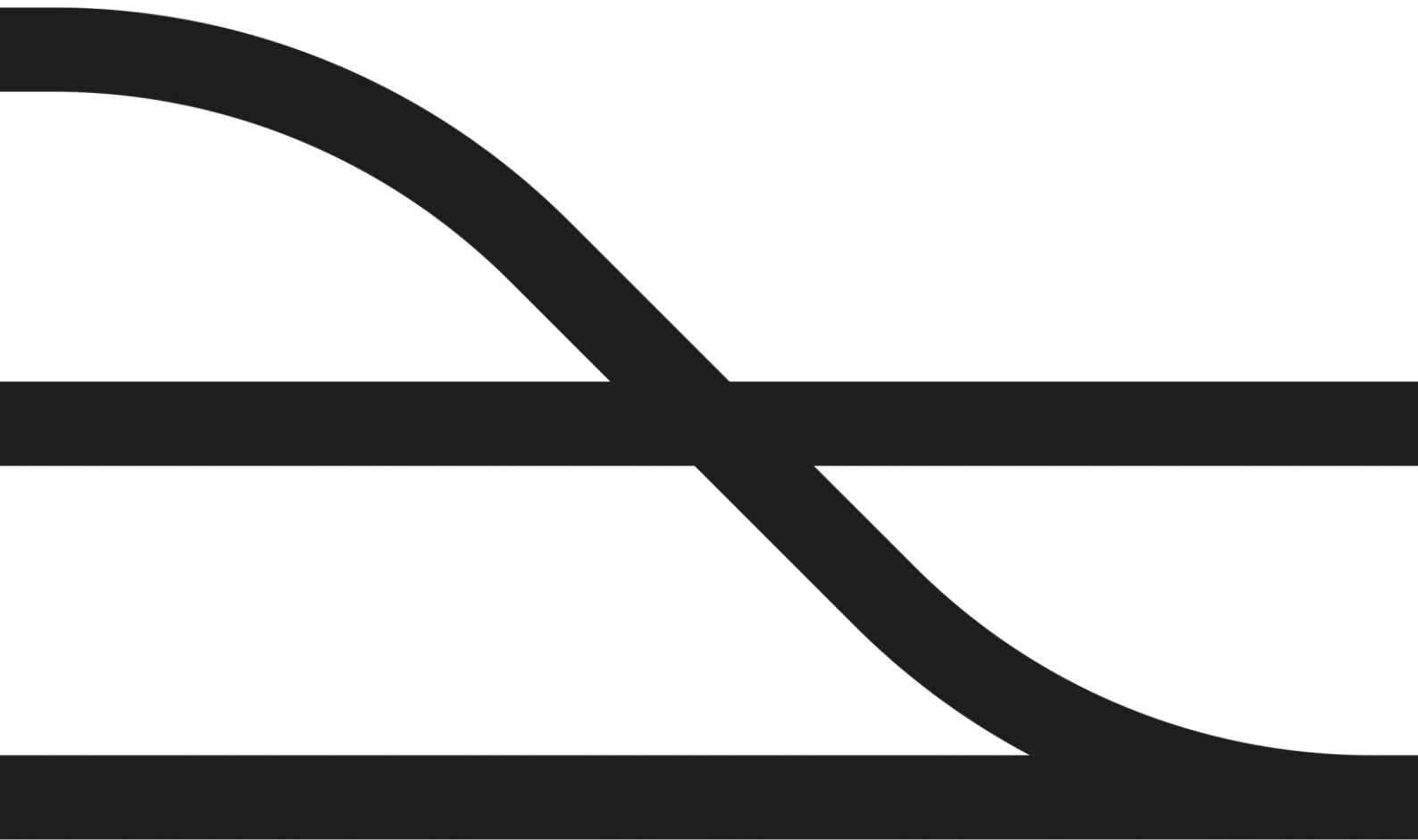




Jernbane-
direktoratet

NULLFIB

Delrapport 2: Batteritog



Sammendrag

Norge har frem til 2030 å kutte 45 prosent av klimagassutslippene. Transportsektoren står for 30 prosent av de totale utslippene, og mye må dermed gjøres innenfor denne sektoren frem mot 2030. Den teknologiske utviklingen innenfor løsninger med nullutslipp går derimot svært raskt. Det er derfor et behov for å kartlegge aktuelle nullutslippsløsninger som vil kunne ha en positiv virkning på sektorens utslipp og samtidig gi økonomiske besparelser. Jernbanedirektoratet har derfor gjennomført prosjektet «NULLutslippsløsninger For Ikke-elektrifiserte Baner» (NULLFIB). Hensikten er å utrede tilgjengelige valg for nullutslippsløsninger og gi anbefaling for videre satsning. Dette er delrapporten som utreder batteridrift som et alternativ.

Rapporten skal gi kunnskapsgrunnlag om bruk av batteri som energibærer innen jernbanen.

Rapporten har tre vedlegg:

- Vedlegg-A casestudie Nordlandsbanen, som er en studie av muligheten for batteritog på strekningen.
- Vedlegg-B batteriteknologi, som studerer nå-situasjonen og fremtidig batteriteknologi for jernbanekjøretøy.
- Vedlegg-C arbeidsmaskiner, som omhandler energiforbruk og mulig batteridrift

Dokumentet skal sammen med delrapport 3 og 4, danne grunnlag for sammenligninger og analyse av ulike aktuelle energibærere i NULLFIB sin hovedrapport.

Dette dokumentet gir også forklaringer og underlag for de tall som er brukt i økonomiske analyser av batteri som energibærer i jernbanen, og det casestudiet som er utført på Nordlandsbanen i tilknytning til NULLFIB.

Dokumentet trekker ingen konklusjoner og gir ikke anbefalinger for valg av teknologi. Sammenligninger av teknologier, konklusjoner og anbefalinger gjøres i NULLFIB sin hovedrapport.

I beskrivelsene i studien er mye av informasjonen som er innhentet blitt anonymisert av hensyn til konkurranseforhold. Noe av informasjonen kan derfor ikke henvises til produsenter eller togoperatører.

Prosjektnummer: 21007122	Saksnummer: 201900404-1	Revisjon: 00
Utarbeidet av: Dag Wilhelm Aarsland	Kontrollert av: Geir Vadseth	Godkjent av: Stephen Oommen

Innhold

1 Innledning og historisk utvikling	5
1.1 Bidragsyttere.....	5
2 Batteritog.....	6
2.1 Teknologibeskrivelse.....	6
2.1.1 Kjøretøyets oppbygging	6
2.1.2 Kjøretøyets fremdriftssystem	6
2.1.3 Hovedtransformator	7
2.1.4 Traksjonsomformer/traksjonsstrømretter.....	7
2.1.5 Hjelpestrømnettet.....	9
2.1.6 Traksjonsmotorer	9
2.1.7 Strømvaktaker.....	10
2.1.8 Batteriet.....	10
2.1.9 Systemrisiko og teknologisk utfordring med batteri i lokomotiv.....	11
2.2 Hvor langt har forskningen kommet	11
2.3 Tilgjengelighet av teknologi for bruk av batteri	11
2.4 Prisutvikling, historisk og forventet	11
2.5 Fremtidig perspektiv på utviklingen av batteriteknologi.....	12
2.6 Hva er forventet utvikling uttalt fra produsenter/kjøretøyprodusenter	13
2.7 Energieffektivitet 'Well to Wheel'	14
3 Nå-situasjon for bruk av batterier som energibærer innen transport/anlegg generelt	15
3.1 Nå-situasjon og erfaringer	15
4 Nå-situasjon ved batterier som energibærer innen jernbane	16
4.1 Presentasjon av erfaringer ved batteridrift.....	16
4.1.1 Siemens mobility/ Siemens Mireo City Jet Eco	16
4.1.2 Bombardier Transportation/ Talent 3.....	17
4.2 Planer for batteritog.....	18
4.2.1 Stadler/ Flirt Akku.....	18
4.2.2 Stadler/ WINK	19
4.2.3 Stadler /Flirt bimodalt togsett.....	19
4.2.4 Andre planer.....	19
5 Miljøkonsekvenser ved bruk av batteri.....	21
5.1 Utslipp	21
5.1.1 Gjenbruk/resirkulering av batterier	21
5.2 Støy	22
5.3 Levetid, gjenbruk/deponering av utstyr.....	22
5.4 HMS ulemper og gevinster	22
6 Lading/teknologi for lading og overføring av strøm til batterier	23
6.1 Ladeanlegg.....	23
6.2 Kjøretøyenes ladekapasitet.....	23
6.2.1 Komponenter som begrenser ladeeffekten	23
6.3 Produksjon, kapasitet og tilgjengelighet.....	24
6.4 Hva er maksimal rekkevidde, gods, persontog	24
6.5 Regenerering av effekt ved motorbremsing	24
7 Begrensninger/barrierer ved bruk av batteri som energibærer	25
7.1 Kapasitet for lengre strekninger og hvilke restkapasiteter skal beregnes	25
7.2 Klimatiske forhold som kan, og påvirker batteridrift	25

7.3 Topografiske forhold	25
7.4 Konsekvenser for nyttelast ved installasjon av batteriteknologi.....	25
Nødvendige forutsetninger/tiltak i infrastrukturiltak for en overgang til batteridrift.....	27
7.5 Ladeanlegg.....	27
7.6 Tunneler.....	27
7.7 Tilpassing av verksteder og andre overdekkede områder.....	27
7.8 Behov for sikring av områder	27
8 Utvikling av kjøretøyflåten	28
8.1 Persontog.....	28
8.2 Godstog.....	28
8.3 Arbeidsmaskiner for infrastrukturen	28
8.4 Nye kjøretøy	28
8.5 Ombyggingsmuligheter av eksisterende/kommende kjøretøy til alternativ drift	29
9 Forurensning og HMS gevinster ved vedlikehold- og byggearbeider i infrastrukturen ved overgang til alternativ drift	30
10 Sikkerhet og risiko	31
10.1 Lover og forskrifter.....	31
10.2 Batterisikkerhet	32
10.3 Sikkerhet ved bruk av batterier som energilager.....	32
10.3.1 Termisk styring.....	32
10.3.2 Ukontrollert termisk hendelse «Thermal Runaway»	33
10.3.3 Eksplosjonsfare	33
10.3.4 Oppvarming av batterier ved lave temperaturer.	34
10.3.5 Beskyttelse mot overoppheting - kjøling av batterier	34
10.3.6 Kjøling	35
10.3.7 Batterisikkerhet og operasjonelle forhold som må ivaretas ved batteridrift,	36
11 Kostnader for kjøretøy ved drift basert på batteri	38
11.1 Investering.....	38
11.2 Drift.....	38
11.3 Vedlikehold.....	39
12 Kostnader for infrastruktur; Investering, drift og vedlikehold ved batteridrift	40
13 Referanser	41
14 Forkortelser.....	44

1 Innledning og historisk utvikling

I USA i 1889 oppsto et nisjetilbud med jernbanekjøretøy (trikk) med batteridrift. Suksessen man fikk med batteritikk hos New York & Harlem Railroad førte til flere eksperimenter i Jersey City mellom 1888 og 1893. Det ble imidlertid oppdaget alvorlige ulemper med batteriene som ble brukt. Batteriene var ikke bare for tunge, de var også altfor skrøpelige og hadde etterfølgende lekkasjeskader, og batteridriften ble derfor avsluttet. Gjennombruddet for batteridrevne tog kom da den kjente oppfinneren Thomas Edison oppfant Edison-batteriet med nikkel-jern, som var svært robust. Edison tilbød batteritypen til jernbaneoperatører (1).

Sammen med Ralph H. Beach startet han selskapet Federal Storage Battery Co. I 1909, det samme året som batteriet var ferdigutviklet, ble det første forsøkskjøretøyet «Car 1» satt i drift. «Car 1» hadde 200 Edison-batterier som var plassert under setene og produksjonen fortsatte fram til 1914. Totalt ble det levert 20 stykker til Manhattan i New York (1).

Eksperimenter med batteritog ble gjennomført fra rundt 1890 i Belgia, Frankrike, Tyskland og Italia. I New Zealand var en batterielektrisk Edison-jernbane i drift fra 1926 til 1934, og på Harcourt Street Line i Irland var fire batteritog i drift i perioden mellom 1932 og 1946. I 1887 ble de første tyske batteritogene med bly-syre batterier tatt i bruk av Royal Bavarian State Railways. Utviklingen av disse batteritogene fortsatte i før- og etterkrigstiden, og fikk flere typebetegnelser. DB klasse ETA 150 ble brukt i 40 år fra 1955 frem til 1995, og ble siden modernisert og satt i drift på Glückauf-Bahn banen. I perioden 1932 til 1949 var fire batteritog i drift mellom Dublin og Bray. Batterier ble ladet på hver terminal ved hjelp av en type pantograf. Togene kunne komme opp i en hastighet på til 105 km/t, men hastighetene i drift var vanligvis begrenset til 40 km/t. Fra 2014 har passasjer batteritog vært i drift i Japan på en rekke linjer. Østerrike og New Zealand har satt i drift batteritog som benyttes kombinert på ordinære elektrifiserte og ikke-elektrifiserte banestrekninger (1).

Batteriteknologien har forbedret seg kraftig de siste 20 årene, noe som har åpnet for utvidet bruk av batteritog, og gitt en bevegelse bort fra begrensede nisjeprogrammer. Produsenter av batteritog markedsfører i dag rekkevidder på opptil 120 km, noe forskningen antar at vil øke til 360 km i løpet av 15-20 år. Litium-ion batterier er nå ansett som den mest lovende batteriteknologien for bruk innen transportsektoren basert på sin høye spesifikke energitetthet, lange levetid og potensielt lave kostnad.

Dette tilbakeblikket viser at batteridrift som driftsform har vært aktuelt innen jernbane i 130 år. Batteritog har sine fordeler ved at de er økonomisk levedyktige, og at de høye utbyggingskostnadene og vedlikeholdet av elektrifisering kan elimineres.

1.1 Bidragsyttere

Foruten involvering fra interne seksjoner i Jernbanedirektoratet, har Norske tog ved Razieh Nejati Fard bidratt med kjøretøyteknisk kompetanse. Bane Nor ved Øyvind Gebhart har bidratt med teknisk kompetanse i tilknytning til vurdering av batterikapasitet for kjøretøytyper. Kjøretøyprodusentene Siemens, Bombardier og Stadler har bidratt med kjøretøytekniske data og analyser knyttet til batteriteknologi. Cargo Net har vært en dialogpart i innledningen av arbeidet.

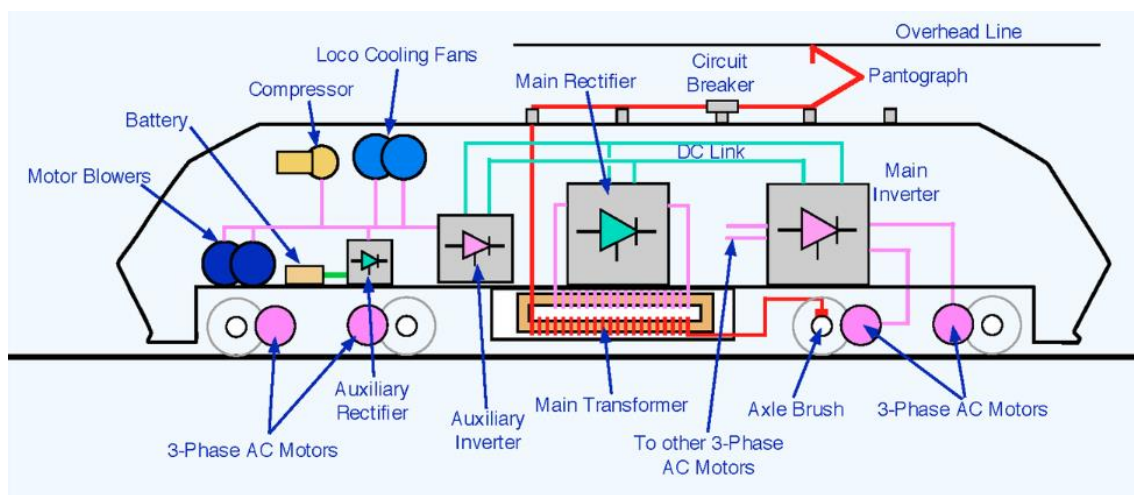
2 Batteritog

2.1 Teknologibeskrivelse

Beskrivelsen av teknologien i avsnittene under baseres på de valg som er gjort for de europeiske kjøretøyene som til nå er bygget eller planlagt. Det kan ikke utelukkes at andre leverandører gjør valg som medfører at beskrivelsene av deres kjøretøy vil være noe annerledes. Installasjonene i et batteritog, bortsett selve batteriet, er i prinsippet tilsvarende vanlig elektriske kjøretøy. Elektriske kjøretøy har velkjent teknologi som er meget pålitelig. For å forklare hvordan et batteritog fungerer vil det i de påfølgende avsnittene beskrives hvilke komponenter og funksjoner elektriske kjøretøy har, i tillegg til batteriteknologien.

2.1.1 Kjøretøyets oppbygging

Teknologien for jernbanekjøretøy som benytter batterier vil prinsipielt være den samme som for konvensjonelle elektriske jernbanekjøretøy. Figuren 1 viser en vekselstrøm (AC) elektrisk lokomotiv, som får strømtilførsel fra kontaktledningen. De røde linjene indikerer en-fase høyspenningskretsen (AC), de grønne linjene viser likestrømskretsen (DC) og de rosa viser lavspenningskretsen (AC, vanligvis < 1 kV) både 1-fase og 3-fase. Et lokomotiv som bruker DC traksjonsstrøm er lik, bortsett fra at det ikke er en en-fase høyspenningskrets eller likeretter (AC/DC). Strøm for fremdrift går fra strømtavtakeren til en DC/DC omformer og deretter til traksjonsvekselretter (DC/AC) og hjelpestrømomformere for tilleggsutstyr for lokomotivet.



Figur 1: Prinsippskisse med komponenter i et elektrisk kjøretøy/lokomotiv-traksjonssystem i et lokomotiv. (2)

2.1.2 Kjøretøyets fremdriftssystem

Kjøretøyets fremdriftssystem omtales gjerne som kjøretøyets traksjonssystem. Et elektrisk tog som ikke har en egen energikilde som batteri, trekker strømmen fra kontaktledningen (15 kV 16 2/3 Hz, på elektrifisert jernbane i Norge) via strømtavtaker og deretter overføres det til en (eller flere) transformator, en (eller flere) likeretter (AC/DC) og en (eller flere) vekselretter (DC/AC). Tilslutt går strømmen til traksjonsmotorene, som videre driver aksler og hjul i form av mekanisk energi. For batterielektriske (batteridrevne) tog overføres elektrisk energi fra traksjonsbatteriet til en omformer (DC/DC) og deretter vekselretteren (DC/AC) for å drive traksjonsmotorene. Hvis toget er designet til å lade opp traksjonsbatteriene under kjøring overføres energien fra kontaktledningen til pantograf, trafoen, AC/DC likeretteren og deretter batteri DC/DC omformeren.

Som eksempel for Flirt togene som vi har i Norge, er det 3 traksjonssystemer i 3 av 5 vogner som hver består av: 1 stk. transformator + 2stk. omformere (AC/DC+DC/AC) + 2stk traksjonsmotorer. Hver traksjonsmotor er designet for 500 kW nominell (kontinuerlig) effekt, men maks effekten kan økes til

750 kW som kan overføres kortvarig under akselerasjon/retardasjon. Toget er designet for totalt maks 4,5 MW (3 MW kontinuerlig) traksjon effekt på hjul. I tillegg må det beregnes at hjelpestrømsystemet på toget typisk trenger 100-300 kW kontinuerlig effekt avhengig av ulike faktorer som utetemperatur og passasjerbelastning.

Elektriske motorer produserer energi under bremsing eller retardasjon ved hjelp av DC/AC omformerer som kan brukes av toget, tilbakemates til kontaktledningen eller brennes i bremsemotstander. Denne energien kalles regenerativ bremseenergi. Hvis toget har traksjonsbatteri om bord kan de lades med denne energien via DC/DC omformerer dersom det har tilstrekkelig ledig kapasitet, ellers må energien brennes i bremsemotstandene. Ved gjenbruk av den regenerative bremseenergi kan cirka 10-20% av totalenergien spares.

2.1.3 Hovedtransformator

Elektriske lokomotiver/motorvognsett forsynes med elektrisk energi via strømtakeren. I Norge og enkelte andre land forsynes togene med 15 kV nominell spenning og 16 2/3 Hz frekvens. Deretter overføres strømmen via hovedtransformatoren som reduserer spenningen til passende spenninger for togets elektriske kretser, det vil si til traksjonsomformer, hjelpestrømomformer, togvarmeanlegg osv. Transformatorer er en av de tyngste enkeltkomponentene i toget og består av en jernkjerne med elektriske viklinger rundt. Jernkjernen er vanligvis montert inne i en stålkapsling fylt med isolerende transformatorolje for nedkjøling ((Figur 2). Det finnes også mer kompakte tørre transformatorer som er luftkjølt ((Figur 3) (3).



Figur 2: ABBs Resibloc tørr transformator til jernbanekjøretøy (29).



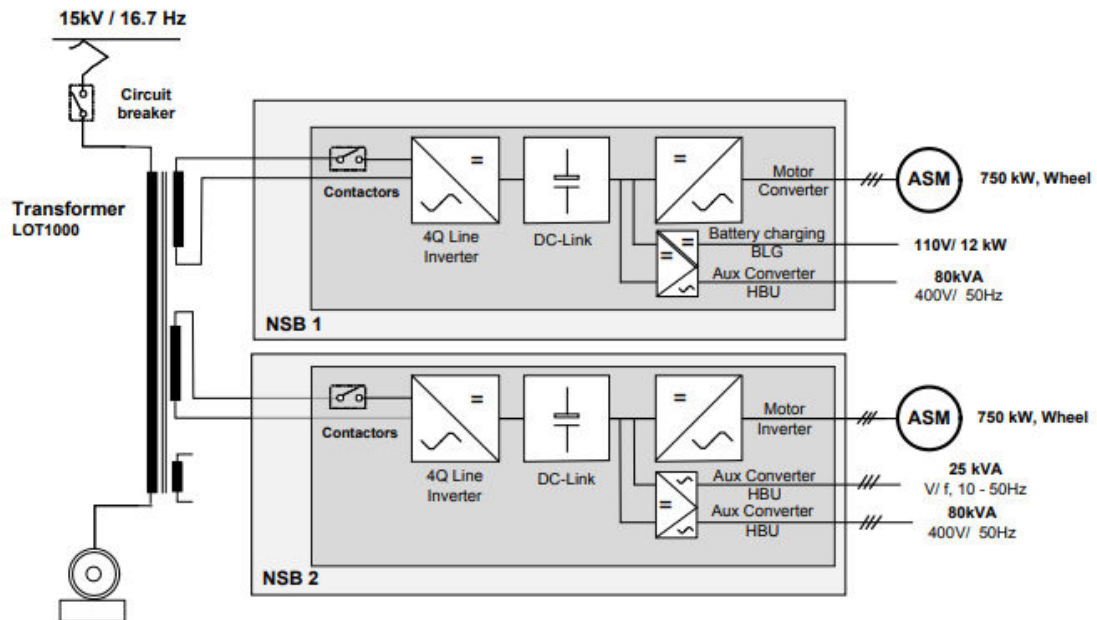
Figur 3: Oljefylt transformator produsert av ABB (28).

I Norge finnes det lokomotiver samt noen togsett som har bare en hovedtransformator. Nyere motorvognsett har derimot flere hovedtransformatorer (FLIRT har 3 hovedtransformatorer), særlig på grunn av redundans. Volum og vekt av hver hovedtransformator i FLIRT er henholdsvis ca. 5,1 m³ og 3,3 tonn.

2.1.4 Traksjonsomformer/traksjonsstrømretter

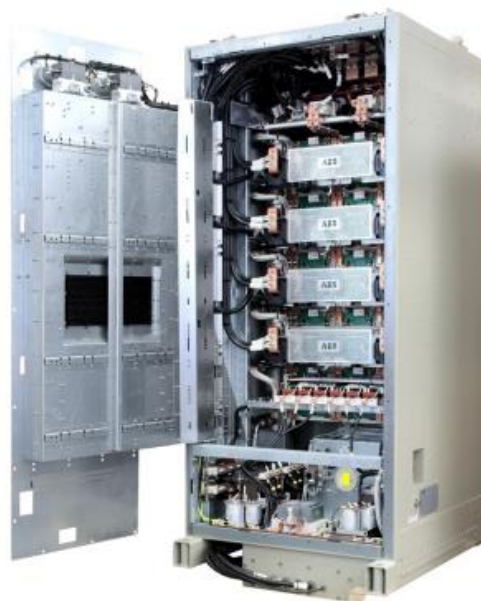
En omformer er i utgangspunktet en enhet som kan regulere utgangsspenning og frekvens med hjelp av kraftelektroniske svitsjer. De kan være enten AC>>DC, DC>>AC, AC>>AC eller DC>>DC. En traksjonsstrømretter leverer passende 3-fase variabel spenning og frekvens til AC traksjonsmotorene for hastighetsjustering. Den består av minst en vekselretter (DC>>AC), men nettlikeretteren (AC>>DC) kan også bli integrert i samme skap og hele enheten kalles traksjonsomformer (Figur 4). Spenningen til en traksjonsomformer forsynes fra sekundærsiden av hovedtransformatoren som er 1-fase lavspenning med fast frekvens på 16 2/3 Hz. Kraftelektroniske svitsjer i traksjonsstrømretterne blir

varme under drift og må kjøles ned, vanligvis med væske (vann eller olje). FLIRT togene i Norge har totalt 6 traksjonsomformer og hver enhet veier ca. 850 kg, mens volumet er ca. 1,5 m³.



Figur 4: Prinsippsskisse for et traksjonssystem på FLIRT med ABB traksjonsomformer. Det finnes 3 av dem per togsett (4).

Figur 5 viser en traksjonsomformer slik den som er montert i de Flirt persontogsettene som er i drift i Norge.



Figur 5: Traksjonsomformer produsert av ABB. Tre lignende omformere er installert i FLIRT togene (4).

2.1.5 Hjelpestrømnettet

Hjelpestrømomformerne leverer strøm til nødvendig hjelpeutstyr på toget, som varme og ventilasjonsanlegg, kompressorer, traksjonssystemets kjøleanlegg, 230 V stikkontakter osv. og kan enten mates direkte av hovedtransformatoren eller fra traksjonsstrømretterne (DC-linken). Hjelpestrømkomponentene kan mates med 3-fase 400 V 50 Hz (fast frekvens) eller variabel spenning og frekvens som kan reguleres etter behov. I tillegg er hjelpestrømomformerne også ansvarlige for å lade opp vognbatteriene om bord (ikke traksjonsbatteri). Nødvendige komponenter som trenger avbruddsfri strømforsyning er belysning, elektronikk og styringssystemer, som mates av disse batteriene som vanligvis er av type Nikkel-Kadmium eller Bly-Syre. Vanligvis er hjelpestrømomformerne luft- eller vannkjølte. Det er mulig å integrere hjelpestrømomformere i traksjonsomformerskapet også (Figur 4 & 5).

2.1.6 Traksjonsmotorer

Traksjonsmotorer har som oppgave å omforme elektrisk energi til kinetisk energi. De er hovedsakelig asynkronmotorer som er enkle, robuste og de minst vedlikeholdskrevende motorene i industrien. Det har nylig også blitt produsert permanentmagnet motorer som er mer kompakt og mer effektiv enn asynkronmotorer. FLIRT har seks asynkrone traksjonsmotorer og hver traksjonsmotor veier ca. 1 tonn.



Figur 6: MITRAC permanent-magnet motor produsert av Bombardier installert i REGINA (Gröna Tåget) (30).

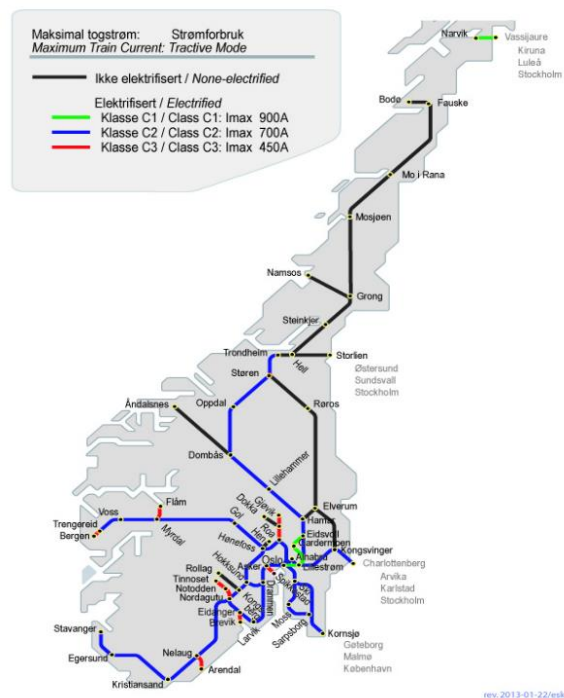


ABB: Traksjonsmotor for lokomotiv (39)

2.1.7 Strømvaktaker

En strømvaktaker er en innretning på elektrisk jernbane/forstadsbane/sporvognsmateriell som sørger for elektrisk kontakt mellom den bevegelige enheten og en strømførende ledning eller skinne. Normalt er strømvaktakeren plassert på taket til enheten og strømmen hentes fra en oppspent kontaktledning. Ved hjelp av fjærer eller trykkluft presses strømvaktakeren med passende trykk opp mot kontaktledningen. Maks strøm pr. strømvaktaker under kjøring i Norge er 900 A (basert på EN 50388). Maks strøm pr. strømvaktaker når et kjøretøy står stille er 80 A (basert på EN 50367).

Figur 7 viser klasseinndelingen på banestrekningene for det maksimale strømforbruket til et kjøretøy. Figuren viser også de banestrekningene som ikke er elektrifiserte. (5)



Figur 7: Kart over banestrekninger med maksimalt strømtrekk (5).

2.1.8 Batteriet

En rekke oppladbare batteriteknologier har blitt utviklet og kommersialisert de siste 150 årene. Det første oppladbare batteriet som ble kommersialisert er blybatteriet (fra 1859) som fortsatt er i storskala bruk i applikasjoner som trenger høye, men korte strømpulser. Videre kom Nikkel-Kadmium (1899) og Nikkel Metallhydrid (1967) -batteriene. Litium har vært kjent fra 1913 for å ha det høyeste reduksjonspotensialet av alle metaller, og litium batterier kan derfor vise til den høyeste batterispenningen. Kommersialisering av det første Li-ion batteriet var i 1986 av Asahi Chemical, som ble etterfulgt av det mer berømte Sony-batteriet i 1990. Av teknologiene nevnt ovenfor er det Li-ion som har den høyeste energitettheten både med hensyn på vekt og volum og som er den mest aktuelle batteriteknologien for batteritog (6). Med bakgrunn i dette vil den videre beskrivelsen hovedsakelig begrense seg til Li-ion batterier.

Batterier lagrer energi som kjemisk energi og leverer elektrisk energi ved forespørsel. Et batteri består av en katode, anode og elektrolytt. Katoden og anoden er også referert til som elektroder. De to elektrodene er koblet til en lukket krets av en ekstern elektrisk krets og en elektrolytt.

Batterier har en endelig mengde med kjemiske reaktanter og kan derfor bare levere elektrisk energi i en begrenset periode før de er fullstendig utladet. For å kunne levere mer elektrisk energi må batteriene lades opp med tilførsel av elektrisitet.

Batteriet i et batteritog er energilageret som skal sikre kjøretøyets behov for å kunne kjøre en strekning i tillegg til behovet for komfotelementer som lys, oppvarming, ventilasjon og kjøling. I tillegg er det et lager for å oppta energi som gjenvinnes fra kjøretøyets bremsing (e-brems). Et batteritog av typen togsett har normalt flere batteripakker. Dette er gjort for å kunne fordele vekten av den totale batterikapasiteten på flere vogner/vognakslinger. Dette gir også den fordel at dersom det oppstår feil i en batterimodul i en batteripakke, kan denne kobles ut og kjøretøyet vil fremdeles ha mulighet for kjøring.

Batteritypenes egnethet for jernbanekjøretøy, levetid/aldring av batterier og faktorer som påvirker dimensjoneringen er beskrevet i Vedlegg B, kapittel 2.1.

2.1.9 Systemrisiko og teknologisk utfordring med batteri i lokomotiv.

Væskekjølt NMC-systemer med Nikkel-Mangan-Kobolt (NMC) batteriteknologi er ikke tilgjengelig fra erfarne underleverandører til produsenter av jernbanekjøretøy. Det har med bakgrunn i dette vist seg at batteristørrelser over 500 kWh innebærer et område med stor usikkerhet.

Det finnes leverandører for luftkjølte systemer, men spesielt for NMC batterityper innebærer dette en for stor risiko, samt at den mulige kapasiteten vil være lavere grunnet problematikk for plassering av kjøling og batteriene på egnede steder. Se også Vedlegg B, kapittel 2.3

2.2 Hvor langt har forskningen kommet

Basisteknologien for bruk av batteridrift av kjøretøy er i stor grad ferdig utviklet, men markedet for batteridrevne elektriske kjøretøy (EV) etterspør batterityper med høyere energitetthet, kortere ladehastigheter, lavere priser og økt sikkerhet. Det er derfor stor aktivitet innen forskningen som grunnlag for produksjon av bedre batterityper.

Innen en 10 års periode vil tilgangen til kobolt for produksjon av NMC batterier bli betydelig redusert. Det antas at det vil bli utviklet annen batteri-kjemi hvor kobolt erstattes med annet materiale. Forskning og utvikling vil muliggjøre en teknologiendring mot materialer med lavere Co-innhold. Videre celledesignoptimalisering vil forbedre Li-ion batteriets energitetthet og redusere batterikostnadene i 2025. Post-Li-ion batterier, som faststoff-litiumbatterier og metall-luftbatterier, forventes å bli tatt i bruk rundt 2030. Forskning og utvikling innen faststoff-litiumbatterier er aktivt i gang på forskningsstadiet med spesielt fokus på sikkerhet og energitetthet.

2.3 Tilgjengelighet av teknologi for bruk av batteri

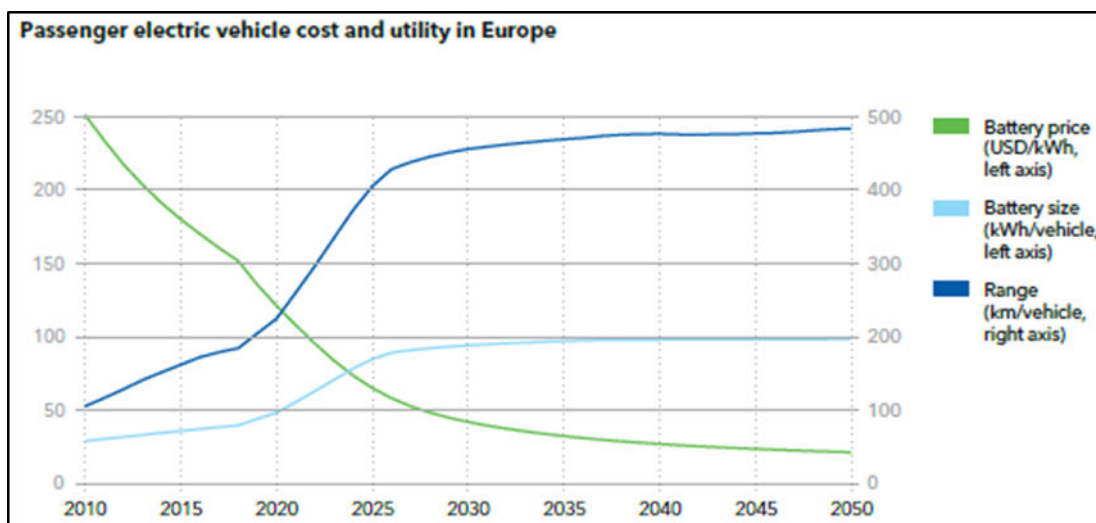
Det er produsert tog, busser, lastebiler, ferger og småfly som drives med batterier. I Norge er antallet el-biler > 200 000, og for nybilsalget i 2019 utgjør el-bil andelen 44% av totalt antall solgte biler. Kina dominerer el-buss markedet med over 420 000. I Norge var det 20 el-busser i begynnelsen av 2019 og det vil være ca. 400 i løpet av 2020. Generelt er bruken av teknologien utviklet og velprøvd som helbatteriløsning hvor lading foregår når batteritoget står stille. Den batteriteknologien som tas i bruk for batteritog i dag har kun vært i bruk i ca. 10 år. Tilgjengeligheten for nyere teknologi hvor lading av batteriet foretas fra KL under kjøring er et nytt satsningsområde. Lading under kjøring på elektrifiserte strekninger og overgang til/fra ikke-elektrifiserte strekninger er satt i drift f.eks. i Østerrike. Denne typen driftsmodell er under utprøving og optimalisering. Dette gjelder primært for togsett, men ikke for lokomotiver. For lokomotiver er det utviklet batteridrift for bruk på kortere strekninger og på godsterminaler. Dette betegnes som 'last-mile' batteridrift, og utales av produsentene som en rekkevidde på ca. 5km.

I USA i California er det et samarbeidsprosjekt mellom BNSF og Wabtec (tidligere General Electric) om utvikling av et batteridrevet lokomotiv som skal settes i drift i 2020. Lokomotivet bygges med en batterikapasitet på 2,4MWh, og som også vil være tilnærmet det behovet som er nødvendig for å kunne fungere som godslokomotiv i Norge under forutsetning av del-elektrifisering B/L.

Lokomotivet som utvikles i California er imidlertid adskillig større (infrastruktur med høyere tillatt aksellast) med bedre forutsetninger for å kunne bære høy batterivekt enn de lokomotivtypene som benyttes i Europa. Batteriteknologi tilpasset lokomotiver for et europeisk marked er ikke tilgjengelig, og krever nyutvikling. Utvikling av et batterilokomotiv for KL- og batteridrift antas å ha en kostnad i størrelsesorden 500 mill. NOK.

2.4 Prisutvikling, historisk og forventet

Figur 8 viser hvordan teknologiutviklingen av batterier endres samtidig som batterikapasiteten (rekkevidden) øker med det 3-dobbelte for kjøretøy i perioden 2020 – 2050. Den grafiske fremstillingen (Det Norske Veritas GL, 2019) viser kostnadsnivå for batterier i USD/kWh: 125 USD/kWh i 2020, 45 USD/kWh i 2030 og 25 USD/kWh i 2050.



Figur 8: Utviklingen av batteristørrelse, rekkevidde og batteripris frem til år 2050 (7).

2.5 Fremtidig perspektiv på utviklingen av batteriteknologi.

Vedlegg B til denne delrapporten gir et overblikk over mange nye batteriteknologier som er under forskning og utvikling

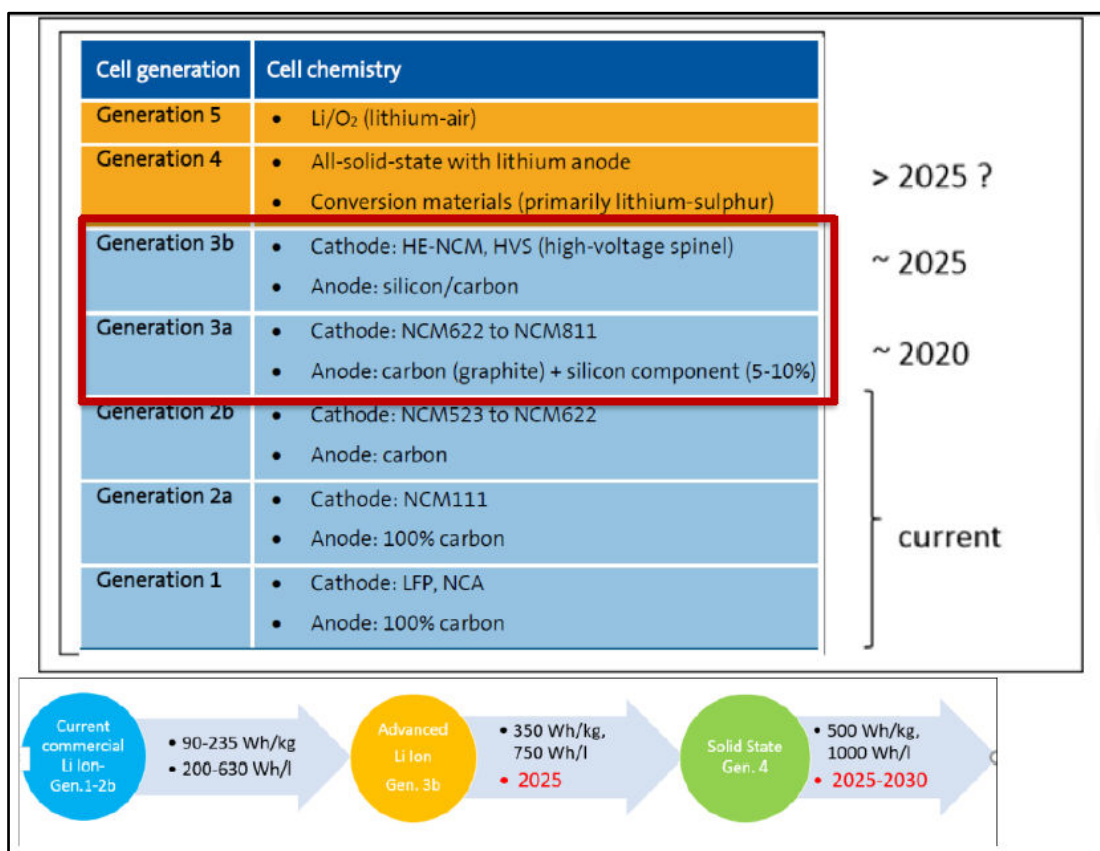
Batteri vil ha en betydelig og økende rolle innen transportsektoren som energibærer og energilager i fremtiden. I 2020 vil energitettheten bli 250 Wh/kg for PHEV-er (Plugin Hybrid Electrical Vehicles) og EV-er (Electrical Vehicles), mens batterikostnadene vil bli redusert til 180 USD/kWh eller mindre. For å kunne distribuere EV-er mer omfattende i fremtiden, må energitettheten og batterikostnadene forbedres ytterligere. Fremtidige mål for energitetthet og batterikostnader er satt til henholdsvis 500 Wh/kg og mindre enn 90 USD/kWh i 2030 av NEDO, og batterikostnadene forventes å være mindre enn 45 USD/kWh i rundt 2040. Det forventes også at batterikapasiteten er 3-doblet i år 2040 sammenlignet med 2019.

Fra dagens generasjon 2b batteri(celle)teknologi med energitetthet på cellenivå på ca. 235Wh/kg antas det innen forskningen at energitettheten er doblet fra/etter 2025. Det antas at rekkevidden for kjøretøy har nådd en 3-dobling innen 2040 og 4-dobling innen 2050. (7)

Hvis dette blir gjeldene for batteritog vil vi med dagens rekkevidde for togsett på 120 km kunne kjøre henholdsvis 240 km etter 2025, 360 km i 2040 og 480 km i 2050. Nå er det normalt slik at jernbaneprodusenter er mer konservative enn for eksempel bilindustrien med å ta i bruk nyeste teknologi, og det må derfor antas en forsinkelse på 5 år.

En utfordring med utvikling av lokomotiver for persontogtrafikk og godstog er at vekten på batteriene (lav energitetthet) gir begrensning for hvor mye batterikapasitet som er mulig å bygge inn i et lokomotiv. Ved en 3b/4 generasjon batteriteknologi vil det være mulig å bygge inn mer (dobbel) batterikapasitet for samme vekt som dagens teknologi, dette vil bedre muligheten for batteridrevne lokomotiver.

Figur 9 hentet fra Mozees seminar (8) viser en oversikt over antatt utvikling av batterier.



Figur 9: Utvikling av energitetthet og batterikjemier for de forskjellige generasjoner av batterier (8).

2.6 Hva er forventet utvikling uttalt fra produsenter/kjøretøyprodusenter

Togprodusentene i Europa antar at batterikapasiteten vil øke med ca. 15% i de nærmeste årene. Jernbanekjøretøy regnes å ha en levetid på 30 år, og produsentene antar at batteriene har en levetid på 15 år. Dette gjelder Litium-Titanat (LTO) batteriteknologi, mens NMC batterier har en kortere levetid. Grunnet den høye kostnaden for batteripakker, er det rimelig å anta at de togsettene som leveres nå vil benytte de installerte batteripakkene ut levetiden, Dette betyr at dagens batteritog med LTO batterier vil kjøre med dagens batteriteknologi frem til 2034 eller med NMC batterier til 2026.

Lokomotiver for kjøring på ikke-elektrifiserte baner er ikke på utviklingsstadiet hos produsentene. Grunnen for dette er det høye effektbehovet (ca. 4-5 MW) og lange kjørestrekninger, noe som ikke enkelt lar seg erstatte med batterier. Produsenten har pr. i dag ikke en 'business-case' som viser at produksjon av batterilokomotiv er lønnsomt. Det vises liten interesse for utvikling og produksjon av et antatt totalt behov i Norge for 10 stk. KL-/batterilokomotiver. Det er imidlertid en uttalt interesse dersom utviklingskostnadene er finansiert av andre. Utviklingskostnadene antas å ligge i størrelsesorden 500 mil. NOK.

Utvikling av 'last-mile' batteriløsning.

Inne på terminalområder er det ikke montert KL, da dette ikke er mulig på grunn av kraner og trucker for lasting og lossing. Skifting av godsvogner gjøres derfor med egne skiftelokomotiver med dieseldrift. Det er utviklet løsning med mindre batterikapasitet for lokomotiver/skiftelokomotiver for bruk i tettbebygde områder og for bruk inne på terminaler. Økt batterikapasitet vil gi økt fleksibilitet.

Det er et samarbeid innen jernbanebransjen i Europa gjennom Shift2Rail, som innen 2022 skal ha videreutviklet en opp skalerbar batteriløsning for 'last-mile' drift (9). Se også Vedlegg B, kapittel 2.4.

2.7 Energieffektivitet 'Well to Wheel'

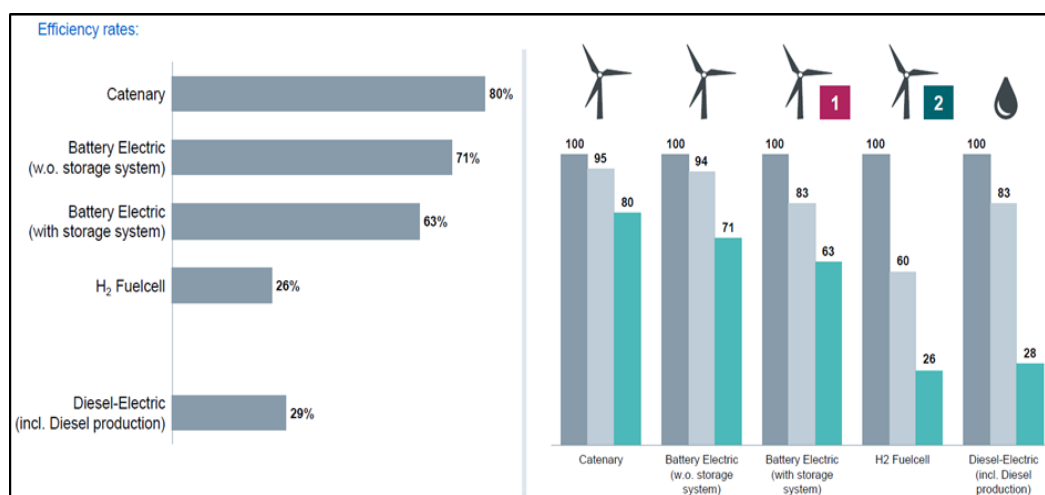
Sammenligninger av energieffektivitet er komplekse og kan ha ulike feilkilder. Det vil ofte kunne være diskusjon om hvor effektivitetskjedens startpunkt skal være og hvilke faktorer som skal være med. Det kan også forekomme diskusjoner om forutsetninger og diskusjoner om hvilken teknologi som skal legges til grunn.

For batteri er det valgt å starte med elektrisk kraft, dette er gunstig i forhold til å få gode sammenligninger mot hydrogen og kontaktledningsdrevne tog.

Kjøretøyets virkningsgrad eksklusive regenerering av bremseeffekt er vurdert til å ligge på 80% for kjøretøyets traksjonsutrustning og på 70% inklusive ladesystemet. I beregninger er det lagt til en virkningsgrad på 75% for batteritog.

Figur 10 viser en sammenligning av effektiviteten 'Well to Wheel' for jernbanekjøretøy ved de forskjellige driftsformene. Eksempelvis gir KL (Catenary) en virkningsgrad i % på 80, batteridrift 71, hydrogen 26 og diesel 28. Med Battery Electric w/o storage system menes: Ingen "mellomlagring" av energi i for eksempel nettstasjoner. Batteriene om bord på toget lades direkte fra nett/grid.

Med Battery Electric w/storage system menes: Lading av batterier i for eksempel nettstasjoner i perioder med lavere energibehov. De stasjonære batteriene brukes i neste steg til å lade batteriene om bord på toget. På grunn av at energi er lagret og brukt i 2 steg, er det en lavere (63%) virkningsgrad i forhold til direkte mating av batteriene (71%) på toget fra nettet. Angitt virkningsgrad med bruk av kontaktledning og batterielektrisk uten mellomlagring hensyntar tapet i kontaktledningen i tillegg til virkningsgraden for komponenter om bord på togene. Dette er også grunnen til at virkningsgraden på 80% for KL og 71% fremkommer som lav.



Figur 10: Energieffektivitet 'Well to wheel'. Siemens Mobility

3 Nå-situasjon for bruk av batterier som energibærer innen transport/anlegg generelt

3.1 Nå-situasjon og erfaringer

Bruk av batterier innen anlegg er generelt lav i Norge og Europa i forhold til andre drivstoffalternativer. Det er meldt fra produsentene at interessen er økende, og enkelte mindre typer anleggsmaskiner har batteriløsning. Eksempel her kan nevnes lette gravemaskiner og trucker.

Verdens første store batteridrevne gravemaskin ble utviklet av Pon Equipment i Norge i samarbeid med Caterpillar. Maskinen veier 26 tonn og ble tatt i bruk av Veidekke i år (10). Dette er et tegn på at batteridrift innen anleggsbransjen er i en oppstartfase.

Bruk av batteridrift i Norge er i stor grad begrenset til biler og busser. Det er mer enn 200 000 batteribiler i Norge, og som i 2019 utgjorde ca. 45% av nybilsalget. Det var 20 batteridrevne busser i Norge ved inngangen til 2019, og det vil være 400 i løpet av 2022.

4 Nå-situasjon ved batterier som energibærer innen jernbane

4.1 Presentasjon av erfaringer ved batteridrift

Produsenter i Europa forteller at de positive erfaringene med batteritog for persontrafikk har ført til betydelig økt interesse, etterspørsel og flere leveransekontrakter. Land som Tyskland, Østerrike og Danmark der store deler av jernbanenettet ikke er elektrifisert, ser nå med bakgrunn i operativ suksess med batteridrift og den raske utviklingen av batteriteknologien fordelene ved å kunne benytte togsett som kan bruke kombinasjonen av KL- og batteri som driftsmodell. Batteridrift gir også bedre fleksibilitet, en mer ensartet kjøretøypark og reduserte driftskostnader for togselskapene. Togselskapene viser til at trekkraften ved batteridrift ligger litt lavere enn ved KL, men at det er fullt ut akseptabelt. Sammenlignet med dieseldrift er batteridrift adskillig bedre av komforthensyn. Der passasjerer tidligere måtte bytte tog ved overgang fra en elektrifisert strekning til en ikke-elektrifisert strekning unngår man dette med batteridrift. Det bidrar også til kortere reisetider. Disse togsettene veksler dermed mellom batterier og banestrøm (KL), og erfaringen er at vekslingen mellom kjøring på elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger i hastighet inntil 100 km/t er uproblematisk.

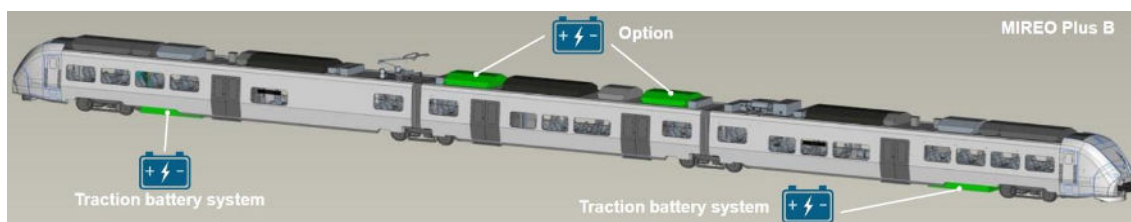
4.1.1 Siemens mobility/ Siemens Mireo City Jet Eco

Som en del av "Update Fleet Strategy 2035"-program initiert av ÖBB i Østerrike, er et delprosjekt med batteritog City Jet implementert. Målet med dette prosjektet er å få erfaringer med batteridrift under alle driftsforhold (sommer/ vinterdrift). Det er bestilt 25 stk. Mireo City Jet Eco, hvor den første er en prototype batteritog som er bygget for KL- og batterier for kjøring på elektrifiserte og ikke-elektrifiserte baner. Prototypen ble satt i ordinær persontrafikk i august 2019. De øvrige 24 stk. leveres i utgangspunktet for kjøring kun med KL, men er designet som prototypen hvor det enkelt kan etter monteres batterier. ÖBB vil ta en beslutning om oppgradering til batteridrift for de øvrige etter prøveperioden første halvdel av 2020. Foreløpig viser prototypen gode resultater. Figur 11 viser batteritog hvor strømtakeren er koblet til KL og lader batteriene.



Figur 11: Batteritog Siemens Mireo City Jet ECO

Figur 12 og Figur 13 viser konfigurasjonen, hastigheter og rekkevidder til Siemens Mireo Plus Batteritog (Kilde: Siemens Presentasjon):



Figur 12: Siemens Mireo Plus Batteritog konfigurasjon.

Platform	Configuration	Performance	Track class	Max. V	Batt. Capacity						
					1	2	3	4	5	6	
Mireo Plus B	2-car 120 Seats	Standard	C (<20 t)	160			80 km				
		Range	C (<20 t)	140			90 km				
		Lightweight	B (<18 t)	140			40 km				
	3 car 165 Seats	Standard	C (<20 t)	160				100 km			
		Range	C (<20 t)	140					120 km		
		Lightweight	B (<18 t)	140			60 km				

Figur 13: Siemens Mireo Plus Batteritog hastigheter og rekkevidder.

4.1.2 Bombardier Transportation/ Talent 3

I Hennigsdorf, Brandenburg, Tyskland, har Bombardier presentert sitt batteridrevne Talent 3 elektro-hybrid-tog. I 2019 vil Deutsche Bahn (DB) starte en tolv måneders prøve kjøring med passasjerer med den nåværende prototypen i Alb-Lake Constance-regionen.

Batteritoget er utslippsfritt, energieffektivt og lite støyende. Det har også rundt 50 prosent lavere støynivå enn moderne dieseltog.

Den nåværende prototypen er utstyrt med fire Mitrac trekkbatterier og kan kjøre strekninger på rundt 40 km. Neste generasjon batteridrevne tog vil kunne dekke avstander på opptil 120 km på ikke-elektrifiserte jernbaner.

Statssekretæren i Det Føderale Departementet for Transport og Digital Infrastruktur, Enak Ferleman sier (oversatt fra engelsk):

Vi ønsker å fortsette å elektrifisere jernbanetransporten. Et tog som kan lade batteriene fra KL mens du kjører, er et stort skritt mot dette. På ikke-elektrifiserte eller bare delvis elektrifiserte ruter er mottoet: vekk med diesel fra sporene og mot renere og mer miljøvennlig mobilitet.

Figur 14 og Figur 15 viser henholdsvis bilde av Bombardier Talent 3 samt en illustrasjon av Bombardiens design av batteritoget med komponentene for batteridrift.



Figur 14: Bombardier Talent 3, batteritog



Figur 15: Bombardier design av batteritog med komponenter for batteridrift.

4.2 Planer for batteritog.

Dette kapitlet presenterer eksempler på det begynnende omfanget og satsningen på batteritog som erstatning for dieseldrift på ikke-elektrifiserte banestrekninger.

4.2.1 Stadler/ Flirt Akku

I Nord-Tyskland for Schleswig-Holstein har Stadler fått i oppdrag å levere 55 batteri-elektriske tog. Stadler Flirt Akku-enhetene skal erstatte 55 dieseltog fra desember 2022. Kun 29% av dette jernbanenettet er elektrifisert. Flirt Akku er et passasjertogsett med batterier montert på taket som gir toget en rekkevidde på opptil 150 kilometer. På de elektrifiserte hovedlinjene blir togene ladet fra KL i tillegg til at ekstra lade anordninger skal bygges på bestemte punkter (11). Toget er vist i Figur 16.



Figur 16: Flirt Akku batteritog (12).

4.2.2 Stadler/ WINK

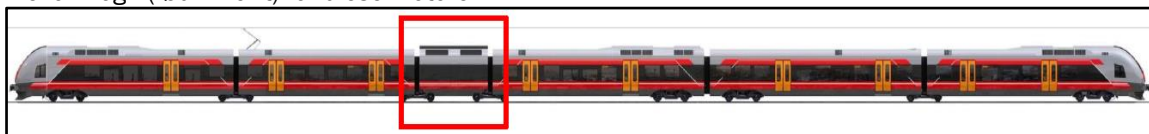
Togselskapet Arriva i Nederland har bestilt 18 WINK-bimodale togsett for Noordelijke Lijnen, som i utgangspunktet skal benytte KL på elektrifiserte strekninger og biodiesel på ikke-elektrifiserte strekninger. På et senere tidspunkt skal dieselinstallasjonen erstattes med batterier, som gjør WINK utslippsfri på de ikke-elektrifiserte banestrekningene (12). Illustrasjon av toget er vist i Figur 17.



Figur 17: Stadler Wink batteritog med mellomvogn for batteriinstallasjon (36).

4.2.3 Stadler /Flirt bimodalt togsett

Norske tog AS har bestilt Flirt type 76 fra Stadler med dieseldrift som ankommer i Norge fra våren 2020. Flirt type 76 er bygget bimodalt (BMU) med en løsning for å kunne kjøre og veksle mellom kjørestrøm/KL og dieseldrift, avhengig av om banestrekningene er elektrifisert eller ikke. Type 76 har en mellomvogn med 4 dieselmotorer som genererer energi for elektriske fremdrift. Stadler har sett på en løsning hvor mellomvognen med dieselmotorene byttes ut/omgjøres til batteri lager. Stadler har videre gjort en vurdering og foreløpige energiberegninger for en mulig overgang fra dieseldrift til ren batteridrift. Målet er å få installert så mye batterikapasitet som mulig. Figur 18 viser Flirt type 76, med mellomvogn (rød firkant) for dieselmotorer.



Figur 18: Illustrasjon av Flirt type 76.

4.2.4 Andre planer

New Zealand/Auckland har bestilt 17 batteritog fra den spanske togprodusenten CAF. Persontogene skal kjøre på både elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger med lading fra KL. Disse vil bli satt i full drift i 2020 (13).

Irland National Transport Authority har planer om å fornye persontog flåten med 600 togsett i løpet kommende 10 år. Flåten skal bestå av batteritog og ordinære elektriske togsett. 80% av jernbanedriften i Irland vil da være utslippsfri (14).

California Air Resource Board har gitt BNSF Railway og San Joaquin Valley Air Pollution Control District en sum på 22,6 mill. USD for et pilotprosjekt for å utvikle lav-utslippsteknologi innen godstransport, inkludert bruk av batterier som energibærer. General Electric utvikler i denne sammenheng et 6-akslet

batterilokomotiv basert på GE Evolution Series Tier 4, med lagringskapasitet på 2,4 MWh. Totalvekten på dette lokomotivet er ca. 195 tonn. Det er normalt for BNSFs transkontinentale ruter å benytte 3 lokomotiver til trekk-kraft ved tog lengder over 2 km. Pilotprosjektet innebærer å bygge om ett av disse til batteridrift som hybridiserer hele toget for å øke energieffektiviteten. California har de største stigningstallene (f.eks. San Bernardino-området) og tog på vei nedover kan regenerere mye energi. Batteripakken vil bli ladet gjennom å oppta bremse-effekten. Pilotprosjektet gjennomføres på Stockton – Barstol linjen med planlagt oppstart i 2020. Figur 19 viser en prinsippskisse for lokomotivet. Dominique Malenfant, visepresident av Global Technology for GE Transportation, sier dette om prosjektet:

"This project will give us tremendous insight into the capabilities of battery power and the best operational methods of leveraging the technology, It will accelerate the development of this cleaner, more efficient solution for the freight rail industry." (15)



Figur 19: Prinsippskisse for BNSF and Waco lokomotiv. (15)

Den spanske togprodusenten CAF fikk en bestilling i 2019 fra det franske togselskapet RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) for produksjon av 12 stk. batterilokomotiver (skiftelokomotiver) med opsjon på 6 stk. Lokomotivene har en batterikapasitet på 1 MW og kan kjøre enten med KL eller batteridrift. Lokomotivene skal benyttes til å slepe tog for vedlikehold av infrastrukturen for det regionale jernbanenettet (16).

5 Miljøkonsekvenser ved bruk av batteri

5.1 Utslipp

Utslippene i forbindelse med batterier som energibærer er knyttet til produksjon, distribusjon og deponering. Hvilken type råstoff som benyttes til produksjonen har også en påvirkning på utslippene.

Eksempel fra el-bil: For det første bidrar det å produsere et elektrisk kjøretøy i gjennomsnitt dobbelt så mye til det globale oppvarmingspotensialet, og bruker dobbelt så mye energi tilsvarende det å produsere en bil med forbrenningsmotor. Dette er hovedsakelig på grunn av batteriet. Batteriproduksjon bruker mye energi, fra utvinning av råvarer til strøm som forbrukes i produksjonen. Jo større elbil og rekkevidde, desto flere battericeller trengs for å drive den, og følgelig mer produsert karbon.

For det andre, når den er tatt i bruk, er et elektrisk kjøretøy bare så grønt som strømmen som lader batteriet. Et kuldrevet batteri er skitnere enn et solcelledrevet batteri.

For det tredje, mens et elektrisk kjøretøy har et høyere karbonavtrykk i begynnelsen av livssyklusen, er det vanligvis renere når den er i bruk. Over tid kan det ta igjen biler med forbrenningsmotorer. Tidspunktet der utslippet i levetiden for et elektrisk kjøretøy blir likt en bil med forbrenningsmotor, avhenger også av bilens kjørelengde.

Tabell 1 presenterer en oversikt utarbeidet av Ricardo (2011), som viser at elektriske kjøretøy har et høyere karbonavtrykk under produksjon enn konvensjonelle kjøretøy. I bruk i løpet av levetiden vises det imidlertid at konvensjonelle kjøretøy har et høyere CO₂ utslipp (17).

Tabell 1: Sammenligning av livssyklus karbonfotavtrykk for bensin- og batteridrevne biler (17).

Comparison of full life cycle assessment(well-to-wheels) of carbon emissions and carbon footprint during production for four different powertrain technologies ^[50]			
Type of vehicle (powertrain)	Estimated emissions in production (tonnes CO ₂ e)	Estimated lifecycle emissions (tonnes CO ₂ e)	Percentage of emissions during production
Standard gasoline vehicle	5.6	24	23%
Hybrid electric vehicle	6.5	21	31%
Plug-in hybrid electric vehicle	6.7	19	35%
Battery electric vehicle	8.8	19	46%

Notes: Estimates based upon a 2015 model vehicle assuming 150,000 km (93,000 mi) full life travel using 10% ethanol blend and 500g/kWh grid electricity.

5.1.1 Gjenbruk/resirkulering av batterier

For øyeblikket er det stor etterspørselen etter Li-ion for batteriproduksjon for fremtidig transport og andre applikasjoner. Som diskutert i det foregående kapittelet har batteriproduksjon negativ innvirkning på miljøet. For å redusere utslipp av CO₂ og klimagasser er gjenvinning av batterier viktig for å redusere miljøforurensningen. Gjenvinningsprosesser reduserer etterspørselen og behovet for litium, nikkell og andre materialer, slik at gjenbruk reduserer utslippet ved batteriproduksjonen og utvinningsbehovet fra opprinnelige kilder reduseres. Det er tre grunnleggende resirkuleringsteknikker: hydrometallurgisk utvinning, pyrometallurgisk utvinning og direkte resirkulering. Teknikkene diskuteres ikke her, men metoden med direkte gjenvinning gjør det mulig å gjenvinne større prosentandel av innholdet av batteriproduktene. Overhaling av batterier på slutten av livssyklusen eller revitaliseres med nye elektrolytter gir større muligheter i fremtiden (18).

For batterier i jernbanekjøretøy, regnes levetiden (aldringen) frem til at batterikapasiteten har nådd 80% av nytt batteri. Batteriene kan da enten revitaliseres eller benyttes for lagring av energi innen andre områder hvor en restkapasitet over 80% er mindre viktig.

5.2 Støy

Sammenlignet med støy fra et dieseldrevet tog vil bruk av batteriteknologi medføre en betydelig reduksjon i støy. Et kjøretøy med batteri som energibærer vil ha et støybilde som er svært likt et ordinært elektrisk drevet kjøretøy både med tanke på utvendig støy og støy inne i kjøretøyet.

5.3 Levetid, gjenbruk/deponering av utstyr

Levetiden for et ordinært jernbanekjøretøy betraktes av Jernbanedirektoratet til å være 30 år, og det antas at dette vil være gyldig også for et kjøretøy med batteri som energibærer. Det antas at et kjøretøy med batteri som energibærer i hovedsak vil kunne gjenvinnes og deponeres på samme måte som et ordinært kjøretøy. Siden teknologien innebærer bruk av et relativt sett stort batteri, må det antas at dette vil måtte gjenvinnes, gjenbrukes eller deponeres på samme måte som andre store batterier benyttet i transport. De er ikke identifisert noen deler av teknologien som antas vil utgjøre noen særskilt utfordring å håndtere for norsk avfall og gjenvinningsindustri på det tidspunkt dette blir aktuelt.

5.4 HMS ulemper og gevinster

Bruk av batteriteknologi vil ha ulik påvirkning på HMS for ulike grupper av personell som er involvert i håndtering av kjøretøyet.

For førere og annet personell som arbeider om bord i kjøretøyet når det er i drift, vil de få reduserte støybelastninger sammenlignet med et dieseldrevet kjøretøy. Behandlingen og arbeidsmiljøet vil være svært likt som ved et ordinært elektrisk drevet kjøretøy når kjøretøyet er i normal drift.

Basisteknologien har liten eller ingen betydning for disse gruppernes arbeidsmiljø når toget er i normal drift, men tilstedeværelsen av en større mengde energi lagret i et batteri kan ha det i avvikssituasjoner og ved uønskede hendelser. Jernbanedirektoratet vil ikke gjøre noen vurdering av denne betydningen, da det er det enkelte jernbaneforetak som er ansvarlig for å utføre risikovurderinger av alle endringer i operasjon, organisasjon og teknikk innen egen virksomhet i henhold til jernbanelovgivningen.

Tilstedeværelsen av lagret energi i et batteri vil også kunne påvirke verkstedpersonell, renholdspersonell, personell i ulike beredskapsorganisasjoner. Det er Jernbanedirektoratet sin vurdering at det personell som kan være involvert i avvik og uønskede hendelser er spesielt utsatt for negativ påvirkning av HMS i tilknytning til bruk av batteri i jernbanekjøretøy, men at dette må vurderes spesifikt av de organisasjonene som er ansvarlig for personellet det er aktuelt for.

6 Lading/teknologi for lading og overføring av strøm til batterier

6.1 Ladeanlegg

Lading av batterier for jernbanekjøretøy, kan gjøres fra ordinært KL- anlegg under kjøring eller ved stillstand. Dimensjonering av strømvaktakeren er imidlertid avgjørende for lading av batteri.

Lading kan også gjøres ved spesialdesignede ladeanlegg, når kjøretøyet står stille. Den fysiske strukturen på ladestasjonen er ganske enkel. Den består av en kort lengde luftledningsskinner, omtrent 20 til 200m lang. Lengden avhenger av antall batteritog og togtypen som skal lades i samtidighet. Det vil være normalt med lading av kun et togsett av gangen, noe som gjør strømforsyningen relativ enkel å utforme siden belastningen er forutsigbar.

Figur 20 viser et ladeskinnesystem for både 25 kV og 15 kV som er tilgjengelige i markedet. Den mest fremtredende lademetoden med dagens teknologi er lading via KL ved både kjøring og stillstand. Det vil være mulig å kombinere lading ved KL og ladeskinne. Ladeskinne vil gi mulighet for hurtigere lading ved stillstand enn KL.



Figur 20: Ladeskinne på Auckland stasjon (foto: Furrer+Frey).

Lading ved hjelp av 3de skinne er også en mulig løsning. Dette krever ekstra installasjoner i kjøretøyet og i infrastrukturen og synes lite aktuell for ordinær jernbane.

6.2 Kjøretøyenes ladekapasitet

Når batteriene lades opp går strømmen fra KL anlegget til trafoen, deretter til likeretteren og etterpå til DC/DC omformerer og batteriene. Hvis alle disse komponenter blir designet til å tåle 700 A kontinuerlig skal det ikke være noe problem. Kjøleanlegg må designes nøyaktig med høy kapasitet til å kjøle trafo, omformerne og batteriene effektivt. I tillegg bør det være eksklusive DC/DC omformere til å koble batteriene til DC link. Dette gjelder nødvendigvis ikke type 76 (BMU) som har en PEBB modul i traksjonsomformer som kan være enten DC/DC omformer til batteriladning under KL eller DC/AC traksjonsomformer.

6.2.1 Komponenter som begrenser ladeeffekten

Stasjonærladning

Strømvaktakers slepekull (som er laget av karbon) begrenser ladeeffekten. Høy temperatur skader slepekullet. Det er maks 80 A lade strøm per strømvaktaker uansett KL-spenning. Det vil si 1,2 MW i forhold til 15 kV og 2 MW i forhold til 25 kV. Stasjonærladning kan også gjennomføres med to pantografer samtidig for å ha dobbelt så mye ladeeffekt. Når toget nærmer seg en stasjon og hastigheten reduserer

kan pantografen nummer 2 heves også for å ha 160 A tilgjengelig, ladeprosessen kan gjøre automatisk ved hjelp at hastighetsmåling og geofensing (eller ved bruk av ERTMS).

Et forslag til innovativ løsning kan være at en liten motor beveger strømvtageren horisontalt når toget er stående i stasjoner for å ha større lade kapasitet tilsvarende som under kjøring.

Lading under kjøring

Den elektriske infrastrukturen i Norge har begrenset kapasitet på 900 A (13,5 MW) for enkelte strekninger, men det mest vanlige er 700 A (10,5 MW). Figur 7 i kapittel 2.1.7 viser hvordan klasseinndeling av strømtilførsel til tog er for de forskjellige banestrekningene. Klasseinndelingen viser i prinsippet den teoretiske oppnåelige ladeeffekten for batteri. Hvilken elektrisk effekt som da er tilgjengelig for lading av batteriet under kjøring er begrenset av hvilket effektforbruk toget bruker under kjøringen, i tillegg til effekttapet fra strømvtager til batteriet. Egenskapene til batteriet er også avgjørende for hvor mye energi et batteri kan ta imot for opplading. Ved retardasjon vil bremseenergien bli tilbakematet til batteriet, og derved lade batteriet. Hvor mye energi som tilbakemates til batteriet under kjøring er avhengig av kjøring og høydeprofilen på en banestrekning.

6.3 Produksjon, kapasitet og tilgjengelighet

Med utgangspunkt i en case-studie av Nordlandsbanen, er det gjort en forstudie i rapporten for beskrivelse av delmål 3 med del-elektrifisering og potensielle kjøredistanser sett opp mot batterikapasitet og tilgjengelighet av ladeinfrastruktur.

Det er også gjort beregninger for en hel-batteriløsning med ladestasjoner i endepunktene på strekningen.

Tilgang til kraft og utredning av dette er beskrevet i delrapport 3.

6.4 Hva er maksimal rekkevidde, gods, persontog

Mulig kjøredistanser for godstog og persontog er avhengig av mange forhold og parametere, det er derfor ikke mulig å konkret beskrive maksimal rekkevidde. Rekkeviddebetraktninger er drøftet i de kapitlene hvor dette inngår som tema. Beskrivelser finnes i kapittel 7.1 samt i vedlegg A og B til denne rapporten, i tillegg til beskrivelser for en case-studie for Nordlandsbanen i delrapport 3.

6.5 Regenerering av effekt ved motorbremsing

Regenerering er også betegnet som tilbakemating av effekt ved motorbremsing, og foregår når elektromotorene er drevne og bremser togets massebevegelse for eksempel ved kjøring i fall.

Tilbakematingen av effekt ved bremsing benytter samme elektriske krets som for kjøring, og lader batteriet. Tilbakemating for lading av batteriet ligger i størrelsesorden 10-20% av det totale effektforbruket på en strekning. Prosentandelen for hvor mye effekt som tilbakemates vil variere med faktorer som høydeprofil, kjøremønster og batteriets oppladede nivå (SOC).

7 Begrensninger/barrierer ved bruk av batteri som energibærer

7.1 Kapasitet for lengre strekninger og hvilke restkapasiteter skal beregnes

For persontog og godstog med batterier som energibærer er kapasitet for å kjøre lengre strekninger en barriere som gir begrensninger for bruken av teknologien. På grunn av aksellastbegrensninger i infrastrukturen i Norge, gir vekten på batteriene i tillegg til togets 'normale' vekt begrensning for hvor mye batterier som kan bygges inn i tog konstruksjonen. Av denne grunn kan batteritog kun kjøre til den batterikapasitet som batteritog har med seg, er utladet. Med dagens batteriteknologi opplyser tog produsentene av persontog, rekkevidder i størrelsesorden 80-120 km, før batteriene må lades opp på nytt. Dette er imidlertid avhengig av blant annet høydeprofilen, stopp- og akslerasjonsmønster for en banestrekning samt energiforbruk av andre installasjoner i toget, som for eksempel oppvarming ventilasjon. Infrastrukturen for lading av batteritog må derfor tilpasses batteritogets maksimale energiforbruk, samt ha en sikkerhetsmargin. Batteridrift har ikke samme fleksibiliteten som dagens dieseldrift.

Det finnes ikke konsepter for godslokomotiv som er utviklet for kjøring på lengre strekninger. Batterienes foreløpige lave energitetthet viser at det er utfordrende å få mye energimengde installert i et lokomotiv. Vekten på komponentene i et lokomotiv knyttet til dieseldrift har en vekt på ca. 25-30 tonn. Denne vekten kan erstattes med batterier og tilhørende komponenter. En produsent oppgir at et 4-akslet lokomotiv kan ha et energilager med batterier tilsvarende 1.7 MWh og et 6-akslet lokomotiv 50% mer, som gir 2,6 MWh. En batterikapasitet på 2,6 MWh, er for lavt for godstransport for lengre strekninger. Energiforbruket for et godstog på 1080 tonn som skal kjøre fra Trondheim til Bodø er ca. 14 MWh. Det vil derfor være nødvendig med lading av batteriet underveis på strekningen. Et godstog vil også kunne benytte godsvogn(er) som batteri lager, slik at rekkevidden øker. Utfordringene med dette vil være at batterivognene opptar transportkapasiteten for gods. Ved eventuelt bruk av batterivogn, vil dette gi en utfordrende skifteoperasjon ved endestasjonene da både lokomotivet og batterivognen (som må stå bak lokomotivet) må skifte til motsatt ende. For å få dette gjennomført må lokomotivet ha egen fremdrift for eksempel ved en 'last-mile' batteripakke.

Batterivekten er altså en avgjørende faktor for rekkevidden. Batterivolum synes ikke å være en tilsvarende begrensende faktor.

7.2 Klimatiske forhold som kan, og påvirker batteridrift

Teknologien med bruk av batterier antas ikke avvike mye fra andre driftsformer. Dette avhenger av batteritypen og hvordan batteriene isoleres/varmes opp under ekstrem kulde. Batteritog i ekstrem kulde må utprøves.

7.3 Topografiske forhold

Rekkevidden for kjøretøy (gods- og persontog med batteri) avhenger av høydeprofilen, kurvatur og kjøring i snø som skaper økt motstand. Andre topografisk relaterte problemstillinger anses ikke som relevante begrensninger eller barrierer.

7.4 Konsekvenser for nyttelast ved installasjon av batteriteknologi

De forskjellige Li-ion batteritypene har variasjoner i energitetthet. Som eksempel kan vi beregne vekten for LTO batteripakker for et persontog med energitetthet på 50 Wh/kg (pessimistisk). 1 MWh batteripakke vil da veie 20 tonn. En mer optimistisk beregning med batteripakke med energitetthet på 100Wh/kg vil veie 10 tonn. Ved design av kjøretøy er tillatt aksellast en dimensjonerende faktor som for eksempel 20 tonn. Batteritog for persontrafikk er designet opp mot maksimal aksellast og antall passasjer seter er opprettholdt. Det kan være mulig å erstatte passasjerplasser med batterier.

For at et lokomotiv skal ha nødvendig traksjonsevne dvs. unngå sluring, er aksellasten avgjørende. Dette betyr at høy batterivekt i et lokomotiv er nødvendig. Ved en løsning med batterier installert på egne vogner, for godstransport vil dette belegge godsoperatørens transportkapasitet.

For persontogtrafikk med lokomotiver og vogner med påkoblet batterivogn(er) er ikke dette en tilsvarende problemstilling, da tog lengde og tog vekt ikke er en problemstilling.

En teknisk løsning med batterier på vogner er foreløpig ikke utviklet av kjøretøyleverandører.

Nødvendige forutsetninger/tiltak i infrastrukturtiltak for en overgang til batteridrift

7.5 Ladeanlegg

Forhold som knytter seg til investering i ladeanlegg er ikke omfattet av denne rapporten, men er behandlet i Nullfib delrapport 3.

7.6 Tunneler

Forhold som knytter seg til tiltak på tunneller er ikke omfattet av denne rapporten, men er behandlet i Nullfib delrapport 3.

7.7 Tilpassing av verksteder og andre overdekkede områder

Ingen tiltak er nødvendige ved overgang fra diesel til batteri som energibærer.

7.8 Behov for sikring av områder

Ingen tiltak er nødvendige ved overgang fra diesel til batteri som energibærer.

8 Utvikling av kjøretøyflåten

8.1 Persontog

Kjøretøyflåten for persontog må fornyes kontinuerlig og det bør også beregnes en viss vekst i flåtens størrelse. Med den flåtestørrelsen som er i dag vil det i gjennomsnitt kreves en fornyelse i størrelsesorden 10- 15 kjøretøy pr år for å opprettholde flåtens størrelse og kvalitet over tid.

Vekst i behovene for passasjertrafikk med tog vil i tillegg generere behov for anskaffelser av nye kjøretøy.

Tilsvarende gjelder for flåten av kjøretøy som er knyttet til godstrafikk.

Fornyses og vekstbehovene i kjøretøyflåten gir et rom for gradvis innføring av ny teknologi dersom det er behov for å bytte ut den eksisterende.

Kjøretøyflåten domineres av kjøretøy som benytter den elektrifiserte delen av jernbanenettet, og her er det ikke identifisert noe behov for implementering av alternativ teknologi.

Det er kun ca. 10% av flåten som i dag drives av diesel, der det er behov for et teknologiskifte.

Store deler av den dieseldrevne kjøretøyflåten er imidlertid i slutten av sin levetid og behovene for utskiftning pga. alder ligger ikke så veldig langt frem i tid. Behovene for erstatninger vil komme innen segmentene lokal/regionaltrafikk, fjerntogtrafikk, godslokomotiver og passasjertrafikk til baner i distrikter med lav passasjerbelastning.

8.2 Godstog

Beslutninger for fornyelser og investeringer i tilknytning til godstransport, ligger hos togoperatørens strategiske planer. Dette er informasjon som ikke er tilgjengelig.

8.3 Arbeidsmaskiner for infrastrukturen

Mer utdypende informasjon om arbeidsmaskiner er omtalt i Vedlegg C

Arbeidsmaskiner som benyttes til å utføre arbeidsoppgaver kan inndeles i 2 hovedgrupper:

- Sporbunden arbeidsmaskin kan beskrives som spesiallagde kjøretøy for beredskap, bygging, vedlikehold eller til kontrollvirksomhet av jernbaneinfrastrukturen. Disse har jernbanehjul slik annet togmateriell har. Kjøretøyene er spesiallagde for spesielle arbeidsoppgaver, Samtlige sporbundende arbeidsmaskiner i Norge er dieseldrevet.
- En veg-skinne-maskin at den er bygget som en standard anleggsmaskin/traktor/lastebil men i tillegg har påbygd skinneføringshjul slik at de også kan kjøre på skinnegangen, for eksempel frem til områder det ikke er veg. Og kan enkelt kjøre av og på sporet mellom togpasseringer, noe som gir økt tilgjengelighet for vedlikeholdsoppgaver. Veg-skinne maskiner er dieseldrevne.

Utbygging og en del av vedlikeholdet til Bane NORs eksisterende infrastruktur settes ut i det eksterne markedet gjennom kontrakter. Ansvar for utviklingen mot fossilfrie anleggsplasser og overgang til fossilfrie maskiner både når det gjelder Bane NORs egne og eksterne maskiner ligger hos Bane NOR. Det kan tenkes at en handlingsplan for å oppnå 0-utslipp skal foregå via eierstyring og ved avtalestyring av Bane NOR.

8.4 Nye kjøretøy

Det er pr i dag mulig å anskaffe jernbanekjøretøy for persontrafikk med batteridrift.

Det er flere produsenter av kjøretøy som tilbyr produkter der batterier er en av energibærerne. Det mest utbredte er hybridløsninger med KL og batterier, der batteriene har begrenset kapasitet i forhold

til rekkevidde. Det er store forskjeller i tilgangen på kjøretøy mellom de ulike kjøretøykategoriene. Det er for persontog flere kommersielt tilgjengelige produkter, men for gods er det ikke kommersielt tilgjengelige konsepter for annet enn det som betegnes som «last mile» løsninger. Det er flere produsenter som har tegninger og planer for utvikling av kjøretøy til flere kategorier, men de er ikke bygget eller testet. En anskaffelse av et kjøretøy som tilhører en annen produktkategori enn de kommersielt tilgjengelige, vil være å betrakte som en utviklingskontrakt med den risiko det medfører.

Det er flere aktuelle produsenter av lokomotiver i Europa som har vist interesse for å utvikle kjøretøy i alle kategorier basert på batteriteknologi som energibærer. Tilgangen på nye kjøretøy med denne energibæreren er pr i dag begrenset, men med stor interesse fra leverandørene i det Europeiske markedet for kjøretøy.

8.5 Ombyggingsmuligheter av eksisterende/kommende kjøretøy til alternativ drift

Enkelte eksisterende elektriske- og dieseldrevne kjøretøy kan ombygges til å kunne benytte batterier. Innsatsen som må til for å få dette til vil variere fra kjøretøytype til kjøretøytype. Det er en antagelse om at innsatsen som må til og den tekniske risikoen ved en slik endring vil være større ved ombygging av eldre kjøretøy enn ved ombygging av de noe nyere konstruksjoner. Det er ikke gitt at det er å anbefale å bygge om kjøretøy, med unntak av type 76 som har en konstruksjon som fremstår som svært egnet for ombygging.

Ombygging av eksisterende kjøretøy til batteridrift vil være et meget omfattende og kostbart tiltak. Det vil trolig ikke være gjennomførbart for de fleste av de eksisterende kjøretøyene.

9 Forurensning og HMS gevinster ved vedlikehold- og byggearbeider i infrastrukturen ved overgang til alternativ drift

Bruk av kjøretøy som har batteri som energibærer vil ha stor påvirkning på HMS for det personell som er involvert i vedlikehold og byggearbeider av jernbanens infrastruktur som i dag gjøres med dieseldrevne kjøretøy.

Siden kjøretøy med batteri som energibærer har et annet og gunstigere støybilde enn hva dagens dieseldrevne kjøretøy har, vil de som arbeider i og ved disse kjøretøyene få reduserte støybelastninger ved overgang til denne teknologien.

Et batteridrevet kjøretøy vil i tillegg ikke ha lokale utslipp, som vil være avgjørende for personellens arbeidsmiljø med tanke på luftkvalitet og eksponering for skadelige gasser. Dette vil gjelde på generell basis, men spesielt ved arbeid i tunneller og andre innelukkede områder der avgasser fra dieseleksos kan bygge seg opp til høye konsentrasjoner ved langvarige arbeider.

Tilstedeværelsen av en betydelig mengde lagret elektrisk energi på arbeidsstedet vil imidlertid føre til at personellet er eksponert for en endret sikkerhetsrisiko. Jernbanedirektoratet vil ikke gjøre en vurdering av om denne endrede eksponering for sikkerhetsrisiko er akseptabel. Den enkelte virksomhet som er ansvarlig for det eksponerte personellet må selv vurdere om dette er en akseptabel risiko å eksponere sine ansatte for.

10 Sikkerhet og risiko

10.1 Lover og forskrifter

Kravene til kjøretøy for å ivareta sikkerhet er i utgangspunktet harmonisert gjennom europeisk lovgivning, med eventuelle ytterligere nasjonale krav der det er relevant. For å få godkjent nytt materiell så må man generelt:

- Verifisere at kjøretøy fyller kravene i Technical Specifications for Interoperability (TSI) (verifiseres av Notified Body (NoBo), teknisk kontrollorgan)
- Verifisere at kjøretøy fyller kravene i nasjonalt jernbaneregulverk verifiseres av Designated Body (DeBo), utpekt organ)
- Evaluere risikostyringsprosessen og resultatet (evalueres av Assessment Body (AsBo), assesserende enhet)
- Verifisere at prosessstandarder CENELEC EN 50126 er fulgt (verifiseres av Independent Safety Assessor (ISA), uavhengig assessor)

De primære kildene til relevante europeiske og norsk regelverk som vil gjelde for nytt materiell er:

- Interoperabilitetsdirektivet, 2008/57/EC (erstattes i Norge av 2016/797/EC i løpet av kort tid).
- Sikkerhetsdirektivet 2004/49/EC.
- CSM RA (Common Safety Method, 402/2013), felles sikkerhetsmetode for risikoevaluering og vurdering.
- CENELEC EN 50126 Railway applications – the specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- Relevante Tekniske Spesifikasjoner for Samtrafikkveie (TSI) med tilhørende standarder.

Dette er et omfattende og velutviklet regelverk som har til hensikt å ivareta sikkerhet på jernbanen gjennom de krav som er stilt. Regelverket bygger på to ulike hovedprinsipper som utfyller hverandre i forhold til å klare å ivareta og utvikle sikkerhetsnivået i jernbanen uten å blokkere annen utvikling av jernbanesystemet. Prinsippene er «etterlevelsescrav» og «risikovurderingskrav».

Hoveddelen av regelverket er en samling av konkrete eller funksjonelle tekniske krav til kjøretøyenes funksjon og verifikasjon av disse, samt krav til prosesser og metoder i tilknytning til utvikling og bygging av kjøretøy. Dette er det vi her omtaler som «etterlevelsescrav», regler som det skal dokumenteres at er blitt fulgt. Velutviklede og dekkende «etterlevelsescrav» er godt egnet til å sikre ivaretagelse av sikkerhet, men det har svakheter i forhold til utvikling, der enkelte teknologier i perioder der det er nytt og ukjent, enten kan være u hensiktsmessig strengt regulert eller uregulert fordi det ikke finnes regler for den nye teknologien enda (Og at slik regelverksutvikling ofte tar noe tid).

Den andre delen av regelverket som bygger på de ansvarlige parters vurdering av risiko i tilknytning til egen aktivitet, har sitt utspring i regelverket som omtales som CSM-RA. Her er det krav om vurdering og evaluering av risiko som er prinsippet som benyttes for å ivareta og utvikle sikkerhetsnivået i jernbanen. Ansvar for sikker drift er i jernbanens regler plassert relativt tydelig hos operatør. For at ikke dette regelverket ved innføring skal innebære voldsomme endringer i kravene til sikkerhet i de ulike delene av europeisk jernbane er det lagt til grunn at dagens nivå er akseptabelt. Kravet til vurdering av risiko er dermed knyttet til endringer. Kravet til at risikovurdering skal utføres er at det foreligger en endring i teknikk, operasjon eller organisasjon. Det er også gitt regler for hva som må dokumenteres for at aksept av risiko kan skje. Enten må det dokumenteres at endringen ikke er av betydning for sikkerhet, eller så må det dokumenteres at det er dekkende og relevant «etterlevelsescrav» som er fulgt, eller så må det gjøres sammenlignende analyse mot et referansesystem som er vurdert til å representere et akseptabelt sikkerhetsnivå, eller så må det gjøres en konkret sannsynlighetsvurdering av alle identifiserte potensielle farer. Kravene til akseptabel sannsynlighet er imidlertid satt så høyt at denne metoden i praksis er svært krevende å benytte. Regelverket er godt egnet til å sikre ivaretagelse av sikkerhetsnivå i jernbanen. Det er få svakheter i

dette regelverket med unntak av at det kun behandler det som faktisk gjøres, ved utrulling av ny teknologi vil denne delen av regelverket ikke gi svar på om aktiviteter som ikke er gjort enda vil kunne bli vurdert som akseptable eller ei. En annen svakhet er at det vil kunne forekomme at ulike operatører kommer frem til ulike konklusjoner i forhold til hva de vurderer å være akseptabelt.

Siden de ansvarlige operatørene er gitt ansvaret for å vurdere risiko i tilknytning til egen operasjon er myndighetene (for Norge Statens Jernbanetilsyn) gitt rettigheten til å tildele og trekke tilbake det sikkerhetssertifikat eller den sikkerhetsgodkjenning operatører må ha for å kunne operere på det nasjonale jernbanenettet. På denne måten er systemet rigget slik at det er innebærer svært stor risiko for operatørene å gjøre svake eller dårlige vurderinger av sikkerhet. De endringene som er vurdert til å være vesentlige er i tillegg underlagt krav til metodekontroll av en ekstern part (AsBo).

10.2 Batterisikkerhet

Proseduren for vurdering av 'Sikkerhetskritisk hendelse' skal gjennomføres av togselskap og enhet ansvar for vedlikehold (ECM) som står ansvarlig for operasjon og vedlikehold. Sammenlignet med luftfart, hvor flyprodusentene er ansvarlig for kritikaliteten til komponentene og systemfunksjonaliteten, har derimot ikke produsentene inne jernbanekjøretøy dette ansvaret gjennom levetiden, men kun begrenset til at endelig godkjenning er gitt av tilsynsmyndigheter. Nivået for å vurdere om en funksjon feiler skal ikke være forutbestemt/fastlagt, men enhver togoperatør og ECM skal ha ansvaret for dybden og omfanget av en analyse. Jernbanekjøretøy med batterier som driftsform innebærer ikke bare risikoforhold knyttet til selve kjøretøyet, men også grensesnitt til forhold innen infrastrukturen (f.eks. ladepunkter, lading på strekninger, brann- og eksplosjonssikkerhet i tunneler, mangel på batterikapasitet ved f. eks fastkjøring i snø mm). Jernbanekjøretøy (passasjertog) som både benytter ordinær kjørestrom og batterier har gjennomgått en homologisering og er godkjent av tilsynsmyndigheter i andre europeiske land. Dette betyr nødvendigvis ikke at et slikt kjøretøy passer for de betingelsene som gjelder for jernbanen i Norge.

Det vil til syvende og sist være togoperatør som foretar risikovurderinger og har ansvaret for sikkerheten ved å sette et kjøretøy i drift, under de operasjonelle driftsbetingelser kjøretøyet vil ha på jernbanen.

10.3 Sikkerhet ved bruk av batterier som energilager.

Den største faren med batteripakker er betegnet som 'thermal runaway' eller termisk hendelse hvor det oppstår ukontrollert varmeutvikling i enkeltceller som genererer varme og akselererer varmeutviklingen slik at hele batteripakken 'tar fyr'. Eksempel på dette er hendelsene med Samsung Galaxy Note 7 brannene. Samsung har rapportert for hard behandling på kantene av batteriene under produksjonen som skadet isolasjonsseparatoren eller grafittanoden. Når separatoren blir skadet, kan den ikke lenger holde anoden og katoden fysisk fra hverandre; elektrodene berører hverandre og fører til en kortslutning og videre overoppheting og brann. Batteriene i Samsung enheten ble skiftet ut med batterier fra ATL, som også kortslo. Det viste seg her at det ikke dreide seg om hard fysisk behandling av cellene under produksjonen, men at det var sveisingen av forbindelsen til koblingspunktet til batteriet. Å eliminere fysiske skader under produksjonen er en læringsprosess, men antagelig ikke tilstrekkelig, og adresserer ikke rot-årsakene. Det må antas at det vil komme flere batteribranner innen industrien, og at etterforskningen etter hendelser og tiltak for å hindre gjentagelse vil kontinuerlig forbedre sikkerheten (19).

Sikkerheten knyttet batteripakkene i kjøretøy overvåkes ved et eget Battery Management System (BMS). Kontrollsystemer er nødvendige for å holde cellene innenfor sitt spesifiserte driftsområde og for å beskytte dem mot menneskelige feilhandlinger. Måling av energi behøver komplekse algoritmer for å estimere ladningstilstanden (SoC). Kommunikasjon med andre kjøretøysystemer er nødvendig for å overvåke batteristatus og kontrollere energistømmene. Som eksempel på dette kan vises til Siemens Desiro ML City -jet.

10.3.1 Termisk styring

System for termisk styring er viktig for å kunne opprettholde spesifikasjonen temperaturspennet battericellene kan tåle, dette er spesielt viktig innen jernbane, andre transportmidler og anlegg. Som en del av batterisystemet er det nødvendig med luft- eller vannkjølekanaler, pumper eller vifter og varmevekslere for å kunne styre høye temperaturer eller varmetilførsel for bruk i miljøer med lav

temperatur. Termiske effekter må tas med i betraktningen i et sikkerhetsperspektiv, og toleranser må gi mulighet for utvidelse av cellene. Noen litiumceller kan svulle så mye som 10% gjennom cellenes levetid. I konstruksjoner med lav effekt kan grupper av celler pakkes sammen, men for applikasjoner med høyere effekter kan plast- eller metallrammer brukes både for å gi fysisk beskyttelse av cellene samt for å gi rom for utvidelse.

På grunn av indre motstand i batterier vil ethvert batteri i bruk generere varme ved lading eller utlading. Dette er også kjent som Joule-oppvarming. Ved utlading er den totale energien i systemet fast og temperaturøkningen vil være begrenset av den tilgjengelige energien. Imidlertid kan dette føre til svært høye lokale temperaturer i batteriet. Ingen slik automatisk grense gjelder under lading, da det ikke er noe hindrer i å fortsette å pumpe elektrisk energi inn i batteriet etter at det er fulladet. Dette kan være en veldig risikofylt situasjon, som må styres ved et BMS.

10.3.2 Ukontrollert termisk hendelse «Thermal Runaway»

Driftstemperaturen som oppstår i et batteri er et resultat av omgivelsestemperaturen i tillegg til varmen som genereres i batteriet. Hvis et batteri er utsatt for store amperstyrker, oppstår risikoen for en ukontrollert termisk hendelse som resulterer i katastrofal ødeleggelse av batteriet. Dette skjer når hastigheten i varmeproduksjon i batteriet overstiger batteriet varmeavledningsevne. Det er flere forhold som kan føre til dette:

- Til å begynne med oppvarmer de termiske tapene i ladestrømmen gjennom cellene opp elektrolytten, men elektrolyttens motstand avtar med temperaturen, så dette vil igjen føre til at en høyere strøm styrer temperaturen enda høyere, forsterker reaksjonen inntil en løpsk tilstand er nådd.
- Under lading induserer ladestrømmen en eksoterm kjemisk reaksjon av kjemikalierne i cellene som forsterker varmen som genereres av ladestrømmen,
- eller ved avgivelse av varmen som produseres ved den eksoterme kjemiske virkningen som genererer strømmen, forsterkes den resistive oppvarmingen på grunn av strømmen i cellene.
- Omgivelsestemperaturen er for høy.
- Utilstrekkelig avkjøling

Uansett årsak til oppvarming av cellene vil plastfilmen som skiller anoden og katoden bli skadet eller ødelagt. Dette medfører at cellen kortslutter og ytterligere varme genereres. Dette medfører igjen eksoterme reaksjoner som øker trykk og temperatur i cellen. Etter hvert som trykket og temperatur fortsetter å stige, vil cellene begynne å ventilere ut avgasser som: metan, propan, karbondioksid, karbonmonoksid og hydrogen. Fortsetter temperaturen å stige ytterligere vil man tilslutt nå et punkt der man får en ukontrollert termisk hendelse. På dette tidspunktet vil det sannsynligvis ha oppstått en brann, og brannen vil her være selv. Brannen vil være veldig vanskelig å slukke som følge av at brannen delvis finner sted inne i cellene/modulene. Brannen vil også kunne bidra til oppvarming av omkringliggende celler og moduler. I verste fall vil brannen spres og man vil ende opp med en ukontrollert brann i hele batteripakken.

Med mindre beskyttelsestiltak er på plass, kan konsekvensene av en termisk hendelse bli nedbrytning/nedsmelting av cellene eller en oppbygging av trykk som kan forårsake eksplosjon eller brann avhengig av cellekjemi og konstruksjon.

Det termiske styringssystemet i et BMS om bord i et kjøretøy må holde alle disse faktorene under kontroll.

10.3.3 Eksplosjonsfare

På grunn av at mange batterier frigjør hydrogen eller oksygen under drift, skal batteripakker normalt ikke være lufttett eller forseglet, noe som kan forårsake oppsamling av gasser og eksplosjon. Litiumceller avgir imidlertid ikke gasser under normale omstendigheter. Som nevnt over, kan det avgis brennbare gasser fra cellene ved svikt eller ved termisk nedbrytning. For å unngå en slik fare, kreves et system for ventilering eller rensing.

Nettoresultatet av termoelektriske og termokjemiske effekter som kan forsterkes av miljøforhold, er vanligvis en temperaturøkning, og som kan føre til en eksponentiell hastighetsøkning hvor den kjemiske reaksjonen akselererer. Ved en for høy temperaturøkningen kan følgende skje: (20)

- Kjemikaliene i batteriet ekspanderer og forårsaker utvidelse av cellene
- Mekanisk belastning av cellekomponentene kan føre til kortslutning eller åpne kretser
- Irreversible kjemiske reaksjoner kan medføre permanent reduksjon i de aktive kjemikaliene og redusere cellenes kapasitet
- Langvarig belastning/drift under høy temperatur kan forårsake sprekker i plastdelene av cellene
- Temperaturøkning får den kjemiske reaksjonen til å akselerere hastigheten og temperaturen ytterligere og kan som resultat føre til en termisk hendelse.
- Dannelse av gasser
- Trykket bygger seg opp inne i cellene
- Cellene kan etter hvert sprekke eller eksplodere
- Giftige eller brennbare kjemikalier kan frigjøres

For batterier med høy effekt, som for eksempel for jernbanekjøretøy, er det nødvendig med spesiell ventilasjon eller kanaler mellom cellene for å tillate avkjøling av luft eller væske. Temperaturen til hver enkelt battericelle overvåkes kontinuerlig ved hjelp av BMS om bord i kjøretøyet og til en fjernstyrt overvåknings-sentral. Ved fare for overoppheting, eller spenningsfeil i batteriene vil hele batteripakken nedstenges. Et batteridrevet jernbanekjøretøy har normalt flere batteripakker, og ved feil i en batteripakke vil denne kunne isoleres fra de øvrige.

10.3.4 Oppvarming av batterier ved lave temperaturer.

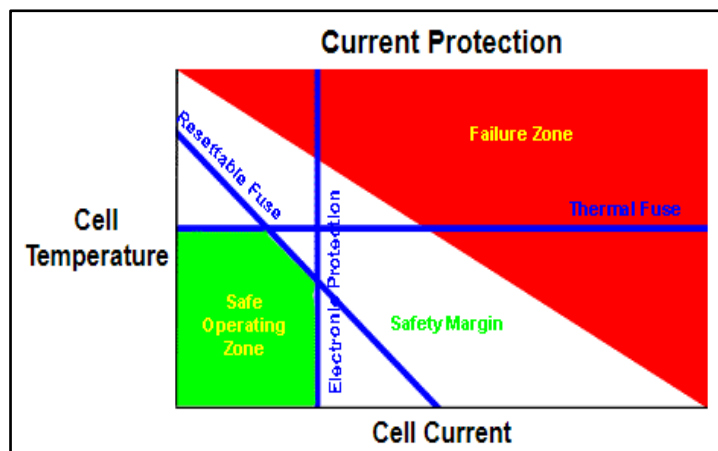
Driftsforholdene ved lave temperaturer er relativt enkle å takle. I det enkleste tilfelle er det vanligvis nok energi i batteriet til å drive selvoppvarming som gradvis fører batteriet opp til en mer effektiv driftstemperatur. I noen tilfeller er det nok å holde batteriet på ladesyklusen når det ikke er i bruk.

Enkelte batterikjemier tåler lavere temperaturer bedre enn andre, som eksempel vil et LTO batteri ha mindre påvirkning i lave temperaturer, for eksempel -20 grader, enn et NMC batteri. LTO batterier er blant annet av denne grunnen sett som fordelaktig og tatt i bruk av produsenter innen jernbanekjøretøy.

10.3.5 Beskyttelse mot overoppheting - kjøling av batterier

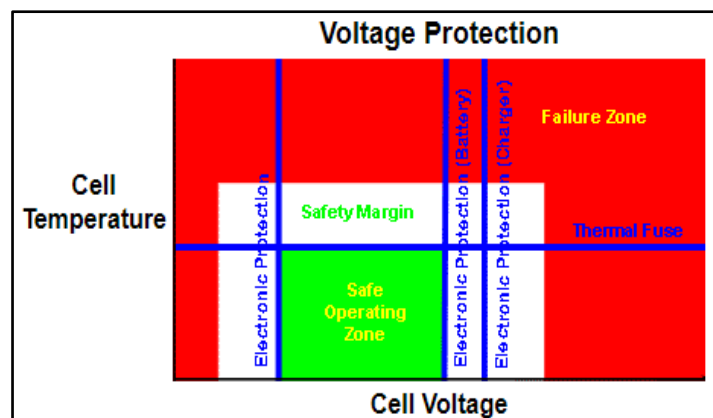
Beskyttelse mot overoppheting innebærer i de fleste tilfeller å overvåke temperaturen og avbryte strømtilførselen hvis temperaturen når øvre tillatte grenseverdi. Selv om dette forhindrer skade på batteriet på grunn av overoppheting, kan strømtilførselen imidlertid også kuttes før den øvre tillatte temperaturgrense er nådd. Ulempen med dette er at det begrenser batteriets ytelse.

Diagrammet (Figur 21) illustrerer hvordan multiple beskyttelsesnivåer ivaretar en sikker drift selv om én del i systemet feiler. Her vises tre beskyttelsessystemer som gir beskyttelsesnivåer både for overlading (for mye ampere) og for høy temperatur. Hvis en feiler, ivaretar redundansen med det andre systemet en sikker operasjon. For høy temperatur vil forårsake at alle cellene til slutt vil feile. Hvis temperaturen i batteriet overstiger akseptkriteriet, vil en innebygd termisk sikring kutte forbindelsene til batteriet. Batteripakkene i batteridrevne jernbanekjøretøy har innebygd system for termisk sikring.



Figur 21: Illustrasjon for interaksjon og redundans mellom multiple beskyttelsesnivåer (19).

Battericellene kan bli ødelagt ved både ved for høy spenning under opplading, ved for lav spenning og ved overdreven utlading. Figur 22 illustrerer prinsippet for hvordan et elektronisk beskyttelsessystem vil hindre for lav eller for høy spenning samt batteritemperatur, slik at ikke batteriet kommer i faresonen for å feile.



Figur 22: Illustrasjon av spenningsvern ved batteriets celledetemperatur (19).

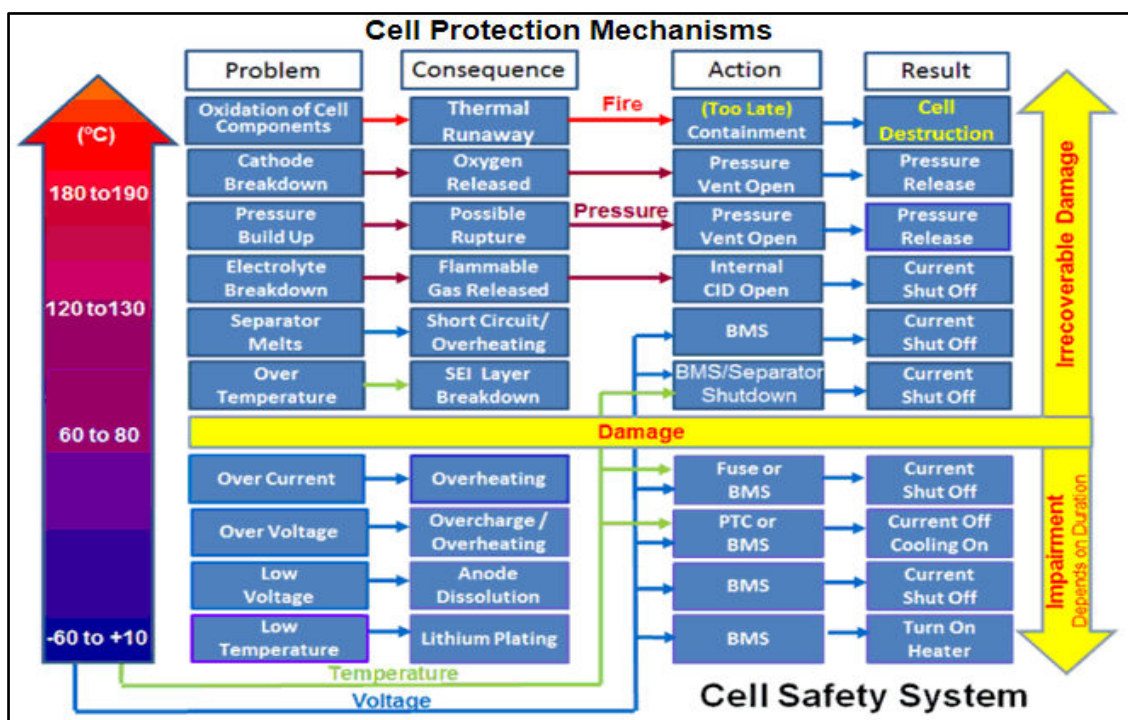
10.3.6 Kjøling

Ved å avlede varmen fra batteriet kan man tillate høyere strømtilførsel før tillatt temperaturgrense er nådd. Batteriprodusentene maksimerer dette ved å holde omgivelsestemperaturen lav, ved å sørge for en solid og god varmeavledning fra batteriet

Selv om batteriets termiske design er mer enn tilstrekkelig til å avlede den totale varmen som genereres av batteriet, kan det fortsatt være lokale områder i batteripakken som kan overskride akseptkriteriet for øvre temperaturgrense. Dette kan for eksempel være et problem med cellene i midten av en flercellepakke i motsetning til de som ligger friere og med bedre kjølemuligheter.

For applikasjoner med meget høy effekt, for eksempel batterier som brukes i jernbanekjøretøy, er det normalt med en kombinasjon av luft- og væskekjøling. Dette gir et komplekst og kostbart system, øker vekten og forbruker effekt for eksempel til vifter og pumper for sirkulasjon av kjølevæske.

Figur 23 gir en oppsummering av hvilke problemer som kan oppstå i Litium energi celler. Figuren viser hvilke konsekvenser med tilhørende tiltak som kan sikres med et batteri-styringssystem for å adressere potensielle problemer og resultater av tiltak (20).



Figur 23: Battericelle beskyttelsessystem (20).

10.3.7 Batterisikkerhet og operasjonelle forhold som må ivaretas ved batteridrift,

Sikkerhetsaspekter ved batteridrift i operativ drift skiller seg ikke spesielt ut fra andre driftsformer. En ukontrollert termisk hendelse eller eksplosjon av batteripakke med høyt energilager vil gi store utfordringer ved slukking. Dette antas å kunne skje i Norge for eksempel i en tunnel, og det må derfor tilrettelegges med beredskapstiltak.

Batteritogenes BMS er designet slik at ved feil eller brann i en batteripakke, vil denne kunne kobles ut og isolere fra de øvrige slik at videre kjøring for eksempel ut av en tunnel er mulig.

Ved utfordrende klimatiske forhold, eksempelvis hvis et tog kjører seg fast i snø ved lav temperatur vil det kunne være begrenset tilgang til strøm for å opprettholde varme i toget. Ved dimensjonering av batterikapasitet, beregner togprodusentene en sikkerhetsmargin slik at det alltid vil være tilstrekkelig kapasitet for oppvarming/ventilasjon/lys for en forutbestemt tidsperiode.

Kjøring i store snømengder krever høyere energiforbruk. Avhengig av dimensjoneringen av batterikapasitet vil det være nødvendig med vurdering av akseptkriterier for snørydding.

Ved innføring av batteridrift, innebærer dette at føreren får en tilleggsoppgave med å følge med på batteristyringssystemet (BMS) og å optimalisere energiforbruket. Dette medfører en risiko for at førerens oppmerksomhet til omliggende forhold blir redusert. Det er under utvikling energistyringssystemer basert på maskinlæring som vil automatisere optimaliseringen av energiforbruket.

Introduksjon av store energimengder som er lagret i batterier kan øke risikoen forbundet med togdrift. For hendelser med tog utendørs forventes det ingen signifikant økning av risiko som følge av implementering av batteri som driftsform. Risiko ved hendelse i tunell må vies spesiell oppmerksomhet.

Farepotensialet i forbindelse ukontrollert termisk hendelse i tilknytning til en større hendelse som for eksempel sammenstøt kan representere sikkerhetsrelaterte utfordringer som må vurderes av de ansvarlige for operasjon og godkjenning av jernbanekjøretøy.

Da det i liten grad er økende aksept for risiko i samfunnet bør det være en forutsetning at et togkonsept basert på batteridrift må ha som mål at det lages så sikkert at risiko fra hendelser med batterier blir marginal sammenlignet med annen risiko forbundet med togtransport. Dette forutsetter særlig fokus på å sikre at tunnelhendelser kan håndteres på en sikker måte.

Jernbanedirektoratet er ikke kjent med at det foreligger begrensninger eller unntak/dispensasjoner i andre land knyttet bruk av batterier.

11 Kostnader for kjøretøy ved drift basert på batteri

11.1 Investering

Investering i kjøretøy kan fordeles på produksjonskostnader for kjøretøyet, engangskostnadene ved engineering og godkjenning av kjøretøyet. Kostnadene til produksjon av kjøretøy er noe det finnes mye erfaringsmateriale på, og som kan anslås med en god presisjon. Det er også en del erfaringstall for engangskostnadene ved kjøretøyanskaffelsesprosjekter. Fra prosessen med endring av et ordinært elektrisk Flirt Type75 (EMU) til en bimodal Type76 (BMU), finnes også noe erfaring på kostnadene med å introdusere ny teknologi i eksisterende kjøretøy (før de er bygget, ikke retrofit). I tillegg vil det for denne teknologien komme utviklingskostnader knyttet til særnorske driftsforhold og krav.

Engangskostnaden for anskaffelse av et lokomotiv basert på batteri som energibærer anslås til å være i størrelsesorden 500 MNok. Dette inkluderer da kjøretøyleverandørens kostnader til engineering, utvikling testing og godkjenning, samt kostnadene relatert til å gjennomføre en offentlig anskaffelse av et kjøretøy og følge opp anskaffelsen. Denne kostnaden fordeles normalt på det antall kjøretøy som anskaffes, slik at pris pr kjøretøy varierer ut ifra hvor mange kjøretøy anskaffelsen omfatter. Størrelsen på engangskostnader vil kunne variere ut ifra f.eks. valutakurser, og hvilket år kostnadene kommer i.

Produksjonskostnaden for et kjøretøy uten engangskostnader varierer sterkt som følge av hvilken type kjøretøy som skal bygges.

En standard elektrisk motorvogn (EMU), på ca. 110m for bruk i regiontogtrafikk har en basis pris som kan regnes som 100%. Det forventes at innkjøpspris for et tilsvarende batterikjøretøy uten engangskostnader vil være omtrent 130%. Dersom størrelsen på kjøretøyet halveres vil produksjonsprisen uten engangskostnader kunne forventes å gå ned med 30-40%.

For lokomotiver vil batteriteknologien kreve et fysisk stort lokomotiv for å få plass til alt utstyr. Prisen må dermed baseres på et 6 akslet lokomotiv. Dersom vi angir prisen for et 6 akslet bimodalt lokomotiv for gods som 100%, vil et lokomotiv som er tilpasset batteridrift ha en innkjøpspris som er 30% høyere.

Ved bruk av en kombinasjon av et elektrisk lokomotiv og en batterivogn kan eksisterende lokomotiver og godsvogner tilpasses slik bruk, Det vil da kun være produksjons- og godkjennings-kostnader knyttet til en container som inneholder batterier.

Det gis dermed følgende anslag for kostnader for kjøretøy med engangskostnad og utviklingskostnad under forutsetning om at hele dagens flåte av dieselskjøretøy byttes ut:

- 110m motorvognsett med batteri som energibærer 150 MNok pr stk.
- 60m motorvognsett med batteri som energibærer 120 MNok pr stk.
- 6 akslet lok med batteri som energibærer 70 MNok pr stk.
- Battericontainer for å sette på godsvogn for å drifte persontog 14 MNok.
- Battericontainer for å sette på godsvogn for å drifte godstog 14 MNok.

11.2 Drift

Kostnadene knyttet til drift av togtilbudet kan deles inn i flere kategorier.

Leiekostnadene knyttet til kjøretøy basert på batteri som energibærer vil ha størst påvirkning fra to ulike faktorer, pris pr kjøretøy inklusive engangskostnader, og hvor lang nedskrivningstid som beregnes på investeringen. Her ser vi på antatt leie for et teknologivalg, der det forutsettes normal avskrivningstid for kjøretøy på 30 år og anskaffelsen omfatter det meste av dagens tilbud som kjøres med dieselmotorvogner vil leieprisen kunne komme ned mot 130% av leieprisen for et tilsvarende ordinært elektrisk kjøretøy.

En annen vesentlig faktor i driftsutgiftene er energikostnadene. Prisen for diesel til bruk i jernbanekjøretøy er pr i dag 6,29 kr/l. Diesel har et energiinnhold på 42 MJ/kg, og et dieseltog kan antas å ha en virkningsgrad på 26-34%. Det er rimelig å anta at vi oppnår en virkningsgrad på ca. 75% i kjøretøy med batteri som energibærer. Kjøretøy basert på batteri i jernbanen har en strømpris på 0,529kr/kWh.

Sammenligning av kostnadsnivåer til energi for ulike driftsformer viser da at kostnaden knyttet til drift med batteri er ca. 18% av ordinær dieseldrift og ca. 10% høyere enn ordinær elektrisk drift, når man legger til grunn en virkningsgrad på 30% for dieselkjøretøy og 85% for ordinære elektriske kjøretøy og en virkningsgrad på 75% for batteridrift.

Den delen av operatørens driftskostnader som relaterer seg til bemanning påvirkes ikke av valg av energibærer for toget. Innenfor denne delen av driftskostnadene antas kostnadene dermed å være på samme nivå som for ordinær drift.

11.3 Vedlikehold

En vesentlig del av driftskostnadene til operatør ved ordinær drift på jernbanen har sammenheng med vedlikehold. Et batterikjøretøy er teknisk svært likt et ordinært elektrisk kjøretøy. Forskjellen ligger i batteriet og forventet levetid for batterier. Levetid for et batteri vil variere ut ifra hvilken batteriteknologi som er valgt. Det er for enkelte batteriteknologier fortsatt relativt store usikkerheter knyttet til levetid. Dette avhenger av antall ladesykler og hvordan effektuttaket av batteriene styres. Ved bruk av f.eks. LTO batterier er det rimelig å anta at batteriene har en levetid på ca. 15 år (se vedlegg A og B for mer detaljer informasjon om batteriers sykliske levetid). Selv om prisen for batterier forventes å bli betydelig lavere i fremtiden innebærer fornyelse av batteriene en betydelig kostnad.

Basert på en skjønsmessig vurdering er det valgt å anta at vedlikeholdskostnaden for tog med batteri som energibærer ligger 10% høyere enn for tilsvarende kjøretøy basert på ordinær elektrisk drift. Dette tilsvarer ca. 1 kr pr/km.

Det må også legges til at vedlikeholdskostnader har en tendens til å øke som funksjon av tid. Videre har det vært en vesentlig utvikling i kvalitet på jernbanekjøretøy over de siste 30-40 årene, som medfører at kostnadene til vedlikehold pr togkilometer er kraftig redusert. Det kan dermed ikke utelukkes at et tog basert på batteri som energibærer vil kunne ha lavere vedlikeholdskostnader som nytt, enn hva et eldre tog basert på ordinær elektrisk drift har. Vedlikeholdskostnadene er også avhengig av andre faktorer som for eksempel vedlikeholdsinnsatsen og kvalitet i jernbaneinfrastrukturen..

12 Kostnader for infrastruktur; Investering, drift og vedlikehold ved batteridrift

Forhold som knytter seg til investering drift og vedlikehold av infrastruktur er ikke omfattet av denne rapporten, men er behandlet i NULLFIB delrapport 3.

13 Referanser

1. Battery electric units. *Wikipedia*. [Internett] 2019. [Sisert: 15 November 2019.] https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_electric_multiple_unit.
2. The Railway Technical Website. *Electric lokomotives*. [Internett] [Sisert: 22 November 2019.] <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/electric-locomotives/>.
3. ABB. RESIBLOC transformers - Product presentation. [Internett] 2013. <https://library.e.abb.com/public/d13a07f1c4b979acc1257b9d002fd490/1LDE000003%20revB%20en%20RESIBLOC%20presentation%20INTERNET.pdf>.
4. —. BORDLINE® CC750 AC_15-25kV - For regional trains (EMUs) with 15/25 kVac line voltage. [Internett] 2018. [Sisert: 20 10 2019.] https://library.e.abb.com/public/ca0761b5f2e4411c9791043b2f14dd4c/BORDLINE%20CC750%20AC_15-25kV_M_800%20NSB%20RevB%20EN.pdf.
5. Bane nor. Banenor.no. [Internett] Bane nor. [Sisert: 22 November 2019.] <https://www.banenor.no/>.
6. SINTEF. *Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner*. 2019.
7. DNV GL. *Energy Transition Outlook*. 2019.
8. NTNU. *Presentasjon på Mozees seminar, heavy duty seminar*. 2019.
9. Shift2Rail. *Shift2Rail Catalogue of Solutions*. s.l. : Shift2Rail, 2019.
10. Anleggsmaskinen. Anleggsmaskinen. [Internett] 29 Januar 2019. [Sisert: 22 November 2019.] <https://anleggsmaskinen.no/2019/01/elektrisk-26-tonner-tatt-i-bruk/>.
11. Lok-report.de. *Lok-report.de*. [Internett] 14 Oktober 2019. [Sisert: 16 November 2019.] <https://www.lok-report.de/news/deutschland/aus-den-laendern/item/13917-schleswig-holstein-land-und-stadler-unterzeichnen-vertrag-ueber-die-lieferung-von-55-flirt-akku-triebzuegen.html>.
12. Stadlerrail.com. *Stadlerrail.com*. [Internett] Stadler. [Sisert: 16 November 2019.] <https://int.search.myway.com/search/GGmain.jhtml?n=7857d7da&p2=%5EY6%5Expv065%5ES31248%5Eno&ptb=FOEEDA63-B8F8-4DB0-8D01-F0BBB6E2530C&q=&si=001007013000578&ss=sub&st=tab&trs=wt&tpr=sbt&enc=2&searchfor=E-ePfb30QYiGK8Ww8BAXpGAAYDmhtztczlrqVL7R6ITxvZHAqPH0>.
13. International Railway Journal. *Auckland approves order for battery-electric trains*. [Internett] 27 Juli 2017. [Sisert: 16 November 2019.] <http://www.railjournal.com/index.php/australia-nz/auckland-council-approves-order-for-caf-battery-electric-trains.html>.
14. The Irish Times.
15. BNSF Railways. *BNSF LEADS THE CHARGE ON TESTING BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE*. [Internett] 24 Oktober 2018. [Sisert: 16 November 2019.] <https://www.bnsf.com/news-media/railtalk/service/battery-electric-locomotive.html>.
16. CAF. Ratp locomotive. [Internett] <https://www.caf.net/en/productos-servicios/proyectos/proyecto-detalle.php?p=290>.

17. Wikipedia. *Environmental aspects of the electric car*. [Internett] Wikipedia. [Sisert: 18 November 2019.] https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_aspects_of_the_electric_car.
18. Hannan A. M, Hoque M. M, Yusof Y. and Ker P. J. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEEAccess*. April 23, 2018.
19. Electropaedia. Battery Pack Design . [Internett] 2005. https://www.mpoweruk.com/pack_construction.htm#connections.
20. —. Battery Safety. [Internett] 2005. <https://www.mpoweruk.com/safety.htm>.
21. Battery University. BU-218: Summary Table of Future Batteries . [Internett] 2016. https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/bu_218_summary_table_of_future_batteries.
22. Financial Times. Beyond lithium — the search for a better battery. [Internett] 08 01 2018. <https://www.ft.com/content/46adb98c-d8ef-11e7-9504-59efdb70e12f>.
23. The conversation. Tesla's batteries have reached their limit – here's how they could go further. [Internett] 06 09 2016. <https://theconversation.com/teslas-batteries-have-reached-their-limit-heres-how-they-could-go-further-64765>.
24. *High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors*. Kato, Yuki, et al. s.l. : Nature Energy, 2016, Vol. 1. 16030.
25. Greenbrier Europe. Sgnss 60' - 4-axle intermodal wagon. [Internett] 2019. <https://www.greenbrier-europe.com/products/product/sgnss-60/>.
26. Wikipedia. British Rail Class 88. [Internett] 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_88.
27. ICEF. *Energy storage roadmap - technology and institution*. 2019.
28. *Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030*. Berckmans, Gert, et al. s.l. : Energies, 2017, Vol. 10. 1314.
29. ABB. Traction transformers for electrical multiple unit (EMU). [Internett] 2019. [https://new.abb.com/products/transformers/special-application/traction-transformers/traction-transformers-for-electrical-multiple-unit-\(emu\)](https://new.abb.com/products/transformers/special-application/traction-transformers/traction-transformers-for-electrical-multiple-unit-(emu)).
30. —. ABB breakthrough transformer for trains improves efficiency and safety significantly. [Internett] 18 09 2018. <https://new.abb.com/news/detail/7269/abb-breakthrough-transformer-for-trains-improves-efficiency-and-safety-significantly>.
31. Bombardier. MITRAC - Driven by Reliability. [Internett] 2008. <https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-MITRAC.pdf>.
32. Aucland approves order for battery-electric trains. *International railway Journal*. 2017.
33. ABB. *Borderline CC750 AC_15-25kV*. [Internett] [Sisert: 16 November 2019.] https://library.e.abb.com/public/ca0761b5f2e4411c9791043b2f14dd4c/BORDLINE%20CC750%20AC_15-25kV_M_800%20NSB%20RevB%20EN.pdf.
34. TØI. *Fornybare drivstoffer – Fornybar diesel: HVO*. 2016.

35. Miljødirektoratet. Fakta om biodrivstoff . [Internett] 30 04 2019. [Sisert: 21 10 2019.] <http://tema.miljodirektoratet.no/no/Tema/Energi/Biodrivstoff/Fakta-om-biodrivstoff/>.
36. Framtiden i våre hender. *Faktaark om klimagassutslipp fra forbruk*. 2013.
37. Stadler. Stadler. *Stadler*. [Internett] [Sisert: 18 November 2019.] : https://www.stadlerrail.com/media/pdf/warr0517e_print.pdf.
38. SINTEF. *Alternative driftsformer for ikke elektrifiserte baner*. Trondheim : SINTEF, 2019.
39. ABB. ABB Traction motor for locomotive. ABB. [Internett] [Sisert: 4 12 2019.] <https://new.abb.com/motors-generators/traction-motors-and-generators/traction-motors/locomotive-traction-motors>.

14 Forkortelser

AsBo – Assessment Body
BMS – Battery Management System
CH4 – Metan
CO – karbonmonooksyd
CO2 – karbondioksyd
DeBo – Designated Body
EoL – End of Life
ERA – European Railway Agency
EV – Electrical Vehicle
HVO – Hydrotreated Vegetable Oil
Jdir - Jernbanedirektoratet
KL - kjøreledning
NMVOC - Flyktige organiske forbindelser unntatt metan
NoBo – Notified Body
NOx – Nitrogenoksyd
N2O – Lystgass
PHEV – Plugin Hybrid Electrical Vehicle
SoC – State of Charge
SoD – State of Discharge