

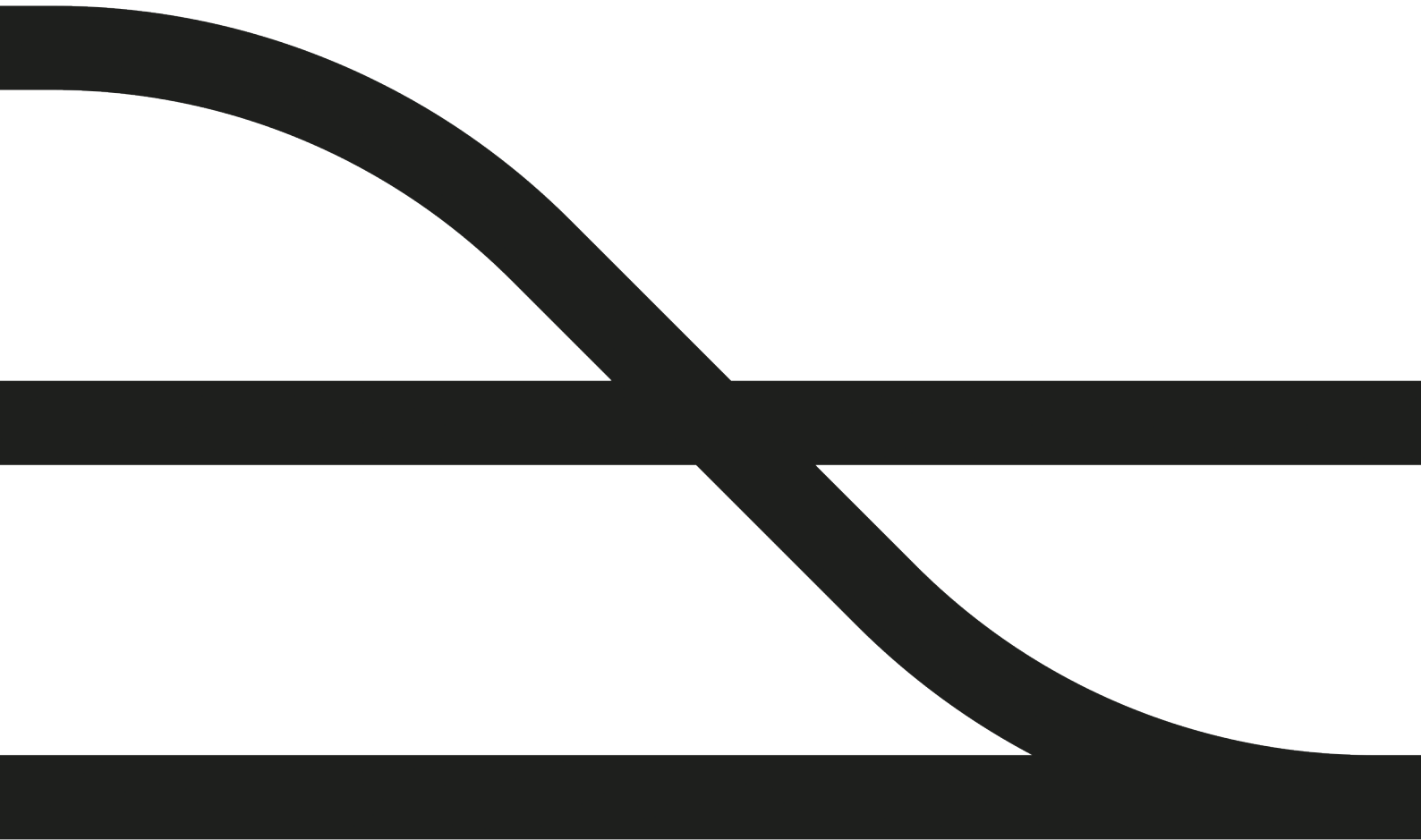


Jernbane-
direktoratet

NULLFIB

DELRAPPORT 2: BATTERITOG

VEDLEGG A: CASE STUDIE NORDLANDSBANEN



Sammendrag

Denne studien har vist at batteri som driftsform på Nordlandsbanen er gjennomførbar. Vurderingene som ligger til grunn for dette er:

- Delrapport 3 med et scenario med del-elektrifisering.
- Simuleringer med kjøretøy basert på banedata i henhold til scenariet i delrapport 3, utført av Bane Nor Energi
- Simuleringer med kjøretøy basert på banedata utført av togprodusenter.
- Energiberegninger for de forskjellige kjøretøytyper utført av Jernbanedirektoratet v/Trafikk og kapasitet.
- Faktiske operative data fra togselskaper
- SINTEF rapport 2019, Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner.

Med de erfaringer som er gjort med batteridrift av togsett i andre land, den teoretiske forskningen som legges til grunn for forventet utvikling av batteriteknologi og produsentenes foreløpige simuleringer for Nordlandsbanen, er det allerede nå mulig å legge om dagens driftsform fra diesel til en 0-utslippsløsning med batteridrift.

Hva som vil være det mest optimale i forhold til ladestrekningenes lengder, intervaller og lokasjoner må analyseres nærmere og sees på i en eventuell detaljprosjektering.

Saker som ikke er inkludert i vurderingen er potensielle fremtidige driftsendringer.

Når det gjelder energiforsyning refereres det til delrapport 3.

Det vil være strategisk å velge ett rekkeviddeområde/strekning som et pilotprosjekt. Når det velges en løsning, anbefales det å utdype dette ytterligere og holde piloten i gang før det gjøres en vurdering om full implementering.

De nåværende motorvognsettene har en levetid på omtrent 30 år. Den eldste type 92 har vært i drift siden 1984-85, og vil bli erstattet med Flirt type 76 og satt i drift i 2021. Motorvognene type93 vil nå levetiden i 2030-32, og vil bli erstattet. Flirt type76 gir en ideell mulighet til å eksperimentere med en ombygging av mellomvognen/kraftmodulen, som består av 4 dieselmotorer, til batteridrift. Dette fordrer at det bygges infrastruktur for lading av togsettet. Kunnskap om drift legges til grunn for et valg av løsning når type93 skal anskaffes og ombygging av øvrige Flirt type76, slik at persontogtrafikken kan være utslippsfri i 2030. Dette krever også ytterligere utbygging av infrastrukturen.

Forskningen og annen informasjon viser til forventet teknologiske utvikling i perioden 2025-2030 som vil gi kjøretøy 2-3 ganger dagens rekkevidde. Utviklingen av batteriteknologi gir grunn for en anbefaling å skifte til batteridrift med deelektrifisering. Inntil da er det en mulighet til å kjøre piloter som grunnlag for å prøve ut batteritog knyttet til særnorske forhold. Dette også som grunnlag for å tilegne seg erfaring og begrense eventuelle risikoer.

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

Innhold

DELRAPPORT 2: BATTERITOG	1
1 Innledning	4
1.1 Avgrensninger og forutsetninger	4
1.2 Problemstilling.....	5
2 Presentasjon av relevante jernbanekjøretøy	6
2.1 Godsløkomotiver med diesel som energikilde	6
2.2 Persontog med diesel som energikilde.....	7
2.3 Elektrisk lokomotiv.....	8
3 Kjøretøystrategi for persontrafikk	9
4 Utslipp fra dieselskjøretøy på Nordlandsbanen	10
5 Beregning av energiforbruk på Nordlandsbanen	12
5.1 Innledning.....	12
5.2 Dataverktøy	12
5.3 Beregninger	12
5.4 Tilbakemating av effekt	14
5.5 Teoretisk beregning fra ABB	15
5.6 Faktisk målt effektforbruk	16
6 Batteritog for deelektrifisering	17
6.1 Togprodusentenes simuleringer ved kjøring på deelektrifisert Nordlandsbane	17
6.2 Mulig implementering av batteritog på Nordlandsbanen	17
6.3 Deelektrifisering med 25 kV 50 Hz	18
6.3.1 Ombygning av eksisterende kjøretøy.....	18
6.4 Anskaffelse av nye tog som kan fungere med både 15 kV 16 2/3 Hz og 25 kV 50 Hz	18
7 Helbatteridrift på Nordlandsbanen	19
7.1 Konfigurasjoner for batterikontainere: Informasjon om energimengde, volum og vekt.....	19
7.2 Kontainerløsning for batteri på vogn	20
7.3 Batterilevetid for batteritog på Nordlandsbanen	22
8 Utvikling av batterielektrisk lokomotiv	23
9 Lokomotiv- og vognkonsepter for batteridrift for Nordlandsbanen	24
9.1 Innledning.....	24
9.2 Godstogkonfigurasjon for hel-batteri	24
9.3 Godstogkonfigurasjoner for del-elektrifisering	24
9.4 Persontogkonfigurasjoner.....	24
10 Årlig energiforbruk og drivstoffkostnader	26
10.1 Godstransport på Nordlandsbanen	26
10.2 Årlig energiforbruk og drivstoffkostnad for persontogtrafikk på dieselstrekningene i Norge 26	
11 Drøfting	28
12 Referanser	30

1 Innledning

Denne studien har abduktiv tilnærming og består av en analyse av 0-utslippsalternativet med hybride jernbanekjøretøy med mulighet for kjøring på ordinær banestrøm (KL), samt kjøring uten ekstern strømtilførsel med batteri som energibærer. Dette vil kreve lading av batteriet. Batteri kan lades når kjøretøyet står stille eller under kjøring. Hvor mye et batteri lades under kjøring er avhengig av hvor lenge kjøretøyet har kontakt med KL-anlegget, forbruk av energi under kjøring og hvor mye energi batteriet kan ta imot. Et batteri kan kun lades opp til et bestemt energinivå, som kan nyttiggjøres for kjøring uten ekstern strømtilførsel. Rekkevidden for et kjøretøy på en ikke elektrifisert strekning er avhengig av energilageret til batteriet og hvor mye som forbrukes under kjøring. For å finne ut om eller hvordan batteridrift kan være en driftsmodell på ikke elektrifiserte strekninger, er det nødvendig med simuleringer med grunnlagsdata om infrastruktur, batteriteknologi, rutemodeller (hastigheter og stoppmønster), og kjøretøydata som for eksempel energiforbruk og tilgjengelig vekt for batteriinstallasjon. Denne delrapporten er en studie som vurderer forhold knyttet til selve kjøretøyet/batteritoget med dagens og fremtidens antatte batteriteknologi.

Når det gjelder grunnlagsdata for infrastrukturen vises det til delrapport 3, som er en mulighetsstudie for deelektrifisering på Nordlandsbanen. Delrapport 3 benytter data fra denne delrapporten (delrapport 2 med vedlegg A og B) for vurdering og simulering av hvordan ladingen av batteriet i et jernbanekjøretøy kan gjennomføres.

Informasjon/data er innhentet internt i Jernbanedirektoratet, fra forskningen, offentlige kilder og ved samarbeid med eksterne aktører som Norske tog AS, kjøretøyprodusenter, togselskaper og batteriprodusenter m.fl. Studien legger også til grunn simuleringer gjort av produsenter og deres kunnskaper og opparbeidede erfaringer fra operativ drift. I beskrivelsene i studien er mye av informasjonen som er innhentet blitt anonymisert av hensyn til konkurranseforhold. Det er innhentet informasjon fra store produsenter som; Bombardier, Siemens, Stadler med forhold knyttet til data for kjøretøy med batteridrift.

En case studie for Nordlandsbanen med dagens batteriteknologi er brukt for å illustrere faktorer, samt å drøfte muligheten for drift med batterier. Det vil også bli vurdert hva som er et realistisk fremtidsbilde mot år 2035, etter dette viser forskningen at utviklingen av batteriteknologien for usikker. Det er imidlertid gjort analyse av dette (1).

Valget med Nordlandsbanen forklares ut ifra at denne banestrekningen vil dekke alle utfordringene som gjelder operative drift av jernbanekjøretøy for driftsforhold i Norge. Dette vil gi innsikt og kunnskap om muligheter og begrensninger ved batteridrift. Resultatene vil i stor grad kunne generaliseres og benyttes ved vurdering for andre ikke-elektrifiserte banestrekninger.

1.1 Avgrensninger og forutsetninger

Det er stor usikkerhet i hvordan batteriteknologien vil utvikle seg og hvordan denne vil kunne implementeres for bruk i jernbanekjøretøy. Studien er avgrenset til en case-studie med batteridrift på Nordlandsbanen. Med bakgrunn i en vurdering fra en av produsentene for hvilken energimengde/batterikapasitet som er mulig å bygge inn i et 4- og 6-akslet lokomotiv, er dette fastsatt til henholdsvis 1,7 MWh og 2,55 MWh. Dette er videre benyttet i beregningen for mulig elektrifisering av strekninger for lading av batterier under kjøring.

Det vil fremtiden vil anskaffes nye jernbanekjøretøy for persontrafikk, spesifikt motorvognsett. Disse vil være kraftigere, tyngre og ha rom for flere passasjerer enn de motorvognsettene som er i drift i dag. I beregningene for fremtidig dieselforbruk legges dieselforbruket for nye kjøretøy til grunn. Som basis for beregningen benyttes Flirt type76 i kort og lang versjon. Flirt tp76 blir utstyrt med 4 stk. dieselmotorer, og pga. behovet for økt effekt, vil det totale dieselforbruket øke i forhold dagens motorvognsett.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen som dette vedlegget vil prøve å gi et svar på er som følger:

- Er det slik at jernbanekjøretøy med batteri som energibærer for godstransport og passasjertransport på Nordlandsbanen (jfr. seksjonsvis elektrifiserte ladestrekninger utredet i delrapport 3) kan erstatte dagens dieseldrift?


2 Presentasjon av relevante jernbanekjøretøy

Kapitlene under viser jernbanekjøretøyene i Norge som er relevante i tilknytning til studien for batteridrift på Nordlandsbanen og som bruker diesel som energibærer.

2.1 Godsløkomotiver med diesel som energikilde

Class 941 (2 stk.)	Årsmmodell 2005 20 år gammelt i 2025	Bygget av Vossloh Locomotives GmbH
<ul style="list-style-type: none"> • 4 akslet. • 1 dieselmotor med totalt 2700 kW • Hydraulisk transmisjon • Tjenestevekt 88 tonn • Aksellast 22 tonn • Lengde 17.4m 		


Godstog, diesel lokomotiv på Solørbanen og søndre del av Rørosbanen (Hector Rail)

CD 312 (6 stk.) T68 (2 stk.) EURO4000	Årsmmodell 2010	Bygget av Stadler Rail Valencia (tidligere Vossloh España)
<ul style="list-style-type: none"> • 6 akslet • 1 EMD dieselmotor med 3178 kW • Start trekraft 400kN • Topp hastighet 120km/t • Vekt 123 tonn • Elektrisk transmisjon • Akslet med 1 generator og 6 elektriske motorer • Aksellast 20.5 tonn • Lengde 23m 		


Godstog, diesel lokomotiv på Nordlandsbanen (Cargo Net). Benyttes også for malmtransport for Rana Gruber.

2.2 Persontog med diesel som energikilde


Dette kapittelet gir en oversikt med noen tekniske data for de kjøretøyene som benyttes i Norge.

Type92 (14 stk.)	Årsmodell 1984-1985 40 år gammelt i 2025	Bygget av Duewag i Tyskland.
<ul style="list-style-type: none"> • 2 dieselmotorer med totalt 714 kW • Diesel-elektrisk transmisjon • Egenvekt 99 t • Aksler med trekkraft 2 • Aksler utan trekkraft 6 • Maks aksellast 16,1 t • Lengde 49,5 m • Interiøroppgradering i 2004-2006 • Tekniskoppgradering i 2009-2011 		

Diesel persontog, på Nordlandsbanen/Trønderbanen (Norske Tog AS).

Type93 (15 stk.)	Årsmodell 2000-2002 25 år gammelt i 2025	Bygget av Bombardier Talbot i Tyskland.
<ul style="list-style-type: none"> • 2 dieselmotorer med totalt 596 kW • Mekanisk transmisjon og 6 trinn automatisk girkasse • Lengde 38,2m 		

Persontog, diesel motorvognsett på Nordlandsbanen, Rørosbanen, Raumabanen


Di4 (6 stk.)	Årsmodell 1980 45 år gammelt i 2025	Bygget av Thyssen Henschel i Tyskland. Vogner TP5 er fra 1977-1981
<ul style="list-style-type: none"> • 6 akslet • 1 dieselmotor med totalt 2450 kW • Elektrisk transmisjon • Akslet med 1 generator og 6 elektriske motorer • Kontinuerlig effekt 450 kW • Nominell spenning 1100V • Tjenestevekt 113.6 tonn • Aksellast 19.1 tonn • Lengde 20,8 m 		

Diesel lokomotiv for langdistanse persontog på Nordlandsbanen (Norske Tog AS).

2.3 Elektrisk lokomotiv

Norske tog eier 17 stk. og Vy eier 5 stk. EL18 type tog. EL18 er produsert av Adtranz og levert til NSB i perioden 1996-1997. Det ble gjennomført en teknisk oppgradering i perioden 2005 - 2006 og i perioden 2011 - 2014. Lokomotivtypen benyttes som dag- og nattog på Dovrebanen, Bergensbanen og Sørlandsbanen, og i trafikk på Flåmsbanen.

ABB viser til at denne lokomotivtypen i Finland og Sverige enkelt kan bygges om til også å kunne benytte batterier fra batterivogn som driftsform i tillegg til KL. Hvis EL18 tenkes å bli brukt i en kombinasjon med batterier, må det vurderes hva slags ombygging som må gjennomføres på den norske versjonen.

EL18	Årsmodell 1996-1997. 29 år gammelt i 2025	Bygget av Adtranz og SLM i Sveits.
<ul style="list-style-type: none"> • 4 akslet • Effekt 5400M kW • Start trekkraft 275kN • Topp hastighet 200km/t • Vekt 88 tonn • Maks primærstrøm 610A • Ca. effektopptak ved 15 kV (kW) 9150W • Tjenestevekt 96,3 tonn • Lengde 18,5m 		

3 Kjøretøystrategi for persontrafikk

Fremtidig kjøretøyoppsett for dieselstrekningene er foreløpig ikke fastsatt. Kjøretøyoppsettet og strategien slik det foreløpig p.t. er:

NT har sendt ut forespørsel på innleie av 5 lokomotiver som erstatning for Di4. Grunnen for et valg av innleie er at dette skal gi fleksibilitet for å kunne bytte til nyere/annen teknologi eller annet togkonsept om dette blir et behov.

Type 93 som ble levert i perioden 2000-2002 og som har en levetid på 30 år, vil bli byttet ut i løpet av 2030-2032. En eventuell tidligere utskifting kan bli vurdert med bakgrunn i at togtypen er meget vedlikeholdskrevende. I den nært forstående forespørselen på nye lokaltog (type77) for Osloområdet, vil det legges inn en opsjon på anskaffelse av flere varianter av kjøretøykonfigurasjoner og teknologi som kan overta trafikkbehovet etter type93. I forespørselen vil dette imidlertid ikke være et vurderingskriterie for selve valget av lokaltog.

Jernbanedirektoratet og Norske tog vil når det etableres avtaler for anskaffelse av nye kjøretøy, forsøke å tilrettelegge med tilstrekkelig rom til å bruke opsjoner i en av disse avtalene. Dette for erstatningskjøretøy for type 93, og for å slippe å gjøre en egen anskaffelse av det som forutsettes å bli en liten serie.

4 Utslipp fra dieselkjøretøy på Nordlandsbanen

Dette kapittelet gir en oversikt over utslipp fra persontogtrafikken i perioden 1. januar til 31. august 2019.

Tabell 1 viser målte data for dieseldrevne persontog i Norge mellom 01.01.2019 og 31.08.2019. Data til Type 76 er basert på simulasjon resultater.

Tabell 1: dieselforbruk og utslipp fra dieseldrevne persontog og bimodale tog

	Di4 *	Type 92 *	Type 76 **
Dieselvolum	2 088 982 liter	2 254 310 liter	2 209 liter
Kjøretøykilometer	674 942 km	1 769 625 km	727 km
Dieselforbruk (Gjennomsnittlig)	3,1 l/km	1,3 l/km	3,0 l/km
CH4	320 kg	345 kg	-
N2O	2 133 kg	2 302 kg	-
NOx	83 533 kg	90 144 kg	-
NMVOC	7 109 kg	7 672 kg	-
CO	19 550 kg	21 098 kg	-
CO2	1 070 tonn	419 tonn	-

*Verdiene tilhører Type92 og Di4 og viser totalt dieselforbruk og utslipp målt fra 1. januar 2019 til 31. august 2019.

** Verdiene tilhører Type76 og er estimert basert på simulasjonsresultater for Trondheim-Bodø strekningen om vinteren når toget kjører i Eco-mode (hybrid modus: diesel og batteri).

Diesel motorene på Type76 er bygget i henhold til European Emission Standard «EU Stage IV». Utslipp begrensningene står i Tabell 2.

Tabell 2: "Stage IV emission standard" til dieselmotorer.

Dieselmotor effekt	Dato	CO [g/kWh]	HC [g/kWh] (Hydrokarboner)	NOx [g/kWh]	PM [g/kWh] (Partikler)
130≤kW≤560 175≤hp≤750	01.2014	3,5	0,19	0,4	0,025

Dieselforbruk for Type76 er nesten likt Di4 som vanligvis trekker 5-6 personvogner. Energiforbruk/dieselforbruk er først og fremst relatert til vekt som trekkes. Type76 har ganske lik passasjer kapasitet og totalvekt som Di4, mens både Type92 og Type93 er to-vogn motorvognsett med mindre kapasitet (Tabell 3).

Tabell 3: Kapasitet og vekt av dieseldrevne person tog og bimodale tog.

Kjøretøytype	Di4 *	Type 92	Type 93	Type 76
Sittende Passasjerer	250-300 (5-6 vogner)	143/145	87	241
Egenvekt	Ca. 300 tonn (5-6 vogner)	99 tonn	84 tonn	275 tonn

5 Beregning av energiforbruk på Nordlandsbanen

5.1 Innledning

Trafikk og kapasitet har utført beregninger for kjøretid og energibehov for gods- og persontog på Nordlandsbanen. NULLFIB-prosjektet ser på alternative energikilder som kan erstatte dagens dieseldrift. For å kunne dimensjonere andre løsninger enn full elektrifisering er det nødvendig å kjenne energibehovet. Resultatene av beregningene er sammenliknet med resultatene fra beregninger som andre jernbane-kjøretøyprodusenter og batteriprodusent ABB har utført.

Til prosjektet NULLFIB har Trafikk og kapasitet utført beregninger for kjøretid og energibehov for gods- og persontog på Nordlandsbanen.

Godstogene er de mest energikrevende togene som kjører hele strekningen Trondheim – Bodø, og vil derfor være dimensjonerende når det gjelder energibehov. Et godstog med etterhengt vekt på 1000 tonn og en maksimalhastighet på 80 km/h, kan ansees som typisk, selv om det i noen tilfeller kjøres tog på opptil 1200 tonn. Mellom Ørtfjell og Mo i Rana (ca. 36 km) kjøres det malmtog på 3700 tonn som det er gjort beregninger for. I tillegg er det også sett på energiforbruket for gjennomgående persontog på Nordlandsbanen.

5.2 Dataverktøy

Beregningene gjort av Trafikk og kapasitet er utført med dataverktøyet TRENOpus, versjon 3.0.21. Verktøyet brukes hovedsakelig til planlegging og kjøretidsberegninger ved rutemodellarbeid, men det er også mulig å beregne energiforbruket for et konkret tog på en strekning. Energiforbruket vil være avhengig av togvekt, hastighet og stoppmønster. Verdien som framkommer er beregnet «på hjulet». Det vil si at den ikke forteller noe om behovet for tilført effekt til materiellet og virkningsgrad, eller behovet for energi til for eksempel oppvarming og hjelpesystemer.

Beregningene utføres for et tog på en detaljert infrastruktur med maksimalhastighet på delstrekninger, stigninger og fall, samt stoppmønster for det enkelte tog. Togets egenskaper varierer med hvilken trekkraft som benyttes og togets vekt.

For kjøretidsberegningene er det lagt på et tillegg til den rent teoretiske kjøretiden. Dette er vanlig ved ruteplanlegging for å fange opp driftsforstyrrelser og kunne ha en tilbakestillingsevne ved forsinkelser. For direktoratets beregninger er teoretisk kjøretid pluss tillegg oppgitt i Tabell 5 og for kjøretøy (materieltype) Tabell 4 .

5.3 Beregninger

Det er utført beregninger for følgende tog og strekninger:

- Godstog 5791/5792 Trondheim – Bodø/Bodø – Trondheim (729 km)
- Malmtog Ørtfjell – Mo i Rana/Mo i Rana – Ørtfjell (36 km)
- Passasjertog 471 Trondheim – Bodø (729 km)

For passasjertog ble det gjort beregninger bare én vei, siden beregningene for de gjennomgående godstogene viste at resultatene blir omtrent likt i begge retninger.

Tabell 4: Kjøretøydata.

Kjøretøytype	Betegnelse	Effekt [kW]	Vekt [tonn]	Lengde [m]	Maks.hast. [km/h]
Diesel lokomotiv	CD312/EURO 4000	3200	119	23,0	120
Diesel lokomotiv	Di4	2450	114	20,8	140
Elektrisk lokomotiv	TRAXX	5600	83	18,9	140
Elektrisk lokomotiv	EI18	5400	88	18,5	200
Elektrisk persontog-sett	Type 74	4500	217	105,5	200

Tabell 5: Sammenlikning av beregninger av energiforbruk og kjøretid.

Beregning utført av	Kjøretøytype	Strekning/ stoppmønster	Etterhengt vekt [tonn]	Hastighet [km/h]	Kjøretid [tt:mm]	Energiforbruk på hjul [kWh]
Jdir	CD312	Gt 5791	1000	80	10:18	11400
Jdir	CD312	Gt 5792	1000	80	10:22	11900
Jdir	CD312	Ørtfjell - Mo	3700	50	00:50	380
Jdir	CD312	Mo - Ørtfjell	820	70	00:36	650
Jdir	TRAXX	Gt 5791	1000	80	10:08	11200
Jdir	TRAXX	Gt 5792	1000	80	10:09	11700
Jdir	Di4	Pt 471	270	120	09:54	7315
Jdir	EI18	Pt 471	270	120	09:45	7330
Jdir	Type 74	Pt 471	Motorvogn	130	09:05	5700
Jdir	Type 74x2	Pt 471	Motorvogn	130	09:07	10700
Togselskap	CD312	Trondh. - Bodø	1000	80	09:50	13700
SINTEF	CD312	Steinkjer - Bodø	880	90	07:37	~ 15000
ABB	CD312	Trondh. - Bodø	961	120	09:38	12550

De beregnede energibehovene for godstog 5791/5792 er ganske like, både med diesel- og elektriske lokomotiver (se Tabell 4). Sammenliknet med en togoperatørs beregning ligger direktoratets verdier ca. 13% lavere og ABBs beregning ligger ca. 8% lavere. SINTEF får en betydelig høyere verdi for en strekning som er 125 km kortere. Vi kjenner ikke årsaken til at de får en høyere verdi, og vi kjenner

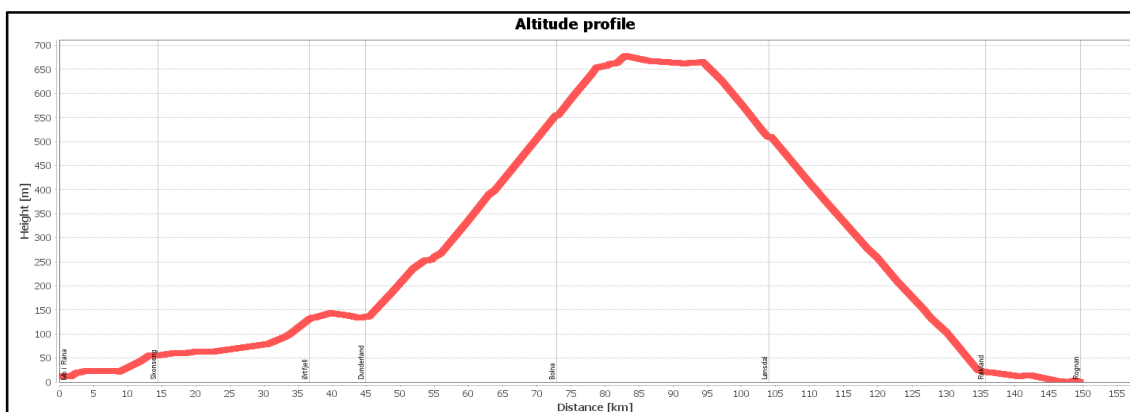
ikke beregningsmetoden. I det videre arbeidet er det naturlig å bruke togoperatørs verdi som utgangspunkt, siden det er den eneste verdien som kan kobles mot reell bruk.

Kjøretiden for 5791/5792 blir noe kortere med TRAXX-lok, som skyldes hovedsakelig at de kan holde linjehastighet opp Saltfjellet. Med CD312 faller hastigheten ned mot 50 km/h enkelte steder i stigningene. Se Figur 2 hvor oransje kurve viser hastigheten og blå kurve viser effektuttaket under kjøring. Ved distansen på ca. 95 km vises det et negativt effektuttak som betyr at effekt tilbakemates fra traksjonsmotorene. CD312 bruker ca. ni minutter lenger tid opp Saltfjellet. En etterhengt vekt på 1000 tonn ligger på grensen av hva TRAXX-lok kan klare i stigningen (18%) opp Saltfjellet. Togselskapet oppgir en maksimalvekt på 900 tonn (vinter) og 1100 tonn (sommer) ved bruk på elektriske baner med tilsvarende stigning.

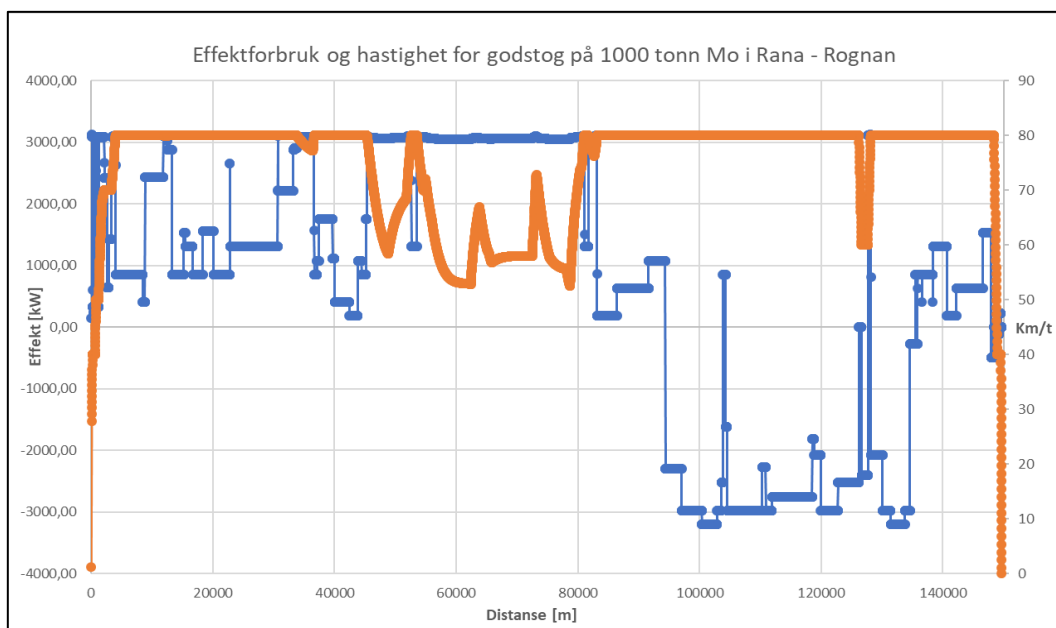
5.4 Tilbakemating av effekt

Figur 1 viser som et eksempel høydeprofilen for strekningen Mo i Rana – Rognan og potensialet for utnyttelse av bremseenergi med elektrisk bremsing ved kjøring i fall. De elektriske banemotorene brukes da som generatorer og kan mate energien tilbake til nettet, eller til en batteribank.

På dieselektriske lok kan banemotorene også brukes ved bremsing, men energien «brennes opp» i bremsemotstander. Den blå kurven i Figur 2 viser det momentane energibehovet. Negative verdier viser at det ikke forbrukes, men genereres energi. Kurven for tilbakemating er teoretisk riktig, men for optimistisk i forhold til det man kan utnytte. I praksis mates det tilbake lavere effekt. CargoNet oppgir for eksempel at deres TRAXX-lokomotiver har en begrensning for tilbakemating på 150kN, selv om lokomotivet har en starttrekkraft 300 kN.



Figur 1: Høydeprofil for strekningen Mo i Rana – Rognan.



Figur 2: Energiforbruk og hastighet for et godstog trukket av CD312 på strekningen Mo i Rana – Rognan.

For malmtogene mellom Ørtfjell og Mo i Rana er energiforbruket ved kjøring av lastede tog fra Ørtfjell lavere enn med tomtog til gravene. Ørtfjell stasjon ligger 127 meter høyere enn Mo i Rana, så her bør det være mulig å utnytte bremseenergien ved tilbakemating.

5.5 Teoretisk beregning fra ABB

Simulering/beregninger utført av ABB viser at et godstog med totalvekt 1080 tonn gjenvinner 4.65 MWh på distansen Trondheim – Bodø, og 4.36 MWh på returen. I forhold til brutto effektforbruk gjenvinnes det i størrelsesorden 34-37%. Effektforbruk og regenerert effekt ved bremsing for Nordlandsbanen er vist i Tabell 6.

Tabell 6: Effektforbruk og regenerert effekt ved bremsing for Nordlandsbanen (Trondheim - Bodø - Trondheim). Tabell er fra ABB sin presentasjon.

Station Name	Distance	Travel Time	Stop Time	Average Speed	Motor Phase Current	Motor Average Power	Energy from Battery	Energy Recuperation	Recuperation Rate
	[m]	[s]	[s]	[km/h]	[A rms]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[%]
Trondheim	727225	34673	0	76	282	431	12549	4648	37
Bodo	727230	34506	215	76	285	438	13061	4385	34
Trondheim									

5.6 Faktisk målt effektforbruk

Figur 3 viser faktisk effektforbruk på strekningen Trondheim – Bodø. Det akkumulerte ytelsesbehovet/energiforbruket er 13,7 MW.

Km-punkt	Stasjoner	Akkumulert ytelsesbehov hjul	Akkumulert ytelsesbehov GEN	Effektforbruk mellom stasjoner. Hjul kWh	Effektforbruk mellom stasjoner. GEN kWh ?	Avstand mellom stasjoner
0	Trondheim	0	0	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!
31,54	Hell	541	661	541	661	32
76,01	Skogn	1591	1943	1050	1282	44
125,5	Steinkjer	2460	3005	869	1062	49
219,522	Grong	4230	5167	1770	2162	94
321,768	Majavatn	6507	7948	2277	2781	102
406,067	Mosjøen	7295	8911	788	962	84
498,04	Mo i Rana	8843	10802	1548	1891	92
543,73	Dunderland	9844	12025	1001	1223	46
571,08	Bolna	11332	13842	1488	1817	27
602,135	Lønsdal	12029	14695	698	852	31
634,459	Røklund	12064	14736	34	42	32
674,28	Fauske	12759	15585	695	849	40
728,572	Bodø	13702	16738	944	1153	54

Figur 3: Energiforbruk for godstog på 1080 tonn.

6 Batteritog for deelektrifisering

Tilgjengeligheten av batteritog for persontrafikk som kan benyttes ved deelektrifisering er beskrevet i delrapportens hovedkapittel 4.

I og med at det foreløpig ikke er utviklet lokomotiver for batteridrift (se kapittel 8), vil det være mulig å utvikle og benytte batterivogn som beskrives i det etterfølgende kapittel 7. Inndelingen og lengdene til seksjonene for deelektrifisering av Nordlandsbanen forutsetter et lokomotiv med batterikapasitet på 2,4 MW (se delrapport 3). En batterivogn for godstog må da ha batterikapasitet på 2,4 MW for å kunne kjøre mellom de deelektrifiserte seksjonene (ladestrekningene).

Persontog med lokomotiv og vogner har et mindre effektforbruk enn gods. Batterikapasiteten for en batterivogn kan da dimensjoneres mindre. Det kan imidlertid være nyttig å standardisere på en type, slik at også persontog benytter batterivognen som utvikles for gods.

6.1 Togprodusentenes simuleringer ved kjøring på deelektrifisert Nordlandsbane

Persontogsett

Det oppgis ikke spesifikke data fra de enkelte produsentene. Togprodusentene har simulert kjøring på en deelektrifisert Nordlandsbane i henhold til forutsetninger i case studien i delrapport 3. De har benyttet egne dataverktøy for simuleringen. Hensikten har vært å vise om det er mulig å kjøre strekningen med et batterielektrisk tog. Det er gjennomført simuleringer for hele strekningen eller deler av strekningen. Til grunn for simuleringene har togprodusentene benyttet spesifikasjoner for egne togtyper (togsett) og grunnlagsdata som:

- Kjøretider med strekningens forskjellige hastigheter og stoppmønstre,
- Infrastrukturdata som høydeprofiler og kurvatur
- Strekningsdata som lokasjoner og lengder for de deelektrifiserte og ikke elektrifiserte strekningene.

Resultatet fra simuleringene bekrefter at alle produsentene kan levere batterielektriske persontog som kan kjøre en deelektrifisert Nordlandsbanen. Det vises imidlertid behov for en justering av deelektrifiseringen med hensyn til optimalisering av ut- og oppladingen av batteriene.

Produsentene forventer 15% økning av energitettheten i batteriene i løpet av kommende 5 år, noe som bør ligge til grunn i vurderingen av deelektrifiseringen. Deelektrifisering skal ikke dimensjoneres kun for persontogsett, men også for lokomotiver for gods- og persontog.

Lokomotiv

Produsentene har ikke hatt mulighet til å simulere kjøring av lokomotiv på en deelektrifisert Nordlandsbane. Grunnen for dette er at ingen av produsentene har utviklet lokomotiv med batteridrift.

6.2 Mulig implementering av batteritog på Nordlandsbanen

Norske tog har bestilt Flirt Type76 med dieseldrift som ankommer i Norge fra våren 2020. Flirt Type76 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. Type76 har en mellomvogn med 4 dieselmotorer som genererer energi for elektriske fremdrift. Stadler har sett på en løsning hvor mellomvognen (markert i rød ramme) med dieselmotorene byttes ut/omgjøres til batterilager, som illustrert i Figur 4. Stadler har videre gjort en vurdering og foreløpige energiberegninger for en mulig overgang fra dieseldrift til ren batteridrift. Målet er å få installer så mye batterikapasitet som mulig.



Figur 4: Flirt Type76 for Nordlandsbanen (Trønderbanen)

Foreløpige beregninger viser at batteridrift er gjennomførbart. Beregninger er gjort med fullsatte seter (ingen stående passasjerer) og temperatur på -40 grader.

6.3 Delelektrifisering med 25 kV 50 Hz

Alle komponenter på taket (høyspenningsanlegg g kabler) må generelt designes til å tåle høyere spenningen (25 kV) og høyere strøm (ift. 15 kV).

6.3.1 Ombygning av eksisterende kjøretøy.

I Norge er hoved høyspenningskomponenter (strømvaktter, hovedbryter, isolatorer, HV siden av trafoer) generelt designet for 25 kV systemspenning og de kan tåle dette spenningsnivået, men sikkerhetsmarginen som vi har i dag faller bort. Dessuten er noen små komponenter som er ikke dimensjonert til 25 kV, som for eksempel spenningstransformer som brukes til å måle KL spenning. Trafoene må byttes med nye trafoer som har spenningsregulering for å justere spenningen på sekundærsiden for tilpassing til traksjonsomformer (likeretteren). Traksjonsomformeren må omprogrammeres til å svitsje med både 16 2/3 Hz og 50 Hz for å produsere samme spenning til DC-linken som før. Både aktiv og passiv filtre (Sugekretsen i DC linken til å blokkere 100 Hz harmonikken i tillegg til 33,4 Hz) må både omprogrammeres og ombygges. Traksjonsvekselrettere og hjelpestrømomformerne som er tilkoblet til DC-linken skal ikke endres, men de separate hjelpestrømomformerne som er direkte tilkoblet til hoved trafoen må også omprogrammeres. Energimålere og deres tilbehør (strømtransduser og spenningstransformator) må byttes til passende strøm og spenning.

6.4 Anskaffelse av nye tog som kan fungere med både 15 kV 16 2/3 Hz og 25 kV 50 Hz

Ved anskaffelse av nye tog kan det regnes at prisen øker cirka 5-10% hvis toget kan fungere med begge systemer sammenlignes med bare 15 kV 16 2/3 Hz.

7 Helbatteridrift på Nordlandsbanen

Helbatteridrift forklares ved at hele strekninger skal kunne kjøres på batteri uten mellomading.

For å kunne kjøre strekningen fra Trondheim til Bodø med et godstog på 1080 tonn må energien som er lagret i batteriet minimum være 13.7 MWh (Figur 3). Batterivekten for NMC batterier (80 W/kg) vil i 2020 utgjøre ca. 160 tonn, og for LTO batterier (50 W/kg) 274 tonn. Slike batterivekter kan ikke bygges inn i et lokomotiv, men må monteres på godsvogner eller fordeles mellom lokomotiv og godsvogner. Det antas at et lokomotiv har en øvre tillat grense (aksellast) for å bære ca. 25-30 tonn batteripakker, noe som tilsvarer en energimengde på ca. 2.5 MW. For persontog (lok og vogn) antas det at energibehovet ligger i størrelsesorden 8 MWh. Helbatteridrift for persontogsett (motorvogn) synes ikke å være mulig på grunn av altfor høy batterivekt.

Helbatteridrift innebærer også at batteripakken(e) må lades der togene har driftspauser og at det bygges ladestasjoner med tilstrekkelig ladekapasitet.

7.1 Konfigurasjoner for batterikontainere: Informasjon om energimengde, volum og vekt.

Det er utviklet kontainerløsninger for batteripakker. Dette er også en løsning som kan være en mulig løsning for montering på godsvogn. I det følgende er en kort beskrivelse av løsninger.

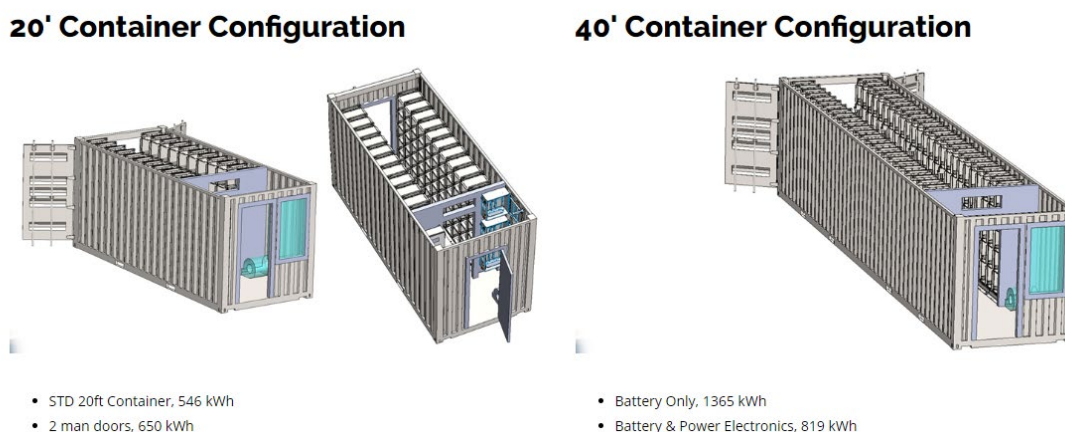
Norled: Li-ion batteri i kontainerløsning.

Nesodden ferjer har 1,5 MWh batteri, som opptar et volum og en vekt på henholdsvis 15 m³ og 15 tonn. En 20 fots container har et volum på 33 m³. Norled benytter Li-ion batterier fra Corvus. Ladetid er 9 min, og da har man ladet 400 kWh.

Corvus Energy AS: Li-ion batteri i kontainerløsning.

Corvus Energi har virksomhet i Bergen og i Canada. Corvus leverer batteripakkeløsninger til ferjer, enten som lavhastighets fremdrift ved havner eller som fullskala elektrisk drift for hele strekninger. Den største batteripakken som Corvus planlegger å levere er på 6.1 MWh. Denne batteripakken er levert til Norwegian Electrical System AS (NES).

Figur 5 viser Corvus sin løsning for batteri-installasjon i 20 fots og 40 fots kontainer.



Figur 5: Corvus kontainersystem for batterier

Siemens Marine batterisystem

Siemens har gjort et design med batterier egnet for bruk i marineapplikasjoner, og har da 713 kWh i en 20 fot kontainer. Dette er inkludert frekvensomformer, kjøling, etc. og er basert på Siemens standard batteriskap med krav fra offshore. Det vil imidlertid være mulig å få betydelig mer batterikapasitet inn i en container ved å skreddersy et design. Lading av batteriene kan foretas med opptil 2C (1420kW). Batterilageret er kjent teknologi i forbindelse med ladestasjoner for ferger.

ABB: Li-ion batteri i containerløsning

Figur 6 viser ABB sin løsning for installasjon av batterier. En 20 fots containerløsning kan ha et batterilager på ca. 2 MWh. Energitettheten i batterisystemer som brukes til marinefartøy er ganske lav på grunn av kravene fra dette segmentet. ABB beskriver at ved stasjonær lading vil man kunne lade 1,2 MWh på 6 minutter.

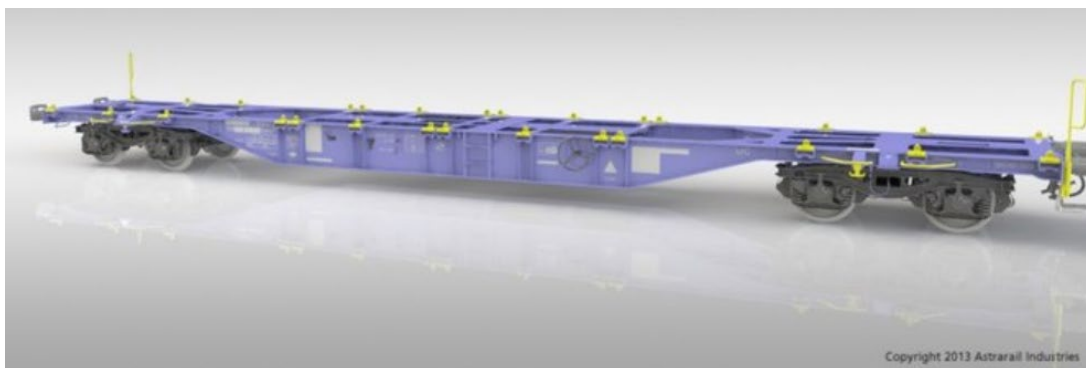


Batteries	
Energy capacity	565 kWh
Battery type	Lithium ion
Cooling	Air or fresh water
Power converters	
Type	ABB ACS800
Cooling	Fresh water
Container	
Dimensions	20' container (6050 x 2862 x 3100 mm)
Mass with equipment	23 000 kg
Cooling	Fresh water
Ambient temperature range	-20°C / +40°C
Internal climate control	Air to water heat pump
Safety equipment	Smoke detectors, manual alarm call point, PA/GA loudspeaker
Fire fighting	Water mist
Marine class approval	Yes - as deckhouse

Figur 6: ABB containerized energy storage systems

7.2 Kontainerløsning for batteri på vogn

Det er ikke funnet et konsept hvor batterier er montert i en containerløsning på godsvogn og utprøvd i et driftskonsept. Prinsippet slik det er tenkt, er at det settes en container med batteriinstallasjonen på en 4 akslet godsvogn. Det kan da benyttes et vanlig elektrisk lokomotiv som kan kjøre på KL men som også kan benytte strøm fra batterivoggen. En godsvogn av typen som illustrert i Figur 7 har en lastekapasitet på 70,8 tonn. En 60 fots kontainer veier ca. 7.5 tonn. Det vil da være mulig med et batterilager i en kontainer på 63,3 tonn. Vognen på bildet under antas å kunne brukes som standardplattform for batterikontainer.



Figur 7: 60 fots SGNSS boggi (Greenbier Europe) (2).

Energikapasitet varierer mellom de forskjellige typene av Li-ion-batterier; spesialiserte typer som LTO har for eksempel lengre levetid og kan lades mye raskere, men er også tyngre og dyrere. Bruk av batterier med høyere energitetthet vil kompenseres noe ved at slike batterier ikke kan lades fullstendig ut eller opp, da dette vil forkorte levetiden. Energimengden som kan installeres på en batterivogn, vil være avhengig av hvilken Li-ion batteritype og spesifikasjoner som er nødvendig.

Tabell 7 viser forventet evolusjon av energitetthet på cellenivå i Li-ion batterier og utregnet energikapasitet i en 60 fot lang batterivogn (3). Beregningen i Tabell 7 tar ikke hensyn til vekten av en 60 fots container på 7.5 tonn

Tabell 7: Forventet evolusjon av energitetthet på cellenivå i Li-ion batterier, samt utregnet energikapasitet i en 60 fots batterivogn.

År	Energitetthet		Batterivogn	
	<i>brutto</i>	<i>netto</i>	<i>brutto</i>	<i>netto</i>
	Wh/kg		MWh	
2020	150	90	10,62	6,37
2030	185	111	13,10	7,86
2050	325	195	23,01	13,81

Tabell 8 viser forventet evolusjon (se vedlegg B, kapittel 3.2.1, Figur 17) for energitettheten på cellenivå i generasjon 3b (avansert Li-ion) og 4 (faststoff-batteri). I beregningene gjort i Tabell 8 er lastekapasiteten for batterier redusert med 7,5 tonn, slik at tilgjengelig lastekapasitet for batterier er da 63,3 tonn.

Tabell 8: Forventet energilager i batterivogn i 2025-2030.

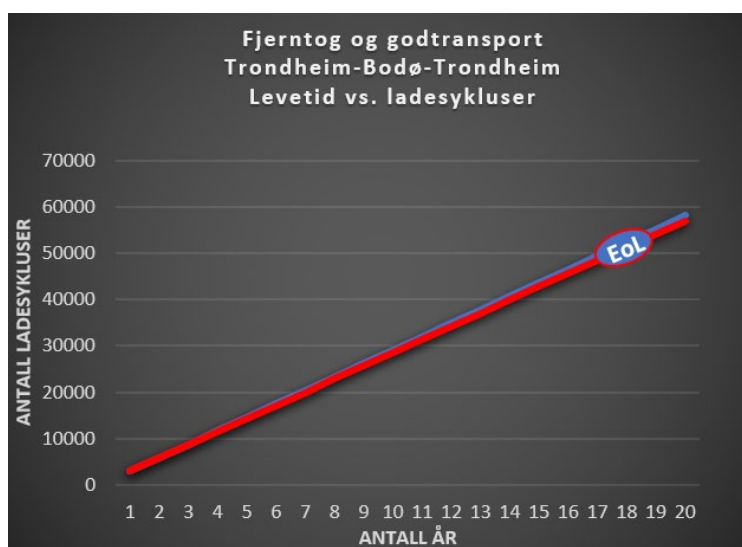
År	Energitetthet		Batterivogn	
	<i>brutto</i>	<i>netto</i>	<i>brutto</i>	<i>netto</i>
	Wh/kg		MWh	
2025	350	210	22,2	13,3
2030	500	300	31,7	19,0

Vekten til temperaturreguleringssystemet er ikke tatt med, da den uansett vil være mindre enn usikkerheten rundt batterienes energitetthet. Usikkerheten knyttet til vekt av temperaturreguleringssystemet gjør at batterivognens netto batterikapasitet vil være mindre enn det som er angitt i Tabell 8. Det antas at temperaturreguleringssystemet med innfestingsrammer mm. utgjør 30% av batterivekten, og med en forventet batteriutvikling i perioden 2025-2030 kan et godstog kjøre hele Nordlandsbanen med en 60 fots batterivogn. Det samme gjelder også for persontog med lokomotiv og passasjervogner. Her kan det imidlertid også antas en mindre batterikonfigurasjon. Batterisystemer har en volumetrisk energitetthet på omtrent 0,2 MWh/m³ (4), som betyr at batterisystemet på en 2020-batterivogn vil oppta 53 m³. Dette er mindre enn volumet til en standard 60 fots container, og passer med god margin på den angitte plattformen i Figur 7. Generelt sett er volum sjelden et problem med batterier, da vekt er oftest den begrensende faktoren.

7.3 Batterilevetid for batteritog på Nordlandsbanen

For å bestemme gjennomførbarheten i forhold til antall ladesykluser på Nordlandsbanen med et godstog som kjører strekningen Trondheim – Bodø – Trondheim 7 ganger pr. uke, med 8 ladestrekninger, 80% utladet (DoD) og ladehastighet 2C (se delrapport 3), tas det utgangspunkt i levetiden til Leclanché LTO-batteriet (se vedlegg B). Antall sykluser er en av hovedparameterne som bestemmer levetiden til batteriene (se vedlegg B for dybdeinformasjon). Kjøremønsteret for fjerntog (antall turer) er omtrent det samme som for godtog.

Beregningene for C-nivå (C2) for strekningen vil gi en lengre levetid for batteriene enn 4C. Det er ikke funnet noen analyse av hvor mange lade-/utladingsykluser som kan oppnås ved 2C og DOD=80%. Det er derfor gjort en antagelse om at 2C gir i størrelsesorden 50 000 ladesykluser før batteriet har nådd EoL. Levetiden vil med dette være ca 18 år (se Figur 8).



Figur 8: Batterilevetid som funksjon av antall ladesykluser.

8 Utvikling av batterielektrisk lokomotiv

Lokomotiver som benyttes til godstransport og persontransport i Europa har enten vært elektriske eller med dieselmotor. Stadler har utviklet et bimodalt elektrodiesel-lokomotiv (Eurodual) som kan benytte KL og som også har dieselmotor, slik at det kan benyttes på alle banestrekninger. Dette gir økt fleksibilitet og i flere tilfeller gi reduksjon i antall lokomotiver.

Hybride lokomotiver for KL- og batteridrift er foreløpig ikke tilgjengelig i markedet og er heller ikke under utvikling. Grunnen for dette er i hovedsak at lokomotiver benyttes for lange strekninger/ruter, noe som krever mye energi. I forbindelse med denne utredning har Jernbanedirektoratet vært i kontakt med leverandører av lokomotiver for å diskutere muligheten for batteri-installasjon. Diskusjonen viser en reservert holdning, fordi en business-case med et anslagsvis behov for 10 lokomotiver (gods- og persontrafikk) i Norge er et for lite marked. Utviklingskostnadene for et hybrid lokomotiv for KL- og batteridrift hevdes å være 40-50 mill. Euro. Hvis det skal utvikles et lokomotiv for KL- og batteridrift for Norge krever dette et samarbeid mellom flere aktører i sektoren. Det må lages et budsjett og en finansieringsplan.

Jernbanedirektoratet har tatt et initiativ for samarbeid med Deutsche Bahn AG (DB) for å vurdere om det finnes et marked for denne typen lokomotiver i Tyskland. Transport fra havner og inn til godsterminaler foregår i stor utstrekning med diesellokomotiver. Disse strekningene varierer, men er inntil 70 km lange, noe som antas å være oppnåelig med batteri. En etterspørsel etter lokomotiver for KL-/batteridrift for slik transport vil muligens drive frem en utvikling og produksjon av lokomotiver for langdistanse kjøring.

9 Lokomotiv- og vognkonsepter for batteridrift for Nordlandsbanen

9.1 Innledning

Dette kapitlet gir en oversikt over kjøretøykonsepter med lokomotiv og vogner, og hvordan batteripakker (illustrert som grønne batterier) kan organiseres både for persontog og godstog. Ikke alle konseptene kan antas å være aktuelle, pga. at de gir dårlig logistikk og fører til tidkrevende skifteoperasjoner ved endestasjonene. I tillegg vil et tillegg av vogner føre til redusert transportmengde for godsoperatører. En forklaring som gjelder generelt for batterivogner er som følger:

Effektoverføringen fra en batterivogn til et elektrisk lokomotiv gjøres med el.kabler, og batterivognen(e) må da stå etter lokomotivet. Når et tog kjører inn på en stasjon/terminal er batterivognene fremst i toget. Et helt vognsett snues ikke når det skal samme strekning tilbake. Dette betyr at både lokomotiv og batterivogner må skiftes til bakerste vogn for returen. En slik operasjon krever at lokomotivet har tilgang til KL eller egen fremdriftsmulighet, for eksempel egen batteripakke eller dieseldrift. Skifteoperasjonen medfører dermed en skifteoperasjon som er tungvint og tidkrevende.

9.2 Godstogkonfigurasjon for hel-batteri

I år 2020 vil batterikapasiteten for helbatteri med 3 batterivogner som beskrevet av SINTEF (3) være 19 MWh (150 tonn batterier), og 23,6 MWh i 2030. Forventet evolusjon for energitettheten på cellnivå for generasjon 3b (avansert Li-ion) og 4 (faststoff) i perioden gir en batterikapasitet på 57 MWh (5) . Konseptet under viser helbatterikonfigurasjon med ca. 19 MWh energilager.



9.3 Godstogkonfigurasjoner for del-elektrifisering

6 akslet elektrisk godslokomotiv med batterivogn:

Konseptet vil kreve en tungvint skifteoperasjon hvor batterivogn må skiftes inn bak lokomotivet når toget skal snu ved en endestasjon. Batterivognen må stå etter lokomotivet. Dette krever også at lokomotivet må ha egen fremdriftsmulighet med en egen batteripakke 'last mile'.



6 akslet hybrid godslokomotiv for KL- og batteridrift:

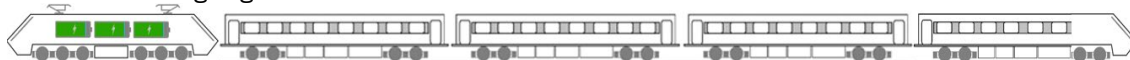
Skifteoperasjon vil være tilsvarende dagens, hvor lokomotiv må skiftes til bakerste vogn for retur. Denne konfigurasjonen gir også store fordeler ved skiftning på godsterminaler.



9.4 Persontogkonfigurasjoner

6 akslet hybrid lokomotiv for både KL- og batteridrift med styrevogn:

Toget styres i fra begge ender, og ingen skifteoperasjon er nødvendig. Enklere skiftning enn ordinært med lokomotiv og vogn.



2 stk. 4 akslet hybrid halv-lokomotiver for både KL- og batteridrift:
Ingen skifteoperasjon nødvendig.



6 akslet hybrid lokomotiv for både KL- og batteridrift for persontog:
Lokomotivet må skiftes til siste vogn for retur, slik det gjøres i dag.



4 akslet hybrid lokomotiv for både KL- og batteridrift:

Et 4-akslet lokomotivet vil ikke ha like stor batteripakke som 6-akslet lokomotiv, og derved kortere rekkevidde. Lokomotivet må skiftes til bakerste vogn for retur, slik det gjøres i dag.



4 akslet lokomotiv for KL-drift med batterivogn for batteridrift:

Tungvint skifteoperasjon, da batterivogn og lokomotiv må skiftes til bakerste vogn for retur. Vognen må settes etter lokomotiv. Dette krever også at lokomotivet har egen fremdriftsmulighet for å kunne foreta skifteoperasjoner.



10 Årlig energiforbruk og drivstoffkostnader

10.1 Godstransport på Nordlandsbanen

For godstransport med 15 turer t/r Nordlandsbanen pr. uke (Jdir tilbudskonsept T18) gir årlig drivstoffkostnad på henholdsvis diesel/biodiesel (avansert HVO) 32 mill./57 mill. NOK. Det tas her utgangspunkt i et dieselforbruk på 5,62 liter/km som gir årlig forbruk på ca. 6.8 mill. liter diesel.

Dieselforbruk omregnes til MWh med en faktor på 10, dvs. 1 liter diesel tilsvarer 10kWh. Virkningsgraden for batteridrift fra pantograf til hjul er satt til 0,75 og virkningsgraden for dieselmotor er satt til 0,3. Tabell 9 og Tabell 10 viser kostnaden ved batterielektrisk drift pr. år med en MWh pris på 529kr, og anslås da til 10,8 mill. NOK. Tabellene viser også driftskostnadene ved bruk av henholdsvis ordinær diesel og avansert biodiesel. Ved batterielektrisk drift vil godstransporten redusere drivstoffkostnadene for ordinær diesel med 32 mill. NOK Hvis en antagelse om at en 0-utslippsløsning blir å erstatte ordinær diesel med avansert biodiesel, vil kostnadsreduksjonen være 57 mill. NOK.

Tabell 9: Kostnadsreduksjon av driftskostnader ved å bruke batteridrift kontra konvensjonell diesel. Kostnad ordinær diesel 6.29 kr/liter, kostnad el. 529 kr/MWh.

Kostnadssammenligning ordinær dieseldrift vs batteridrift, kjørte godstogkilometer for Nordlandsbanen tilbudskonsept T18 Jdir								
Strekning	Kjørte km 2018	Virkningsgrad batteridrift	Virkningsgrad dieselmotor	Dieselforbruk omregnet til MWh	Forbruk pr. år (5,62 liter/km)	Dieseldrift pr. år 6,29 kr/l	Kostnad ved batteridrift	Kostnadsreduksjon ved overgang fra diesel til elektrisk
Brattøra - Bodø - Brattøra	1 211 600	0,75	0,32	12 722	6 809 192	42 829 818	10 827 149	32 002 669

Tabell 10: Kostnadsreduksjon av driftskostnader ved å bruke batteridrift kontra HVO biodiesel. Kostnad biodiesel (avansert) 10.00 kr/liter, kostnad el. 529 kr/MWh. Et eventuelt effekttap ved biodiesel vs. ordinær diesel er ikke tatt med som en faktor.

Kostnadssammenligning biodiesel drift vs batteridrift, kjørte godstogkilometer for Nordlandsbanen iht tilbudskonsept T18 Jdir								
Strekning	Kjørte km 2018	Virkningsgrad batteridrift	Virkningsgrad dieselmotor	Dieselforbruk omregnet til MWh	Forbruk pr. år (5,62 liter/km)	Fremtid Biodieseldrift pr. år 10 kr/l	Kostnad ved batteridrift	Kostnadsreduksjon ved overgang fra diesel til elektrisk
Brattøra - Bodø - Brattøra	1 211 600	0,75	0,32	12 722	6 809 192	68 091 920	10 827 149	57 264 771

10.2 Årlig energiforbruk og drivstoffkostnad for persontogtrafikk på dieselstrekningene i Norge

For passasjertog er antall kjørte kilometer innhentet fra NSB sitt regnskap og Jernbanedirektoratets forventede fremtidige (2027) økning med 5% ut ifra 2018 nivå. Det har ikke vært mulig å trekke ut eksakte tall spesifikt for Nordlandsbanen.

For beregningene legges det til grunn dieselforbruksdata fra produsenten av Flirt type76. Dette togsettet vil bli satt i drift på Trønderbanen i løpet av 2021. Togsettet har en mellomvogn med 4 stk. dieselmotorer. Disse dieselmotorene har en teknologi med lavt drivstofforbruk sammenlignet med dagens dieselskjøretøy. Produsenten oppgir et nominelt drivstofforbruk på 3,0 liter/km. For enkelte strekninger merket med (*) forventes det at det kjøres kortere togsett, men da med et redusert forbruk på 1 liter/km, noe som reduserer dieselkostnaden til 2 kr/km.

Togsettet har i tillegg til dieselmotorene en batteripakke som lades opp gjennom retardasjon/bremsing, og som benyttes ved akselerasjon. Dieselforbruk omregnes til MWh med en faktor på 10, dvs. 1 liter diesel tilsvarer 10kWh. Slik som tidligere er virkningsgraden for batteridrift fra pantograf til hjul satt til 0,75 og virkningsgraden for dieseldrift er satt til 0,3 fra motor til hjul. Tabell

11 og Tabell 12 viser kostnadsreduksjonen ved elektrisk drift pr. år for alle dieselstrekninger i Norge (antatt MWh pris på 529kr) og anslås til å være 75 mill. NOK med dagens dieselpris på 6,29 kr/liter og 133 mill. NOK med en biodiesel (HVO) kostnad på 10 kr/liter i år 2030.

Tabell 11: Samlet driftskostnader for alle dieselstrekninger i Norge ved diesel som energibærer, samt kostnadsreduksjon ved overgang til batteridrift.

Strekning	2017	2018	Forventet 5% økning	Dieselforbruk omregnet til MWh	Forbruk pr. år (3.0 liter/km)	Diesekost pr. år	Omregnet til el. kostnad batteridrift	Kostnadsreduksjon ved overgang fra diesel til elektrisk
Dagtog Trondheim - Bodø	2 551 797	2 669 460	2 802 933	29 431	8 408 799	52 891 346	8 303 409	44 587 937
Nattog Trondheim - Bodø	520 353	513 347	539 014	5 660	1 617 043	10 171 201	1 596 776	8 574 425
Bodø-Rognan*	216 420	203 363	213 531	2 242	427 062	2 686 222	632 565	2 053 657
Dombås - Åndalsnes*	339 925	371 567	390 145	4 097	780 291	4 908 029	1 155 767	3 752 262
Hamar - Røros*	1 000 824	968 098	1 016 503	10 673	2 033 006	12 787 606	3 011 288	9 776 318
Trondheim - Storlien	165 362	168 167	176 575	1 854	529 726	3 331 977	523 087	2 808 890
Trondheim- Røros (Elektrifisert Støren - Trondheim)*	392 573	353 081	370 735	3 893	741 470	4 663 847	1 098 266	3 565 581
Totaler	5 187 254	5 247 083	5 509 437	57 849	14 537 397	91 440 227	16 321 157	75 119 071
Virkningsgrad batteridrift =0.75								
Virkningsgrad dieseldrift =0.3								
* Kortere togsett = 2liter/km								

Tabell 12: Samlet driftskostnader for alle dieselstrekninger i Norge ved bruk av avansert biodiesel som energibærer, samt kostnadsreduksjon ved overgang til batteridrift.

Strekning	2017	2018	Forventet 5% økning	Dieselforbruk omregnet til MWh	Forbruk pr. år (3,0 liter/km)	Diesekost pr. år	Omregnet til el. kostnad batteridrift	Kostnadsreduksjon ved overgang fra diesel til elektrisk
Dagtog Trondheim - Bodø	2 551 797	2 669 460	2 802 933	29 431	8 408 799	84 087 990	6 227 557	77 860 433
Nattog Trondheim - Bodø	520 353	513 347	539 014	5 660	1 617 043	16 170 431	1 197 582	14 972 848
Bodø-Rognan*	216 420	203 363	213 531	2 242	427 062	4 270 623	474 424	3 796 199
Dombås - Åndalsnes*	339 925	371 567	390 145	4 097	780 291	7 802 907	866 825	6 936 082
Hamar - Røros*	1 000 824	968 098	1 016 503	10 673	2 033 006	20 330 058	2 258 466	18 071 592
Trondheim - Storlien	165 362	168 167	176 575	1 854	529 726	5 297 261	392 315	4 904 945
Trondheim- Røros (Elektrifisert Støren - Trondheim)*	392 573	353 081	370 735	3 893	741 470	7 414 701	823 699	6 591 002
Totaler	5 187 254	5 247 083	5 509 437	57 849	14 537 397	145 373 970	12 240 867	133 133 103
Virkningsgrad batteridrift =0.75								
Virkningsgrad dieseldrift =0.3								
* Kortere togsett = 2liter/km								

11 Drøfting

Dette kapittelet drøfter muligheten for å kunne ta i bruk batteri som driftsform på Nordlandbanen, både for godstog med hybridlokomotiv, passasjertog med hybridlokomotiv og passasjertog med hybrid togsett. Et bimodalt kjøretøy i denne sammenhengen er et elektrisk drevet kjøretøy med mulighet for å bruke banestrøm (KL) direkte eller elektrisk drift ved batteri hvor batteriet lades fra banestrøm (KL) under kjøring

De finnes hundrevis av forskningsartikler og andre artikler om utviklingen og bruken av ny batteriteknologi. Flere av artiklene synes å være utarbeidet for markedsføring og for å tiltrekke seg investor-interesse. På den annen side bidrar denne markedsføringen til å skape forventninger til hvordan den enkelte kan bidra til å redusere CO₂ utslipp.

I vedlegg B er det gjennomgått noen batteriteknologier som er og kan bli aktuelle i fremtiden. Mange av disse teknologiene er på forsøksstadiet og det kan ikke antas at alle vil kunne kommersialiseres eller benyttes som energilagere i et batteritog.

Mange av teknologiene har stort potensiale for å kunne bli en suksess, men i denne studien tas det en konservativ vinkling til dette, hvor det fremheves at det er usikkerhet rundt om det kommer til å finnes banebrytende teknologi for jernbane før år 2030. Det legges til grunn en utvikling innen generasjon 3b/4 batteriteknologi med innfasing av fast-stoff-batterier i 2030 hvor energitettheten i batteriene økes med 250% sammenlignet med 2020 nivå (1).

Forskningen viser at energitettheten i batterier i perioden 2025-2030 vil øke fra 90-235 Wh/kg i 2019 til 500Wh/kg (NTNU presentasjon Mozees seminar). Dette betyr at ut fra 2019 nivå, hvor for eksempel batterikapasiteten i et 6- akslet lokomotiv er 2,5 MWh med generasjon 2b batteriteknologi, vil øke til 5,0 MWh i perioden frem til 2030 med generasjon 4 batteriteknologi. Usikkerheten knyttet til at dette er et realistisk scenario for implementering i lokomotiv, er at jernbanen henger etter f.eks. bilprodusentene med å ta i bruk ny teknologi. Fra bestilling av et nytt jernbanekjøretøy og frem til det er levert må det regnes 4-5 år. Dette betyr at det på leveransetidspunktet aldri vil kunne være den nyeste teknologiske løsningen. Et lokomotiv som leveres i 2030 vil i 2025 ha generasjon 3b batteriteknologi, anslagsvis 3,5 MWh. Et lokomotiv som bestilles (hvis mulig) i 2020, vil ha en batterikapasitet på ca. 2,5 MWh.

En eventuell batteriinstallasjon på 3,5 MWh i et lokomotiv i 2030 og økning til 5,0 MWh i 2035 kan gi endringer i oppsettet for ladestrekninger sammenlignet med et 2019-scenario (se delrapport 3).

Gitt en teknologisk utvikling av batterier som beskrevet over for persontogsett, vil det som markedsføres av kjørelengde på 120 km i dag kunne gi 2,5 ganger så lang kjørelengde i perioden 2025-2030, altså ca. 300 km.

Batteriteknologien som benyttes for jernbanekjøretøy i dag er NMC og LTO. Begge batteritypene benyttes av forskjellige produsenter under forskjellige driftsbetingelser. Med driftsbetingelser menes f.eks. behov for å kunne kjøre strekningslengde, strekningsprofil, klima (temperatur), togvekt, toglangde, passasjerantall, rutetidskrav, fremføringshastighet og effekt til komfortelementer som varme/luftkjøling (HVAC) og belysning. For klimatiske forhold i Norge (-40 °C), høyest mulig sikkerhet og levetid basert på C-rate = 2C, vises det at LTO batterikjemien vil være best egnet.

Batterivogn

I vedlegg B, kapittel 3.2.1 er det beskrevet hvilken batterikapasitet som kan forventes i perioden 2025-2030. Gitt en utvikling og kommersialisering av generasjon 3b/4 batteriteknologi, vil én 60 fots batterivogn være tilstrekkelig for at et godstog på 1080 tonn skal kunne kjøre strekningen Trondheim – Bodø. Det er ikke gjort beregning med tilleggslasten på batterivognen med totalvekt ca. 90 tonn, altså en total togvekt på 1170 tonn. Det samme gjelder også for persontog med lokomotiv og passasjervogner. Her kan det imidlertid også antas en mindre batterikonfigurasjon.

Levetid for batterier

Hvor ofte batteripakkene må skiftes ut avhenger av hvordan infrastrukturen på ladestrekningene (lengde og lokasjon) bygges, samt hvordan utviklingen innen batteriteknologien kan bidra til å øke antallet ladesykluser og C-rater. Tatt i betraktning forholdene knyttet til batteridrift på Nordlandsbanen, ser LTO-batteriene ut til å være det mest passende valget. LTO-batterier oppfyller nesten alle de oppgitte forholdene. LTO-batterier er dyrere enn NMC-batterier, men det kompenseres med lengre levetid.

Med den anslagsvise beregningen gjort for godstransport og persontransport på Nordlandsbanen, med 8 ladestrekninger og en livslengde for LTO batterier på mer enn 50 000 sykluser, vil batteriene ha en levetid på 18 år. Optimalisering av ladestrekninger i forhold til batterienes fremtidige spesifikasjoner bør gi en økonomisk- og teknisk levetid på over 18 år.

Robusthet knyttet til sikker fremføring

Gitt dagens batteriteknologi og ved et infrastruktur-oppsett for del-elektrifisering som beskrevet i delrapport 3, samt at det er kjent at en ladestrekning er ute av drift, vil tiltaket være å lade batteriene helt fullt (+10% over det som er øvre normal grense). Ved å ta i bruk marginen ved dyputlading (20% av det som er under normal utladingsgrense) vil en ha 30% mer batterikapasitet enn det som er beregnet til normal drift. Dette kan brukes til å kjøre en batteristrekning + en ladestrekning (ute av funksjon) + en batteristrekning. Dette krever $70\%+70/3\%+70\%$ kapasitet = 165% kapasitet.

Full kapasitet er nå (2019) beregnet til 2,6 MWh. En kapasitet på 3,5 MWh i 2030 tilsvarer 135%, og 5 MWh i 2035 tilsvarer 192%. Med andre ord vil et godstog i år 2035 med 5 MWh batterikapasitet kunne passere en ladestrekning med utfall samt kjøre 2 batteristrekninger. Dette vil også gi en enorm levetid på batteriet, som vil ha svært lav utnyttelse (antall sykluser). Det vil imidlertid være en utfordring med å lade opp så mye kapasitet på de ladestrekningene som er beregnet i delrapport 3. Antagelig vil en optimalisering være å lage noe lengere ladestrekninger. Dette gir noe kortere batteristrekninger, slik at 3,5 MWh batteri vil kunne ha nok energi til å passere en ladestrekning uten funksjon.

En fremtidig generasjon 4 batteriteknologi i 2030-2035 vil kunne bidra til enklere omformerstasjoner. Dette gjelder for de relativt flate strekningene. Antagelig vil det være nødvendig med matestrekning over Saltfjellet. Gitt kjøretøy med generasjon 3a/4 batteriteknologi tyder dette på at to batteristrekninger kan kjøres uten mellomading hvis strømforsyningen på en ladestrekning skulle falle ut.

Det må også tas hensyn til hendelser ved f.eks. ras, det toget må returnere tilbake til nærmeste ladestrekning.

12 Referanser

1. **DNV GL.** *Energy Transition Outlook.* 2019.
2. **Greenbrier Europe.** Sgnss 60' - 4-axle intermodal wagon. [Internett] 2019. <https://www.greenbrier-europe.com/products/product/sgnss-60/>.
3. **SINTEF.** *Alternative driftsformer for ikke elektrifiserte baner.* Trondheim : SINTEF, 2019.
4. **DoE., Howell .** US Department of Energy. *The EV Everywhere Challenge.* [Internett] 2013. [Sisert: 22 November 2019.] [http:// energy. gov/ sites/ prod/ files/2014/05/f15/APR13_Energy_Storage_c_II_EV_Everywhere_1.pdf..](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/APR13_Energy_Storage_c_II_EV_Everywhere_1.pdf..)
5. **NTNU.** *Presentasjon på Mozees seminar, heavy duty seminar.* 2019.