor elbilmarkedet.

5.5 Eksempel på batteripakkepriser for tog

I all hovedsak så består batteripakker i hele transportsektoren av battericeller som er relativt like hvis man sammenligner tilsvarende batterikjemier. Den vesentlige forskjellen ligger i størrelsen på pakkene og hvordan batteripakkene konstrueres, og i denne sammenheng er det vesentlig å trekke frem, som tidligere redegjort for, at prisen for batteripakker for tog er høyere enn for personbil og buss. Prisforskjellen mellom battericeller og -pakker for personbiler har en faktor på omtrent 1,2 til 2,2, der den laveste er et resultat av utviklingen som er forventet å skje videre innenfor personbilmarkedet.

Tabell 9 under viser pris på batteripakker i 2020. Her vises det at høyeffektbatterier for buss koster ca. 3 ganger så mye som høyenergibatterier. I denne sammenheng er det viktig å presisere at levetiden for høyeffektbatterier er vesentlig bedre enn for høyenergibatterier, som beskrevet i kapittel 3.3.

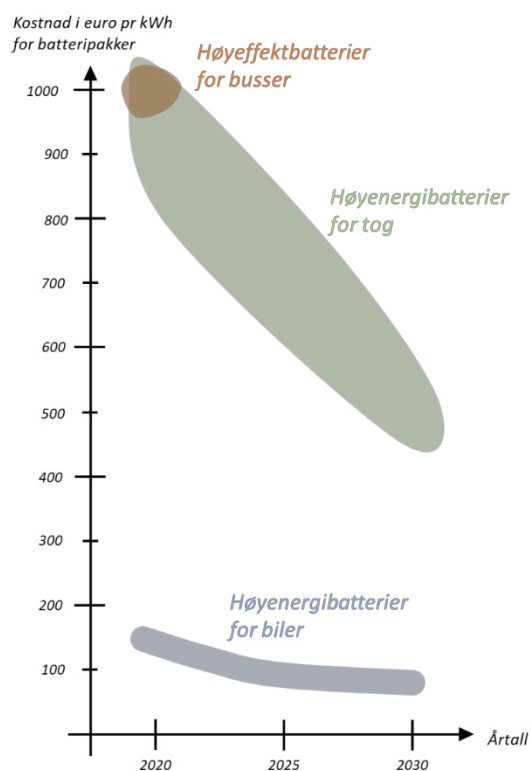
Når det gjelder prisen på togbatterier innebærer dette stor usikkerhet, men signaler fra industrien indikerer at den kan være oppmot 1000 €/kWh i 2020 for høyenergibatterisystemer. Batterisystemet inkluderer ikke bare pakken, men også annet utstyr som eksempelvis BMS. Jernbanedirektoratet har ikke funnet noe informasjon gjeldende pris for høyeffektbatterier for tog.

Tabell 9: Batteripakkepriser i €/kWh i 2020 for personbil, buss og tog. *Pris basert på redegjørelse i kapittel 5.3. **Pris basert på sammenstilling gjort i 2016 med estimert median for høyenergibatterier (405 USD) og høyeffektbatterier (1150 USD) i 2020 [43], med en gjennomsnittlig valutakurs for 2016 mellom USD og EUR på 1.1 [44].

	Personbil	Buss	Tog
Høyenergi	140*	Cirka 370**	Cirka 1000

Høyeffekt	Benyttet ikke	Cirka 1050**	Ingen indikasjon på pris
-----------	---------------	--------------	--------------------------

Med anslaget for faktoren mellom priser for battericeller og batteripakker lagt til grunn, kan det gjøres estimater for batteripakkepriser til bruk i jernbanekjøretøy. Dette vil bli basert på høyenergibatterier. Med utgangspunkt i kapittel 5.1, så kan det anslås en battericellepris i 2020 på 140 €/kWh, og en konservativt anslått prisreduksjon på 30 % til omtrent 100 €/kWh for 2030. Faktoren mellom battericelle- og -pakkepris for 2020 anslås til å være på omtrent 7, noe som vil gi en batteripakkepris på omtrent 1000 €/kWh i 2020. Faktor 7 sammen med celleprisen på 140 €/kWh vil gi en batteripakkepris på omtrent 1000 €/kWh som presentert i forrige avsnitt. I 2030 antas det en reduksjon til en faktor på 5 i takt med teknologiske fremskritt og markedets utvikling. Dette resulterer i et prisnivå på 500 €/kWh i 2030 for høyenergibatterier for tog. Dette er illustrert i Figur 17.



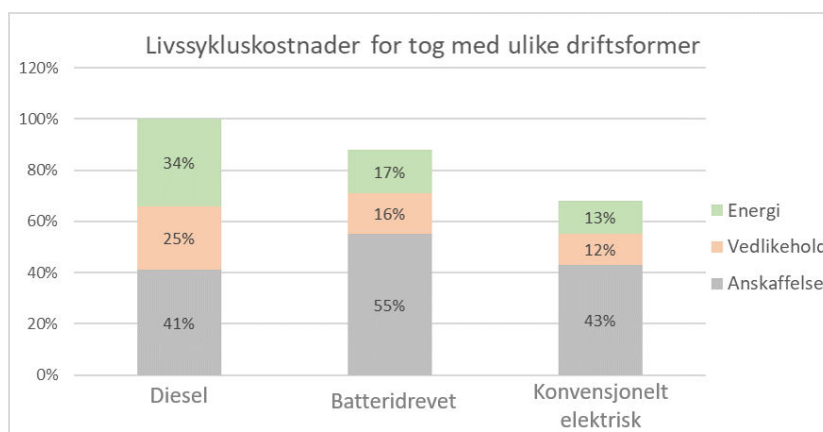
Figur 17: Illustrasjon av prognostisert pris for batteripakker for biler, busser og tog frem mot 2030. Noter at prisen på pakker for busser er basert på estimat fra 2016 [43]. Prisen for pakker på tog er forklart tidligere i delkapittelet. Prisen for pakker for biler er forklart i kapittel 5.3.

I utredningsarbeidet har Bane NOR bistått Jernbanedirektoratet med å beregne energibehovet til eventuelle batteridrevne tog på de ikke-elektrifiserte strekningene. I et deelektrifisert driftsopplegg har det blitt lagt til grunn omtrent 20-40 km lange ladestrekninger med rundt 100 km ikke-elektrifiserte etapper imellom. For et motorvognsett, lokomotivtrukket persontog og lokomotiv for tunge godstog, medfører dette et batteristørrelsesbehov (tilgjengelig energi) på henholdsvis 0,5, 1 og 2 MWh. Med prisberegningene som ligger til grunn, så vil batteripakker til motorvognsett og lokomotiver koste henholdsvis 0,25, 0,5 og 1,0 mill. € i 2030. Det inkluderer ikke alle andre tilpasningskostnader som batteripakker medfører. Det er i denne sammenheng vesentlig å belyse at energibehovet som er lagt til grunn for kostnadsberegningen bare inkluderer benyttet energi til fremdrift, og at HVAC-sysemer vil øke energibehovet. Den installerte kapasiteten vil også være opp til 20-40 % høyere avhengig av batteriteknologi for å ha både en aldrings- og en kapasitetsreserve. Dette vil resultere i en kostnadsøkning som er høyere enn tallene presentert for batteripakken.

Anskaffelseskostnadene for konvensjonelle elektriske jernbanekjøretøy er på cirka 6-8 mill. € for et trevogners motorvognsett, og omtrent den samme for et elektrisk seksakslet lokomotiv, men disse tallene kan variere betydelig, basert på ordrestørrelse og tilpasning til spesifikke forhold. Batterisystemkostnadene er dermed store, men ikke dominerende, i forhold til prisen for hele kjøretøyet,

Ifølge jernbaneorganisasjonen VDB i Tyskland, så er den økte anskaffelseskostnaden for et batteridrevet motorvognsett sammenliknet med et tilsvarende konvensjonelt elektrisk motorvognsett, på cirka 28 % [34]. Dette vil, med en antagelse om en batteripakkekostnad på cirka 2 mill. €², bety at prisen pr. installert energi vil være 2000 €/kWh. Dette kan sammenlignes med den tidligere anslåtte prisen for batteripakker på 1000 €/kWh. Sistnevnte inkluderer kun den benyttede energimengden til traksjon, og forskjellen i pris kan også forklares av at det kan være forskjellige batterityper. En annen forklaring på differansen mellom de estimerte prisene kan være tidspunktene referanseprisene er hentet fra.

Et jernbanekjøretøy har en levetid på minst 30 år, hvilket innebærer at batteriene, gitt en batterilevetid på rundt ti år, må skiftes minst to ganger i løpet av kjøretøyets levetid. Dette er av vesentlig betydning for jernbanekjøretøyets livssyklus kostnader. Dette fremgår av Figur 18, som sammenligner livssyklus kostnader for dieseldrevne-, batteridrevne- og konvensjonelle elektriske jernbanekjøretøy. Anskaffelseskostnadene er anslått å være omtrent 28 % - 34 % høyere for et batteridrevet tog sammenliknet med tilsvarende diesel- eller konvensjonelt elektriske tog. Til tross for disse økte kostnadene, så vil de lavere energi- og vedlikeholdskostnadene resultere i en totalt lavere livssyklus kostnad for toget. I dette eksempel er kostnaden for batteribytter inkludert i vedlikeholdskostnaden [34].



Figur 18: Sammenligning av livssyklus kostnader for tog med ulike driftsformer. Norsk utarbeidelse av figur 12 (side 25) i rapport fra VDB [34].

² Forutsatt en total anskaffelseskostnad på 9 mill. € for et batteridrevet motorvognssett med 1000 kWh installert energikapasitet.

6 Konklusjon

Den raske utviklingen av batteriteknologi er ventet å tilta videre gjennom 2020-tallet, og valget av batteritype for jernbanekjøretøy vil være heftet med stadig lavere usikkerhet frem mot 2030.

Energitettheten er ventet å øke for både høyeffekt- og høyenergibatterier, noe som medfører flere fordeler for et driftsopplegg basert på batteridrift i kombinasjon med del-elektrifiserte ladestrekninger. Det vil bli mulig å installere en økt energimengde i batterikjøretøyet pr. volum og vekt, noe som kan utnyttes til flere fordeler, blant annet økt robusthet i driftskonseptet, lengre levetid for batteriene, kortere ladetid, men også lavere drifts- og investeringskostnader.

Samlet sett vil driftsopplegget være fullt mulig med dagens prisnivå på batteripakker. Konseptet er ventet å ha en enda lavere kostnad i 2030 som følge av en forventet økt etterspørsel, standardisering, større produksjonsvolum, batteriteknologiutvikling, og dermed et lavere prisnivå.

Rekkevidden er en konsekvens av flere faktorer, deriblant batterienes egenskaper. I denne rapporten redegjøres det for en lengde på henholdsvis 80-120 og 20-40 km for ikke-elektrifiserte strekninger og ladestrekninger. Dette er begrunnet i begrensningene i de tilgjengelige konseptene for batteridrevne motorvogntsett fra leverandørene, samt godstogenes oppladningsbehov under kjøring. I tillegg den samlede tilgjengelige energien i batteriene, så blir dermed den mulige ladeeffekten også førende for lengden og fordelingen mellom ladestrekninger og delstrekninger med batteridrift, slik at toget rekker å lade opp batteriene før neste ikke-elektrifiserte delstrekning. For et energikrevende godslokomotiv kan det i flere tilfeller være tilgjengelig effekt fra infrastrukturen som er begrensende, mens det for et lettere motorvogntsett i all hovedsak vil være batterielektriske begrensninger for ladeeffekten.

Batterienes levetid påvirkes av hvilken batteritype som velges til driftsopplegget, og hvordan batteriene brukes. Helt overordnet så har høyeffektbatterier et lengre syklusliv enn høyenergibatterier.

Som det fremgår av denne delrapporten, så er et driftsopplegg basert på delelektrifiserte ladestrekninger i kombinasjon med batteridrift på ikke-elektrifiserte delstrekninger allerede mulig med dagens batteriteknologi uavhengig av videre utvikling. Frem mot 2030 er det antatt at teknologiutviklingen vil gjøre den tilgjengelige rekkevidden for dagens batteridrevne motorvogntsett i Sentral-Europa mulig også under norske forhold.

De stadig forbedrede batteriegenskapene for batteridrevne tog kan gi inntrykk av at det vil være hensiktsmessig å avvente en implementering av batteridrift av hensyn til lavere investeringskostnader. Imidlertid er det en rekke fordeler ved å ikke avvente videre forbedringer av batteriteknologi. Den økte energitettheten i batteriene kan utnyttes til en rekke fordeler. Dersom det bygges en infrastruktur basert på dagens batteriegenskaper blir det i fremtiden mulig med lengere levetid på høyenergibatteriene og dermed lavere driftskostnader, men også en raskere overgang til høyeffektbatterier. Høyeffektbatteriene har en lavere energitetthet, men vil da kunne benyttes, noe som innebærer lenger levetid, raskere ladetid og høyere ytelse for togenes batteripakker.

7 Kilder

- [1] «Towards the battery of the future,» *Science for Environment Policy*, nr. 20, 2018.
- [2] CADEX, «BU-302: Series and Parallel Battery Configurations,» Battery University, 19 06 2020. [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations. [Funnet 27 05 2021].
- [3] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw og M. Lienkamp, «An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles,» *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, nr. 21, 2021.
- [4] L. Languang, H. Xuebing, L. Jianqiu, H. Jianfeng og . O. Minggao, «A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric,» *Journal of Power Sources*, vol. 226, nr. 1, pp. 272-288, 2013.
- [5] Zenith et al., «Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner. 2. utgave,» SINTEF, 2019.
- [6] Y. Zhao, O. Pohl, A. I. Bhatt, G. E. Collis, P. J. Mahon, T. Rütther og A. Hollenkamp, «A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling,» *Sustainable Chemistry*, vol. 2, pp. 167-205, 2021.
- [7] T. Persun, «Advancing Battery Technology for Modern Innovations,» The American Society of Mechanical Engineers, 18 05 2021. [Internett]. Available: <https://www.asme.org/topics-resources/content/advancing-battery-technology-for-modern-innovations>. [Funnet 12 08 2021].
- [8] U.S. Department of Energy, «Batteries for Hybrid and Plug-in Electric Vehicles,» U.S. Department of Energy, [Internett]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html. [Funnet 26 05 2021].
- [9] E. Osmanbasic, «What You Need to Know About Batteries for Electric Vehicles,» 25 09 2019. [Internett]. Available: <https://www.engineering.com/story/what-you-need-to-know-about-batteries-for-electric-vehicles>. [Funnet 26 05 2021].
- [10] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean og B. Jurchis, «Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles,» i *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
- [11] L. Kailong, L. Kang, P. Qiao og Z. Cheng, «A brief review on key technologies in the battery,» *Front. Mech. Eng.*, vol. 14, nr. 1, pp. 47-64, 2019.
- [12] G. Blomgren, «The Development and Future of Lithium Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 164, nr. 1, 2016.
- [13] M. Lain, J. Brandon og E. Kendrick, «Design Strategies for High Power vs. High Energy Lithium Ion Cells,» *Batteries*, vol. 5, nr. 64, 2019.
- [14] J. Arai, Y. Muranaka og M. Koseki, «High-power and High-energy Lithium Secondary Batteries,» *Hitachi Review*, vol. 53, nr. 4, pp. 182-185, 2004.
- [15] Element Energy Ltd, *Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. Technical Appendix.*, 2019.

- [16] K. Rudisuela, «Nickel Institute,» 21 02 2020. [Internett]. Available: <https://nickelinstitute.org/blog/2020/february/competitive-technologies-to-high-nickel-lithium-ion-batteries-the-pros-and-cons/>. [Funnet 10 07 2021].
- [17] Herald Corporation, «SK makes world's 1st NCM battery with 90% nickel,» Herald Corporation, 10 08 2020. [Internett]. Available: <http://www.theinvestor.co.kr/view.php?ud=20200810000820>. [Funnet 13 08 2021].
- [18] W. Ho-seop og C. Jeehyun, «Samsung SDI ready to mass produce high-performance Gen 5 EV batteries,» Maekyung Media Group, 14 06 2021. [Internett]. Available: <https://pulsenews.co.kr/view.php?year=2021&no=573432>. [Funnet 10 08 2021].
- [19] M. Kane, «Samsung SDI Announced Next Generation Battery For 600 km (373 Mile) BEVs, Rechargeable In 20 Minutes!,» Motorsport Network, 10 01 2017. [Internett]. Available: <https://insideevs.com/news/331619/samsung-sdi-announced-next-generation-battery-for-600-km-373-mile-bevs-rechargeable-in-20-minutes/>. [Funnet 10 08 2021].
- [20] K. Be-eun, «LG to supply NCMA battery for Tesla next year,» The Korea Times Co., 17 12 2020. [Internett]. Available: https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2020/12/133_301037.html. [Funnet 10 08 2021].
- [21] C. Hampel, «GAC Aion V charges in 8 minutes,» Rabbit Publishing GmbH, 22 08 2021. [Internett]. Available: <https://www.electrive.com/2021/08/22/gac-aion-v-charges-in-8-minutes/>. [Funnet 24 08 2021].
- [22] «GAC bets on graphene tech for batteries,» Verdict Media Limited, 16 06 2021. [Internett]. Available: <https://www.just-auto.com/comment/gac-bets-on-graphene-tech-for-batteries/>. [Funnet 24 08 2021].
- [23] Siemens Mobility, «Totally fit for the future – Mireo Plus B,» Siemens Mobility, 21 07 2021. [Internett]. Available: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/stories/totally-fit-for-the-future-mireo-plus-b.html>. [Funnet 10 08 2021].
- [24] Toshiba Corporation, «Using Niobium Titanium Oxide (NTO) as a next-generation anode material,» Toshiba Corporation, 10 07 2021. [Internett]. Available: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/next/nto.html>. [Funnet 10 08 2021].
- [25] S. K. Johnson, «Here's what Tesla will put in its new batteries,» WIRED Media Group, 24 09 2020. [Internett]. Available: <https://arstechnica.com/cars/2020/09/heres-what-tesla-will-put-in-its-new-batteries/>. [Funnet 10 08 2021].
- [26] COBRA, «Tesla vs COBRA: A look at Tesla's Battery Day,» Project COBRA by the European Commission, 01 10 2020. [Internett]. Available: <https://projectcobra.eu/2020/10/01/tesla-vs-cobra-battery-day/>. [Funnet 10 08 2021].
- [27] VDMA, «Roadmap Battery Production Equipment 2030 (Update 2020)».
- [28] European Commission, «Batteries Europe: Strategic Research Agenda for batteries,» *European technology and innovation platform*, 2020.
- [29] R. Nesheim, «Superbatteriene er rett rundt hjørnet,» Azets Insight AS, 15 03 2021. [Internett]. Available: <https://elbil.no/superbatteriene-er-rett-rundt-hjornet/>. [Funnet 12 08 2021].
- [30] H. Löbbberding, S. Wessel, C. Offermanns, M. Kehrler, J. Rother, H. Heimes og A. Kampker, «From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types,» *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, nr. 77, 2020.

- [31] Sharova Varvara et al., «Evaluation of Lithium-Ion Battery Cell Value Chain,» *Working Paper Forschungsförderung*, 2020.
- [32] Edström et al., «Battery 2030+ Roadmap - Second Draft,» 2019.
- [33] E. Andersson, M. Berg, S. Stichel og C. Casanueva, «Rail Systems and Rail Vehicles,» i *Part 2: Rail Vehicles*, Stockholm, 2017.
- [34] D. Amelia, N. Witteman og U. Zimmermann, «Emissionfreie Mobilität - eine Strategie für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen und Ladeinfrastruktur in Deutschlands Schienenpersonennahverkehr,» Berlin, Juli 2021.
- [35] J. Robertsson, «Styrmedel för ökad andel miljöbilar - internationella exempel,» AB Stelacon, Stockholm, 2016.
- [36] Miljødirektoratet, «Klimakur 2030, Tiltak og Virkemidler mot 2030,» 2020.
- [37] M. Ziegler og J. Trancik, «Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline,» *Energy & Environmental Science*, vol. 14, pp. 1635-1651, 2021.
- [38] I. Tsiropoulos, D. Tarvydas og N. Lebedeva, «Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications,» *EUR 29440 EN, Publications Office of the European Union*, 2018.
- [39] V. Henze, «Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh,» BloombergNEF, 16 12 2020. [Internett]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>. [Funnet 04 06 2021].
- [40] Det Norske Veritas, «TESLA'S BATTERY DAY AND THE ENERGY TRANSITION,» Det Norske Veritas Group, [Internett]. Available: <https://www.dnv.com/feature/tesla-battery-day-energy-transition.html>. [Funnet 04 06 2021].
- [41] World Economic Forum, «A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation.,» *Global Battery Alliance, Insight Report*, 2019.
- [42] J. Regnart, «Roadmaps Explored – Understanding the battery challenges from chemistry to recycling,» The Advanced Propulsion Centre UK Ltd, 26 02 2018. [Internett]. Available: [view-source:https://www.apcuk.co.uk/news/roadmaps-explored-understanding-battery-challenges-chemistry-recycling/](https://www.apcuk.co.uk/news/roadmaps-explored-understanding-battery-challenges-chemistry-recycling/). [Funnet 11 08 2021].
- [43] F. Yan, «Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles, (Discussion Draft),» California Air Resources Board, 22 august 2016.
- [44] «Exchange Rates UK,» UK FX Ltd, [Internett]. Available: <https://www.exchangerates.org.uk/EUR-USD-spot-exchange-rates-history-2016.html>. [Funnet 26 08 2021].
- [45] I. Tsiropoulos, D. Tarvydas og N. Lebedeva, «Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications,» European Commission, Luxembourg, 2018.
- [46] S. Moores, «THE GLOBAL BATTERY ARMS RACE: LITHIUM-ION BATTERY GIGAFACORIES AND THEIR SUPPLY CHAIN,» *forum: A quarterly journal for debating energy issues and policies*, 2021.
- [47] D. Küpper, K. Kuhlmann, S. Wolf, C. Pieper, G. Xu og J. Ahmad, «The Future of Battery Production for Electric Vehicles,» The Boston Consulting Group, 2018.

[48] Wiebelt, A. et al., «Thermomanagement of Li-Ion batteries,» *ATZ worldwide*, vol. 111(7), pp. pp. 12-15, 2009.