

Omlegging av lastetraktor fra diesel til batteridrift

Mulighetsstudie for Bane NOR



Revisjonshistorikk

Rev	Dato	Beskrivelse av endringen	Utarbeidet av	Godkjent av
00	05.12.2022	Førstegangshøring prosjektgruppe	Eirik Hordnes	Daniel Wilson/Gjermund Siksjø/Vegard Milde
01	09.12.2022	Utkast til høring Bane NOR	Eirik Hordnes	Daniel Wilson/Gjermund Siksjø/Vegard Milde
02	15.12.2022	Endelig rapport	Eirik Hordnes	Daniel Wilson/Gjermund Siksjø/Vegard Milde

Sweco Norge AS Prosjekt	Organisasjonsnr. 967032271 Mulighetsstudie – omlegging lastetraktor fra diesel- til batteridrift		
Prosjektnummer	10232105	Kontrollert av	Harald Birkeland
Kunde Rev	Bane NOR 00	Godkjent av	Daniel Wilson/Gjermund Siksjø/Vegard Milde/Eirik Hordnes
Dato	23.08.2022		
Dokumentnummer		Bilde forside: Njål Svingheim, Jernbanedirektoratet	
Opprettet av Dokumentreferanse	Gjermund Siksjø p:\3513\10232105_mulighetsstudie_omlegging_lastetraktor_fra_diesel_til_batteridrift\000\09_leveranser\rev02 15.12.2022\mulighetsstudie omlegging lastetraktor fra diesel til batteridrift_02.docx		

Innholdsfortegnelse

1.	Innledning.....	12
1.1	Bakgrunn.....	12
1.2	Formål.....	13
1.3	Avgrensninger.....	13
1.4	Om Bane NOR.....	13
1.5	Rapportens struktur	14
2.	Driftsmønster og behov	15
2.1	Rekkevidde, hastighet og arbeidsoppgaver.....	15
2.2	Energibehov.....	16
2.2.1	Kartlegging energiforbruk LTR17	18
2.2.2	Litteraturstudie spesifikt energiforbruk for sammenligning.....	23
3.	Ombyggingskartlegging	24
3.1	Detaljer om lastetraktor – LT15.....	25
3.1.1	Dieselmotor	27
3.1.2	Hydraulisk traksjonssystem.....	28
3.1.3	Hydraulisk hjelpesystem.....	30
3.1.4	Boggi	31
3.2	Litteraturstudie	32
3.2.1	Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner i periodene frem til 2030 og 2050 [2]	32
3.2.2	Førerhjelppssystem [3]	33
3.2.3	Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric [5].....	33
3.2.4	Railway Bogies – GANZ MOTORS [6].....	34
3.2.5	CO ₂ utslippsreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner [7]	34
3.2.6	Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work Machinery [8]	36
3.3	Markedskartlegging.....	37
3.3.1	Intervju med relevante systemintegratorer for ombygging.....	39
3.3.2	Dialog med Sporveien om tidligere anskaffelse.....	42
3.4	Kartlegging av plass og vekt	43
3.4.1	Redusert vekt.....	44
3.5	Konsept for ombordutrustning.....	45
3.5.1	Lading via kontaktledning.....	45
3.5.2	Lading fra ekstern kilde.....	46

4.	Match-up av batterier.....	47
4.1	Batterikjemier	48
4.2	Dimensjonering av batteristørrelse	49
4.2.1	Metode 1: Ingen redusert nyttelast	50
4.2.2	Metode 2 – Dimensjonering etter energiinnhold i dieseltank	51
4.2.3	Metode 3 – akseptabel reduksjon i nyttelast.....	52
4.3	Andre forhold som påvirker forbruk.....	53
5.	Ladeløsninger.....	54
5.1	Lading uten banestrøm.....	56
5.1.1	AC-lading.....	56
5.1.2	DC-lading	59
5.2	Lading med banestrøm.....	63
5.3	Batteribytte og batterivogn	64
5.3.1	Batteribytte.....	64
5.3.2	Batterivogn	64
5.4	Jernbanestandarder og koordinerte løsninger.....	65
6.	Ombyggingskonsepter.....	66
6.1	Teknisk	67
6.1.1	Ombyggingskonsept 1 – KL/batteri.....	68
6.1.2	Ombyggingskonsept 2 – Batteri.....	70
6.1.3	Ombyggingskonsept 3 – Batteribytte.....	73
6.1.4	Ladetider	76
6.1	Økonomisk	77
7.	Anbefalinger	80
8.	Referanser.....	82
	Appendiks.....	83
	Sammenlikning med LTR17	83
	Resultater nøkkeltall.....	86

Sammendrag

Sweco har fått i oppdrag av Bane NOR å gjennomføre en mulighetsstudie som ser på potensialet for å gjøre en ombygging av en av Bane NORs gule arbeidsmaskiner fra dieseldrift til batteridrift. Dette er gjort med utgangspunkt i et tildelt individ, en LT15 (AMC2), en lastetraktor fra TesMec som ble tatt i bruk i Norge i 2009. Dette spesifikke kjøretøyet er en god kandidat til ombygging grunnet gjentagende utfordringer med den diesel-hydrauliske drivlinjen.

Prosjektet har kartlagt driftsmønster og behov, samt gjort noen energibehovsberegninger med utgangspunkt i litteraturstudier og de tekniske detaljene i underlaget for den aktuelle lastetraktoren. I tillegg har Sweco utarbeidet et loggskjema som ble sendt til sjåfør av lignende lastetraktor, en LTR17 stasjonert i Oppdal, ettersom ingen LT15 var i drift. Videre er det gjort en ombyggingskartlegging av kjøretøyet som innebar flere befaringer på hensettingsplass på Hamar, detaljert gjennomgang av tegningsunderlag og datablader. Videre ble det gjort litteraturstudier for å undersøke om andre har gjort lignende ombygginger, samt utført markedskartlegging med dialog med ulike markedsaktører blant annet på InnoTrans i Berlin, samt intervju med relevante systemintegratorer av et slik batterielektrisk fremdriftssystem.

Ettersom det er grunnleggende forskjeller mellom energitetheten i batterier og diesel har det vært en sentral arbeidshypotese å kartlegge flest mulig komponenter i tilknytning til eksisterende drivlinje som kan fjernes for å redusere vekten mest mulig. Kartleggingen har kommet frem til at man kan frigjøre 5 tonn fra kjøretøyet ved å ta bort den diesel-hydrauliske drivlinjen. Plass i form av volum har ikke vært en begrensende faktor. Egenvekten til kjøretøyet er på 54 tonn, mens tilgjengelig nyttelast på plan er 10 tonn. Ved å fjerne eksisterende drivlinje har man et spillerrom på 15 tonn som kan utnyttes av batterielektrisk fremdriftssystem. Minst 5 tonn må reserveres til snøfres eller annen nyttelast, da den veier rundt 5 tonn, og som er den tyngste enkeltlasten på planet lastetraktoren typisk har. Dette reduserer spillerommet noe. Maksimalt kan da samlet vekt for kombinasjonen av batteri og ekstra vekt fra komponenter for valgt ladeløsning være 10 tonn forutsatt at nyttelast reduseres fra 10 til 5 tonn.

Ved å kartlegge en rekke ulike ladeløsninger og gjøre ulike tilnærminger for batteridimensjonering har prosjektet kommet fram til hvilke batteristørrelser og som de ulike ladekonseptene kan ha uten at det nødvendigvis reduserer typen aktiviteter som den aktuelle lastetraktoren kan bidra med. Dette vil også være helt avhengig av type strekning og hvor tilgjengelig ladeinfrastruktur befinner seg. Selv om den vil kunne gjøre veldig mange typer aktiviteter og dekke mange behov, har den også sine begrensninger for eksempel i forbindelse med 24-timers snøfresing hvor kontaktledning ikke er tilgjengelig. Bruk av lastetraktor vil kreve bedre planlegging enn tidligere.

Teknisk sammenligning

Det må skilles mellom tre ombyggingskonsepter.

- Ombyggingskonsept 1 – Kontaktledning/batteri (forkortet KL/batteri fremover)
- Ombyggingskonsept 2 – Batteri
- Ombyggingskonsept 3 – Batteribytte

Å redusere nyttelast fra 10 til 5 tonn skaper fleksibilitet og et økt mulighetsrom for flere ombyggingskonsepter.

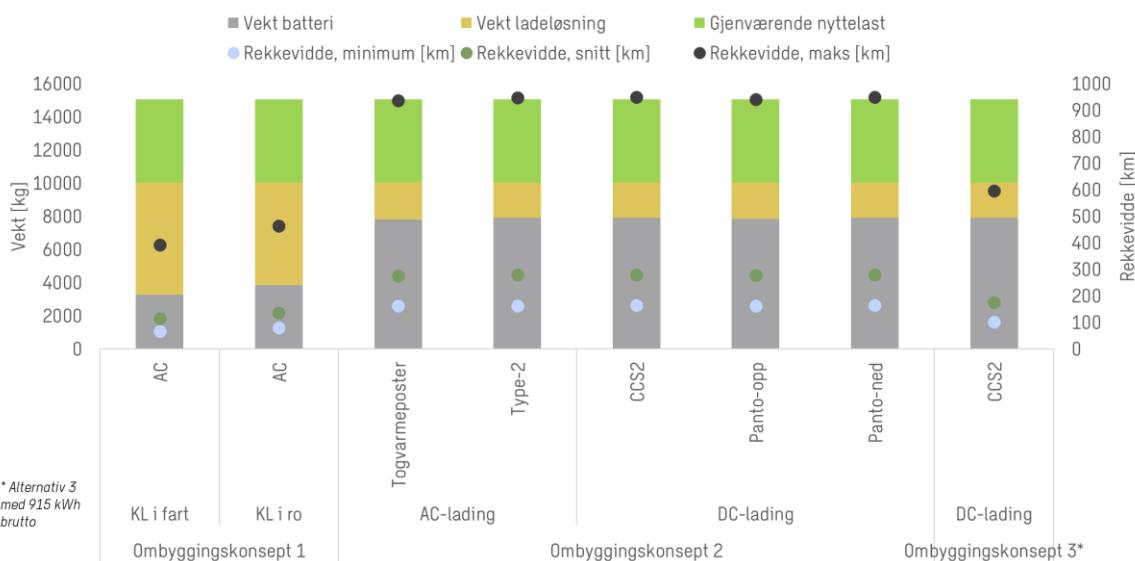
Hovedforskjellen mellom disse er at ladeløsningen for KL/batteri vil påføre kjøretøyet en høy vekt som kun muliggjør mindre batteristørrelser på rundt 600 kWh. For det rene batterikonseptet veier ladeløsningen mindre, noe som muliggjør et større batteri på opptil rundt 1450 kWh. Det er en vektforskjell på rundt 4 tonn for mellom ladeløsningene for disse to ombyggingskonseptene. Ombyggingskonsept vil oppnå en batteristørrelse på 915 kWh.

Vekten for ombyggingskonseptet KL/batteri er over 6 tonn for begge ladeløsningene og rundt 2 tonn for rent batterikonsept og for batteribyttekonseptet.

Tabell 1: Viser detaljene for vektene fordelt mellom batteri og ladeløsning og den gjenværende nødvendige nyttelasten på 5 tonn. Alle konseptene summeres til å lik vekt på fremdriftssystemet lik 10 tonn, dobbel vekt fra eksisterende drivlinje på diesel.

	Ombyggingskonsept 1		Ombyggingskonsept 2					Ombyggingskonsept 3*
	KL i fart	KL i ro	AC-lading		DC-lading			DC-lading
	AC	AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	Panto-ned	CCS2
Vekt batteri	3268	3868	7818	7906	7918	7843	7913	7918
Vekt ladeløsning	6770	6170	2220	2132	2120	2195	2125	2120
Gjenværende nyttelast	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Rekkevidde, minimum [km]	68	80	162	164	164	162	164	103
Rekkevidde, snitt [km]	115	137	276	279	280	277	280	176
Rekkevidde, maks [km]	392	464	938	948	950	941	949	596

Sammenligning mellom fordeling av vekt mellom ladeløsning og batteri for alternativene ut fra tilgjengelig vekt etter fjerning eksisterende drivlinje



Figur 1: Grafisk fremstilling av tallene i Tabell 1. Rekkevidden reduseres på batteribytte løsning i ombyggingskonsept 3 grunnet lavere energitettethet på grunn av ekstra vekt for container.

Som vist på figur og i tabell over sees det at lading med banestrøm i fart og i ro vil gi en rekkevidde på henholdsvis 68 og 80 km som et minimum, dette tilsvarer henholdsvis 1 t 40 min og 2 timer med snøfresing uten tilkobling på kontaktledning. Ettersom det er små forskjeller i vekt mellom lading i fart og lading i ro vil ladekonseptet med lading i fart være mest relevant av disse ladekonseptene med banestrøm, da det er få ikke-elektrifiserte baner i Norge. Bruk av dette kjøretøyet på ikke-elektrifiserte strekninger vil være begrenset og vil måtte planlegges nøye. Det er også gjort en beregning, basert på logget forbruk at batteristørrelse på LT15 vil kunne gjøre arbeid på banestrøm/kontaktledningsanlegg eller annet arbeid med kran en 8-timers dag uten å være tilkoblet banestrømmen.

Ombyggingskonsept med ren batteridrift vil være i stand til å løse de fleste aktiviteter så fremt aktivitetene gjennomføres innenfor rekkeviddebegrensningene eller at driften er godt nok planlagt og eventuell nødvendig infrastruktur er etablert. Ut fra litteraturstudien i rapporten sees det at gjennomsnittlig kjørelengde (tur/retur) for lastetraktor er oppgitt til mellom 41-90 km og at lengste kjøretur er angitt til 200 km. Ut fra disse tallene vil de beskrevne løsningene kunne håndtere disse avstandene, men dette avhenger av hvilke aktiviteter kjøretøyet har for de angitte kjørelengdene. De vil typisk kunne utføre snøfresing i rundt 4 timer før behov for lading. Eksempelvis vil de kunne være klar til en ny økt etter dette med en ladeeffekt på 600 kW etter rundt 2 timer og 30 minutt. **Dette forutsetter for øvrig DC hurtiglading.** Det vil også være mulig med ladeeffekter opp til rundt 1450 kW basert på batteriets begrensning for mottatt ladeeffekt. I så fall vil batteriet kunne lade fullt opp på ca. 1t og 30 minutter.

Ombyggingskonsept med batteribytte vil også kunne være aktuelt. Det er definert tre forskjellige typer ombyggingskonsepter for batteribytte i dette prosjektet. Batteribytte med spesialtilpasset batteri innebygd i rammen som kan løftes av og på. Denne løsningen har størst usikkerheter tilknyttet seg, blant annet med av- og påløfting og at det potensielt sett vil være behov for en ekstern kran til å kjøre løftene. Et prosjekt som kan sammenlignes med dette er Norled sitt batteribyttekonsept for hurtigbåt som forventes å være i drift i Oslofjorden i 2024. Der skiftes 1000 kWh på 3 minutter, noe som ville tilsvart en ladeeffekt på 20 000 kW. Det er mye standardiseringsarbeid som gjenstår for denne typen løsninger og ansees for usikkert til at det kan anbefales i dette tilfellet. **Et annet konsept er å kun løfte av og på prefabrikkerte containermodulær med batterier.** Dette har en rekke ulemper tilknyttet seg og anbefles ikke som noe å satse på. Det siste alternativet er en annen versjon av dette. I dette alternativet er det et fastmonert batteri på rundt 345 kWh. I tillegg til dette kan det lastet på moduler etter behov. Ut fra tilgjengelige moduler på markedet ser man at det kan være opp til to moduler som kan gi en samlet batteristørrelse på rundt 900 kWh. Da kan det eller de batteriene som ikke er på kjøretøyet lades over lang tid med lav ladeeffekt mens det andre batteriet eller kun det fastmonterte batteriet er ute og kjører. Ved bruk av 1 batterimodul vil man «kun» redusere samlet nyttelast i forhold til dagens drivlinje med 2 tonn. Det er for øvrig tilknyttet noe usikkerhet rundt praktisk bruk. Det vil være opplagte fordeler med en slik løsning, men samtidig også en del ulemper. Løsningen har færre sammenlignbare referanseprosjekter og systemintegratorerene vil **prise inn usikkerhet.**

Gjennomsnittlig kjørelengde tur/retur er mellom 41-90 km og lengste tur er angitt til 200 km for lastetraktor.

Ombyggingskonsept med ren batteridrift vil kunne klare dette om det ikke er kontinuerlig snøfresing de 200 kilometerne. Gjennomsnittlig drift vil den klare uten problemer.

Ombyggingskonsept med KL/batteri vil klare å gjennomføre alle rutene så lenge det tilgjengelig kontaktledning. Om ikke tilgjengelig kontaktledning vil den kunne kjøre snøfresi i rundt 1 time og 40 minutter. Avstander for gjennomsnittlig drift vil den kunne håndtere om aktiviteten ikke er snøfresing.

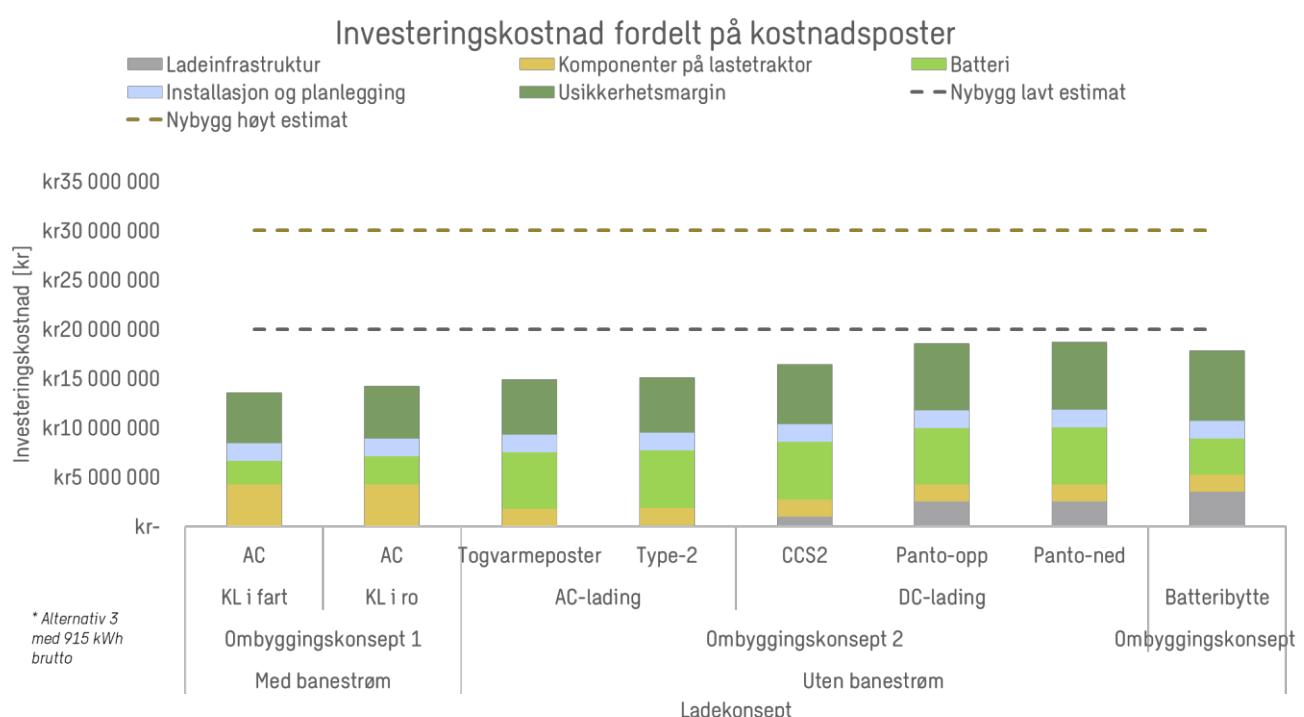
Økonomisk sammenligning

Det er også gjort en økonomisk sammenligning av de ulike løsningene.

Investeringskostnadene og fordelingen av dem sees i Figur 2 og Tabell 2 under. Det er også lagt inn et grovestimat på kostnad nybygg lavt estimat og kostnad nybygg høyt estimat i denne sammenligningen. Det er, på grunn av høy usikkerhet lagt på en ekstra usikkerhet ved å doble prisene for kostnadspostene knyttet til installasjon og planlegging. Usikkerheten knyttet til utstyrsprisene ansees ikke som stor og de er gitt en usikkerhetsmargin på 150%.

Prisene for komponenter og lignende er kommet frem i dialog med potensielle tilbydere av et slikt system. I Figur 2 sees det at ombyggingskonsept 1 med KL/batteri kommer best ut med en samlet investeringskostnad på rundt 13,5 MNOK, mens en løsning med batteribytte kommer dårligst ut med en investeringskostnad på 17,7 MNOK.

Kostnadene er detaljert i Tabell 2 på neste side.



Figur 2: Viser fordeling av investeringskostnader for batteri, ladeinfrastruktur, komponenter på lastetraktor (utenom batteri), samt en usikkerhetsmargin på 200% kostnader knyttet til installasjon og planlegging. Øvrige kostnadsposter ansees å ha lavere usikkerhetsmargin enn det er på kostnadene knyttet til demontering/montasje og planlegging og settes til en usikkerhetsmargin på 150%.

Tabell 2: Viser nedbrytning av økonomi for investeringskostnader for de ulike ombyggingsløsningene med tilhørende ladeløsninger. Samme tall som i Figur 2, men med høyere detaljeringsgrad.

Ladeløsning	Med banestrøm				Uten banestrøm			
	KL i fart	KL i ro	AC-lading		DC-lading			Batteribytte - alternativ 3
			AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	
Ladeinfrastruktur utenfor kjøretøy	kr -	kr -	kr -	kr 100 000	kr 1 000 000	kr 2 500 000	kr 2 500 000	kr 3 500 000
Likeretter [kr]	kr 400 000	kr 400 000	kr 40 000	kr 40 000	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Trafo [kr]	kr 2 000 000	kr 2 000 000	kr -	kr -	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kr]	kr 150 000	kr 150 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 20 000
trafo tilleggsutstyr [kr]	kr 1 700 000							
Kabling [kr]								
Motorer controller [kr]								
Elmotorer tilleggsutstyr (kompressor, kran etc.) [kr]								
Elektromotor [kr]								
Tavle med vern [kr]								
Batteri [kr]	kr 2 407 366	kr 2 849 355	kr 5 759 116	kr 5 823 941	kr 5 832 781	kr 5 777 532	kr 5 829 098	kr 3 660 891
Planlegging design (første system)	kr 1 200 000							
Demontering eksisterende drivlinje	kr 180 000							
Installasjon ny drivlinje [kr]	kr 420 000							
Usikkerhet utstyrskost [%]	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %
Usikkerhet planlegging og arbeid [%]	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	250 %
SUM pris ulike konsept	kr 13 586 050	kr 14 249 033	kr 14 863 674	kr 15 110 912	kr 16 414 171	kr 18 581 298	kr 18 658 646	kr 17 821 337
Investeringskostnad per km rekkevidde	kr 200 659	kr 177 806	kr 91 765	kr 92 253	kr 100 058	kr 114 351	kr 113 812	kr 173 086

Det er én ting å sammenligne investeringskostnaden opp mot hverandre, men det er også viktig å kunne sammenligne investeringskostnaden opp mot hvor mye rekkevidde man får for de investerte pengene. I Figur 32 sees en slik sammenligning. Her det gjort ut fra hvilken minimumsrekkevidde de ulike alternativene gir ved ren batteridrift ut fra et spesifikt forbruk på 7,1 kWh/km. En slik sammenligning burde kanskje også vært videre utvidet ettersom man også burde kunne vektet annen viktig funksjonalitet enn rekkevidde som f.eks. hvor lang tid det tar å få maskinen operativ igjen etter at den er ferdig utladet, dvs. gjennom høye ladeeffekter og at det går raskt å lade opp batteriet eller bytte det til et nytt. Her ville for eksempel batteribytte løsningen og hurtigladeløsningen med DC kommet bedre ut enn for eksempel AC-lading. Samtidig burde hurtiglading med DC også kommet noe mer negativt ut ettersom løsningen ikke vil kunne nytte seg av eksisterende infrastruktur. Dette vil gjøre den mindre fleksibel eventuelt at løsningen totalt sett blir dyrere ettersom slike ladearanlegg må bygges ut flere steder. Batteribytte løsningen med modulær battericontainer kan man i prinsippet ta med seg ved behov for arbeid på ulike strekninger og sette den som ikke er på kjøretøyet til lading mens kjøretøyet utfører arbeid. Videre vil DC-løsningen også ha ulemper knyttet til behov for oppgradering av strømnettet, mens AC og batteribytte løsninger ikke nødvendigvis vil ha et slikt behov.

Kontaktledningsløsning med lading i fart kommer kanskje overdrevet negativt ut i denne sammenligningen ettersom den har kort rekkevidde på ren batteridrift. På den andre siden vil løsningen kunne ha ubegrenset rekkevidde så lenge den trafikkerer på elektrifisert jernbane. Løsningen burde for øvrig blitt trukket ned på grunn av noe mindre fleksibilitet ettersom den ikke er like egnet til å gjøre arbeid på kontaktledning ved utkobling eller på ikke-elektrifiserte strekninger. Dette kan potensielt sett løses med god planlegging. En annen fordel med denne løsningen er at den kan nytte seg av eksisterende infrastruktur som også ville vært lurt å undersøke ettersom det kan gi en god skalingseffekt for andre kommende lastetraktorer.



Figur 3: Sammenligning av konseptene opp mot hverandre ut fra investeringskostnad og hvor lang rekkevidde batteriløsningen gir.

Oppsummert anbefales det å gå videre med ombygging av LT15 ut fra ombyggingskonseptet KL/batteri ettersom denne løsningen vil ha lavest investeringskostnad og kunne nyte seg av eksisterende infrastruktur. Samtidig vil den kunne løse alle aktiviteter så lenge den har tilgang på kontaktledning og kan kjøre relativt langt (mellan 68-390 km avhengig av aktivitet).

Anbefalt løsning nummer to vil være å gå for en ladeløsning med kombinert DC og AC-lading via CCS 2-kontakt på kjøretøyet. Dette vil muliggjøre hurtiglading, samtidig som det vil være relativt rimelig å bygge ut infrastruktur med AC-lading flere steder. Denne infrastrukturen kan samtidig sambrukes med andre batterielektriske veigående kjøretøyer som vil kunne gi økt utnyttelse av infrastrukturen. Samtidig er komponentene og ladeløsningene hyllevare og alt er gjennomstandardisert. En slik løsning vil også kunne gi verdifulle erfaringer knyttet til drift av denne typen konsepter og når jernbanestandardene i forbindelse med plugglading er mer ferdigstilt vil dette kunne gi et frempek på hvordan en slik løsning, men da med bruk av pluggbaserte jernbanestandarder med høy ladeffekt kan utnyttes. Da vil eksisterende infrastruktur potensielt sett kunne utnyttes bedre og fleksibiliteten til bruk og plassering av kjøretøyene øke. Dette ansees som et strategisk veivalg som Bane NOR bør vurdere nærmere fremover.

Etter våre vurderinger kommer ombyggingskonseptet med KL/batteri med muligheten til å lade i fart best ut. Batteriet vil kunne være opp mot rundt 600 kWh. Hovedulempen vil være knyttet til rekkeviddebegrensninger på bane med utkoblet kontaktledning eller på ikke-elektrifiserte baner.

Om lang rekkevidde på ikke-elektrifiserte strekninger er høyt vektet vil ombyggingskonsept 2 med ren batteridrift komme best ut.

Dette vil være interessant også fra et piloteringsperspektiv. 
Dette kan gi verdifulle erfaringer av reell bruk. Når energitetheten i batterier fremover vil øke vil en slik løsning bli mer og mer relevant for enda mer krevende aktiviteter og avstander

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Samferdselsminister Jon-Ivar Nygård har sagt at hvis Norge skal få ned klimagassutslippene i transportsektoren, må vi kutte utslippene på anleggsplassene. Han minner om at gravemaskiner, hjullastere, dumpere og andre store maskiner står for store mengder klimagasser. Derfor setter Bane NOR nå i gang **6 pilotprosjekter** for å teste ut ulike løsninger for på sikt å få anleggsplassene til å bli fossilfrie.

Dette er prosjektene Bane NOR har fått støtte til å gjennomføre i 2022:

- Ombygging av dieseldrevet skinnegående lastetraktor til elektrisk kjøretøy.
- Bruk av ladbar elektrisk gravemaskin til bygging ved Sande omformerstasjon.
- Testing av utslippsfrie maskiner under utbygging av Narvik stasjon.
- Kartlegging av fossilfrie maskiner til bruk på **Sandnes** stasjon.
- Testing av elektriske ladecontainere istedenfor dieselaggregater i Drammen.
- Utvikling av dataverktøy for å overvåke fossildrevne maskiner i Drammen og finne utslippsreduserende tiltak.



For **omdømmet** til Bane NOR og resten av jernbanesektoren er den viktigste påstanden at jernbanen er det beste transportmiddelet for miljøet og fremtiden. Derfor er det en **prestisje** i å oppnå gode resultater i dette prosjektet.

Årlig rapporterer Bane NOR inn tallene for direkte utslipp til Samferdselsdepartementet. Målet er en reduksjon på minimum 40 prosent innen 2030. Ved bruk av lastetraktor som gjennomfører drift og vedlikehold av jernbanen er disse arbeidsmaskinene dieseldrevet. Denne kjøretøyparken skal være rustet per. dags dato til 2040-2060, noe som gjør at ombygging vil være viktig i en kost/nytte-vurdering opp mot eventuelle nyinvesteringer.

Teknologien er moden for å kunne starte opp et slikt prosjekt fordi det har blitt en veldig utvikling og satsing på dette de senere år. Bilbransjen har hatt en rivende utvikling de siste 20 år som bare eskalerer hvert år. Dette inkluderer både buss og lastebil. Det er også blitt gjennomført flere ombygginger for båt og skip.

1.2 Formål

Formålet med rapporten er å gjennomføre en mulighetsstudie for å se på eventuelle barrierer og om det kan være et realistisk alternativ å gjøre en omlegging av en lastetraktor fra dieseldrift til batterielektrisk ved å gjøre en ombygging av eksisterende kjøretøy. Kan en lastetraktor på ren batteridrift brukes til alle oppgaver som en ordinær lastetraktor og hvor langt kan en batteriløsning nærme seg en dieseldrevne maskin? Den største utfordringen her blir å rydde store snømengder på fjellet i større hastighet.

Mulighetsstudie vil gi Bane NOR og andre kjøretøyeiere / infrastruktureiere nyttig informasjon om batteridrift kan være en løsning i fremtiden, eller man må se på andre forhold.

Pilotprosjektet kan også gi andre sektorer / bransjer nyttig informasjon om hvordan batteri kan være løsningen for arbeidsoppgaver / -operasjoner som krever høyt energibehov.

Prosjektet skal kartlegge de muligheter vi har til å utarbeide de aktuelle løsningene. Det gjennomføres da en utredning av hva som skal til for å igangsette denne ombyggingen. I praksis omhandler dette hvilken type ombygging som skal til for å få til en overgang fra dieseldrift til batteridrift og hvilken elektrifiseringsstrategi som kan være mest gunstig.

Bane NOR har valgt individet som mulighetsstudien tar utgangspunkt i som case og eventuell ombygging av. Individet er av typen LT15 (AMC2), en lastetraktor fra TesMec som ble tatt i bruk i Norge i 2009. Dette er en av Bane NORs mange «gule arbeidsmaskiner». Den ansees som en god kandidat for ombygging ettersom den har vært lite i drift grunnet gjentagende utfordringer med den diesel-hydrauliske drivlinjen.

1.3 Avgrensninger

Denne rapporten tar for seg omlegging av skinnegående arbeidskjøretøy fra diesel til batteri. Andre energibærere er ikke utredet. Omfanget av dette oppdraget har ikke inkludert utførelsen av detaljert forbruksberegninger.

1.4 Om Bane NOR

Bane NOR forvalter nesten 1000 objekter som vogner og trailere, kjøretøy med egen fremdrift og spesialutstyr som snøfresere, snøkoster, skinnevaskere med mer. De har 100 skinnegående arbeidsmaskiner med fremdriftssystem. Alle disse er dieseldrevne. Dette mulighetsstudiet er et viktig steg for å bidra til å kjøre deres kjøretøypark mindre utslippsintensiv.

1.5 Rapportens struktur

Rapporten er strukturert ved å først gjennomføre en kartlegging av driftsmønster og behov for lastetraktor. Ombyggingskartleggingen i kapittel 3 er det største kapittelet som ser på detaljer knyttet til plass og vekt av komponenter. Mens man i kapittel 4-7 kommer frem til hvilket ombyggingskonsept som er mest egnet for det aktuelle kjøretøyet. Logikken i rekkefølgen på kapittel 4 til 7 er at man i kapittel 4 dimensjonerer batteriet uten å hensynta vekter påført kjøretøyet fra valgt ladeløsning. I kapittel 5 presenteres de ulike vektene som vil påføres kjøretøyet ved gitt løsning. I kapittel 6 gjøres det en ny batteridimensjonering (en iterasjon) etter at vektene fra ladeløsningene er hensyntatt. Dette fører til en ny batteristørrelse for de ulike som gir de konkrete resultatene knyttet til hvilke aktiviteter og hvor lang rekkevidde de ulike ombyggingskonseptene vil ha, samt hvilke konsekvenser de ulike ladeløsningene har for ladetid.

Kapittel 2 – Driftsmønster og behov

Dette kapittelet ser på driftsmønster til lastetraktorer og hvilke aktiviteter de typisk utfører, samt en tilhørende kartlegging av energibehovet for de ulike aktivitetene. Det er gjort en loggføring av forbruk for LTR17 som er omgjort til hvilket forbruk det ville tilsvart for LT15 om den skulle ha elektrisk fremdriftssystem.

Kapittel 3 – Ombyggingskartlegging - foretar en detaljert gjennomgang av den aktuelle lastetraktoren (LT15) som tenkes ombygd for å kartlegge tilgjengelig plass og hvilke vekter som frigjøres ved å fjerne eksisterende drivlinje. Samtidig sees det på hvilke komponenter utover batterier som må på plass for å realisere et elektrisk fremdriftssystem. Kapittelet gjør også en litteraturstudie av relevant litteratur og har gjort en markedskartlegging av eksisterende og påtenkte prosjekter som er relevant. Videre er det gjort intervjuer av potensielle systemintegratorer for å avklare om de potensielt sett kan løse en slik ombyggingsjobb og hvilke relevante erfaringer de har.



Kapittel 4 – Match-up av batterier - ser på ulike batterikjemier og tar flere tilnæringer til hvordan man kan dimensjonere en batteripakke for LT15 med utgangspunkt i forutsetningene kartlagt i kapittel 3 og 4. Dimensjoneringen av batteriet her gjøres før man hensyntar vektene fra de ulike ladeløsningene.

Kapittel 5 – Ladeløsninger - tar for seg potensielle ladeløsninger av en elektrifisert lastetraktor og legger frem hvilke ekstravekter løsningene vil påføre kjøretøyet. Det legges også frem detaljer om ladeeffekt.

Kapittel 6 – Samlet system – ser på helhetsbildet knyttet til kombinasjonen ladeløsning og batteri fra et teknisk og et økonomisk ståsted. De ulike konseptene drøftes og det gjennomføres en redimensjonering av batteri for de ulike ombyggingskonseptene ut fra type ladeløsning for å hensynta vektene som ladeløsningene påfører kjøretøyet.

Kapittel 7 – Anbefalinger – konkluderer og anbefalerer, basert på resultater og drøftinger i kapittel 6 hvilket ombyggingskonsept som er mest egnet for den aktuelle lastetraktoren.

I **Appendiks** er gjøres det noen betrakninger av LTR17 med hensyn på ombygging til elektrisk fremdrift. Dette er basert på en befaring på lokasjon og med utgangspunkt i dokumentasjon av et spesifikt kjøretøy stasjonert på Oppdal.

2. Driftsmønster og behov

Dette kapittelet legger faktagrunnlaget på bordet knyttet til driftsbehov og driftsmønster med hensyn på rekkevidde, kjøretid, hastighet og arbeidsoppgaver. Deretter sees det på hvilket energibehov lastetraktor har knyttet til de ulike driftsformene.

2.1 Rekkevidde, hastighet og arbeidsoppgaver

LT15 er en av BaneNOR sine gule arbeidsmaskin-modeller. Denne lastetraktoren har en maksimal hastighet på 100 km/t og en dieselmotor med maksimal effekt på 640 kW. Lastetraktoren har et stort lasteplan med påmontert kran, noe som gjør den godt egnet til arbeid langs spor. I sommersesongen består arbeidsoppgaver stort sett i drift og vedlikehold av spor. Dette inkluderer arbeid på skinnene, på banestrøm/kontaktledning og generelt sørge for at det kan kjøres langs sporet. Kranen kan brukes til opprydding etter naturhendelser, som veltede trær, stein eller påkjørte dyr i veibanen. Maskinen kan brukes til å trekke vogner med pukk eller annen last, og kan brukes til generell frakt av personell for visitasjon eller befaring langs linjene. Driften i sommersesongen følger generelt normale arbeidsdager, med unntak av spesielle hendelser.

I vintersesongen er driftsmønsteret mer krevende. Frost og snø krever mer kontinuerlig arbeid for å holde linjene i drift. LT15 er egnet til påmontering av snømåke, snøfreser og sporrenser. Vinterdrift vil i perioder kreve arbeid langs spor døgnet rundt, noe som setter krav til rekkevidde og kapasitet for lastetraktoren. Et mål ved denne rapporten er å undersøke i hvilken grad lastetraktoren kan utføre disse varierte arbeidsoppgavene dersom den bygges om til batterielektrisk fremdrift. En slik ombygging vil nødvendigvis endre bruksmønster noe, siden rekkevidden vil bli begrenset av batterikapasiteten, og ettersom det vil være behov for lading.

2.2 Energibehov

Lastetraktoren av typen LT15 – AMC2 er et dieseldrevet kjøretøy med motorkraft på **640kW**. Kraft fra motoren overføres via aksling til hjulene, og innledningsvis går kraften med til å akselerere massen. Etter hvert når toget ønsket hastighet, og farten holdes jevn. Toget har da en veldig høy bevegelsesmengde (masse multiplisert med hastighet). For å holde konstant fart må kraft fra motoren utligne luftmotstand og friksjon. Nøyaktige beregninger av dette systemet er utenfor omfanget for denne rapporten. I dette kapittelet gjøres beregninger basert på en rekke antakelser som vil tydeliggjøres her. Målet med beregninger er som følger:

1. Beregne brutto energimengde som kreves for å drive en dieseldrevet lastetraktor ved å se på forbruket i liter per time for ulike arbeidsoppgaver.
2. Beregne **størrelsen på arbeidet dieselmotoren leverer**, ved å hensynta virkningsgraden til systemet.
3. Beregne hvilke brutto energimengde som kreves av et batterielektrisk system for å levere det samme arbeidet. Her må de forbedrede virkningsgradene til den batterielektriske drivlinjen hensyntas.

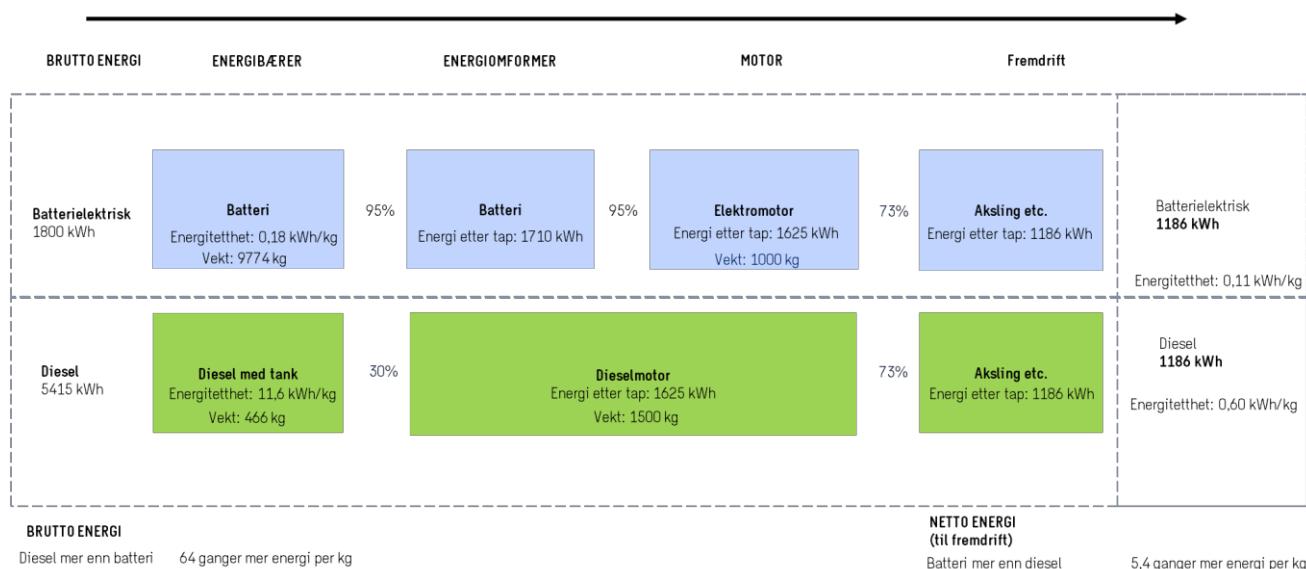
I løpet av en time leverer motoren på full effekt en energimengde på 640 kWh. Virkningsgraden til dieselmotoren antas å være 30 %. Dette vil si at denne timen krever en brutto energimengde i form av diesel på $640 \text{ kWh} / 0,3 = 2133 \text{ kWh}$. Diesel har en energitetthet på ca. 10 kWh/l, som vil si at det krever ca. 213 liter diesel for å kjøre motoren på full effekt i én time. Det antas at motoren yter full effekt ved maks hastighet, som er oppgitt til å være **100 km/t**. Dersom det antas at lastetraktoren har en total vekt på 65 tonn, vil beregnet spesifikt forbruk for en dieseldrevet LT15 være 0,33 kWh per tonn-kilometer. Denne faktoren, spesifikt forbruk, er en veldig nyttig faktor som brukes for å si noe om forbruket til ulike kjøretøy, og vil brukes i beregningene som følger i denne rapporten.

Spesifikt forbruk på 0,33 kWh per tonn-kilometer kan sees på som et dimensjonerende teoretisk maksimum. Det vil si at dette er et teoretisk maksimum, **gitt en bestemt total vekt og en bestemt hastighet**. Dette vil da typisk være førende for en transportetappe, der lastetraktoren holder jevn fart over en lang avstand. Denne faktoren vil være annerledes for et annet type arbeid. En realistisk arbeidssituasjon for en lastetraktor er for eksempel arbeid på høyspentlinjer. Dette kan innebære hyppige start og stopp, noe som fører til en kraftig økning i forbruk per kilometer. Et annet realistisk arbeid utført av lastetraktorer er snømåking. I disse tilfellene kan det spesifikke forbruket overstige 0,33 kWh per tonn-kilometer med god margin. Forbruket vil likevel alltid være begrenset av maksimal energimengde som motoren kan levere, altså 640 kWh per time, eller 213 liter diesel per time (ved gitt virkningsgrad på 30 %).

Det spesifikke forbruket på 0,33 kWh per tonn-kilometer er basert på fremdrift ved hjelp av en forbrenningsmotor, som har veldig lav virkningsgrad sammenlignet med elektriske motorer. Typisk samlet virkningsgrad fra batteri til levert energi fra elektrisk motor er 90 %, altså vil 90 % av brutto energimengde bli levert av motoren. Disse virkningsgradene kan brukes for å regne ut det spesifikke forbruket dersom lastetraktoren har batterielektrisk fremdrift, under de samme antakelsene om total vekt på 65 tonn og hastighet på 100 km/t. Det spesifikke forbruket blir da $(0,33 * 0,9) / 0,3 = 0,16 \text{ kWh per tonn-kilometer}$. Her er det viktig å påpeke at vekten er antatt å være den samme, noe som ikke nødvendigvis vil være tilfelle etter ombygging av lastetraktor til batterielektrisk fremdrift. Også her vil forbruket per time

være begrenset av hva motoren kan levere, altså 640 kWh per time, som tilsvarer 711 kWh brutto energi fra batteriet.

Tank-til-fremdrift – eksempel ulike drivlinjer med lik mengde netto energi



Figur 4: Viser hvordan batterielektrisk fremdriftssystem tar inn på "forspranget" diesel har i sin energitethet gjennom bedre virkningsgrader. Diesel er 64 ganger mer energitett før man hensyntar virkningsgrader. Etter det er hensyntatt er den bare rundt 5 ganger så energitett som et batterielektrisk fremdriftssystem.

2.2.1 Kartlegging energiforbruk LTR17

Det foreligger lite datagrunnlag for lastetraktorene når det kommer til drift. Per dags dato er ingen LT15 i drift, og kartlegging av normalt bruksmønster vil ikke være mulig. I et forsøk på å danne et bilde av normal drift av en lastetraktor har det blitt gjennomført loggføring av bruksmønster for en LTR17 stasjonert i Oppdal kommune. Denne lastetraktoren opererer gjennom hele året på Dovrebanen, noe som innebærer krevende vinterdrift. Loggføringen ble gjennomført i uke 45, altså før vinterdrift, noe som betyr at aktivitetsnivået er noe lavere. Loggen er presentert i Tabell 3.

Tabell 3: Loggføring – Bruksmønster LTR17.

	Arbeidsoppgave	Start tid/sted	Slutt tid/sted	Tid mellom slutt og start [timer]	Tilbakelagt strekning [km]	Last ut over egenvekt [kg]
eksempel	Snøfresing	31.okt 08.00 / Oppdal	31. okt 09:35 / Dovre		xx km	xxxx kg
Mandag	UKV Høyspent	07.11.22 07:25 Oppdal	07.11.22 13:45 Oppdal	6,33	66 km	Henger 7 500 kg Last 2 000 kg
Tirsdag	UKV Høyspent	08.11.22 09:00 Oppdal	08.11.22 13:00 Oppdal	4,00	30 km	Ikke spesifisert
Onsdag						
Torsdag	FV Skinner	10.11.22 07:00 Oppdal	10.11.22 13:00 Oppdal	6,00	70 km	Henger 7 500 kg Last 15 000 kg
Fredag	UKV Linjen	11.11.22 07:00 Oppdal	11.11.22 Ikke spesifisert Oppdal	Ikke spesifisert	145 km	3 stk Xls vogner 53 400 kg

Det finnes også driftsdata for maskinen, dette er data hentet direkte fra kjøretøyet. Her oppgis mange nyttige parametere, som tilbakelagt strekning, arbeidstimer, drivstoffforbruk og lignende. Det som ikke kommer frem i disse driftsdataene, er arbeidsoppgaver og last ut over egenvekt. Data fra loggen presentert i Tabell 3 kobles derfor til de faktiske driftsdataene for lastetraktoren, mottatt som en Excel-fil 25.11.22.

De loggførte arbeidsoppgavene danner grunnlag for fire ulike scenarier:

Scenario 1 er drift uten last ut over egenvekt, og er basert på data fra tirsdag 08.11.22, der det ble utført arbeid på høyspentanlegg.

Scenario 2 er drift med en liten mengde last ut over egenvekt. Dette scenariet er basert på data fra mandag 07.11.22, der det ble utført arbeid på høyspentanlegg. Her har lastetraktoren dratt en henger og last på til sammen 9,5 tonn ut over egenvekt.

Scenario 3 er drift med en mellomstor mengde last ut over egenvekt. Dette scenariet er basert på data fra torsdag 10.11.22, der det ble utført arbeid på skinner. Her har lastetraktoren dratt en henger og last på til sammen 22,5 tonn ut over egenvekt.

Scenario 4 er drift med stor mengde last ut over egenvekt. Dette scenariet er basert på data fra fredag 11.11.22, der lastetraktoren har fraktet 3 Xls-vogner fylt med pukk, med en total vekt på **53,4 tonn** ut over egenvekt.

Metodikk

Målet for beregningene er å finne spesifikt forbruk for de ulike scenariene. Dette beregnes ved å se på faktiske forbruksdata for LTR17. Disse tallene må så tilpasses LT15, som har en større egenvekt og motoreffekt. Resultatet vil da være et spesifikt forbruk for batterielektrisk fremdrift for en LT15 maskin, dersom den skulle utført arbeidsoppgavene beskrevet i de 4 ulike scenariene. Beregning av utvalgte parametere er presentert i Tabell 4. Det er ikke nøyaktig samsvar mellom loggførte data og driftsdata for alle parametere. Tall fra driftsdata brukes dersom det ikke er samsvar (se for eksempel tilbakelagt strekning).

Tabell 4: Beregning av utvalgte parametere basert på loggføringsskjema og driftsdata for LTR17 i perioden 07.11.22 – 11.11.22. Maks last på LTR17 er 45 tonn.

LTR17	Total vekt og dralast [tonn]	Totalt forbruk per time [liter/time]	Energiforbruk per time [kWh/t]	Varighet arbeidsdag (datalogg) [timer]	Tilbakelagt km per dag [km]	Spesifikt forbruk, diesel [kWh per tonn-kilometer]
Scenario 1 - kun egenvekt	40,0	11,7	117	3,9	24,2	0,47
Scenario 2 - lett last	49,5	13,6	136	6,3	66,8	0,26
Scenario 3 - medium last	62,5	17	170	6,6	76,2	0,24
Scenario 4 - tung last	93,4	23,8	238	7,8	146,6	0,14

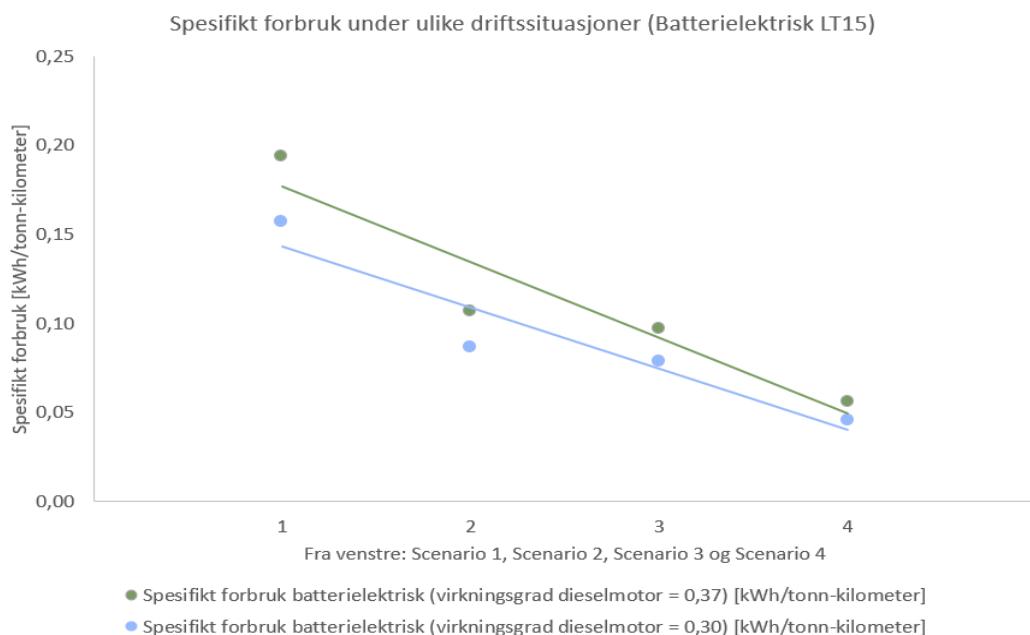


Spesifikt forbruk presentert i tabellen over gjelder for diesel. Dette er energimengden i drivstoff som trengs for å utføre arbeidet med dieselmotor som fremdrift. Ved batterielektrisk fremdrift må det tas høyde for virkningsgrader. Det antas en virkningsgrad for dieselmotoren på hhv. 30 % og 37 %, for å tydeliggjøre effekten av ulik virkningsgrad. Av disse ansees 30 % virkningsgrad som den mest realistiske. Spesifikk levert energi fra motoren finnes ved å gange det spesifikke forbruket med virkningsgraden til motoren. Videre antas virkningsgrad for batteri og elektrisk motor til samlet å være 90 %. Energimengden som kreves for å levere samme output fra den elektriske motoren som dieselmotoren finnes ved å dele den leverte energien på virkningsgraden for batteri og elektrisk motor. Dette er da mengden energi som må leveres fra batteriet til el-motoren for å kunne utføre arbeidsoppgavene. Ved høyere virkningsgrad for dieselmotor vil det si at samme mengde drivstoff kan utføre en større arbeidsmengde, altså en større brutto energimengde. Som konsekvens av dette kreves en større netto batterielektrisk energimengde i dette tilfellet, og spesifikt forbruk øker. Resultatene for spesifikt forbruk ved batterielektrisk fremdrift presenteres i Tabell 5.

Tabell 5: Spesifikt forbruk for batterielektrisk fremdrift. Tabellen presenterer resultater fra to separate beregninger, der virkningsgraden til dieselmotor antas å være hhv. 30% og 37 %.

LT15	Spesifikt forbruk batterielektrisk [kWh/tonn-kilometer]	Spesifikt forbruk batterielektrisk, høy virkningsgrad diesel [kWh/tonn-kilometer]
Virkningsgrad dieselmotor	30 %	37 %
Scenario 1 - kun egenvekt	0,16	0,19
Scenario 2 - lett last	0,09	0,11
Scenario 3 - mellomtung last	0,08	0,10
Scenario 4 - tung last	0,05	0,06

Dette er det spesifikke forbruket for LT15 dersom den skal utføre arbeidsoppgavene på samme måte som LTR17 gjorde i de loggførte scenariene. Resultatene i Tabell 5 presenteres grafisk i Figur 5.



Figur 5: Spesifikt forbruk for LT15 med batterielektrisk fremdrift under ulike driftssituasjoner.

Disse resultatene er noe overraskende, ettersom det intuitivt burde vise at forbruket øker ettersom den totale vekten som motoren må flytte på øker. Dette illustrerer viktigheten av arbeidsmønster. Loggføringsskjemaet presentert i Tabell 3 gir ikke fullstendig informasjon om driftsmønster, men oppgir bare samlet data for hele arbeidsdagen. Resonnementet som følger, er basert på tilgjengelig underlag. I scenario 1 kjørte lastetraktoren LTR17 ifølge driftsdata en strekning på ca. 24 km, over en periode på 3,9 timer. Driftsdata viser i tillegg at motoren gikk på tomgang 39 % av denne arbeidstiden. Dette tyder på mye start og stopp, og dermed et mye høyere forbruk. I scenario 4 dro lastetraktoren en last med pukk på ca. 53 tonn. Kjøretøyet tilbakela en strekning på ca. 147 km over en periode på 7,8 timer, og motoren gikk på

tomgang 18 % av denne perioden. Det lave spesifikke forbruket antyder at lastetraktoren gikk i mye jevnere hastighet over distansen, med få start og stopp underveis.

Hvor stort batteri kreves for å utføre de ulike arbeidsoppgavene i scenario 1-4?

Beregninger gjøres basert på faktiske forbruksdata fra loggføringsskjema og driftsdata. Målet er å beregne hvor mye energi som kreves for å utføre arbeidsoppgavene definert i scenario 1-4, gitt at arbeidet varer en hel arbeidsdag. I dette tilfellet antas en arbeidsdag for lastetraktoren å være 7,5 timer.

Tabell 6: Nødvendig batterielektrisk kapasitet for å utføre typiske arbeidsoppgaver gjennom en arbeidsdag for LT15

LT15	Arbeids- beskrivelse	Forbruk diesel per time [kWh]	Forbruk per time, elektrisk [kWh]	Forbruk per arbeidsdag, diesel [kWh]	forbruk per arbeidsdag, elektrisk [kWh]
Scenario 1 - kun egenvekt	Transitt	116,41	38,80	873	291
Scenario 2 - lett last	Arbeid på høyspantanlegg	135,87	45,29	1019	340
Scenario 3 - mellomtung last	Arbeid på skinner	170,61	56,87	1280	427
Scenario 4 - tung last	Pukk	237,18	79,06	1779	593

Årsaken til differansen i forbruket per arbeidsdag for hhv. diesel og batterielektrisk fremdrift oppgitt i tabellen over er virkningsgrader. Premisset for beregningene er at lastetraktoren skal kunne gjøre samme arbeid med batterielektrisk fremdrift som med forbrenningsmotor og diesel. Det vil si at netto energibehov er det samme. For å finne brutto energibehov, altså antall liter diesel eller antall kWh strøm for å utføre dette arbeidet, ganges netto energibehov med virkningsgrader for systemet. For beregningene i Tabell 6 er det antatt virkningsgrad for dieselmotor på 30 % og samlet virkningsgrad for batterielektrisk motor på 90 %.

Vinterdrift

De mest ekstreme arbeidsforholdene for lastetraktoren vil forekomme under vinterdrift. Forbruk ved arbeid med snøfreser er ikke kjent for dette prosjektet. Det er likevel gjort noen enkle beregninger for å anslå omtrentlig netto energibehov for å utføre arbeid under vinterdrift. I loggføringsskjemaet for LTR17 oppgis to typiske ruter når det kjøres for snø/is. Første ruten er fra Oppdal til Garli, som er en tur på ca. 47 km. Den andre ruten er fra Oppdal til Hjerkinn, en tur på ca. 48 km. Videre står det at når det kjøres for snø/is vil det typisk kjøres 2 turer tur-retur mellom Oppdal og Garli, og 3 turer tur-retur mellom Oppdal og Hjerkinn. Beregninger bygger på følgende antakelser:

- Normal arbeidshastighet med snøfreser er 40 km/h. Dette påvirker spesifikt forbruk, som er energimengden det krever å flytte et tonn en distanse på en kilometer.
- Totalvekten til lastetraktoren består av egenvekt på 54 tonn og snøfreser på 5 tonn samt annen last på plan opp til 64 tonn.
- Motoren yter maksimal effekt ved arbeid med snøfreser i en hastighet på 40 km/h.
- Det er mulighet for lading i Oppdal, så lastetraktoren må klare én tur-retur uten lading.

Resultater av beregningene er presentert i Tabell 7.

Tabell 7: Total energimengde som kreves for å utføre typiske arbeidsoppgaver med snøfreser, vinterdrift.

LT15	Avstand [km]	Spesifikt forbruk diesel [kWh/tonn-kilometer]	Totalt forbruk tur-retur diesel [kWh]	Spesifikt forbruk batterielektrisk [kWh/tonn-kilometer]	Totalt forbruk tur-retur batterielektrisk [kWh]
Rute 1: Oppdal - Garli	94	0,76	5013	0,25	1671
Rute 2: Oppdal - Hjerkinn	96	0,76	5120	0,25	1707

Beregningene viser at lastetraktoren må ha en batterikapasitet på over 1700 kWh for å kunne utføre en typisk arbeidsoppgave ved vinterdrift, med de antakelsene lagt til grunn. Dette ansees som et konservativt estimat, ettersom det er lagt til grunn et premiss om at motoren yter maksimal effekt under hele arbeidsperioden. Dersom enten effekten er lavere, eller normal arbeidshastighet er høyere, vil estimert forbruk reduseres.

2.2.2 Litteraturstudie spesifikt energiforbruk for sammenligning

I Jernbanedirektoratets NULLFIB2 Delrapport 1¹ anslås det følgende gjennomsnittlige energiforbrukstall:

Tabell 8: Gjennomsnittlige energiforbrukstall for ulike togtyper.

Kjøretøy	Forbruk [kWh/km]
Trevogners motorvognsett	5
Lokomotiv for persontog	10
Lokomotivtrekket godstog på 1200 tonn.	20

Nøyaktig vekt for de tre tilfellene er ikke oppgitt. Som et eksempel benyttes NSB sin Type 69 – Serie C, som er et trevogners motorvognsett på 133 tonn. I dette tilfellet er forbruket 0,038 kWh per tonn-kilometer. Dette er altså den energien som kreves for å flytte et tonn en avstand på 1 km. I tilfellet lokomotivtrekket godstog på 1200 tonn er forbruket 0,017 kWh per tonn-kilometer. For tilfellet med lokomotiv for persontog er usikkerheten for vekt noe større. Som eksempel brukes brutto egenvekt til lokomotivet EL18, som er på ca 96 tonn. Det antas så at lokomotivet trekker tre personvogner med samlet vekt på 110 tonn (typisk vekt på personvogn² er ca 37 tonn). Under disse antakelsene er forbruket 0,048 kWh per tonn-kilometer.

I rapporten «Electric Train Energy Consumption Modeling»³ skrevet for «Center for Sustainable Mobility» i 2017 er det gjort modellering av energibruk for «Chicago Brown Line» og «MAX Blue Line», som er tog for persontransport. Her anslås spesifikt forbruk til å være hhv. 0,85 kWh/tonn-kilometer og 0,26 kWh/tonn-kilometer. Dette er persontog med hyppig start og stopp, noe som reflekteres i de høye forbrukstallene.

Det Nederlandske selskapet TNO har gjort analyser av energibruk for elektriske langdistansetog som opererer i Nederland og nabolandene. Resultatet presenteres i en rapport⁴ laget i samarbeid med selskapene Connexxion og Topsector Logistiek fra 2018. Her oppgis typisk energiforbruk for elektriske lokomotiv til å være 0,02 kWh per tonn-kilometer. Forbrukstallene funnet i kapittel 0 ser ut til å passe bra med verdier funnet i dette litteraturstudiet. De diskuterte verdiene oppsummeres i Tabell 9.

Tabell 9: Litteraturstudie – forbruk elektriske tog

Modell	Type	Vekt [kg]	Spesifikt forbruk [kWh/km]	Spesifikt forbruk [kWh/tonn-km]
Blue line 2600 model	Metro	54,5	14,4	0,26
Chicago Brown line	Metro	27,2	23,1	0,85
Metro Series 4300	Metro	-	7,3	-
Generisk	Elektrisk lokomotiv	-	-	0,02

¹ <https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/2470ce4da9d64f739da4f4a83ae1b385/delrapport-1-batteriteknologi-for-jernbanekjøretøy.pdf>, Tabell 5, side 24

² [https://no.wikipedia.org/wiki/Type_7_\(personvogn\)](https://no.wikipedia.org/wiki/Type_7_(personvogn))

³ <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.058>

⁴ <https://publications.tno.nl/publication/34626344/HT13Na/TNO-2017-R11679.pdf>

3. Ombyggingskartlegging

I dette kapittelet vil mulighetsrommet for ombygging av lastetraktoren gjennomgås. Kapittelet omhandler selve kjøretøyet, litteraturstudie og markedskartlegging for ombygging fra diesel- til batteridrift. Her synliggjøres tilgjengelig volum og vektfordeling ved fjerning av hydrostatisk-/dieseldrivlinje og areal for innsetting av batterielektrisk drivlinje.

3.1 Detaljer om lastetraktor – LT15

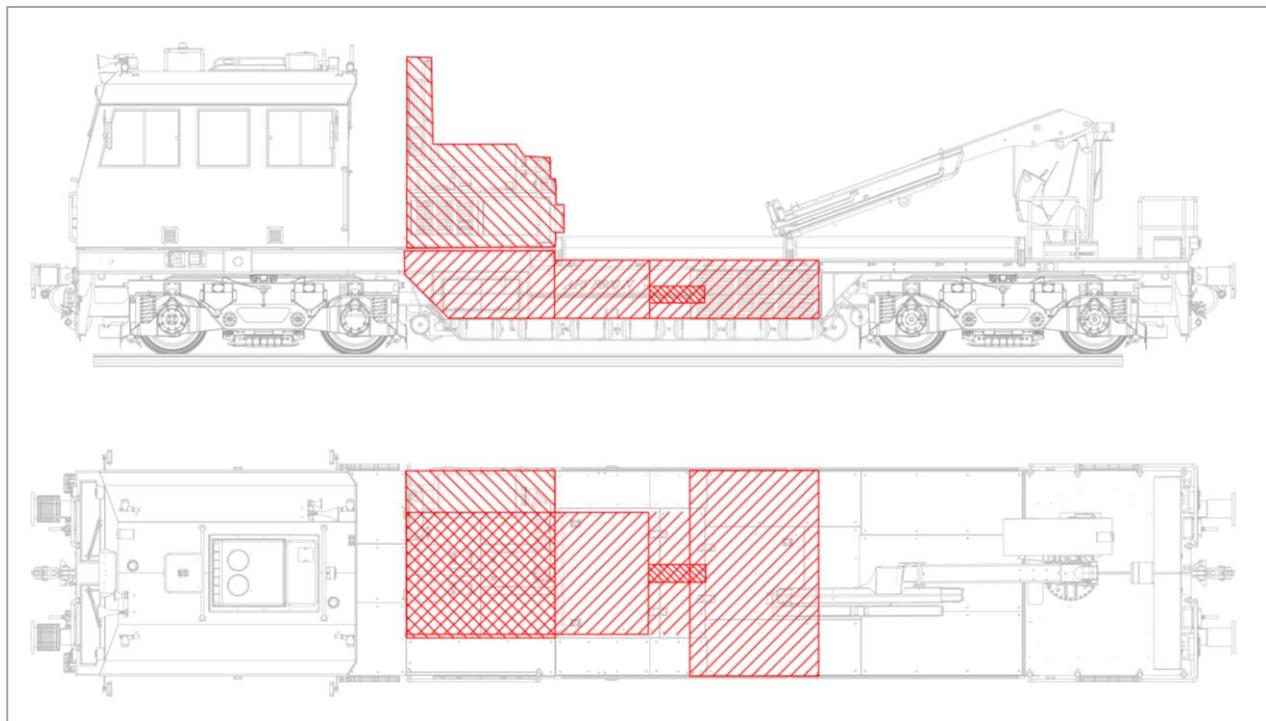
Lastetraktoren med litra LT15 er 16,44 m lang og har en egenvekt på 54 tonn. Det er produsert 3 slike maskiner for bruk i Norge og de ble levert fra produsenten TesMec i 2009. Dette prosjektet ser spesifikt på individet 0365153A. Kjøretøyet brukes blant annet til transport av materialer, inspeksjon og beredskap, og kjøretøyet er utrustet med kran på plattformen. Det finns også muligheter for å koble til snøryddingsutstyr foran og bak, for eksempel plog, snøfres og kost.

Data i dette kapitlet er i hovedsak hentet fra brukerhåndboken for LT15 [1].

Tabell 10: Tekniske data [1]

Modell	APS B800 N
Individ	0365153A
Effekt dieselmotor [kW]	640
Største tilgjengelige ytelse for hydraulisk hjelpesystem (snøfres og så videre) [kW]	400
Byggår	2009
Vekt tom [tonn]	54
Største totalvekt [tonn]	68,7
Største aksellast [tonn]	18
Kapasitet lasteplan [tonn]	10
Maks traksjonskraft med 0,26 adhesjonskoeffisient [kN]	183,83
Maks hastighet [km/h]	100
Motormodell	IVECO V8 ENT75.00
Overføring	Bosch Rexroth Hydrostatisk lukket krets
Drivstoff [L diesel]	600
Hydraulikkolje [L olje]	400

Midt på kjøretøyet ligger motorrommet, der både dieselmotor og det meste av hydraulikkutrusningen (pumper, kjølesystem og så videre) er montert. Motorer for fremdrift av kjøretøyet er montert på sine respektive boggier.



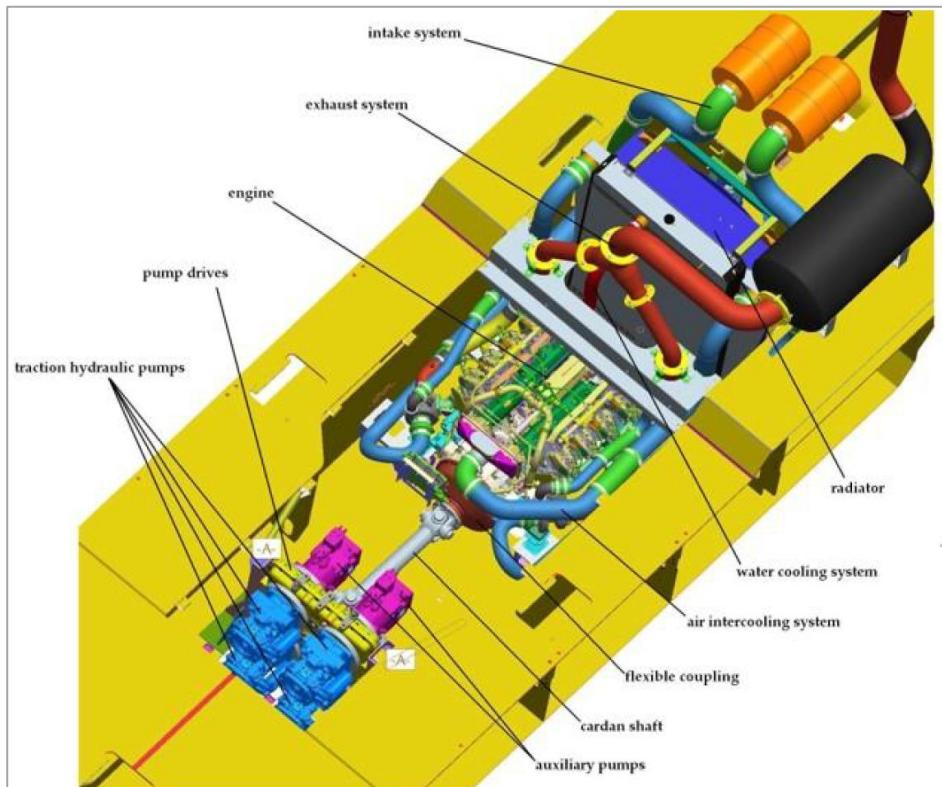
Figur 6: Fysisk plassering av dagens drivlinje.



Figur 7: Oversiktsbilde 1 fra [1].

3.1.1 Dieselmotor

Kjøretøyet drives av en **Iveco Vector V08 ENT75**-motor som veier 1500 kg. Den har en makseffekt på 640 kW ved 2100 RPM og et maksimalt dreiemoment på 3650 Nm (ved 1400 RPM). Motorens kjølekrøt drives av det hydrauliske systemet, dette beskrives i senere kapitler. Dieselmotoren er koblet til hydraulikkpumpene gjennom en kardangaksel som gjennom en fleksibel kobling gir mekanisk energi til hydraulikkpumpene. Motoren er plassert sentralt i kjøretøy og er tilgjengelig fra plattformen gjennom en luke i rammen. Se Figur 8 for en oversikt over motorrommet.



Figur 8: Oversiktsbilde motor. Hentet fra figur 5 i [1]

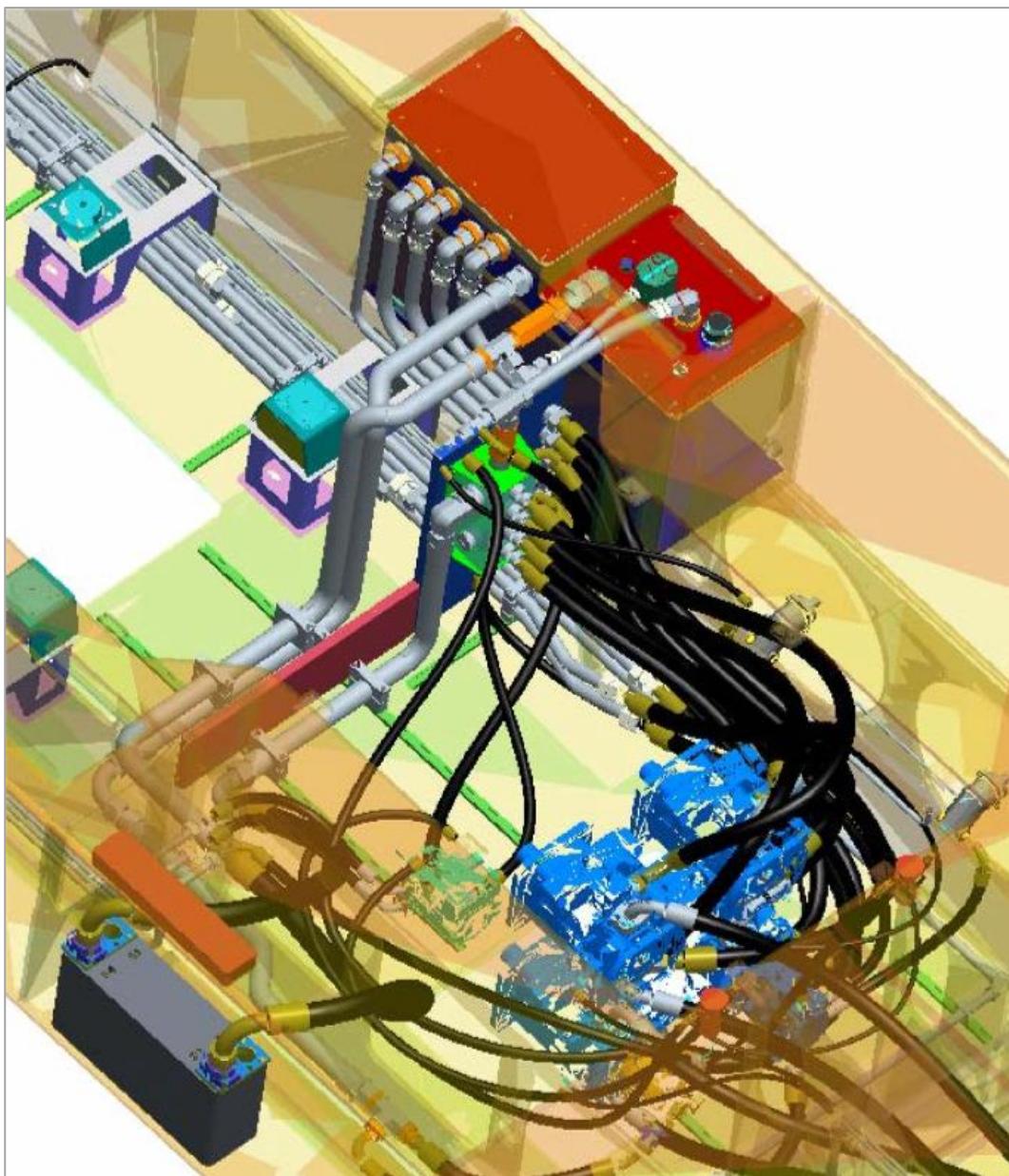
Det finnes totalt tre dieseltanker om bord. To hovedtanker som er montert på hver sin side av motoren á 300 L, totalt 600 L. Den tredje tanken ligger under arbeidskrana bak på kjøretøyet og rommer 600 L⁵.

⁵ I brukerhåndboken for LT15 [1] er det angitt at denne tanken rommer 725 L, men materiellkortet sier 600 L, og derfor velges den mest konservative verdien.

3.1.2 Hydraulisk traksjonssystem

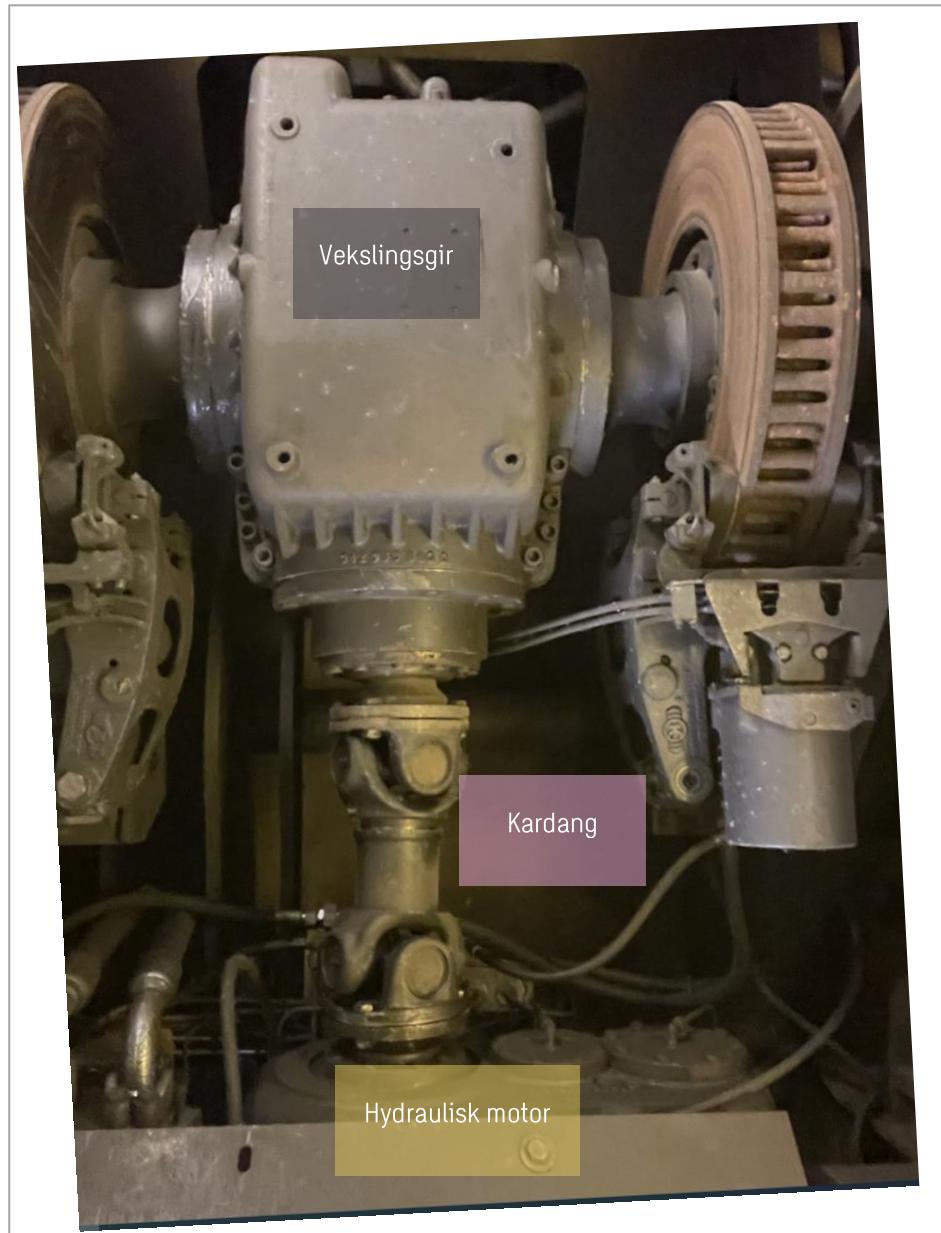
Det er fire 180 cc hydrauliske pumper som overfører energien til kjøretøyets framdrift. Pumpene er montert i midten av kjøretøyets motorrom, bak dieselmotoren som vist i blått i Figur 8 over. Hydraulikkpumpene får sin kraft fra dieselmotoren via en kardangaksel som overfører den mekaniske energien. Pumpene matet deretter de respektive hydraulikkmotorene med olje. Hydraulikkmotorene, som står for kjøretøyets traksjon, er montert på boggiene med én motor per hjulaksel, totalt altså fire motorer á 250 cc.

Se oversiktsbilde over hydraulikkpumpene og slanger fra motorrommet i Figur 9



Figur 9: Oversikt over det hydrauliske traksjonssystemet. De blå pumpene er pumpene for drift av motorer.

Fra hydraulikkmotorene går det ytterligere en kardangaksel fra hver motor til et vekslingsgir som sitter på hjulakselen og der driver kjøretøyet i ønsket retning. I Figur 10 er hjulakselen vist nedenfra, med hydraulikkmotoren nederst i bildet og koblingsgiret øverst.



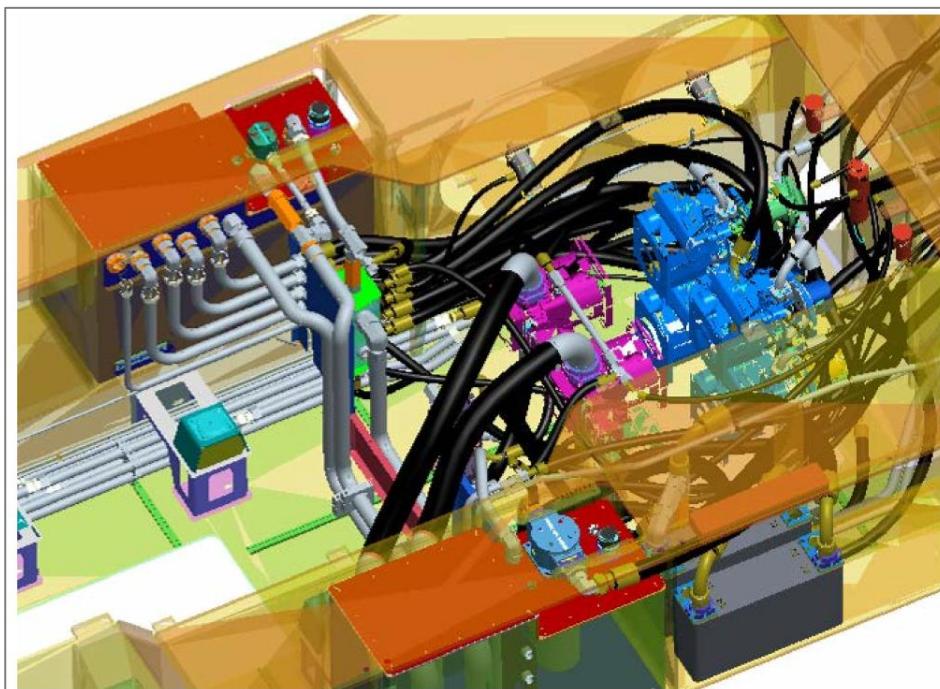
Figur 10: Mekanisk overføring mellom hydraulikkmotor og hjulaksel, sett nedenfra. Bilde: Sweco

3.1.3 Hydraulisk hjelpesystem

Lastetraktoren har et hydraulisk hjelpesystem som forsyner forbindelsene foran og bak (totalt 400 kW), hjelpehydraulikk og konstant filtrering av oljen:

- To 190 cc pumper til forbindelsene foran og bak. Den ene pumpa er forbundet med en retarder som brukes for dynamisk bremsing
- Én 45 cc pumpe som kan gi tilførsel til enten kran, snøplog eller fremre/bakre pumpeforbindelser
- Én 45 cc pumpe som forsyner en 23 cc motor for luftkompressoren
- Én 28 cc pumpe som forsyner to 16 cc motorer for kjøling av førerhus
- Én 28 cc pumpe som forsyner en 28 cc motor for kjøling av motoren.

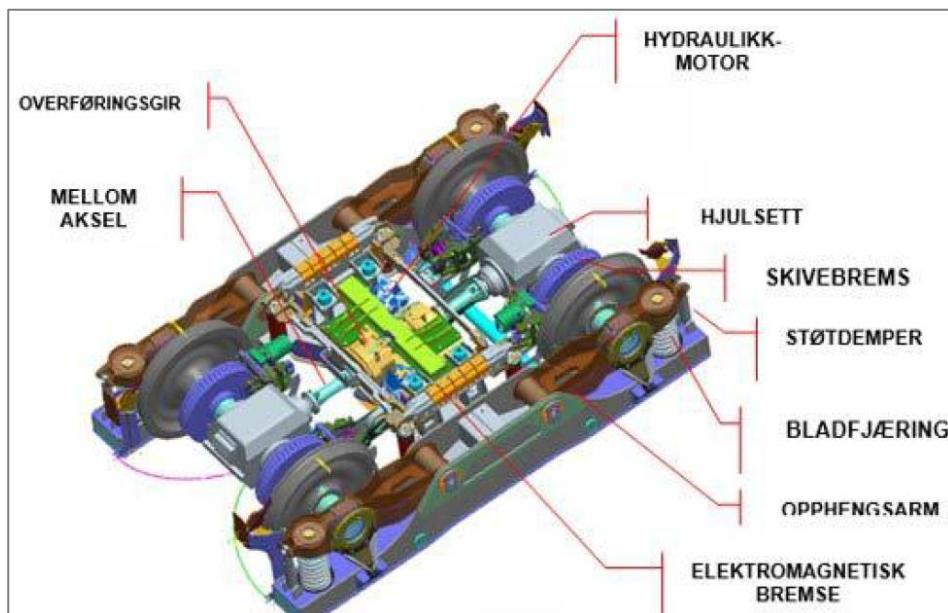
Uttak foran og bak på maskinen kan stilles til 30 eller 50 L/min via førerhuset.



Figur 11: Hjelpehydraulikksystemet, fra [1]. Hjelpesystemet er vist med rosa pumper.

3.1.4 Boggi

Kjøretøyet har to boggier med to hjulaksler hver. Det er to hydrauliske motorer per boggi som driver hver sin hjulaksling. Hydraulikkpumpene plassert i midten av kjøretøyet forsyner de motorene med hydraulikkoljen for traksjon. Boggirammen er 3700x2460 mm. Hver hjulaksel er også utstyrt med bremeskiver for bremsing av alle aksler.



Figur 12: Oversiktstegning boggier, fra [1].

3.2 Litteraturstudie

Generelt er det få studier som retter seg mot tilsvarende ombygginger dette prosjektet tar for seg. Det kommer av flere ting, blant annet er markedet svært lite i volum, det er få av kundene som har konkrete kuttmål (Norge er ett av landene) og ytelseskravene til lastetraktorer er høye. De mest relevante rapportene er de Bane NOR og Jernbanedirektoratet selv har utarbeidet.

3.2.1 Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner i periodene frem til 2030 og 2050 [2]

Rapporten beskriver bredt hva som er mulighetsrommet for Bane NOR å redusere direkte kostnader fra egen kjøretøysflåte og danner på mange måter grunnlaget for denne rapporten. Det er en omfattende beskrivelse av dagens situasjon og ulike utfordringer for drift og vedlikehold på de ulike jernbanestrekningene. Det beskrives også hva som er de sentrale drifts- og vedlikeholdsoppgavene (som kan overføres direkte til denne rapportens maskin):

- Drift:
 - Vinterdrift (plogging, fresing, måking, transport av personell for de rollene)
 - Beredskap for ekstraordinær opprydding og utbedring av jernbanesporet ved naturhendelser og trafikkuhell
- Vedlikehold:
 - Korrektivt vedlikehold (retting av feil)
 - Forebyggende vedlikehold (hindre at feil oppstår)
 - Fornyelse (skifte ut anlegg som er kostbart å vedlikeholde på grunn av alder eller høy slitasje).

Det anslås at de totale utslippene fra drift og vedlikehold er ca. 3600 tonn CO₂e i 2021, med lastetraktorene på ca. 2100 tonn CO₂e

I rapporten beskrives det den svært intense bruken lastetraktorer (som LT15) vil kunne være utsatt for: opptil 24 timers døgn drift over flere dager, dette forekommer gjerne vinterstid i forbindelse med mye snø og vind. Det er gitt et estimat⁶ for bruksmønster av lastetraktorer, som vil være relevant i denne rapporten:

Tabell 11: Bruksmønster som vist i rapport Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner i periodene frem til 2030 og 2050 [2]. Tabellen er forenklet og basert på tabell 4.

Aggregerte data	
Gj.snitt kjørelengde (tur/retur) [km]	41-90
Lengste kjøretur [km]	200
Transportkjøring/reisetid [t]	3
Tomgangskjøring/kjøring på lavt tutall	30 %
Arbeid uten spenningssatt KL	25 %

Det er også gjort en enkel markedsanalyse der man forventer ny teknologi for nullutslippskjøretøyer «innen få år», men at det ikke finnes utslippsfrie alternativer på markedet.

⁶ Merk at det hefter en del usikkerhet ved disse tallene.

Rapporten synliggjør også flere mulige løsninger for lading:

- 400 eller 1000 V ladestasjoner, ved å bruke togvarmeposter og/eller bygge ut nye ladestasjoner. Det er anslått at 400 kWh vil kreve utstyr på 6,6 tonn.
- Kontaktledningslanlegget med 15000 V, kan lades i fart med 200-400 A eller 80-100 A for stilstående tog⁷. Det er anslått at 400 kWh vil kreve utstyr på 10,1 tonn.
- Batteribank-ladestasjon, hvor det plasseres høyeffektbatterier langs linjen som raskt kan lade opp togets batterier. Det er ikke anslått vekt av teknisk utstyr.
- Batteribytte er skissert som en løsning der det kreves mye ekstra infrastruktur. Det er ikke anslått vekt av teknisk utstyr.

Det pekes også på fordelen med å kunne lade etter når strømprisen er som lavest.

Det gis noen anslag for kostnad for nye kjøretøy, som kan fungere som sammenlikningsgrunnlag for ombyggingskostnader: 20-30 MNOK/ny lastetraktor.

3.2.2 Førerhjelppsystem [3]

Også kjent som Driver Advisory System (DAS). Slike systemer er ment å gi føreren råd om pådrag og nedbremsing for et optimalt kjøremønster med lavere energiforbruk. I det finske VR (tilsvarende Vy/Flytoget) er dette tatt i bruk og det er estimert at reduksjonen er på ca. 3500 tonn CO₂e. Tatt i betrakning at de totale direkte utslippena er ca. 77000 tonn CO₂e [4] er det hypotetisk et potensiale for å redusere energiforbruket med 4-5 %.

3.2.3 Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric [5]

Paperet tar for seg et scenario med fire lok som yter 3,3 MW og trekker 6806 tonn nytTELAST over 241 km, med antatt 2,4 millioner km kjørt over 20 år. Studien faller litt utenfor denne rapportens scope, da de fleste diesellok i USA er diesel-elektriske, og man slipper dermed å bytte ut drivlinjen. Det er allikevel en delvis overførbar situasjon, og det er gjort noen betrekninger på valg av batteriteknologi:

- LFP-batterier foretrekkes foran NMC-batterier på grunn av lengre levetid og lavere temperaturer, samt lavere kostnader og bedre driftsikkerhet.

Det anslås at tilfredsstillende kapasitet (14 MWh) kan oppnås med en enkel batterivogn, med nytTELAST inkludert inverter på 114 tonn, og volum på 13,7 m³. Det anslås også at ladingen på LFP i praksis⁸ er 1-2C som betyr fulladet batteri på 0,5-1 t.

Det pekes også på fordelen med å kunne lade etter når strømprisen er som lavest.

⁷ For å unngå høy varmeutvikling på ett enkelt punkt i anlegget

⁸ I teorien er det 4C, men det er vanskelig å oppnå.

3.2.4 Railway Bogies – GANZ MOTORS [6]

Produsent av bogier med liknende oppheng som LT15, sammenlikninga i vekt mellom boggien 160.10-10 (elektrisk drift) og 160.10-20 (hydrostatisk) vil være relevant for denne studien. Boggiene har samme diameter på hjul og akselavstand som LT15 og tallene anses dermed som overførbare.

Tabell 12: Forskjell mellom hydrostatiske og elektriske bogier

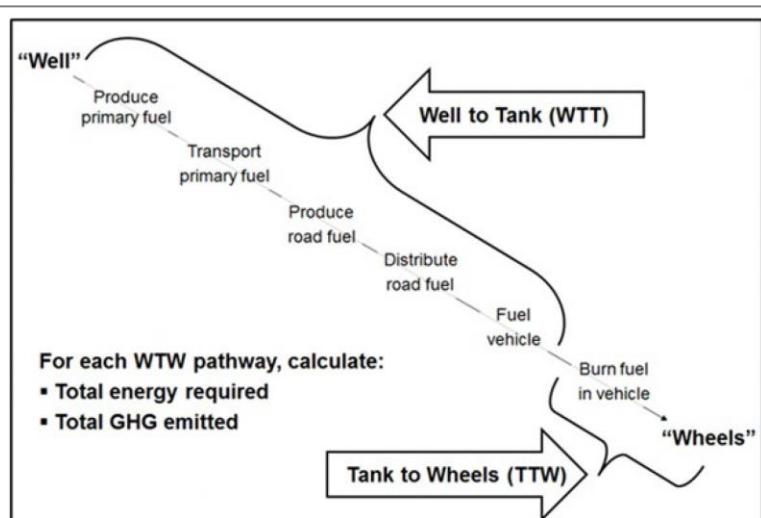
Modell	160.1-10	160-1.20	Forskjell	225.1-10	225-1.20	Forskjell
Fremdrift	Elektrisk	Hydrostatisk		Elektrisk	Hydrostatisk	
Nominelt akseltrykk [t]	12-16	12-16		18-22,5	18-22,5	
Maks akseltrykk [t]	18	18		25	25	
Ytelse per hjulsett [kW]	350	300	225	600	375	225
Største hastighet [km/h]	120	80	40	120	80	40
Vekt [tonn]	9,9	8,6	1,3	12,3	9,8	2,5

Bytte av bogier vil dermed gi en brutto vektkøtning på 2,6 tonn.

3.2.5 CO₂ utslippsreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner [7]

Rapporten utarbeidet av jernbanedirektoratet ser i hovedsak strategisk på samme tema som denne rapporten, med fokus på klimagassutslipp.

	Energieffektivitet	
	Forsyningkjeden	Virkningsgrad kjøretøy
Helbatteri	8	8
Standard KL	10	10
Dele-el	9	9
H2	4	6
Biogass	2	1
Biodiesel	1	2
Diesel (ref)	3	2



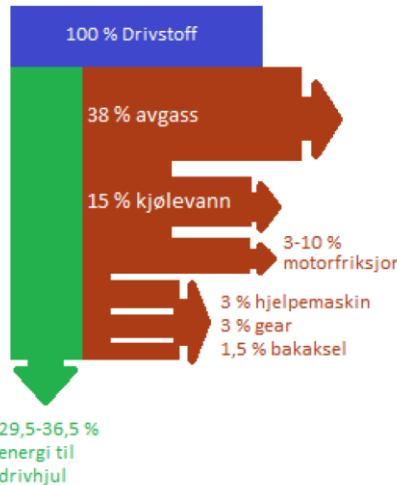
Figur 6. NULLFIB1 energieffektivitet.

Figur 5. EU 2016 [3]

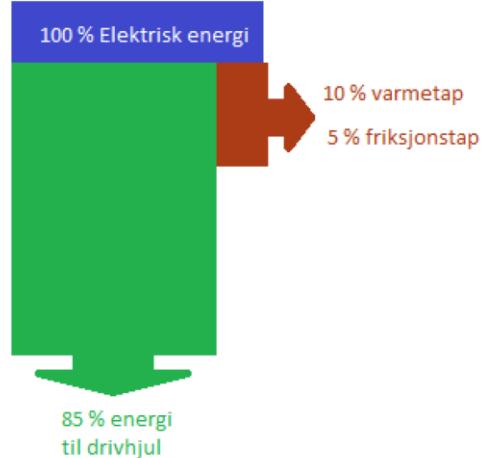
Figur 13: Utsnitt av figurer fra [7]

- Ca. 80 % av utslippene skjer på elektrifisertbane
- Rekkevidde på 200 km mulig med ombygging (vårt prosjekt)
- Foreslår å heterogenisere maskinparken, og gå fra få, komplekse maskiner, til mer spesialiserte maskiner. Dette da store deler av oppgavene til for eksempel en LT er «lette» så kan man heller bruke egne maskiner for de «tyngste» oppgavene.
- Energieffektiviteten fra produksjon til forbruk er:

- 81 % for batteri-elektrisk drift
- 29-36 % for dieseldrift⁹



Figur 7. Virkningsgrad dieselmotor



Figur 8. Virkningsgrad batteridrift

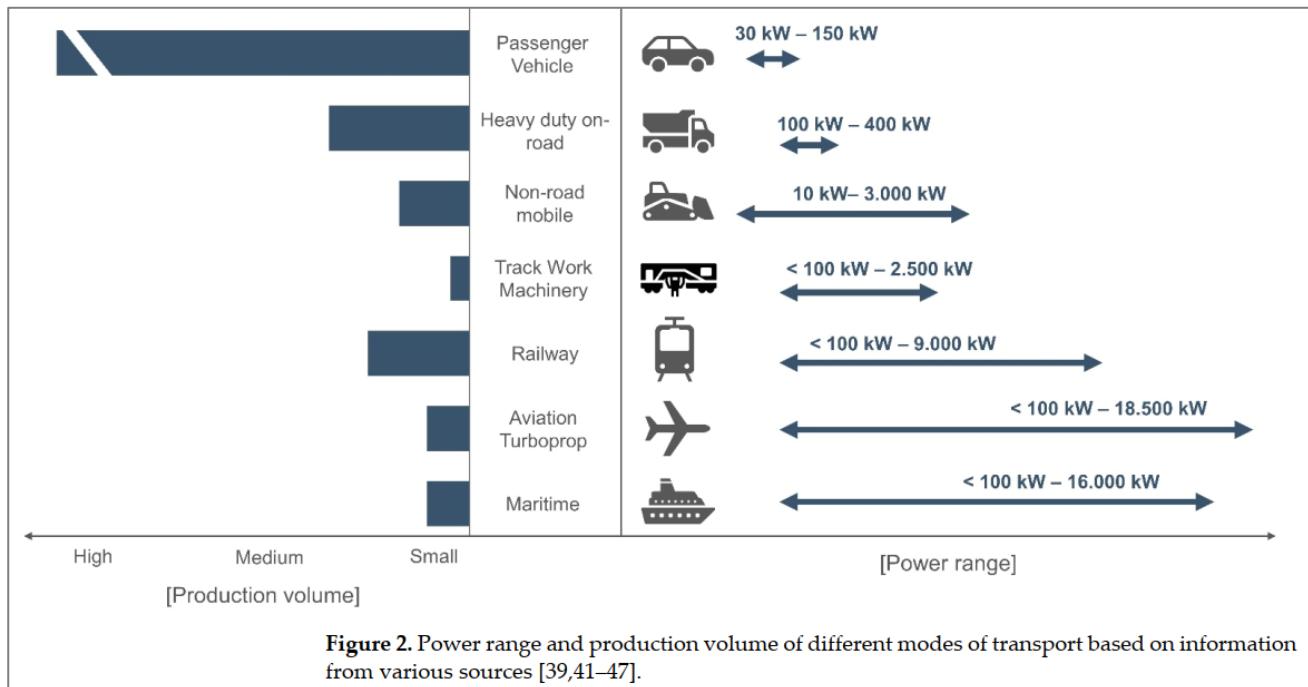
Figur 14: Utsnitt fra [7]

Det er også vist tekniske løsninger for lading og gitt anslag for vekt av komponenter:

- Lading uten banestrøm/KL: 6,6 tonn ved 400 kWh kapasitet
 - 1 tonn DC/DC omformer
 - 2*0,5 tonn for traksjonsmotorer
 - 0,5 tonn tilkobling til 400 V/1000 V
 - 4,6 tonn for batterier
- Lading via banestrøm/KL: 10 tonn ved 400 kWh kapasitet
 - Komponentene over
 - 0,5 tonn høyspentkomponenter
 - 1,5 hovedtransformator
 - 1,5 tonn likeretter
- Lading fra stasjonær batteribank
 - Som uten banestrøm
- Batteribyte/batteribank
 - Vil kreve separasjon av systemer slik at det er et «last mile»/hjelpebatterisystem i tillegg til traksjon/batteriet.

⁹ Med hydrostatisk drivlinje blir dette tallet mer usikkert.

3.2.6 Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work Machinery [8]



Figur 15: Utsnitt fra [8]

Her anbefales det batteridrift for alle maskiner med energibehov under 400 kWh og hydrogendrift for maskiner med energibehov over 800 kWh. Det er også gjort en litteraturstudie og markedskartlegging av tilgjengelige maskiner.

3.3 Markedskartlegging

De fleste aktører på markedet jobber med en dreining mot bærekraftige energibærere, og utvikling pågår for å utarbeide alternative energikilder som kan matche kapasiteten til dieselmotorene. Det leveres i dag både batterielektrisk- og batteri-diesel-hybrider, men overvekten av kjøretøy med alternative energikilder drives av brenselceller (hydrogengass). Se Tabell 13 med eksempler på kjøretøy som benytter annen energi enn fra diesel.

Tabell 13: Leverandører og kjøretøy med annen drivlinje enn kun diesel eller elektrisk.

Leverandør	Modell	Drivlinje	Batterikapasitet
Linsinger Maschinenbau Gesellschaft	MG11 Hydrogen	Brenselcelle (hydrogen)	
PESA Bydgoszcz SA	SM42-6Dn	Brenselcelle (hydrogen)	
Zephir Railroad Shunting Locomotives	LOK 20.150 E	Batteri	
Stadler	Flirt H2	Brenselcelle (hydrogen)	
Stadler	Flirt Trimodal	Batteri, diesel-elektrisk	
Stadler	Flirt Akku	Batteri-elektrisk	
Stadler	EURO9000	Elektrisk, diesel, batteri	
Siemens	Mireo Plus H	Brenselcelle (hydrogen)	
Siemens	Mireo Plus B	Batteri, elektrisk	
Alstom	Traxx	Batteri, elektrisk	
Express Services Shunting Locomotive	ES3000	Batteri	90 kW, 220 kWh
Railcare	Battery VACuum Excavator ¹⁰	Batteri	1100 kWh

Brenselceller (hydrogen) er ikke en del av denne mulighetsstudien. Det kan også antas å være et dyrt alternativ for ombygging i liten skala, da det utover bytte av drivlinjen kreves egen infrastruktur for fylling av hydrogen for å muliggjøre tanking av kjøretøyet.

Etter aktører i markedet å dømme, har utviklingen av kjøretøy med batteri-elektrisk drift et stykke igjen før alternativer med tilsvarende kapasitet som diesel er klare til kommersiell bruk i jernbanen.

En antydning på utviklingsretningen er at enkelte leverandører har utviklet skiftelok som kun går på batteri, men for øyeblikket har de et arbeidsområde som er begrenset til korte avstander. RailCare har også utviklet en batteridrevet pukksuger. Denne har

¹⁰ https://www.railcare.se/wp-content/uploads/2020/11/MPV_screen_v3-1.pdf

batterikapasitet i samme størrelsesordenen som denne mulighetsstudien og har en marsfart på 30-40 km/h.

Det er finnes eksempler på kjøretøy som har blitt bygget om for å redusere utslippene fra dieselmotorer. Blant annet kjøretøyprodusenten TesMec, som har levert LT15, har prosjekter hvor det er laget både hybridløsninger og også kjøretøy med kun batteridrift. Det batteridrevne kjøretøyet er en arbeidsvogn som kan transportere materialer med en plattform som kan heves og senkes. Kjøretøyet har en batterikapasitet på 70 kWh og kan kjøres på batteri med en hastighet på 9 km/h. Både alternativene med hybridløsningene og rent batteridrevne kjøretøy bruker batteri under utførelsen av oppgavene på infrastrukturen og ikke under transport til/fra arbeidsplassen, da de kun har en kjøretid på to timer med batteristrøm.

Se tabellen nedenfor for noen eksempler på kjøretøymodeller fra TesMec.

Tabell 14: Modeller fra TesMec med rene batteri- og diesel-batteri-drivlinjer.

Leverandør	Modell	Drivlinje	Ytelse motor og batterikapasitet
Tesmec	OCPD001-e	Diesel - Batteri	180 kW/ 120 kWh
Tesmec	OCPD002-e	Diesel - Batteri	180 kW/ 120 kWh
Tesmec	APLA100-e	Batteri	70 kWh

Utenom jernbanesektoren er det flere interessante kjøretøy med batteri-drivlinje, for eksempel arbeidsmaskiner i gruveindustrien og til bruk i containerhavner. Disse har ytelseskrav i samme størrelsesorden som banens lastetraktorer, selv om normal drift av LT15 vil sette høyere krav, som vist i senere kapitler.

Tabell 15: Relevante leverandører og kjøretøy i andre sektorer enn jernbanen.

Leverandør	Modell	Drivlinje	Ytelse motor og batterikapasitet
Epiroc	Minetruck MT42 Battery	Batteri	2 x 200 kW/ 375 kWh
Epiroc	Scooptram ST14 Battery	Batteri	200 kW/ 300 kWh
Volvo	FE Eletric	Batteri	225 kW/ 265 kWh
Kalmar/Cargotec	Reachstacker	Batteri	182 kW/ 245-587 kWh

De batteridrevne kjøretøyene er bygget i samarbeid med aktører fra energi- og elkraftindustrien. Både aktørene ABB og Bosch Rexroth har referanseprosjekter der kjøretøy bygges med batteridrift. De fleste komponentene som kreves for en ombygging til batteridrift er standardprodukter på markedet, som for eksempel transformatorer, batteriladere og likerettere. Disse produktene er det flere leverandører av. Et aspekt som gjør jernbanen unik er at banestrommen har en frekvens på 16,7 Hz og ikke 50 Hz som de fleste andre strømanlegg har. Det betyr at dersom kjøretøyet skal lades fra kontaktledningsanlegget er utvalget av likerettere og andre komponenter mer begrenset, og det må benyttes komponenter spesielt utviklet for jernbanen, i første omgang i det minste for å omvandle kjørestrømsspenningen til likespenning.

Den begrensende faktoren er først og fremst batteriet som kreves for å oppnå en kapasitet og rekkevidde mellom lademuligheter som gjør det til et rimelig alternativ mot dagens dieseldrift.

3.3.1 Intervju med relevante systemintegratorer for ombygging

I løpet av mulighetsstudien er det gjennomført intervjuer med utvalgte aktører for å kartlegge realismen i en ombygging av et slikt kjøretøy til batterielektrisk fremdrift. I dette kapittelet er svarene mottatt fra disse intervjuene kort beskrevet. Prosjektet har også vært i dialog med en til aktør, (Nordic Booster) som mener de kan løse dette med sine leverandører, men vi har ikke mottatt noe mer detaljert svar i skrivende stund.

Bertil og Steen Power Solutions (BOS)

Det er utført et intervju av BOS i Bergen ved Eirik Nesse hvorvidt de innehar teknisk kompetanse til å kunne utføre en ombygging som systemintegrator av et batterielektrisk fremdriftssystem på LT15.

1. Har dere erfaring fra lignende prosjekter?
 - a. Bos oppgir at de har erfaring fra ombygging innenfor maritimt med tanke på effekter og type arkitektur. Har levert en del nybygg. Ikke mange har vært ombygg enda. På maritimt er utfordringene alltid å få tilpasset utstyret til det spesifikke objektet noe som vil være lignende for en ombygging av LT15.
2. Innehar dere teknisk kompetanse til å eventuelt gjennomføre et slikt ombyggingsprosjekt?
 - a. BOS ytrer sin interesse for et eventuelt slikt prosjekt.
3. Har dere personell som kan gjøre en slik fullstendig systemintegrasjon på lastetraktor? (Bane NORs gule arbeidsmaskiner)
 - a. De informerer om at de har kompetent personell som kan gjøre en slik systemintegrasjon.
4. Hvordan kunne en slik type ombygging foregått?
 - a. De samarbeider med et firma i Stavanger (Anlegg og marineservice) som gjør service på Detroit diesel motorer til noen av Bane NORs gule arbeidsmaskiner. MTU-motorer på Green Cargo (goods). Konkret vil de ta ut dieselmotor og setter inn elektromotor på samme sted. Dimensjonering av elektromotor vil være ut fra moment. Type Wacon-drive som driver elektromotor. Setter opp et DC-grid med fordelingstavle som er koblet opp mot batteriet eller et 50 Hz 400 V system men med converter opp mot batteriet. Batteriene vil kunne deles opp slik at ikke alt må sentraliseres. På batterier som har 0,7-1C så veier de typisk mellom 6-8 kg/kWh. Disse er utviklet for buss og truck. I dette tilfellet mener BOS det vil være fornuftig å lade det med en industristandard som CCS2. MCS (Megawatt Charging System) er også et alternativ ifølge BOS. Må ha trafo for overføring fra DC-mikrogrid til det som kranen trenger. Trafo veier rundt 225 kg om den er 50 kVA. Om kran og annet tilleggsutstyr kjøres på DC kan man i så fall bruke DC/DC converter og evt. mindre trafo til andre ting, for eksempel 10 kVA og man vil kunne spare vekt, da den er 80 kg. For å gjøre ombyggingen vil det være behov for krankapasitet til å løfte om bord komponenter. De sier at det vil være tilstrekkelig med et Bane NOR verksted så lenge det er en tilpasset kran tilgjengelig der. De sier at det foreløpig er uvisst med tanke på behov for sveising og hva man trenger av utstyr og om det er behov for å sveise etc. Driver kan plasseres i et skap som står et sted. Om man skal ha vannkjølt batteri og/eller elektromotor så må man legge opp kjølekrets med vann til luft varmeverksler. Alternativt kan det være luftkjølt. Innenfor maritimt er det tradisjon med vannkjølte batterier siden vann er lett

tilgjengelig. De sier at dette nok er litt mer komplisert på land. Vannkjølt utstyr er som regel mer kompakt ettersom man tar mer effektivt ut varmen fra utstyret. Konkret er Bergen, i utgangspunktet enklest for BOS med tanke på utførelse av ombyggingen, men Bergen eller Oslo er ikke noe problem. De estimerer kanskje et halvt års leveringstid på batterier og drives etc. Men ingeniørarbeidet kan igangsettes snarlig.

ABB/Hitachi Energy

1. Har dere erfaring fra lignende prosjekter?
 - a. ABB har erfaring fra ombygging og elektrifisering av kjøretøy, både innen jernbanesektoren, men også i andre bransjer som lastebiler og maskiner i gruveindustrien.
2. Innehar dere teknisk kompetanse til å eventuelt gjennomføre et slikt ombyggingsprosjekt?
 - a. ABB/Hitachi Energy viser interesse for prosjektet og kan sammen levere de komponentene som er nødvendige, uavhengig av hvilken ladeløsning som velges, da de i dag er leverandører av komponenter til jernbanen og har utstyr som kan håndtere 16,7 Hz.
3. Har dere personell som kan gjøre en slik fullstendig systemintegrasjon på lastetraktor? (Bane NORs gule arbeidsmaskiner)
 - a. Internt i begge organisasjonene er det ansatte innen både utvikling, systemintegrasjon og verkstedmedarbeidere.
4. Hvordan kunne en slik type ombygging foregått?
 - a. Under møter ble det gjort gjennomganger av konsepter for hvordan den elektrifiserte konstruksjonen kunne se ut. Komponenter fra det interne sortimentet har blitt presentert med både elektriske motorer og vekselretterere for styring av motorene, men også likeretttere og batteriladere.

Et mulig prosjektoppsett er ikke diskutert under mulighetsstudien, så et neste steg i prosjektet må initieres av et oppstartsmøte for å bli enige om rammeverket, men ABB/Hitachi har både stab og et sortiment av komponenter for en totalløsning som gir gode muligheter for samarbeid i et neste steg.

Bosch Rexroth

Det er gjennomført et intervju med representanter for Bosch Rexroth hvorvidt de innehar teknisk kompetanse til å kunne utføre en ombygging som systemintegrator av et batterielektrisk fremdriftssystem på LT15.

1. Har dere erfaring fra lignende prosjekter?
 - a. Bosch Rexroth har erfaring fra lignende prosjekter tidligere, ikke gjennom en helhetlig satsing men som leverandør av komponenter og kabling og som støtte under byggearbeid. Eksempler nevnt er bl.a. Sennebogen, som har arbeidsmaskiner i treindustrien¹¹ samt arbeidsmaskiner som brukes i havnelogistikk i Kalmar¹².
2. Innehar dere teknisk kompetanse til å eventuelt gjennomføre et slikt ombyggingsprosjekt?
 - a. Det er interesse for å delta i diskusjoner om en videreføring av et pilotprosjekt for å bygge om et kjøretøy til en elektrisk drivlinje.
3. Har dere personell som kan gjøre en slik fullstendig systemintegrasjon på lastetraktor? (Bane NORs gule arbeidsmaskiner)
 - a. Bosch Rexroth har eksperter innen konstruksjon, systemintegrasjon samt verkstedpersonale. De har også et partnernettverk som muligens kan brukes dersom det blir tatt en beslutning om å fortsette å samarbeide med dem for å få inn den kompetansen som kan kreves. Bosch Rexroth kan levere de fleste komponentene som kreves for å bygge en elektrifisert struktur. I dag har de komponenter som likerettere, vekselrettere, elektromotorer, kabling og styring for elektronikk som i stor grad kan brukes til en videreføring av dette prosjektet. Selv har de ikke transformator eller frekvensomformer til å håndtere 16,7 Hz, dersom en slik ladeløsning velges, men det må kjøpes inn hos en annen aktør.
4. Hvordan kunne en slik type ombygging foregått?
 - a. Dersom det velges en ladeløsning med via kontaktledning, vil det kreves et samarbeid med flere aktører da Bosch Rexroth i dag spesialiserer seg på andre bransjer enn jernbanen og derfor ikke har komponenter til å håndtere 15 kV og 16,7 Hz. Andre deler av konstruksjonen kan realiseres med komponenter som i dag finnes i produktporteføljen. Hvis en løsning velges for å kjøre på verkstedstrømforsyning 400 V AC, er komponentene for å administrere løsningen tilgjengelig i serien. Arbeidsideer om hvordan løsningen kan se ut har vært diskutert og ved å la en likeretter lage en mellomspenning (DC) som batteri og omformer kobles til elmotorene, er det gode muligheter for å bygge en løsning med produkter fra Bosch Rexroth.

¹¹ [SENNEBOGEN develops Pick & Carry material handler with electric travel drive - SENNEBOGEN Maschinenfabrik GmbH](#)

¹² [Kalmar to collaborate with Bosch Rexroth to develop fully electric versions of its reachstacker and heavy forklift solutions | Kalmarglobal](#)

3.3.2 Dialog med Sporveien om tidligere anskaffelse

Sporveien skulle anskaffe batterielektrisk trikk etter krav fra Oslo kommune for 2 år siden. De endte opp med å gå for diesel. Prosjektet har vært nysgjerrig på årsaken her og har derfor vært i kontakt med relevant personell som har vært involvert, i all hovedsak seniorkonsulent i RailAdvice AS Ingmar Hemsen.

Oppsummert var hovedårsaken til at prosjektet ikke ble realisert at Sporveien har to prinsipper som kom i konflikt i dette prosjektet.

1. Sporveien skal ikke drive utvikling av prototyper og tekniske løsninger
2. Sporveien skal bli utslippsfri så fort som mulig.

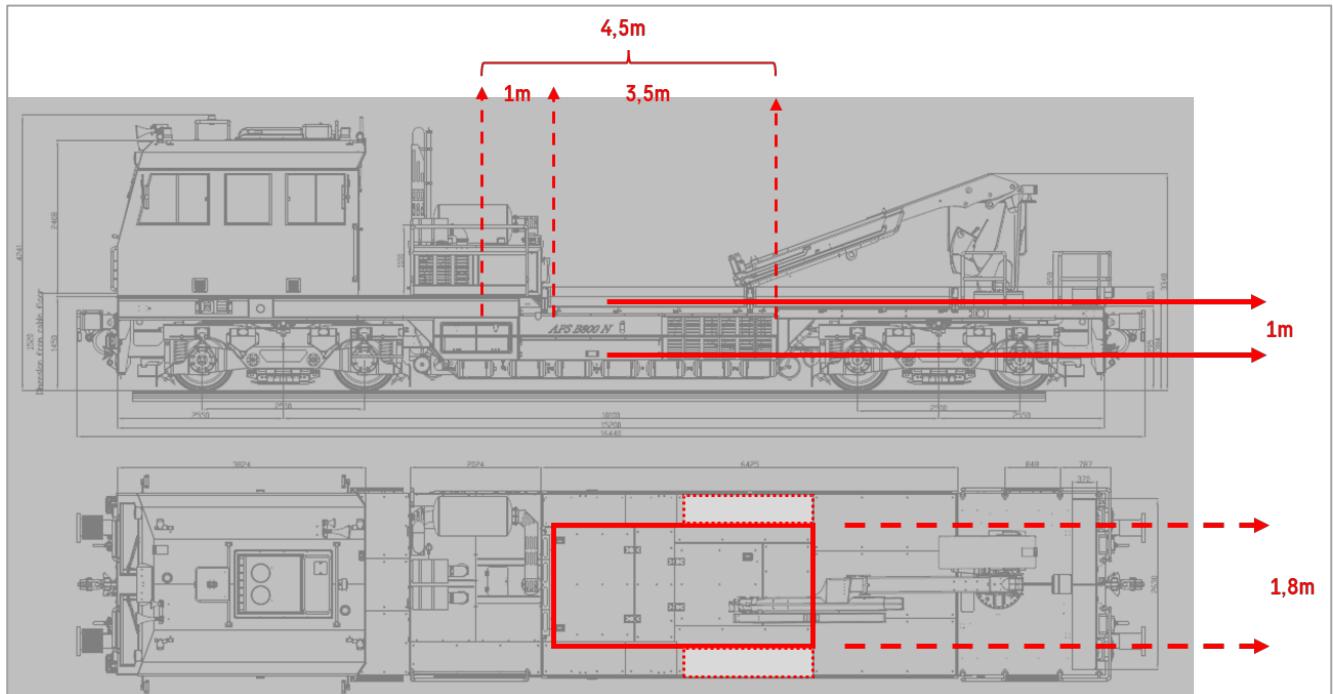
Lastetraktorprosjektet gikk ut i markedet sommeren 2018 med en RFI og fikk som svar at noen av leverandørene mente de kunne levere batterielektriske maskiner med moderne batteriteknologi. Men ingen hadde relevante leveranser av dette. P&T hadde kommet lengst med sin e3-teknologi som har batterier, dieselmotor og strømavtager for jernbane og trengte en god del utvikling for en T-baneløsning for Sporveien. Spørsmålet om elektrisk versus diesel ble diskutert på toppnivå i Sporveien før man til slutt valgte å gå for den tryggeste løsningen med dieselmaskiner som kunne driftes på HV0100.

Prosjektet og linjen i Sporveien ønsket ingen hybridløsning med en dieseldrivlinje i tillegg. Dette ble ansett som unødig komplisert ettersom de regnet ut at et batteri i størrelsesorden 200 kWh burde holde for de fleste formål på T-banen, særlig med mulighet for lading på eller nær arbeidsområdet.

I prinsippet burde Sporveien være en ideell case med hurtiglading fra 750V DC strømskinne over hele nettet og korte kjøreavstander. Det er noen sikkerhetsmomenter, bla annet løsninger for arbeid rundt potensielt spenningssatte strømsko og batteribrann i tunnel.

3.4 Kartlegging av plass og vekt

Mye av utrustningen for drivlinja er plassert i motorrommet i midten av lastetraktoren. Ved befaring på driftsbasen på Hamar 14.09.2022 ble motorrommet innmålt til å være ca. 4,5 m langt, 1,8 m bredt og 1,07 m høyt. Det gir et totalt volum på ca. 8,67 m³.



Figur 16: Innmålt motorrom på LT15

Dieselmotoren er montert foran i motorrommet. Fra dieselmotoren går en kardangaksel til girkoblingen til hydraulikkpumpene. Fra pumpene går det slanger som forsyner de ulike hydraulikkmotorene med olje. Hydraulikkmotorene som styrer kjøringen av kjøretøyet, er montert på boggen med to motorer på hver boggi. Hydraulikkmotorene for hjelpekraftsystemene (AC i førerhus, kompressor, kran og mer) er montert i motorrommet, men de har betydelig mindre fysisk utstrekning enn motorene som gir kjøretøyet fremdrift. Dieselmotoren og det hydrauliske utstyret har to separate kjølesystemer. I oppsummeringen av redusert vekt er kjølevæskene tatt med, men komponentene generelt anses å være ubetydelige i sammenheng når kjølevæskene er tappet ut av systemene.

Ved omlegging fra diesel til batteridrift vil også de tre tankene for diesel og minst en av tankene med hydraulikkolje både kunne tømmes og fjernes. Det vil si en mengde på 1200 liter diesel og 800 liter hydraulikkolje, som dermed kan frigjøre et volum på opptil 2 m³.

3.4.1 Redusert vekt

For å få en oversikt over totalvekten som kan reduseres ved demontering av dagens drivlinje, er komponenter undersøkt ved å se på tegninger og ved å kontakte ulike leverandører av de ulike delsystemene.

Det er gjort estimat for slanger og slangekoblinger. Slangene som brukes er forsterket og en referanse er hentet fra en produsent¹³ hvor en slange som måler 1 og 1/4 tomme har en vekt på 1,5 kg/m. Anslaget som ligger til grunn for beregningen er at det er 25 slanger á 3 m i motorrommet og at det er 10 slanger på 3 m hver til de respektive bogiene. I tillegg er antall slangekoblinger estimert til 200 og de med en referanse på 0,5 kg/stk¹⁴. Dette gir en totalvekt på 300 kg for slanger og slangekoblinger.

Totalvekt med inndeling i komponenter er rapportert i tabellen nedenfor.

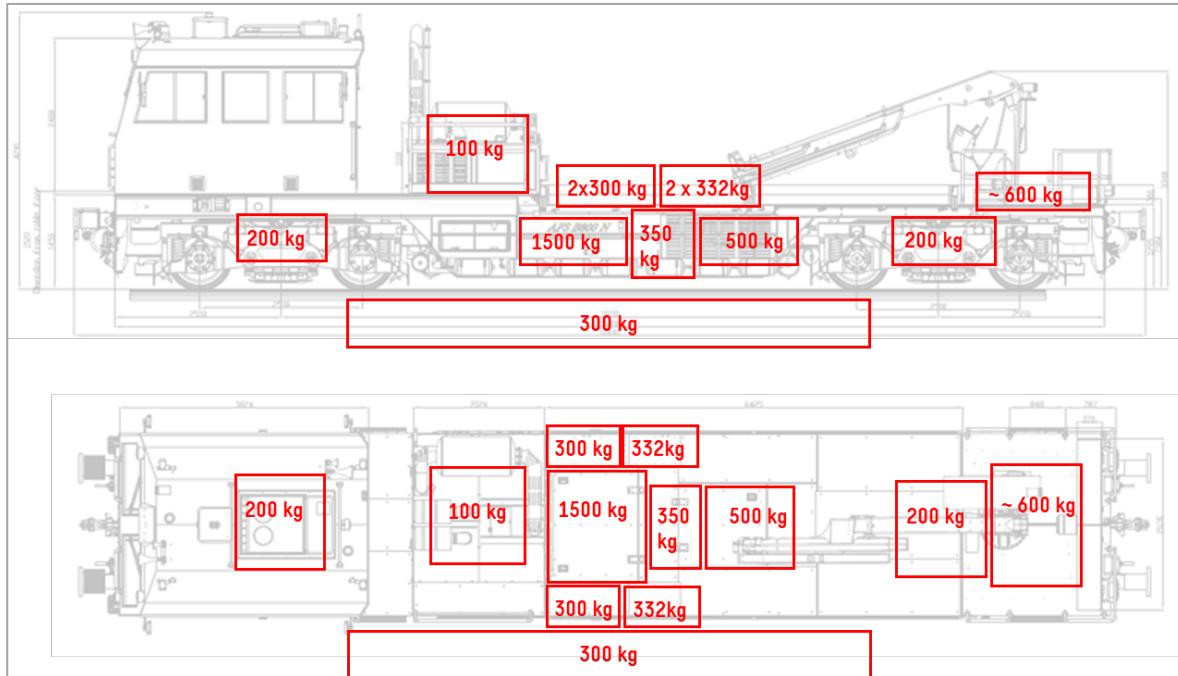
Tabell 16: Sammenstilling av vekt for dagens drivlinje

Komponent	Vekt	Produsent
Dieselmotor	1500 kg	Iveco
Hydraulikkpumper og hydrauliske motorer (i motorrommet)	500 kg	Bosch Rexroth
Hydrauliske motorer for traksjon (på boggi)	400kg (4 x 100kg)	Bosch Rexroth
Kobling dieselmotor – hydraulikkpumper	350 kg	Twindisc
Estimat slanger og slangekoblinger	300 kg	-
Motorkjøling	100 kg (kjøleveske)	Iveco/Oesse
Webasto 23 kW	24 kg	Webasto
Hydraulolja 2 x 400l	664kg (2 x 332kg)	-
Dieselolja 2x300l + 600l	1200 kg	-
Summering totalvikt drivlinia:	<u>5 038 kg</u>	

Se Figur 16 for en oversikt over vektfordelingen av dagens utrustning for den diesel-hydrauliske driften.

¹³ https://www.hydroscand.se/se_se/produkt/kappaflex-hydraulslang-2-stal-kompakt-rock-1105-63

¹⁴ [Presskoppling, rak G-gänga UF, 60° tätningskona. Stål - Kopplingar - Presskopplingar och tillbehör | Hydroscand](http://www.hydroscand.se/se/se/produkt/kappaflex-hydraulslang-2-stal-kompakt-rock-1105-63)



Figur 17: Skisse over vektfordelingen av dagens drivlinje.

3.5 Konsept for ombordutrustning

Mulighetsstudien har undersøkt flere alternativer for lading av batteriene. De ulike alternativene krever ulike komponenter for å lade batteriet. Felles for alle løsningene er at det lages en mellomspenning (DC) som så mater både batteriet og omformerne som styrer elmotorene. Anbefalingen er også å ha en inverter for hver elmotor og hjulaksel for å gjøre løsningen mer fleksibel. Ved å ha en inverter for flere parallellekoblede elektriske motorer kan motorene trekke ulikt avhengig av slitasjen på hjulene, da denne kan være ulik og hjuldiamentene dermed er forskjellig mellom hjulparene.

Ladealternativene er beskrevet i detalj i senere kapitler, og denne delen tar for seg ulike konsepter i komponenter som kreves om bord for hvert alternativ.

Elektriske motorer må detaljeres ytterligere i et neste trinn, men for å få kraften som kreves for å drive kjøretøyet, vil det være nødvendig med motorer i størrelsesområdet 250 kg/stk. Mindre motorer kan brukes til hjelpekraftsystemene.

3.5.1 Lading via kontaktledning

Kontaktledningsanlegget i Norge har en spenning på 15 kV AC med jernbanestandardisert frekvens på 16,7 Hz. Skal spenningen overføres til lastetraktoren, må den utstyres med både en transformator for å få ned spenningen og en inverter, noe som gir en større egenvekt på kjøretøyet. En transformator for å håndtere 15 kV veier ca. 3000 kg. En likeretter for å konvertere strømmen til egnet for batteriladeren veier anslagsvis 1500 kg dersom det skal være mulig å kjøre mens lading pågår. Hvis kun lading uten kjøring skal benyttes, kan likeretteren reduseres litt i størrelse til ca. 1000 kg. En transformator som takler 15 kV spenning vil kreve kjøling, som også tilfører utstyr og ekstra vekt.

Lading via kjøreledning vil gi kjøretøyets tyngste nettovekt. Utenom batterier er kjøretøyets innebygde utstyr beregnet til å være rundt 7 tonn.

3.5.2 Lading fra ekstern kilde

3.5.2.1 Togvarmepost, 400-1000 V

Det er en godt utbygd infrastruktur for togvarmeposter, som vil gjøre det mulig å bruke dem som ladestasjoner. Se kapittel 5.1 for mer informasjon om infrastrukturen.

Togvarmepostene finnes i tre ulike varianter med ulik spenning og frekvens; 400 V 50 Hz, 1000 V 16,7 Hz, men oftest som 1000 V 50 Hz. For håndtering av en spenning på 400-1000 V kan utstyret om bord reduseres i størrelse sammenlignet med lading via kontaktledningen, og det gjør det dermed mulig å redusere kjøretøyets egenvekt med en mindre transformator.

Dersom det benyttes en spenning med frekvens på 50 Hz, finnes det mange standardiserte likeretttere og batteriladere på markedet for ulike bransjer som kan brukes. Skal det benyttes en spenning på 16,7 Hz, kreves det i et første trinn en konvertering av frekvensen.

For håndtering av spenningsnivåer på 400-1000V er det estimert behov for likeretttere på 100 kg. Et frekvensen 16,7 Hz vil det også kreves frekvensomformer, men benyttes frekvensen 50 Hz til lading finnes det i dag ferdige produkter på markedet som leverer ønsket funksjonalitet.

Lading via togvarmepost vil muliggjøre et lettare utstyr om bord på rundt 2-2,5 tonn for komponentene, eksklusiv batterier.

3.5.2.2 Verkstedsstrømforsyning, 400 V

Det er også mulige å bruke verkstedstrømforsyning eller gjennom kontakter tilsvarende de elbiler bruker i dag. Kontakter som enten CCS2 eller Type-2 bør også kunne være brukbare for en arbeidsmaskin på jernbanen. En spenning på 400 V er vanlig og de fleste aktører har komponenter i standardsortimentet for å håndtere retting og batterilading.

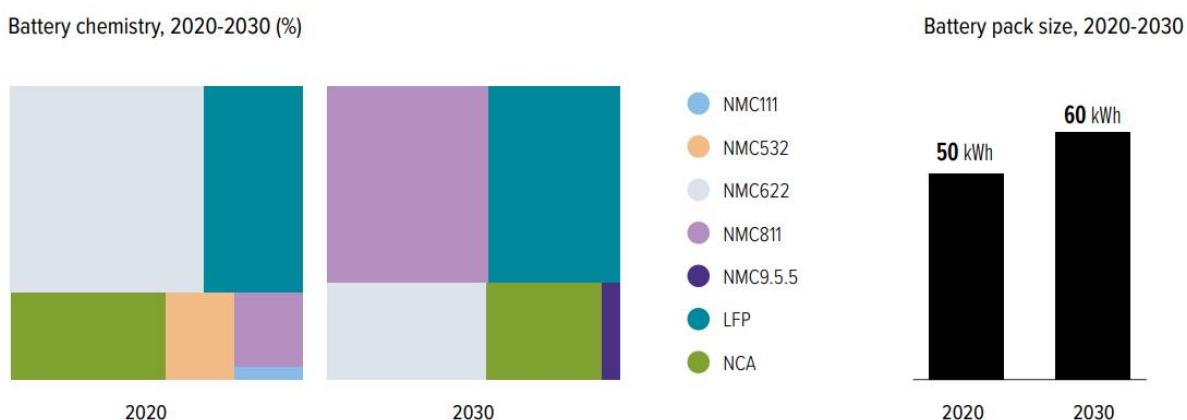
4. Match-up av batterier

Denne delen av rapporten tar for seg detaljer knyttet til potensielle batterier, samt ser på batteridimensjonering. Endelig batteridimensjoneringer blir presentert i kapittel 6 for det samlede systemet etter at vekter for de ulike ladeløsningene er inkludert på kjøretøyet.

4.1 Batterikjemier

Det investeres store midler globalt for å utvikle batterier med batterikjemier tilpasset ulike formål. I de aller fleste batteriene innenfor mobilitetsformål er grunnstoffet lithium en essensiell komponent. De øvrige grunnstoffene i batteriene gir dem ulike egenskaper med hensyn på blant annet vekt, lading- og utladningseffekt (c-rate) og levetid. Et hovedtrekk i utviklingen er at produsentene gjør tiltak for å redusere mengden kobolt i batteriene delvis grunnet problematiske arbeidsforhold i de kongolesiske gruvene. Skiftet går fra å redusere mengden i NMC-batterier (nikkel-mangan-koboltoksid) fra dagens 622, dvs. 6 deler nikkel, 2 deler mangan og 2 deler kobolt, til 811 og 9.5.5. Videre går flere aktører helt bort fra bruk av kobolt ved å gå over til LFP-batterier (litium-jern-fosfat).

I dette prosjektet vil høyenergibatterier med lav spesifikk vekt være det viktigste for å kunne oppnå en batterielektrisk lastetraktor som kan være en best mulig erstatning for den eksisterende drivlinjen. Det legges til grunn bruk av NMC eller LFP-batterier i videre beregninger med hensyn på energitettethet.



Figur 18: Viser dagens fordeling av batterikjemier med utgangspunkt i elektriske kjøretøy, mer spesifikt personbiler.¹⁵

¹⁵ KU Leuven. April 2022. *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*. Hentet fra følgende nettside 30.11.2022: <https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>

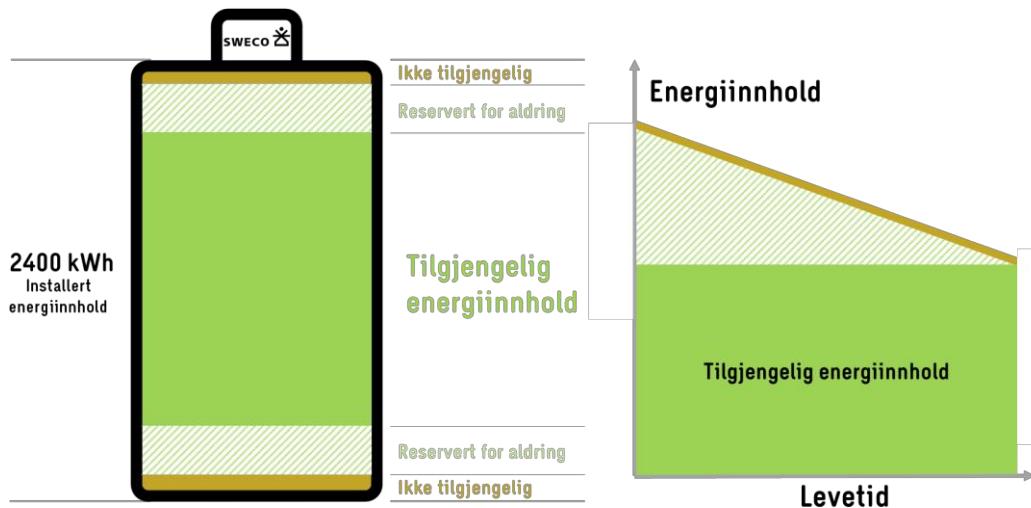
4.2 Dimensjonering av batteristørrelse

Det er mange måter å dimensjonere batteristørrelsen på lastetraktoren på. Det sees, etter kartleggingen av LT15, at volum ikke er en begrensende faktor.

Hovedbegrensningen for batteristørrelsen er i utgangspunktet knyttet til vekt.

Lastetraktoren har med den diesel-hydrauliske drivlinjen i dag en nytTELAST på 10 tonn. Egenvekten til traktor med eksisterende drivlinje er 54 tonn som gir en maksvekt på plan lik 64 tonn. Ved å fjerne den diesel-hydrauliske drivlinjen frigjøres det 5 tonn som totalt gir et spillerom på 15 tonn.

Det er grunnleggende batteridimensjoneringen må hensynta at batteriet degraderes over tid. Det vil si at man må dimensjonere et ekstra energiinnhold til batteriet ut fra ønsket levetid slik at tilgjengelig energiinnhold i batteriet vil være likt både ved oppstart og etter eksempelvis 10 år, mens totalt energiinnhold vil reduseres over tid. Det er typisk at batteriet antas som utgått når kapasiteten er 80% av opprinnelig installert kapasitet. Batterier sin degradering betegnes enten ved hjelp av kalenderlevetid eller antall fulle sykluser. Ettersom litiumbatterier har svært mange sykluser er det som regel kalenderlevetiden som er førende med tanke på levetid.



Figur 19: Prinsippskisse for batteridimensjonering.

Det er lagt til grunn en økning i batteristørrelse på 20% som er energiinnholdet reservert for aldring i alle de følgende beregningene av batteristørrelse. Følgende utvikling i gravimetrisk energitetthet er lagt til grunn for beregningene.

Tabell 17: Viser energitetthet og spesifikk vekt som forventes for batteripakker for LIB fremover.¹⁶

År	2020	2025	2030	2035	2040
Energitetthet [Wh/kg]	184	232	280	328	376
Spesifikk vekt [kg/kWh]	5,4	4,3	3,6	3,0	2,7

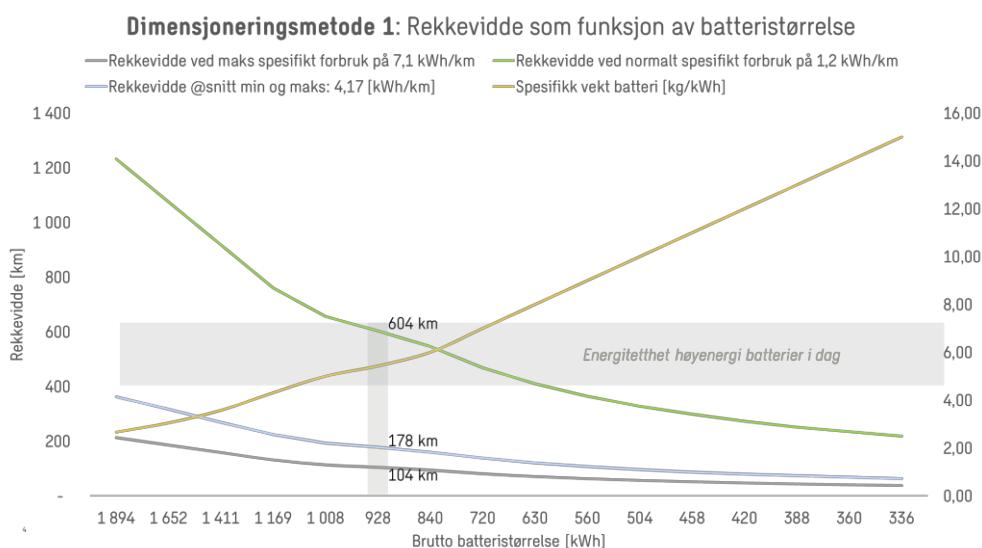
¹⁶ TNO. Oktober 2022. Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe.

4.2.1 Metode 1: Ingen redusert nyttelast

Om man skal ha ingen redusert sammenlignet med dagens løsning vil ikke batteriet kunne veie mer enn eksisterende drivlinje på 5 tonn. Om man legger til grunn spesifikk vekt for batteri lik 5,43 kg/kWh (typisk dagens spesifikke vekt) vil man kunne få en batteristørrelse på 928 kWh på lastetraktoren. Ettersom man reserverer 20% av batterikapasitet for å hensynta aldring over 10 år vil den tilgjengelige energien i batteriet da være 742 kWh.

928 kWh brutto vil ved et spesifikt forbruk på 1,2 kWh/km gi en rekkevidde på 604 km. Rekkevidde med maks forbruk beregnet til 7,1 kWh/km vil da bli 104 km, mens det for et gjennomsnitt mellom disse, altså 4,17 kWh/km, vil gi en rekkevidde på 178 kilometer.

Merk at oppgitte rekkevidder og lignende her er før vekt for ombordkomponenter for gitt ladeløsning er inkludert. I kapittel 5 listes vektene for de ulike ladeløsningene opp, mens de sammenstilles i kapittel 6 og det gjøres en iterasjon av batteripakken etter at vekt fra ladeløsning er hensyntatt.



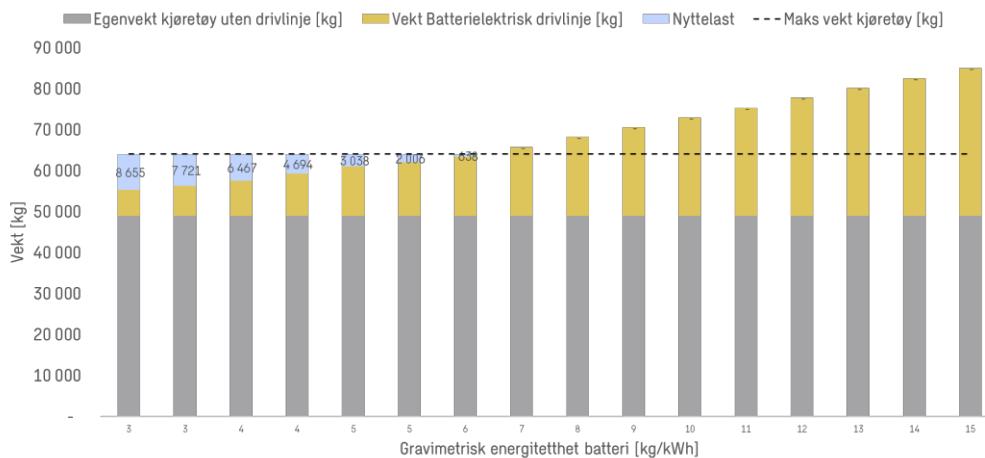
Figur 20: Y-akse viser rekkevidde som funksjon av batteristørrelse uten at man går på kompromiss med eksisterende nyttelast. Grønn soyle viser hvilke batteristørrelse som er lagt til grunn og tallene angir rekkevidde det gir. Sekundær y-akse viser den gravimetriske energitettheten (kg/kWh) som den gule linjen følger. Den blå liggende søylen viser typisk spenn for spesifikk vekt til dagens høyenergibatterier som typisk kan lades og utlades med 1C.

4.2.2 Metode 2 – Dimensjonering etter energiinnhold i dieseltank

Dieseltanker til fremdrift på lastetraktor er på 600 liter totalt. Dette tilsvarer et energiinnhold på 6 000 kWh. Ettersom virkningsgradene for den diesel-hydrauliske drivlinjen er betydelig lavere enn for batterielektrisk drivlinje vil det ikke være behov for å dimensjonere batteriet til 6 000 kWh. Virkningsgrad for dieselmotor er på rundt 30%, mens den er på rundt 90% for batteri- og elektromotor kombinert. Det antas ingen forskjell i virkningsgrad etter output på motor til hjul for diesel-hydraulisk drivlinje og en drivlinje med kun elektromotor. I praksis vil nok kraftoverføringen for elektromotor gi noe bedre virkningsgrad så en slik tilnærming er konservativ.

Med utgangspunkt i 6 000 kWh energiinnhold for diesel og en virkningsgrad på 30% er det ca. 1 800 kWh som går til traksjon om man ser bort fra virkningsgrader på akslinger og lignende ettersom de er antatt lik. For å komme frem til batteristørrelse kan man da ta utgangspunkt i 1 800 kWh som er energien som går til traksjon og regne seg bakover til brutto batteristørrelse nødvendig for å dekke samme transportbehov. Dette gir en batteristørrelse på 2 000 kWh. Deretter må det legges på 20% for å hensynta degradering over levetiden slik at brutto batteristørrelse er på totalt 2 400 kWh. På denne måten vil man ikke få noe redusert rekkevidde sammenlignet med diesel, men man vil tape ganske mye i nyttelast. I Figur 21 nedenfor sees det hvordan nyttelasten blir redusert ved å ta utgangspunkt i en slik måte å dimensjonere batteriet på. Ved en gravimetrisk energitetthet på 5 vil nyttelasten være på 3 038 kg, en reduksjon på 70% sammenlignet med nyttelast som den er i dag på 10 tonn. Rekkevidden vil være 1 560 km om man antar 1,2 kWh/km i spesifikt forbruk. Om man legger til grunn maks forbruk på 7,1 kWh/km vil rekkevidden være 270 km, mens den vil være 460 km ved å ta gjennomsnittsforbruket av min og maks lik 4,17 kWh/km. Ved gravimetrisk energitetthet estimert for 2040 på 2,66 kg/kWh vil nyttelasten kun reduseres med 13%.

Dimensjoningsmetode 2: Samlet vekt kjøretøy og reduksjon i nyttelast som funksjon av energitetthet batteri for batteri som erstatter tilsvarende energiinnhold til dieseltank



Figur 21: Viser samlet vekt kjøretøy med batteristørrelse på 2 400 kWh hvor ulik gravimetrisk energitetthet er lagt til grunn. Mellom 5–6 kg/kWh ansees som realistisk ved gjennomføring i dag. 4,3 kg/kWh ansees realistisk i 2025, 3,57 kg/kWh ansees realistisk i 2030, 3,05 kg/kWh ansees realistisk i 2035 og 2,66 kg/kWh ansees realistisk i 2040.

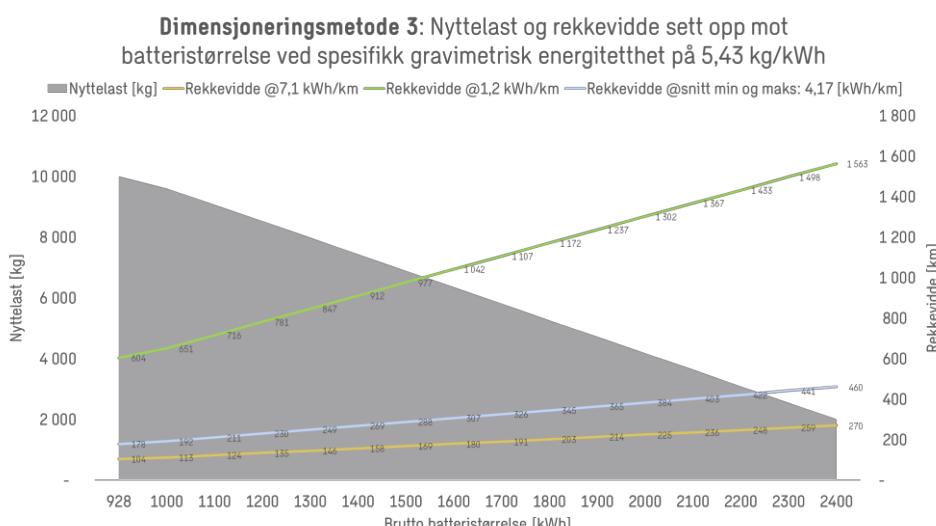
Merk at oppgitte rekkevidder og lignende her er før vekt for ombordkomponenter for gitt ladeløsning er inkludert. I kapittel 5 listes vektene for de ulike ladeløsningene opp, mens de sammenstilles i kapittel 6 og det gjøres en iterasjon av batteripakken etter at vekt fra ladeløsning er hensyntatt.

4.2.3 Metode 3 – akseptabel reduksjon i nyttelast

Metode 3 baserer seg på å dimensjonere batteristørrelsen ut fra hvilken rekkevidde man ønsker uten at det går for mye utover nyttelasten. Det er en del tilfeller hvor nyttelasten nok ikke utnyttes fullt ut og at det dermed er rom for å redusere nyttelasten noe. LT15 sin tyngste oppgave er snøfresing. Det er her tatt utgangspunkt i at en akseptabel reduksjon i nyttelast kan være 5 tonn ettersom snøfres veier 5 tonn og samlet totalt nyttelast er 10 tonn. For å oppsummere blir vektregnskapet og tilgjengelig spillerom slik med en reduksjon i akseptabel nyttelast:

- Maksvekt på plan:	64 000 kg
- Egenvekt lastetraktor uten diesel drivlinje:	- 48 962 kg
- Ønsket gjenværende nyttelast:	+ 5 000 kg
Spillerom batteriløsning LT15:	= 10 038 kg

En slik akseptert reduksjon i nyttelast vil kunne gi en brutto batteristørrelse på 1800 kWh. Denne vil veie 10 tonn ved en spesifikk vekt på 5,43 kg/kWh. Ved slike forutsetninger vil lastetraktor ha en rekkevidde på 200 kilometer ved maks spesifikt forbruk på 7,1 kWh/km. Rekkevidden vil være 1 172 km med utgangspunkt i minimumsforbruk knyttet til transport ved 1,2 kWh/km og 345 km med utgangspunkt i gjennomsnittsforbruket mellom minimum og maksimum lik 4,2 kWh/km.



Figur 22: Viser hvordan nyttelast reduseres med økt batteristørrelse med utgangspunkt i 928 kWh med ingen tap i nyttelast og opp mot 2400 kWh som gir en nyttelast på kun 2000 kg sammenlignet med utgangspunktet på 10 000 kg. Diagrammet viser også hvilken konsekvens dette har for rekkevidden med to ulike spesifikke forbruk [kWh/km] lagt til grunn. Ettersom total nyttelast er 14,7 tonn vil dette bildet være aktuelt for dimensjonerende situasjon med snøfresing, da snøfres som tilleggsutstyr veier rundt 5 tonn.

Merk at oppgitte rekkevidder og lignende her er før vekt for ombordkomponenter for gitt ladeløsning er inkludert. I kapittel 5 listes vektene for de ulike ladeløsningen opp, mens de sammenstilles i kapittel 6 og det gjøres en iterasjon av batteripakken etter at vekt fra ladeløsning er hensyntatt.

4.3 Andre forhold som påvirker forbruk

Flere rutespesifikke forhold som topografi, og klimatiske forhold har det ikke vært omfang til å gjøre detaljerte beregninger på i dette prosjektet. Ettersom vi ikke har hensyntatt økt forbruk i traseer med sterk stigningsprosent har vi heller ikke hensyntatt gevinst ved regenerativ bremsing.

Utetemperatur vil være en faktor som kan påvirke forbruket på tre forskjellige måter. Den vil kunne påvirke batteriytelsen, rullemotstanden og økt behov for oppvarming av førerhus.

Påvirkningen på batteriytelsen vil være minimal om batteriet forvarmes av ladeinfrastrukturen. Derfor må det legges til rette for dette på depot hvor maskinen står før den starter sin drift. Det bør også være mulig å varme opp førerhuset på depot direkte fra strømforsyningen uten å måtte trekke strøm fra batteriet.

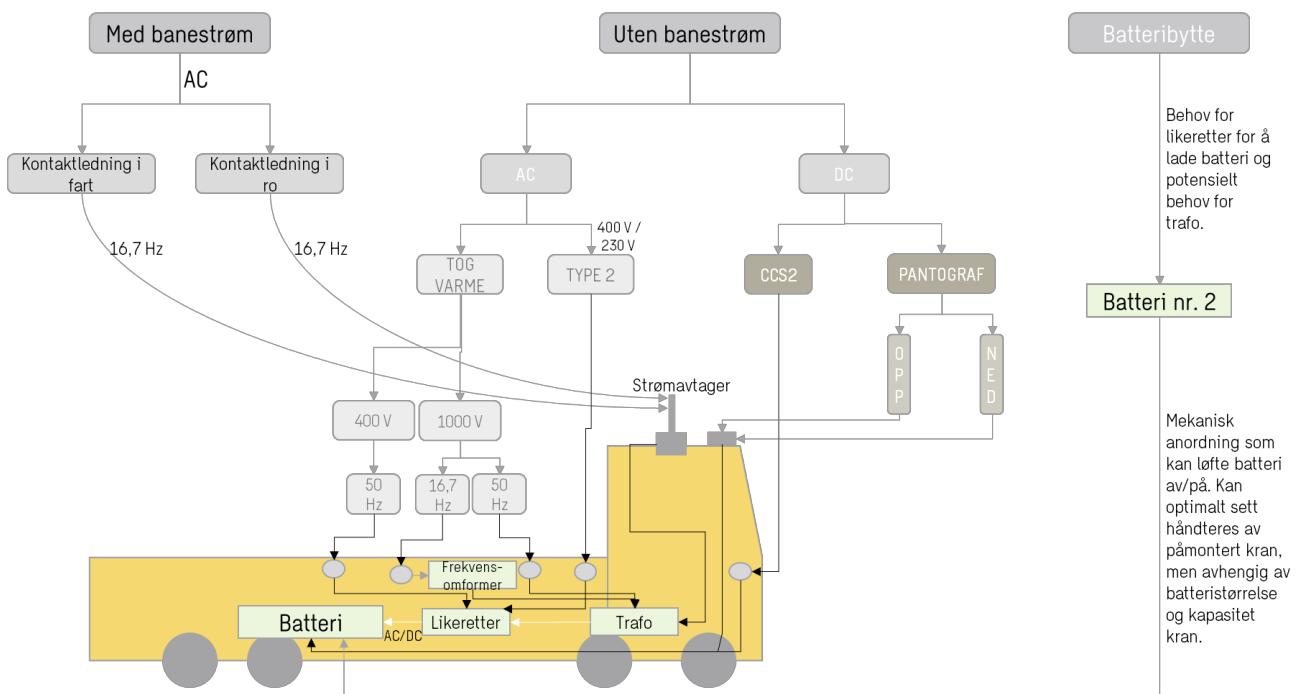
Det estimeres at det maksimalt er behov for 7,5 kW til oppvarming av førerhus, basert på erfaringer fra Bane NOR. Dette vil være behovet på dimensjonerende dag når utetemperatur er lavest. Ettersom dette prosjektet legger til grunn helt utslippsfri drift et slikt forbruk måtte dekkes av fremdriftsbatteriet. Dette tilsvarer 7,5 kWh per driftstime som i løpet av en full arbeidsdag på 8 timer vil være 60 kWh. Med utgangspunkt i brutto batteristørrelse på 1800 kWh med 1440 kWh netto vil dette andelsmessig utgjøre 4% av batteriets netto kapasitet.

Klimatiske forhold som ulike kombinasjoner av utetemperatur, fuktighet og nedbør kan gi økt friksjon som øker rullemotstanden og det totale forbruket. Dette er svært vanskelig å estimere uten å gjøre mer detaljerte beregninger og har ikke vært en del av dette prosjektets omfang

5. Ladeløsninger

Dette kapittelet ser på potensielle ladeløsninger som kan være relevant for en batterielektrisk lastetraktor.

Det finnes mange ulike ladeløsninger hver med sine fordeler og ulemper.



Figur 23: Viser flere veier til måler for ulike ladeløsninger. De tre hovedkategoriene er (1) lading med banestrøm, (2) lading uten banestrøm og (3) batteribytte. Figuren viser prinsipielt hvilke komponenter som er inkludert for de ulike løsningene.

Hovedtrekk med lading via vekselstrøm (AC)

Et fellestrekkt som er sentralt for ladeløsninger med AC er at likerettingen (fra AC til DC) må skje om bord på lastetraktor. Dette er negativt ettersom det tilfører mer vekt på kjøretøyet som igjen gir et mindre vindu til å ha en stor nok batteripakke om bord. Vektbegrensningene på kjøretøyet setter disse føringene og en slik løsning vil redusere nyttelast eller rekkevidde. Avhengig av type spennin og frekvens fra ladeløsningen vil det også kunne medføre behov for trafo om bord som kan sørge for tilpasset spennin og eventuelt frekvens inn på AC-siden av likeretter. Dette vil videre øke vekten på kjøretøyet og redusere enten nyttelast eller rekkevidde. Det finnes også jernbanestandarder for AC strømforsyning, men ingen av disse er utarbeidet spesifikt for lading. Dette adresseres nærmere senere i rapporten.

En generell fordel med lading via AC er potensialet til å nyte seg av eksisterende infrastruktur som gir flere lademuligheter som har en geografisk spredning.

Hovedtrekk med lading via likestrøm (DC)

Hovedfordeling med DC-lading er at likerettingen skjer utenfor kjøretøyet. Dette gir ikke nevneverdig økt vekt på kjøretøyet utover batteriet, noe som igjen muliggjør lengre rekkevidde og mindre tap av nyttelast. Motsvarende til ladeløsning via AC vil en generell ulempe være at det vil være få lokasjoner å lade bortsett fra der det er dedikert opprettet en slik ladeløsning. Tilsvarende vil være gjeldende for en batteribytte løsning. En fordel med batteribytte løsning er at man kan justere hvor mye batterier som lastes på kjøretøyet som kan tilpasses aktiviteten kjøretøyet skal utføre.

5.1 Lading uten banestrøm

Lading uten bruk av banestrøm er inndelt i tre hovedkategorier: AC-lading, DC-lading og batteribytte.

AC-lading er inndelt i (1) lading fra eksisterende togvarmeposter og (2) lading via type2-kontakt (elbilkontakten). DC-lading er inndelt i (a) CCS2, (b) og pantografløsning med invertert pantograf (påmontert på pantografsøyle) og (c) pantografløsning med kjøretøymontert pantograf.

5.1.1 AC-lading

AC-lading er inndelt i (1) lading fra eksisterende togvarmeposter og (2) lading via type2-kontakt (elbilkontakten).

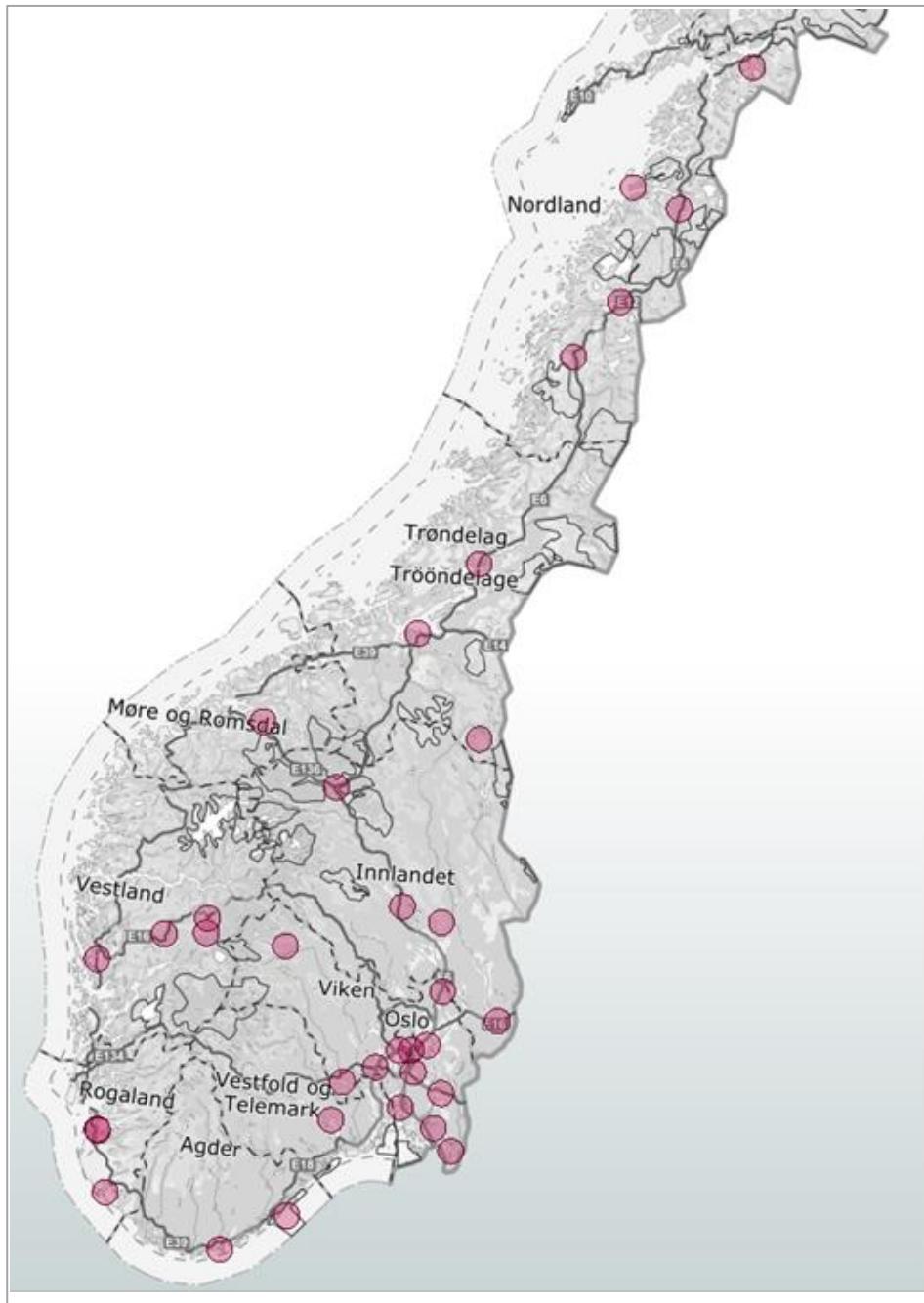
Lading fra togvarmeposter

Det er ca. 250 togvarmeposter i Norge, typisk tilknyttet hensettingsområder for persontog. Disse anleggene leverer strøm enten som 400 V 50 Hz (ca. 8 %) eller som 1000 V med enten 50 Hz (59 %) eller 16,67 Hz (33 %). De fleste togvarmeposter i dag er bygd industristandarden angitt i IEC 60309-2 for 400 V trefase.

Tabell 18: Fordeling av dagens togvarmeposter.

Frekvens	16,67	50	Total Andel		Total Antall
Spennin	Andel	Antall	Andel	Antall	
400	0,00 %		8,43 %	21	8,43 %
1000	32,93 %	82	58,63 %	146	91,57 %
Totalt	32,93 %	82	67,07 %	167	100,00 %
					249

Geografisk fordeling av togvarmeposter sees nedenfor i Figur 24. Siden hensettingsbehovet er størst rundt de store byene er det flere togvarmeposter her. Enkelte driftsbaneegårder (for eksempel Oppdal) har ikke togvarmeposter og togvarmepostene er ikke alltid tilgjengelig på grunn av annet hensatt materiell.



Figur 24: Oversikt over togvarmeposter i Norge

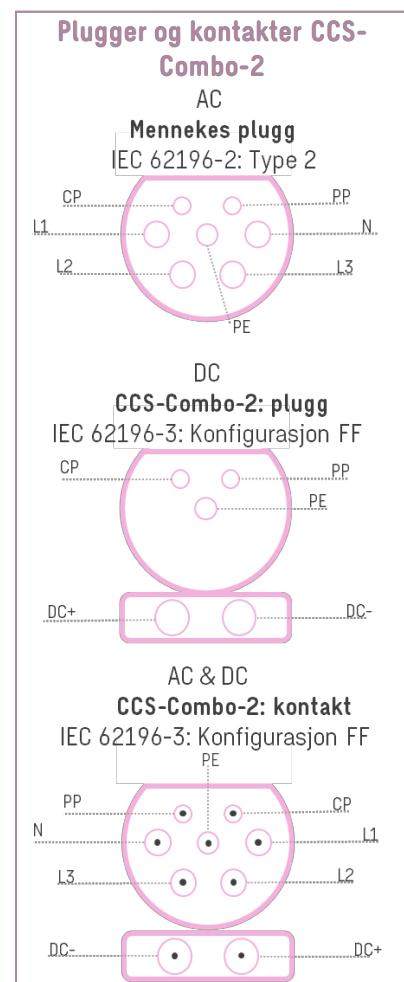
Lading fra type 2 (elbilkontakten)

Type 2-plugg kan være en relevant ladeløsning. Denne er enkel og rimelig å etablere og det eksisterer standarder for alle aspekter knyttet til kommunikasjon mellom ladestasjon og kjøretøy, mekanisk utforming, elektrisk og sikkerhetsmessig.

Denne kan tilkobles med 400 V trefase og lade opp til 43 kW med 63 A eller 230 V enfase og lade opp til 15 kW med 63 A. Pluggen for type 2 sees i rubrikk til høyre. Den kan bruke samme kontakt på kjøretøyet som CCS 2 så om løsningen faller på enten type 2 eller CCS 2 vil det være lurt å montere en CCS 2 kontakt ettersom det vil gi økt fleksibilitet for valgt ladeløsning.

Tabell 19: Lading med type 2 på AC vil tilføye rundt 2 tonn ekstra vekt på kjøretøyet om man ser bort fra batteriet

Type-2	
Likeretter [kg]	12
Trafo [kg]	0
Kontaktpunkt [kg]	10
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10
Kabling [kg]	200
Omformer [kg]	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300
Elektromotor [kg]	1000
Strømskap [kg]	100
SUM vekter	2132



5.1.2 DC-lading

Lading med DC vil gi fordeler med redusert vekt på kjøretøyet ettersom likeretter og trafo vil være plassert utenfor kjøretøyet.

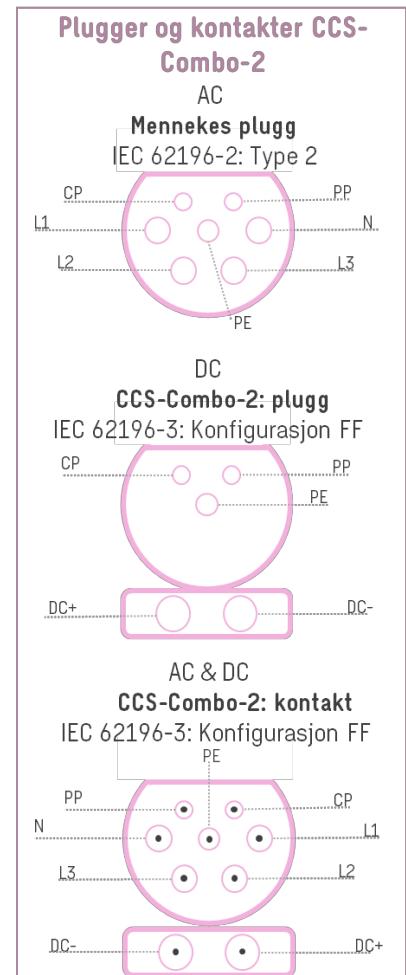
Manuell konduktiv lading med plugg – CCS2

CCS 2-plugg kan være en relevant ladeløsning. Denne er enkel og relativt rimelig å etablere og det eksisterer standarder for alle aspekter knyttet til kommunikasjon mellom ladestasjon og kjøretøy, mekanisk utforming, elektrisk og sikkerhetsmessig.

Av ladekonseptene uten banestrøm er det lading via DC og CCS2-plussen som tilfører minst vekt på kjøretøyet. Dette er marginalt mindre enn for AC-lading ved hjelp av type2-plugg, men det muliggjør ladeeffekter opp til 200 kW uten væskekjølt kabel i motsetning til type2-plugg som kan lade opp til 15 kW med enfase 230 V og opp til 43 kW med trefase 400 V. Man kan lade med høyere effekt enn 200 kW og med CCS2, men da kan man bruke flere plugger uten å gå over til væskekjølt kabel om man vil ha høyere ladeeffekt. Med væskekjølt kabel kan man lade med effekt opp mot 500 kW kontinuerlig.

Tabell 20: Lading med CCS 2 på DC vil tilføye rundt 2 tonn ekstra vekt på kjøretøyet om man ser bort fra batteriet, noe mindre enn for lading via AC og type 2

CCS2	
Likeretter [kg]	Ikke relevant
Trafo [kg]	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kg]	10
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10
Kabling [kg]	200
Omformer [kg]	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300
Elektromotor [kg]	1000
Strømskap [kg]	100
SUM vekter	2120



Pantograflading – Invertert pantograf (Panto-ned)

Dette er en pantografløsning med som tar i bruk invertert pantograf, dvs. en pantograf som senker seg ned på kontaktskinner på kjøretøyet. Denne er hittil tatt mest i bruk for busser, men tar i bruk internasjonale og europeiske standarder. Det vil være usikkerheter knyttet til hvor godt egnet denne er for lastetraktor med tanke på toleranser og avstander/høyde. Den kan lade med effekter opp til rundt 800-900 kW.

Tabell 21: Lading med pantografløsning på DC vil tilføye rundt 2 tonn ekstra vekt på kjøretøyet om man ser bort fra batteriet.

	Invertert pantograf
Likeretter [kg]	Ikke relevant
Trafo [kg]	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kg]	15
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10
Kabling [kg]	200
Omformer [kg]	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300
Elektromotor [kg]	1000
Strømskap [kg]	100
SUM vekter	2195

Pantograflading – Kjøretøymontert pantograf (Panto-opp)

Dette er en pantografløsning med som tar i bruk kjøretøymontert pantograf, dvs. en pantograf som hever seg opp fra kjøretøyet og opp i kontakthette på pantografsøyle. Den kjøretøymonterte pantografen veier rundt 85 kg. Denne er hittil tatt mest i bruk for busser, men tar i bruk standardiserte løsninger. Det vil være usikkerheter knyttet til hvor godt egnet denne er for lastetraktor med tanke på toleranser og avstander/høyde. Den kan lade med effekter opp til rundt 800-900 kW.

Tabell 22: Lading med pantografløsning på DC vil tilføye rundt 2 tonn ekstra vekt på kjøretøyet om man ser bort fra batteriet.

	Kjøretøymontert pantograf
Likeretter [kg]	Ikke relevant
Trafo [kg]	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kg]	85
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10
Kabling [kg]	200
Omformer [kg]	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300
Elektromotor [kg]	1000
Strømskap [kg]	100
SUM vekter ulike konsept	2125

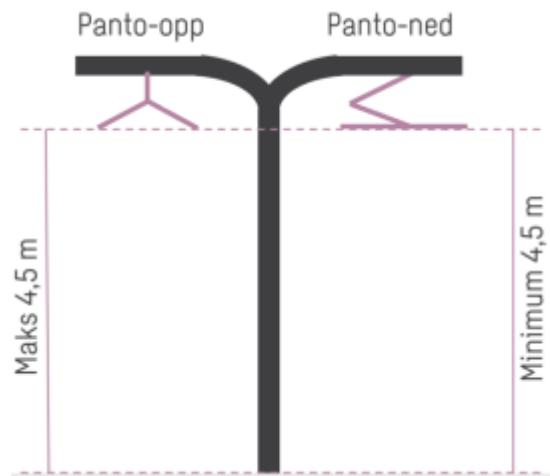
Sammenligning av pantografladekonseptene – toleranser

Kravene til panto-ned-systemer antas å følge OppCharge-standarden.

OPPCharge-utstyret skal være designet for:

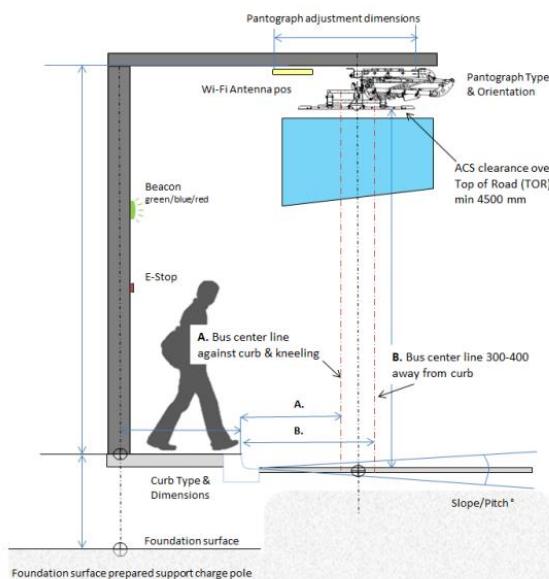
- Kommersielle elektriske kjøretøyer i høyder mellom 3000 og 4500 mm (dvs. enkeltdekker, dobbeltdekker).
- Det er ikke hensikten at OPPCharge-utstyret skal være i stand til å lade alle ovennevnte varianter fra samme installasjon. Det må tas hensyn til de ulike variantene ved design av utstyr (dvs. søyler) for installasjon av valgt automatisk tilkoblingsenhet, Wi-Fi-antennener, kabler og annet utstyr.

For panto-ned skal alt overliggende tilkoblingsutstyr ha en minimumsavstand på 4,5 meter ned til toppen av veidekket, samt følge lokal lovgivning om trafikksikkerhet og byggverk

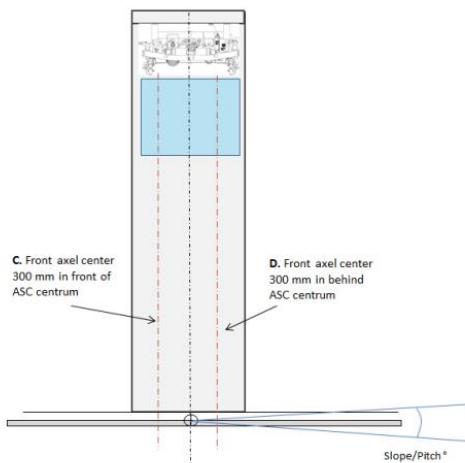


Figur 26: Høyder for de to standardene knyttet til pantograflading av elbuss.

Front View



Side View



Figur 25: Toleranser OppCharge-system. Kilde: OppCharge, Common Interface for Automated Charging of Hybrid Electric and Electric Commercial Vehicles. 2nd edition.

Maksimal klaring for Panto-opp er 4,5 meter fra toppen av veidekket til overliggende tilkoblingsutstyr. LT15 har en høyde på 2,45 meter. Dette er ikke typisk slike kjøretøy panto-ned eller panto-opp er designet for. Det er nok mulig å få produsert en tilpasset pantografløsning, men usikkerhetene tror vi blir for stor for at dette skal være en retning som man bør gå i.

Disse pantografløsningene er ikke relevant for tog på grunn av begrensninger knyttet til høyde.

	Panto-Opp	Panto-Ned
Kjøretøyets vekt	- Høyere vekt på lastetraktor.	+ Vektbesparelse på omtrent 100 kg sammenlignet med Panto Opp.
Plassbehov kjøretøy	- Større plassbehov på lastetraktors tak.	+ Mindre plassbehov på lastetraktors tak.
Kostnad	- Behov for en pantografer per lastetraktor. (Likt antall ladestolper)	+ Behov for mindre antall pantografer for samme antall kjøretøy. (Likt antall ladestolper)
Standardisering	- Ingen EU-standard eksisterer. SAE-standard (USA) eksisterer.	- Ingen EU-standard eksisterer. SAE-standard (USA) eksisterer. OppCharge eksisterer og er en åpen standard, men den er ikke en offisiell EU-standard.
Vedlikehold	+ Vedlikehold av pantografer kan utføres sentralt på depot som er mindre kostbart og mer effektivt.	- Vedlikeholdsbehov langs ruten med behov for kran. Dette øker kompleksitet og kostnader.
Fleksibilitet	+ Håndterer ulike typer busser (f.eks. dobbeltdekkere)	+ Håndterer ulike typer busser (f.eks. dobbeltdekkere)
Pålitelighet	+ Om det oppstår feil på kjøretøyets pantografer kan likevel andre kjøretøy lade.	- Om det oppstår feil kan ingen kjøretøy lade.
Toleranser	+ Ingen store forskjeller mellom systemene.	+ Ingen store forskjeller mellom systemene.
Aerodynamikk	+ Dårligere aerodynamikk om pantografen installeres på lastetraktor.	+ Bedre med Panto Ned, men kun aktuelt ved høyere hastigheter. Har også noe bedre klaring for lave passasjerer.
Sikkerhet	+ Likt sikkerhetsnivå for begge systemer.	+ Likt sikkerhetsnivå for begge systemer.
Støy	- Erfaringer viser at det er høyere lydnivåer.	+ Erfaringer viser at det er lavere lydnivåer.
Utseende	+ Mer kompakt utrustning ladeinfrastruktur.	- Større utrustning, stolper.
Ladeffekt	- Har lavere effekter enn Panto Ned per dags dato.	+ Har høyere effekter enn Panto Ned per dags dato.
Kommunikasjon	+ Ikke behov for trådløs kommunikasjon i forkant av lading.	- Behov for trådløs kommunikasjon mellom kjøretøy og pantografer i forkant av lading.
Værforhold	- For mye snø kan i teorien bli problematisk, men har ikke vist seg å være en utfordring i praksis enda.	+ Snø påvirker ikke mye siden de stasjonære pantograferne har oppvarming.

Figur 27: Sammenligning av Panto-ned versus Panto-opp

5.2 Lading med banestrøm

Lading med banestrøm skjer ved at strøm overføres fra kontaktledning til kjøretøy via pantograf. Den elektriske energien blir tilført kontaktledningsanlegget via tre ulike stasjonstyper: omformerstasjoner, kraftverk eller transformatorstasjoner. Disse stasjonene er plassert med en typisk avstand på 20-80 km langs sporene. I omformerstasjonene blir AC-frekvensen endret fra 50 Hz (som er frekvensen som mantes inn til kontaktledningsnettet), til 16,7 Hz (som er frekvensen på kontaktledningsnettet, og som togene opererer med). Omformerstasjonene vil typisk levere en spenning på 15 000 V ut på kontaktledningsnettet. Jernbanen har også vannkraftverk som produserer AC-strøm med frekvens på 16,7 Hz, slik at det kan mantes direkte inn på kontaktledningsnettet.

Kjøretøyene forsyneres altså fra kontaktledningsnettet med AC-strøm med frekvens på 16,7 Hz og nominell 1-fase spenning på 15 kV. Toget henter strøm fra kontaktledningsnettet via pantograf, noe som muliggjør lading under kjøring. Denne strømmen må så igjennom en transformator om bord på kjøretøyet, slik at strømmen kan benyttes i de elektriske motorene til fremdrift. Etter strømmen har vært igjennom motoren, ledes strømmen ut via togenes hjul og ned på jernbaneskinnene. Strømmen ledes så til sugetransformatorer plassert i kontaktlinjestolper langs sporet, og tilbake til omformerstasjonen. Slik har man en lukket krets, noe som er en nødvendighet for et 1-fase-system.

Tabell 23: Sammenligner ekstra vekt på kjøretøyet for lading med banestrøm for alternativene bruk av kontaktledning (KL) til å lade i fart og for å lade i ro. Samlet vekt for ladeløsning er 6,7 og 6,2 tonn.

Kommentar komponent	Ladeløsning	Med banestrøm	
		KL i fart	KL i ro
	AC	AC	AC
Likerette AC-strøm fra nett	Likeretter [kg]	1500	1000
Nedtransformere spenning fra AC-nett til batterispennin	Trafo [kg]	3000	3000
Tilkoblingspunkt mot ladeinfrastruktur	Kontaktpunkt [kg]	160	60
Nedtransformere batterispennin til 24 V	trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10	10
	Kabling [kg]	200	200
Styring av motor	Omformer [kg]	500	500
Tilleggsutstyr som kompressor, kran etc.	Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300	300
Motor til fremdrift	Elektromotor [kg]	1000	1000
Strømskap til vern, energimåler, annet utstyr	Strømskap [kg]	100	100
Total ekstravekt på kjøretøyet på grunn av ladekonsept	SUM vekter ulike konsept	6770	6170

5.3 Batteribytte og batterivogn

5.3.1 Batteribytte

Ladehastighet vil alltid være begrenset av overføringskapasiteten til inntakskabelen, eller tilgjengelig effekt fra nettet. Et raskere alternativ kan være å ha en utbyttbar batteripakke. Et slikt system har flere fordeler. Det vil for eksempel ta kortere tid å bytte batteripakke enn å hurtiglade. I tillegg gjør dette vedlikehold eller utskifting av batteri etter endt levetid mye lettere. Behovet for lading med høy effekt vil også være mye mindre. Batteripakken kan lades over en lengre periode, og gjerne med styring slik at lading foregår da strømprisen er lavest.

Men et slikt system setter også en del krav til utforming og infrastruktur. Batteriet må kunne byttes som en enhet, for eksempel som en batterikontainer. Dette krever at batteripakken plasseres på kjøretøyet slik at det enkelt kan løftes av og på, enten ved hjelp av kran, truck eller lignende. Infrastruktur må også etableres på bakkeplan, og disse lokasjonene vil være mer begrenset enn for eksempel lading via banestrøm.

En annen ulempe er det er lite standardiserte løsninger for batteribytte, særlig for batterier integrert i karosseriet.

Batteribytteløsninger kan utformes på ulike måter. Man kan ha (1) et integrert batteri særtilpasset karosseriet for å minimere ekstra vekt, (2) ta i bruk ferdige containermoduler med batterier som f.eks. Nortvolt sitt produkt vist her i Figur 28. Et tredje alternativ kan være en kombinasjon av disse, altså et integrert særtilpasset batteri som er fastmontert (ikke batteribytte) og at man tilføyer batterimoduler ut fra behov.



Figur 28: Voltpack fra Northvolt i Sverige. Kan potensielt løftes av og på kjøretøyet. Har før øvrig en høyere spesifikk vekt (10,7 kg/kWh) enn integrerte batterier på rundt 5,5 kg/kWh. Veier 3000 kg og har en oppgitt batterikapasitet på 281 kWh.

5.3.2 Batterivogn

En åpenbar løsning på utfordringer med vekt, plass og til dels beredskap og lading er å koble på en egen batterivogn. Arbeidsmaskinene kan trekke flere tunge vogner, og en batterivogn vil sannsynligvis kunne gi tilgang på nok energi til tunge driftsoperasjoner over lang tid. Batterivogner vil også kunne lades og stå klar til bruk i beredskapssituasjoner.

Det er flere momenter som taler mot bruken av batterivogner. Det vil komplisere vinterdriften, da påmontert snøfres/børster må være foran ved førerhytta, og man da må montere plogen bakom vogna. Dersom toget skal kjøre baklengs vil det måtte benyttes hjelpefører som må ha samband med lokfører, og hastigheten vil derfor bli redusert til 40 km/h. En løsning på dette vil da kunne være å montere førerhus på batterivogna, men da vil kostnadene øke.

Bruk av batterivogn vil også hindre muligheten til å bruke krana på objekter som ligger i sporet.

Til tross for ulempene bør ikke utforming av batterielektriske systemer utelukke bruk av batterivogner i fremtiden, for å ta høyde for at dette kan bli en standard løsning for andre tog, som for eksempel godstog eller arbeidstog.

5.4 Jernbanestandarder og koordinerte løsninger

I prosjektet er det mottatt innspill fra Bane NOR for å koordinere krav som eventuelt kan være relevant i forbindelse med ombygging av lastetraktor.

Der ble det gitt mange konkrete tilbakemeldinger og mye nyttig og detaljert informasjon, blant annet:

- Samtrafikk: Hensiktsmessig å koordinere med andre forvaltninger for å gi større marked for både arbeidsmaskiner og leverandører som bruker dem. Også vurdere koordinere med ladeløsninger for tog. Det forventes at omfang av togvarmeposter i fremtiden vil gå ned pga. forsyning fra kontaktledningen, men det vil fremdeles være poster på ikke-elektrifiserte strekninger og i verksteder.
- Internasjonale krav: LOC&PAS TSI gjelder for lokomotiver og passasjervogner som en felles europeisk teknisk spesifikasjon. Uavklart hvor detaljert denne eventuelt omfatter krav til arbeidsmaskiner.
- Standarder: Delvis dekket av L&P TSI punkt 4.2.11.6 i for hensetting/togvarme uten at de er utarbeidet spesifikt for lading. Der henvises det til
 - Forsyning via strømavtaker (se alle andre krav til tog mtp. mekanisk og elektrisk kompatibilitet og energimåling)
 - Forsyning via UIC plug (i Norge i dag enfase 1000 V 16 2/3 Hz eller 50 Hz): TS 50534 / UIC 550/552.
 - UIC dekker 1000 og 1500 V AC og 3000 V DC, ikke 750 VDC.
 - Forsyning via industriplugg trefase 400 V IEC 60309-2
- Standarder: I tillegg er det utarbeidet en jernbanestandard for trefase 400 V plugg: [EN 50546](#) er forestått tatt inn i L&P TSI, men er foreløpig ikke der.
- Standarder: I tillegg utarbeides det en standard for lading via strømavtaker (TS 50729), men den er ikke utgitt ennå.
- Standarder: Dersom en trenger større ladoeffekt enn standardene tillater per tilkobling, kan det kanskje være mulig å sette flere tilkoblinger (plugger) i parallel.

Oppsummert: Det vil være et strategisk veivalg Bane NOR gjør fremover når det blir flere batterielektriske kjøretøy hvilke ladeløsninger som skal velges for å sikre sambruk og fleksibilitet.

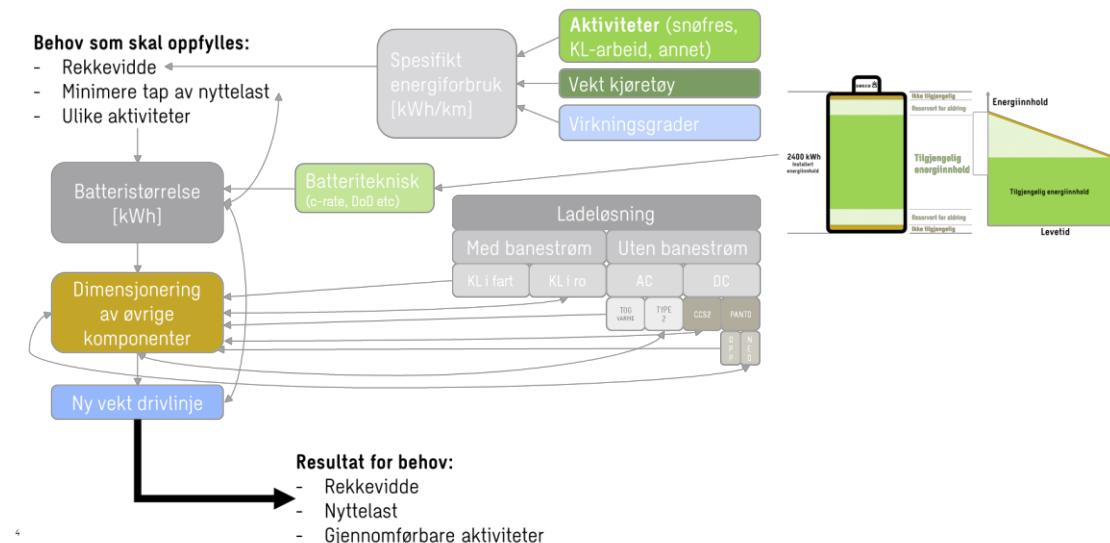
6. Ombyggingskonsepter

I dette kapittelet sammenstilles de detaljene fra de foregående kapittlene for de mest relevante ombyggingskonseptene. De ulike ombyggingskonseptene kan overordnet inndeles i følgende ombyggingskonsepter:

1. KL/batteri
2. Batteri
3. Batteribytte

I tillegg vil det være et potensielt alternativ å koble på en batterivogn på alle de tre ombyggingskonseptene over. Dette vil øke rekkevidden, men vil ha tilknyttet seg noen praktiske konsekvenser særlig for snørydding, samt medføre økte kostnader på grunn av kostnad for batterivogn, flere batterier og tilkoblingsløsning til lastetraktor.

Omleggingen til batterielektrisk fremdriftssystem er komplekst og batteristørrelse må sees opp imot forbruk, type driftsmønster, nyttelast, ladeinfrastruktur og vekter. Batteristørrelse bør (1) oppfylle ønsket driftsmønster og (2) minimere tap av nyttelast samtidig bør ladeinfrastruktur være tilpasset for å kunne (a) gi tilstrekkelig ladeffekt til batteri ut fra ønsket driftsmønster uten at det (b) medfører for mye vekt om bord som minimerer rekkevidde for kjøretøy som går utover transport- og aktivitetsbehovet. Det sees også på økonomien knyttet til en ombygging versus nybygg. Her presenterer vi



Figur 29: Viser kompleksiteten ved å velge en optimal løsning knyttet til dimensjoneringen av samlet system.

6.1 Teknisk

Hvilken teknisk løsning som velges på kjøretøy og for ladeløsning påvirker hvordan dette som et samlet system vil kunne prestere med hensyn på målkriteriene som ønskes oppfylt. Her sees det på hvordan de ulike ladeløsningene påvirker disse målkriteriene og det diskuteres hvilken løsning som ansees som mest egnet.

Som vi så i delkapittel 4.2.3 ble det der angitt muligheten for en batteristørrelse på opp mot 1 800 kWh. Da ville rekkevidden blitt minimum 200 km, 345 km som et gjennomsnitt ut fra kombinerte aktiviteter og opp mot 1 100 km ved rene transportoppdrag med lite start og stopp. Dette var før vi tok hensyn til vekt som valg ladeløsning påfører kjøretøyet.

Dette er essensielt å vite hvilken ekstra vekt som blir påført kjøretøyet ut fra valgt ladekonsept. I Tabell 24 sammenlignes vektregnskapet til de ulike ladeløsningene. Som man ser er det en forskjell på 4-4,5 tonn mellom lading med og uten banestrøm. Av ladekonseptene uten banestrøm er det lading via DC og CCS2-pluggen som tilfører minst vekt på kjøretøyet. Dette er marginalt mindre enn for AC-lading ved hjelp av type2-plugg, men det muliggjør ladeeffekter opp til 200 kW uten væskekjølt kabel i motsetning til type2-plugg som kan lade opp til 15 kW med enfase 230 V og opp til 43 kW med trefase 400 V. Man kan lade med høyere effekt enn 200 kW og med CCS2, men da kan man bruke flere plugger uten å gå over til væskekjølt kabel om man vil ha høyere ladeeffekt eventuelt kan man bruke den kommende søsterstandarden (fra 2023) Megawatt Charging System (MCS) og kan lade opp til 3,75 MW på en plugg. C-rate på lading for høyenergibatterier vil typisk være begrenset til ca. 1C, det vil si at om batteriet f.eks. er 1800 kWh så er maks ladeeffekt 1800 kW.

Tabell 24: Tabell som sammenligner ekstra vekt på kjøretøyet ut fra valgt ladekonsept.

Ladeløsning	Med banestrøm				Uten banestrøm			
	KL i fart		KL i ro		AC-lading		DC-lading	
	AC	AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	Panto-ned	Batteribytte
Likeretter [kg]	1500	1000	100	12	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Trafo [kg]	3000	3000	0	0	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kg]	160	60	10	10	10	85	15	10
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10	10	10	10	10	10	10	10
Kabling [kg]	200	200	200	200	200	200	200	200
Omformer [kg]	500	500	500	500	500	500	500	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300	300	300	300	300	300	300	300
Elektromotor [kg]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Strømskap [kg]	100	100	100	100	100	100	100	100
SUM vekter ulike konsept	6770	6170	2220	2132	2120	2195	2125	2120

For hvert av ombyggingskonseptene er det tatt utgangspunkt i at nyttelast reduseres fra 10 til 5 tonn, om ikke vil rekkevidde og batterikapasiteter være svært begrenset. Konsekvensen av å ikke gjøre det er belyst under hvert av de følgende delkapitlene.

6.1.1 Ombyggingskonsept 1 – KL/batteri

Med utgangspunkt i en batteristørrelse på 1800 kWh før tillagt vekt fra ladeløsningen vil man ha tilgjengelig 5 264 kg nyttelast ettersom den totale nyttelasten er 10 000 kg og et 1800 kWh batteri med spesifikk vekt på 5,43 kg/kWh veier 9 774 kg. Tar man dette og ser dette opp mot vekt for de ulike ladeløsningene for dette ombyggingskonseptet vil det ikke være mulig med lading via kontaktledning i fart og i ro. De to relevante ladeløsningene for dette konseptet er:

1. Lading via kontaktledning i fart
2. Lading via kontaktledning i ro

Vekt for disse ladeløsningene overskriver gjenværende nyttelast som er avsatt til snøfres på ca. 5000 kg med opprinnelig dimensjonert batteristørrelse. Om disse løsningene skal være relevant er man i så fall nødt til å redusere batteristørrelsen.

Ved lading via KL i fart vil batteristørrelsen måtte reduseres til 602 kWh og til 712 kWh lading i ro. Dette vil gi en rekkevidde på henholdsvis 68 og 80 km som ansees som et minimum, dette tilsvarer henholdsvis 1 t 40 min og 2 timer med snøfresing i 40 km/h uten tilkobling på kontaktledning. Ettersom det er små forskjeller i vekt mellom lading i fart og lading i ro vil ladekonseptet i fart være mest relevant av ladekonseptene med banestrøm, da det er få ikke-elektrifiserte baner i Norge. Bruk av dette kjøretøyet på ikke-elektrifiserte strekninger vil være begrenset og vil måtte planlegges nøye.

Tabell 25: Viser detaljert vektregnskap og ny batteristørrelse med tilhørende rekkevidder for dette ombyggingskonseptet etter at vekt for ladeløsninger er lagt til.

Ombyggingskonsept 1 - KL/batteri

	Med banestrøm	
	<i>KL lading i fart</i>	<i>KL lading i ro</i>
	AC	AC
Likeretter [kg]	1500	1000
Trafo [kg]	3000	3000
Kontaktpunkt [kg]	160	60
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10	10
Kabling [kg]	200	200
Omformer [kg]	500	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300	300
Elektromotor [kg]	1000	1000
Strømskap [kg]	100	100
SUM vekter ulike konsept med 1800 kWh batteri	6770	6170
Egenvekt med batteri og ladeløsning 1800 kWh batteri	65506	64906
Tilgjengelig nyttelast etter vekt ladeløsning [kg]	-1506	-906
Evt. reduksjon i batteristørrelse [kWh]	1198	1088
Ny batteristørrelse for å minimere tap nyttelast [kWh]	602	712
Ny rekkevidde, minimum [km]	68	80
Ny rekkevidde, snitt [km]	115	137
Ny rekkevidde, maks [km]	392	464

En batteristørrelse på 600 kWh brutto for ladekonseptet med bruk av kontaktledning i fart vil gi en rekkevidde på rundt **70-390 km** på batteridrift avhengig av type aktivitet, fra snøfres til lett transportkjøring. Dette vil for øvrig **redusere nyttelasten med 5 tonn**.

Rekkevidder er basert på følgende spesifikt forbruk:

- Maks: 7,1 kWh/km
- Snitt: 4,2 kWh/km
- Min: 1,2 kWh/km

Rekkeviddene angitt i Tabell 25 er indikative og vil variere ut fra spesifikk rute og aktivitet, samt ut fra klimatiske forhold og antall start og stopp.

Basert på mottatt data med logging over noen få dagers forbruk av en LTR17 på Oppdal er det gjort estimater på hvilket forbruk dette ville tilsvart for en batterielektrisk versjon omgjort til estimert forbruk for LT15. Som man kan se i Tabell 28 vil systemene som baserer seg på lading med banestrøm beskrevet ovenfor kunne håndtert det daglige forbruks fra loggingen utført på LTR17 i Oppdal skalert til en full 8-timers dag med drift. Høyeste forbruk ville vært 593 kWh (scenario 4 – tung last). Med en batterikapasitet på 602 kWh brutto (tilsvarende ca. 481 kWh netto) eller 712 kWh brutto (tilsvarende 570 kWh brutto) ikke klart å utføre aktiviteten tilsvarende scenario 4 (tung last) en hel arbeidsdag, men begge alternativer ville klart å utføre de andre scenarioene i Tabell 26. Hovedfordelen med alternativet som går på å lade via kontaktledning i fart er at den også ville klart å utføre scenario 4 om den har tilgang på kontaktledning. Derfor ansees dette alternativet som mest relevant av de to ladeløsningene.

Scenario 2 medfører en dags arbeid med arbeid på banestrøm/kontakledning med et forbruk på 340 kWh. Ladeløsning med lading via kontaktledning i fart med en brutto batteristørrelse på 602 kWh (481 kWh netto) ville også kunne håndtert en slik dag uten å kunne lade underveis. Den ville ved endt dag hatt en gjenværende batteriprosent på 29%. Dette viser at dette ombyggingskonseptet har potensiale til å kunne utføre arbeid på bane uten tilgang på lading via kontaktledning.

Ved arbeid på ikke-elektrifisert bane eller lignende vil ladetid maks være 1 time og 10 minutter.

Tabell 26: Forbruk fra logging av LTR17 på Oppdal omgjort til LT15 og aktivitetene er skalert til 7,5 timers drift

LT15	Arbeids- beskrivelse	Forbruk diesel per time [kWh]	Forbruk per time, elektrisk [kWh]	Forbruk per arbeidsdag, diesel [kWh]	forbruk per arbeidsdag, elektrisk [kWh]
Scenario 1 - kun egenvekt	Transitt	116,41	38,80	873	291
Scenario 2 - lett last	Arbeid på høyspentanlegg	135,87	45,29	1019	340
Scenario 3 - mellomtung last	Arbeid på skinner	170,61	56,87	1280	427
Scenario 4 - tung last	Pukk	237,18	79,06	1779	593

Konsekvens av å ikke redusere nyttelast

Nyttelast med eksisterende drivlinje er 10 tonn. Den diesels hydrauliske drivlinjen veier 5 tonn. Ettersom bare ombordutrustningen uten batteri veier mer enn 5 tonn vil dette ikke være et alternativ for dette konseptet om målet er å ikke redusere nyttelasten sammenlignet med dagens situasjon.

6.1.2 Ombyggingskonsept 2 – Batteri

Med utgangspunkt i en batteristørrelse på 1800 kWh før tillagt vekt fra ladeløsningen vil man ha tilgjengelig 5 264 kg nyttelast ettersom den totale nyttelasten er 10 000 kg og et 1800 kWh batteri med spesifikk vekt på 5,43 kg/kWh veier 9 774 kg. Tar man dette og ser dette opp mot vekt for de ulike ladeløsningene for dette ombyggingskonseptet vil det ikke være plass til et så stort batteri som 1800 kWh. De relevante ladeløsningene for dette konseptet er:

1. Lading via AC
 - a. Togvarmepost
 - b. Type 2 (elbilkontakten)
2. Lading via DC
 - a. CCS2
 - b. Kjøretøymontert pantograf (ikke aktuelt)
 - c. Invertert pantograf (ikke aktuelt)

Vekt for disse ladeløsningene overskriver gjenværende nyttelast som er avsatt til snøfres på ca. 5000 kg med opprinnelig dimensjonert batteristørrelse. Om disse løsningene skal være relevant innenfor angitt ramme om nyttelast på 5 tonn i planet er man i så fall nødt til å redusere batteristørrelsen fra 1800 kWh til rundt 1450 kWh. Det er små forskjeller i vekt fra de ulike ladeløsningene så de ulike batteristørrelsene nevnes ikke særskilt utover å henvise til Tabell 27.

Tabell 27: Viser detaljert vektregnskap og ny batteristørrelse med tilhørende rekkevidder for dette ombyggingskonseptet etter at vekt for ladeløsninger er lagt til.

Ombyggingskonsept 2 - batteri

	Uten banestrøm				
	AC-lading		DC-lading		
	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Kjøretøymontert pantograf	Invertert pantograf
Likeretter [kg]	100	12	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Trafo [kg]	0	0	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kg]	10	10	10	85	15
trafo tilleggsutstyr 24 V [kg]	10	10	10	10	10
Kabling [kg]	200	200	200	200	200
Omformer [kg]	500	500	500	500	500
Elmotorer tilleggsutstyr [kg]	300	300	300	300	300
Elektromotor [kg]	1000	1000	1000	1000	1000
Strømskap [kg}	100	100	100	100	100
SUM vekter ulike konsept	2220	2132	2120	2195	2125
Egenvekt med batteri og ladeløsning	60956	60868	60856	60931	60861
Tilgjengelig nyttelast etter vekt ladeløsning [kg]	3044	3132	3144	3069	3139
Evt. reduksjon i batteristørrelse [kWh]	360	344	342	356	343
Ny batteristørrelse for å minimere tap nyttelast [kWh]	1440	1456	1458	1444	1457
Ny rekkevidde, minimum [km]	162	164	164	162	164
Ny rekkevidde, snitt [km]	276	279	280	277	280
Ny rekkevidde, maks [km]	938	948	950	941	949

Disse ladekonseptene må redusere batteristørrelsen fra 1800 kWh til rundt 1450 kWh for å ha nok gjenværende nyttelast på 5 tonn. De vil da ha tilnærmet lik rekkevidde på minimum rundt 160 km ved tung drift (snøfresing) ved å legge til grunn 7,1 kWh/km og 950 km om man legger til grunn kun transport og med utgangspunkt i 1,2 kWh/km. Gjennomsnittet mellom disse, altså en type kombinert kjøring og litt snørydding vil gi en rekkevidde på rundt 280 km.

Alle ladeløsningene vil være i stand til å løse de fleste aktivitetene så fremt aktivitetene gjennomføres innenfor rekkeviddebegrensningen eller at driften er godt nok planlagt og eventuell nødvendig infrastruktur er etablert. Ut fra litteraturstudien i rapporten sees det at gjennomsnittlig kjørelengde (tur/retur) for lastetraktor er oppgitt til mellom 41-90 km og at lengste kjøretur er angitt til 200 km. Ut fra disse tallene vil de beskrevne løsningene kunne håndtere disse avstandene, men dette avhenger av hvilke aktiviteter kjøretøyet har for de angitte kjørelengdene.

Rekkeviddene angitt her er indikative og vil variere ut fra den spesifikke ruten og aktivitet, samt ut fra klimatiske forhold og antall start og stopp. Basert på mottatt data med logging over noen få dagers forbruk av en LTR17 på Oppdal er det gjort estimeringer på hvilket forbruk dette ville tilsvart for en batterielektrisk versjon omgjort til estimert forbruk for LT15. Som man kan se i Tabell 28 vil systemene som baserer seg på lading uten banestrom beskrevet ovenfor kunne håndtert det daglige forbruket fra loggingen utført på LTR17 i Oppdal skalert til en full 8-timers dag med drift. Høyeste forbruk ville vært 593 kWh (scenario 4 – tung last). Med en batterikapasitet på 1450 kWh brutto (tilsvarende ca. 1160 kWh netto) ville den hatt en gjenværende batteriprosent etter endt dag på rundt 50%. Scenario 2 medfører en dags arbeid med arbeid på høyspentanlegg med et forbruk på 340 kWh. Dette ville alle varianter med rundt 1450 kWh kunne klart å utføre med en gjenværende batteriprosent på rundt 70% etter endt arbeidsdag.

Ladetid vil være maks være rundt 3 timer med CCS 2 med én plugg for å lade fra 0-100% SoC utnyttbar energi. Med to plugger kan denne tiden halveres. Med AC og type-2 vil tilsvarende tid være rundt 27 timer.

En batteristørrelse på 1450 kWh brutto for ladekonseptene med stasjonærslading uten bruk av kontaktledning vil gi en rekkevidde på rundt 160-950 km på batteridrift avhengig av type aktivitet, fra snøfres til lett transportkjøring. Dette medfører også en reduksjon i nyttelast på 5 tonn.

Tabell 28: Forbruk fra logging av LTR17 på Oppdal omgjort til LT15 og aktivitetene er skalert til 7,5 timers drift

LT15	Arbeids-beskrivelse	Forbruk diesel per time [kWh]	Forbruk per time, elektrisk [kWh]	Forbruk per arbeidsdag, diesel [kWh]	forbruk per arbeidsdag, elektrisk [kWh]
Scenario 1 - kun egenvekt	Transitt	116,41	38,80	873	291
Scenario 2 - lett last	Arbeid på høyspentanlegg	135,87	45,29	1019	340
Scenario 3 - mellomtung last	Arbeid på skinner	170,61	56,87	1280	427
Scenario 4 - tung last	Pukk	237,18	79,06	1779	593

Konsekvens av å ikke redusere nyttelast

Nyttelast med eksisterende drivlinje er 10 tonn. Den dieselforbruket hydrauliske drivlinjen veier 5 tonn. Da kan med andre ord summen av vekten for batteri og ombordutrustning ikke overstige 5 tonn. Ettersom ladeløsning for de ulike alternativene til dette konseptet veier rundt 2,1-2,2 tonn medfører dette at batteriet ikke kan veie mer enn 2,8-2,9 tonn.

Dette muliggjør en batteristørrelse på rundt 530 kWh som kan gi en maksimal rekkevidde ved lett transportkjøring på 432 km, en gjennomsnittlig rekkevidde på kombinert aktivitet (lett kjøring og snørydding) på rundt 130 km og en minimal rekkevidde på rundt 75 km om man legger til grunn kun snørydding. Eksempelvis tilsvarer dette rundt 2 timers kapasitet med snørydding i 40 km/h og rundt 3 timer og 40 minutter med snørydding i 20 km/h.

6.1.3 Ombyggingskonsept 3 – Batteribytte

Et ombyggingskonsept med batteribytte vil ha relativt like forutsetninger som ombyggingskonsept for batteri. Man kan se for seg en løsning med ulike batteribyttekonsepter. Under sees det på tre alternativer

- Alternativ 1: Batteri integrert i ramme som kan skiftes ut
- Alternativ 2: Bruk av modulære containere med batterier
- Alternativ 3: Bruk av kombinert fastmontert batteri og modulære containere

Enten kan batteriet være integrert i rammen på lastetraktor på en god måte slik at den ikke vil stikke høyt opp og hindre eventuell sikt eller så kan det være en løsning med å laste på prefabrikkerte containermoduler med batterier. Et tredje alternativ vil være at lastetraktor kan ha et fastmontert integrert batteri og at man laster på prefabrikkerte containermoduler etter behov. Dette vil samtidig gi muligheten for en større batteripakke grunnet lavere spesifikk vekt enn for en modulær containerbasert løsning.

En løsning med utgangspunkt i batteritypen til Northvolt med ferdig containermodul vil man få en installert batterikapasitet på 281 kWh, tilsvarende rundt 225 kWh utnyttbar energi, til en vekt på 3000 kg. Med 7918 kg tilgjengelig for batterier etter at vekt fra andre komponenter er hensyntatt (2120 kg for andre ombordkomponenter) vil dette tilsvare en maksimal batteristørrelse på 562 kWh (tilsvarende to Voltpacks) som samlet utgjør 6000 kg. Da vil man ha en resterende tilgjengelig vektkapasitet på 1918 kg som man kan bruke til det fastmonterte batteriet. Dette vil da kunne være opp til 353 kWh, noe som gir en utnyttbar energimengde på rundt 282 kWh. Kjøretøyet vil da som et minimum ha 282 kWh, men med muligheten til å utvide batterikapasiteten med én eller to batterimoduler. Ved bruk av én modul kan det utvides $282+225 = 507$ kWh utnyttbar energi. Ved bruk av to batterimoduler kan det utvides til eller $282+225+225 = 732$ kWh utnyttbar energi.

Batteribytte løsning for alternativ 3 vil gi mellom 40-103 km rekkevidde ved maks forbruk på 7,1 kWh/km, mellom 68-176 km med utgangspunkt i gjennomsnittlig estimert forbruk på 4,2 kWh/km og mellom 230-596 km med utgangspunkt i minimumsforbruk på 1,2 kWh/km.

Tabell 29: Viser hvor mye batterier som kan være om bord ved hjelp av batteribyttekonsept nr. 3 ved bruk av kombinasjonen fastmontert batteri og modulære containere med batterier som kan løftes av og på.

Ombyggingskonsept 3 – batteribytte, alternativ 3

Spesifikt forbruk [kWh/km]	7,1	4,2	1,2	
kWh brutto	kWh netto	Rekkevidde, min [km]	Rekkevidde, snitt [km]	Rekkevidde, maks [km]
Integrt batteri [kWh]	353	283	40	68
Integrt batteri + modul 1 [kWh]	634	507	71	122
Integrt batteri + modul 1 og 2 [kWh]	915	732	103	176
				596

Rekkeviddene angitt her er indikative og vil variere ut fra den spesifikke ruten og aktivitet, samt ut fra klimatiske forhold og antall start og stopp. Basert på mottatt data

med logging over noen få dagers forbruk av en LTR17 på Oppdal er det gjort estimater på hvilket forbruk dette ville tilsvart for en batterielektrisk versjon omgjort til estimert forbruk for LT15. Som man kan se i Tabell 28 vil alternativ 3 med batteribytte løsning kunne håndtere de energibehovene som er estimert for daglig drift av ulike typer aktiviteter. Høyeste forbruk ville vært 593 kWh (scenario 4 – tung last). Med en batterikapasitet på 915 kWh brutto (tilsvarende ca. 732 kWh netto) ville den hatt en gjenværende batteriprosent etter endt dag på rundt 19%. Scenario 2 medfører en dags arbeid med arbeid på høyspentanlegg med et forbruk på 340 kWh. Her kunne batteribytte løsningen klart seg med en batterimodul i tillegg til de fastmonterte batteriene og hatt en gjenværende batteriprosent på 53% ved endt arbeidsdag. For scenario 3, en arbeidsdag med arbeid på skinner og mellomtung last ville man også kunne klart seg med én batterimodul for å gjennomføre arbeidsdagen på ren batteridrift. Gjenværende batteriprosent ville da vært på 15%.

Ladetid vil være maks være rundt 1 time og 10 minutter med CCS 2 med én plugg for å lade fra 0-100% SoC utnyttbar energi for det fastmonterte batteriet på 353 kWh brutto. Med to plugger kan denne tiden halveres. Med AC og type-2 vil tilsvarende tid være rundt 8 timer. De mobile batteripakkene kan anslagsvis påmonteres på et par minutter.

Tabell 30: Forbruk fra logging av LTR17 på Oppdal omgjort til LT15 og aktivitetene er skalert til 7,5 timers drift

LT15	Arbeids- beskrivelse	Forbruk diesel per time [kWh]	Forbruk per time, elektrisk [kWh]	Forbruk per arbeidsdag, diesel [kWh]	forbruk per arbeidsdag, elektrisk [kWh]
Scenario 1 - kun egenvekt	Transitt	116,41	38,80	873	291
Scenario 2 - lett last	Arbeid på høyspentanlegg	135,87	45,29	1019	340
Scenario 3 - mellomtung last	Arbeid på skinner	170,61	56,87	1280	427
Scenario 4 - tung last	Pukk	237,18	79,06	1779	593

Batteribytte løsning nr. 3 ville også kunne muliggjort bruk av den eksisterende kjøretøymonterte kranen om bord på lastetraktor til å laste batterimoduler av og på. Disse veier 3000 kg og som vist i Figur 30 kan slik løft være mulig om man står nære nok batterimodulen som skal løftes på.



Figur 30: Viser løftekapasiteten til den kjøretøymonterte kranen.

Batteribytte løsning nr. 1 vil kunne gi tilsvarende rekkevidde som ombyggingskonsept 2 med rent batteri, men det vil være betydelig større usikkerheter knyttet til på og avløfting. Samtidig vil man måtte dele opp et eventuelt batteri på 1450 kWh i flere moduler om påmontert kran på kjøretøyet skal ha muligheten til å løfte det av og på ettersom samlet vekt for 1450 kWh vil være på rundt 7880 kg, mer enn samlet løftekapasitet til kran. Alternativt vil man måtte være avhengig av en ekstern kran som kan utføre denne jobben. Dette vil medføre behov for kraner i tilknytning til hvor det skal være mulig for kjøretøyet å bytte batterier. Videre vil det være behov for en stor grad av særtilpasning med mye usikkerhet knyttet til toleranser ved av- og påløfting og automatisk strømtilkobling, sikkerhet med mer.

Batteribytte løsning nr. 2 vil gi lavere rekkevidde enn alternativ 1 og 3 og ansees derfor ikke som relevant.

Av de tre batteribytte løsningene ansees batteribytte løsning nr. 3 som mest realistisk og med minst usikkerhet og lavest kostnader. Ulempen sammenlignet med alternativ 1 vil være knyttet til kortere rekkevidde.

Konsekvens av å ikke redusere nyttelast

Nyttelast med eksisterende drivlinje er 10 tonn. Den diesel hydrauliske drivlinjen veier 5 tonn. Da kan med andre ord summen av vekten for batteri og ombordutrustning ikke overstige 5 tonn. Ettersom ladeløsning for de ulike alternativene til dette konseptet veier rundt 2,1-2,2 tonn medfører dette at batteriet ikke kan veie mer enn 2,8-2,9 tonn.

Med utgangspunkt i det mobile containerbatteriet Voltpack fra Northvolt, som veier 3 tonn vil man ikke kunne ha en kombinert løsning tilsvarende alternativ 3 med et fast batteri og et mobilt batteri. Da står man i så fall igjen med alternativ 2 som inkluderer kun et mobilt containerbatteri. Batteripakken til Voltpack er 281 kWh. Reelt sett anslås utnyttbar energi å være 225 kWh. Dette gir en rekkevidde på mellom 31-180 km avhengig av aktivitet. Ved å legge til grunn alternativ 1 med et utbyttbart batteri i rammen vil man kunne oppnå lik rekkevidde som angitt for ombyggingskonsept 2 med ren batteridrift på mellom 75-435 km.

6.1.4 Ladetider

Her listes det opp typiske ladeeffekter og ladetider med utgangspunkt i et de endelig dimensjonerte batteriene.

Tabell 31: Viser ladetider for de ulike ombyggingskonseptene

	Ombyggingskonsept 1		Ombyggingskonsept 2					Ombyggingskonsept 3
	KL i fart	KL i ro	AC-lading		DC-lading			DC-lading
	AC	AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	Panto-ned	CCS2
Maks ladeeffekt [kW]	600	1200	600	43	500	800	800	500
Batteri netto, maks 1C - eksempelstørrelse [kWh]	481	570	1152	1165	1167	1156	1166	732
Ladetid [h]	1,2	1,2	2,4	27,1	2,9	1,8	1,8	1,8

MERK:

(1) Batteriet er definert til å maks kunne lade med 1C, dvs. at ladeeffekt ikke kan være høyere enn batteristørrelsen

(2) Ladetid er korrigert med en faktor på 1,25 ettersom ladekurve ikke lader med konstant makseffekt. Kilde faktor: Department for Transport Vehicle licensing statistics, Q4 2020, EV-Database, OEM brochures

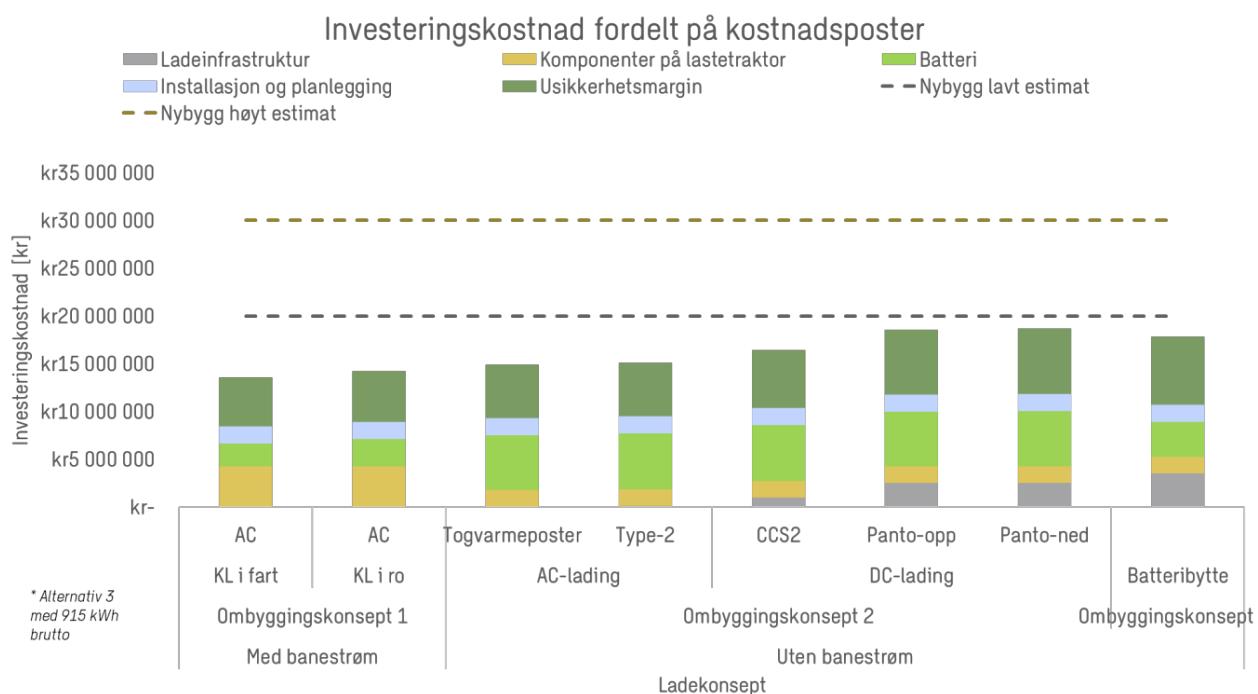
(3) Kun en plugg er lagt til grunn for plugglading. Mulig med flere plugger og økt ladeeffekt

6.1 Økonomisk

Det er gjennomført en grovkalkyle av hva de ulike løsningene vil komme til å koste. Det er, på grunn av høy usikkerhet lagt på en ekstra usikkerhet ved å doble prisene for kostnadspostene knyttet til installasjon og planlegging. Usikkerheten knyttet til utstyrssprisene ansees ikke som stor og de er gitt en usikkerhetsmargin på 150%.

Prisene for komponenter og lignende er kommet frem i dialog med potensielle tilbydere av et slikt system. I Figur 31 sees det at ombyggingskonsept med KL/batteri kommer best ut med en samlet investeringskostnad på 13,5 MNOK, mens en løsning med batteribytte kommer dårligst ut av de tekniske relevante alternativene med en investeringskostnad på 17,8 MNOK.¹⁷

Kostnadene er detaljert i Tabell 32 på neste side.



Figur 31: Sammenligning av investeringeskostnader for de ulike konseptene sett opp mot lavt og høyt estimat for nybygg av en tilsvarende lastetraktor.

¹⁷ Panto-opp og Panto-ned ansees som uaktuelt på grunn av manglende egnethet for denne typen ladeinfrastruktur for banekjøretøy.

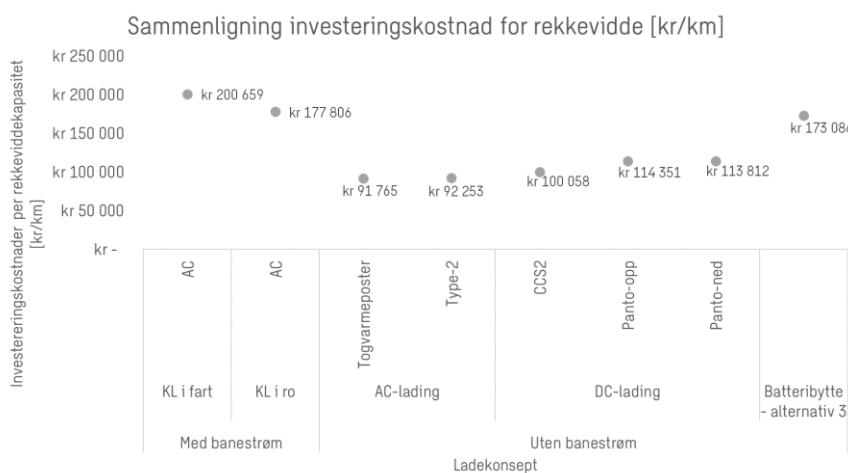
Tabell 32: Viser nedbrytning av økonomi for investeringskostander for de ulike ombyggingsløsningene med tilhørende ladeløsninger.

Ladeløsning	Med banestrom				Uten banestrom			
	KL i fart	KL i ro	AC-lading		DC-lading			Batteribytte - alternativ 3
	AC	AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	Panto-ned	
Ladeinfrastruktur utenfor kjøretøy	kr -	kr -	kr -	kr 100 000	kr 1 000 000	kr 2 500 000	kr 2 500 000	kr 3 500 000
Likeretter [kr]	kr 400 000	kr 400 000	kr 40 000	kr 40 000	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Trafo [kr]	kr 2 000 000	kr 2 000 000	kr -	kr -	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant	Ikke relevant
Kontaktpunkt [kr]	kr 150 000	kr 150 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 10 000	kr 20 000
trafo tilleggsutstyr [kr]	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000	kr 1 700 000
Kabling [kr]								
Motorer controller [kr]								
Elmotorer tilleggsutstyr (kompressor, kran etc.) [kr]								
Elektromotor [kr]								
Tavle med vern [kr]								
Batteri [kr]	kr 2 407 366	kr 2 849 355	kr 5 759 116	kr 5 823 941	kr 5 832 781	kr 5 777 532	kr 5 829 098	kr 3 660 891
Planlegging design (første system)	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000	kr 1 200 000
Demontering eksisterende drivlinje	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000	kr 180 000
Installasjon ny drivlinje [kr]	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000	kr 420 000
Usikkerhet utstyrskost [%]	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %	150 %
Usikkerhet planlegging og arbeid [%]	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	200 %	250 %

SUM pris ulike konsept	kr 13 586 050	kr 14 249 033	kr 14 863 674	kr 15 110 912	kr 16 414 171	kr 18 581 298	kr 18 658 646	kr 17 772 000
Investeringskostnad per km rekkevidde	kr 200 659	kr 177 806	kr 91 765	kr 92 253	kr 100 058	kr 114 351	kr 113 812	kr 174 171

Det er én ting å sammenligne investeringskostnaden opp mot hverandre, men det er også viktig å kunne sammenligne investeringskostnaden opp mot hvor mye rekkevidde man får for de investerte pengene. I Figur 32 sees en slik sammenligning. Her det gjort ut fra hvilken minimumsrekkevidde de ulike alternativene gir ved ren batteridrift ut fra et spesifikt forbruk på 7,1 kWh/km. En slik sammenligning burde kanskje også vært videre utvidet ettersom man også burde kunne vektet annen viktig funksjonalitet enn rekkevidde som f.eks. hvor lang tid det tar å få maskinen operativ igjen etter at den er ferdig utladet, dvs. gjennom høye ladeeffekter og at det går raskt å lade opp batteriet eller bytte det til et nytt. Her ville for eksempel batteribytte løsningen og hurtigladeløsningen med DC kommet bedre ut enn for eksempel AC-lading. Samtidig burde hurtiglading med DC også kommet noe mer negativt ut ettersom løsningen ikke vil kunne nytte seg av eksisterende infrastruktur. Dette vil gjøre den mindre fleksibel eventuelt at løsningen totalt sett blir dyrere ettersom slike ladeanlegg må bygges ut flere steder. Batteribytte løsningen med modulær battericontainer kan man i prinsippet ta med seg ved behov for arbeid på ulike strekninger og sette den som ikke er på kjørerøyet til lading mens kjørerøyet utfører arbeid. Videre vil DC-løsningen også ha ulemper knyttet til behov for oppgradering av strømnettet, mens AC og batteribytte løsninger ikke nødvendigvis vil ha et slikt behov.

Kontaktledningsløsning med lading i fart kommer kanskje overdrevet negativt ut i denne sammenligningen ettersom den har kort rekkevidde på ren batteridrift. På den andre siden vil løsningen kunne ha ubegrenset rekkevidde så lenge den trafikkerer på elektrifisert jernbane. Løsningen burde for øvrig blitt trukket ned på grunn av noe mindre fleksibilitet ettersom den ikke er like egnet til å gjøre arbeid på kontaktledning ved utkobling eller på ikke-elektrifiserte strekninger. Dette kan potensielt sett løses med god planlegging. En annen fordel med denne løsningen er at den kan nytte seg av eksisterende infrastruktur som også ville vært lurt å undersøke ettersom det kan gi en god skaleringseffekt for andre kommende lastetraktorer.



Figur 32: Sammenligning av konseptene opp mot hverandre ut fra investeringskostnad og hvor lang rekkevidde batteriløsningen gir.

7. Anbefalinger

En ombygging av LT15 vurderes som teknisk mulig. Det anbefales at det legges til grunn en redusert nyttelast fra 10 til 5 tonn for å muliggjøre batterielektriske fremdriftskonsepter. Det økonomiske aspektet ved en slik ombygging ansees også å være rimeligere enn å gå til innkjøp av et nybygd tilsvarende kjøretøy. Dette gjelder alle ombyggingskonseptene presentert i denne mulighetsstudien. Det er identifisert flere potensielle firma som kan være aktuelle for å få gjennomført en slik ombygging. Prosjektet har vært i dialog med flere av disse for å validere realismen og redusere usikkerheten. En ombygging av LT15 til batterielektrisk fremdrift i ansees å være et godt strategisk grep for å opparbeide seg bedre kunnskap om praktiske forhold ved et pilotprosjekt. Dette vil gi verdifull informasjon med tanke på hvilke strategiske veivalg som bør gjøres videre for å sikre mest mulig bruk av eksisterende infrastruktur til elektrifiseringen av arbeidsmaskiner og dermed minimere kostnader knyttet til en slik omlegging.

Oppsummert anbefales det å gå videre med ombygging av LT15 til en batterielektrisk lastetraktor som kan lade via kontaktledning både i fart og i ro. Dette ombyggingskonseptet ansees å ha mange fordeler knyttet til bruk av eksisterende infrastruktur, ikke behov for nettoppgraderinger, og ubegrenset rekkevidde på elektrifiserte strekninger. Samtidig gir denne løsningen de laveste investeringskostnadene. Hovedulempen er at den vil ha begrenset rekkevidde sammenlignet med de andre ombyggingskonseptene på ikke-elektrifiserte strekninger.

Fra et rent piloteringsperspektiv, og om man vekter høyest mulig fleksibilitet på ikke-elektrifiserte strekninger, vil ombyggingskonsept med ren batteridrift være aktuelt. Dette kan gi verdifulle erfaringer knyttet til reell bruk og vil kunne forberede grunnen og gi erfaringer knyttet til strategisk arbeid med infrastruktur. Energitetheten i batterier fremover vil fortsette å øke. Dette gjør slike arbeidsmaskiner mer og mer relevant for batteridrift ettersom gapet i ytelsjer mellom diesel og batteridrift gradvis blir mindre.

Om dette legges til grunn står man ovenfor et valg mellom de to ombyggingskonseptene på ren batteridrift, ombyggingskonsept 2 og ombyggingskonsept 3. Dette kan være ombyggingskonsept 2 med fastmonert batteri på 1450 kWh brutto og muligheten for å lade med AC eller DC fra samme kontakt (CCS2) eller det kan være ombyggingskonsept 3 med batteribytte og alternativ 3 med kombinert fastmonert batteri og bruk av containermoduler med batteri som kan løftes av og på. Det fastmonerte batteriet kan også lades vha. CCS2-kontakt eller togvarmeposter slik som ombyggingskonsept 2. Batteribyttekonseptet gir en maksimal batterikapasitet på 907 kWh og det vil være fleksibilitet ved å kunne tilpasse antallet batterimoduler (maks 2) som påmonteres kjøretøyet ut fra hvilke arbeidsoppgaver som er planlagt. Dette vil gi lavere energiforbruk i drift enn for ombyggingskonsept 2

Ombyggingskonseptet KL/batteri kommer best ut på en rekke områder, men om lang rekkevidde på ikke-elektrifiserte strekninger er høyt vektet vil ombyggingskonsept 2 med ren batteridrift komme best ut.

grunnet lavere vekt på kjøretøyet. Hovedulempen med batteribyttekonseptet sammenlignet med et større fastmontert batteri er den maksimale rekkevidden. Overordnet kan disse konseptene løse de fleste driftsoppgaver, bortsett fra de mest krevende rutene med snørydding over lengre tid. Per i dag behov for flere kjøretøyer av denne typen for å kunne håndtere døgnkontinuerlig drift med snørydding.

Ombyggingskonsept nr. 2 med fastmontert batteri vil kunne nytte seg av kombinert DC og AC-lading via CCS 2-kontakt på kjøretøyet. Dette vil muliggjøre hurtiglading, samtidig som det vil være relativt rimelig å bygge ut infrastruktur med AC-lading flere steder. Disse stedene vil før øvrig gi begrensete ladehastigheter. Denne infrastrukturen kan samtidig sambrukes med andre batterielektriske veigående kjøretøy.

Komponentene og ladeløsningene ansees som hyllevare og alt er gjennomstandardisert med tanke på ladeløsninger. Det finnes løsninger som kan forvarme batteri og førerhus i forkant av drift på batteriet ved oppstart.

8. Referanser

- [Bane NOR, «RB-0000002463 rev. 004 Brukerhåndbok lastetraktor LT15,» 2019.
1
]
[Bane NOR, «K02-00-10 rev. 00E Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra
2 arbeidsmaskiner i periodene frem til 2030 og 2050,» 2022.
]
[VR-Group Pic, «Machine intelligence increases energy efficiency, punctuality and
3 travel comfort for train traffic,» 5 juli 2021. [Internett]. Available:
] <https://www.vrgroup.fi/en/vrgroup/news/machine-intelligence-increases-energy-efficiency-punctuality-and-travel-comfort-for-train-traffic-050720211429/>.
[Funnet 29 august 2022].
[VR group, «Corporate responsibility report 2021,» 18 mars 2022. [Internett].
4 Available:
] https://vrgroup.studio.crasman.cloud/file/dl/a/cdTsCw/KLjPFdeD7YhiBWK50VnMvA/VR_Group_Corporate_Responsibility_Report_2021.pdf. [Funnet 29 august 2022].
[N. D. Popovich, D. Rajagopal, E. Tasar og A. Phadke, «Economic, environmental and
5 grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric,» *nature energy*
] , vol. 6, pp. 1017-1025, 2021.
[GANZ MOTORS, «Railway Bogies,» 2018. [Internett]. Available:
6 <https://ganzmotor.hu/products/railway-bogies/>. [Funnet 01 september 2022].
]
[Jernbanedirektoratet, «CO2 utslippsreduksjoner fra skinnegående
7 arbeidsmaskiner,» 2022.
]
[M. Zeiner, M. Landgraf, D. Knabl, B. Antony, V. B. Cárdenas og C. Koczwara,
8 «Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work
] Machinery,» *sustainability*, vol. 13(20), 16 Oktober 2021.
[IVECO, «Vector Series Use and Maintenance,» mars 2006. [Internett]. Available:
9 <http://www.iveco.su/manuals/UseMaintenanceManual-VECT0Rseries--L31900015E-Apr06.pdf>. [Funnet 01 september 2022].

Appendiks

Sammenlikning med LTR17

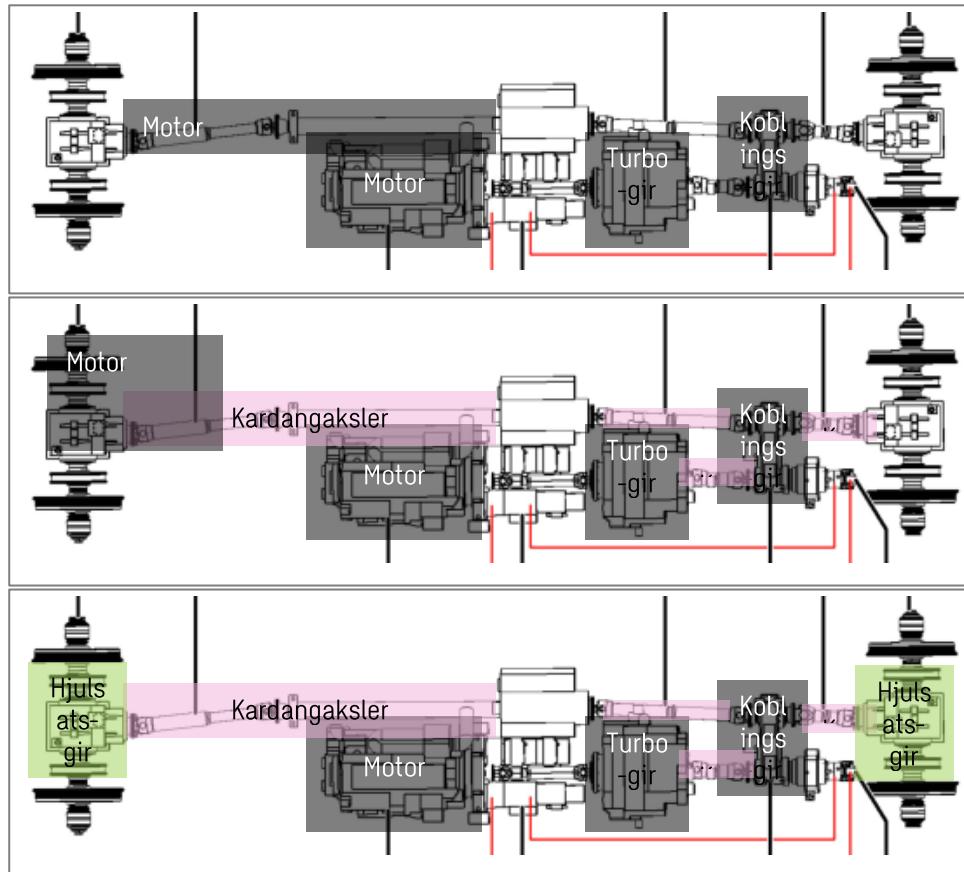
LTR17 er en maskin med liknende bruksmønster som LT15 opprinnelig var tiltenkt. Det er en toakslet lastetraktor fra Windhoff levert fra 2016. Prosjektet har undersøkt hvilke likheter og forskjeller man finner mellom denne og LT15 for å se om resultatene enkelt kan overføres.



Figur 33: LTR17 stasjonert på Oppdal. Foto:Sweco

Prosjektet har sett på LTR17-maskinen som står på Oppdal. Denne stod over smøregrava så tilgangen til drivlinja var god. Både mekaniker fra Bane NOR og fører fra Spordrift var med på befaringa. I uformell prat ble både en eventuell elektrifisering drøftet, samt erfaringer fra drift av LTR17. Inntrykket er at LTR17 er en godt likt maskin, driftsikker og med god ytelse for sin bruk.

Maskina har mekanisk traksjon ved transportkjøring og kobles om til hydrostatisk traksjon ved vinterdrift (lave hastigheter, store krav til ytelse). Siden den inneholder omtrent samme utrusning som LT15, men kun har to akslinger er det langt mindre tilgjengelig nyttelast å gå på.



Figur 34: Drivlinje LTR17. Figur hentet fra brukermanual LTR17.

Som vist i Figur 34 består drivlinja av drivstofftank, motor, et turbogir, to hjulsatsgir og koblingsgir, samt 6 kardangaksler. Om man antar at drivlinja fram til og med hjulsatsgirene tas ut, og man heller setter på elmotorer på hjulsatsene vil man i teorien kunne frigi en del vekt:

- Drivstoff, tank, og så videre: 0,7 tonn
- Motor, inkl. eksos: 2,1 tonn
- Kjølesystem motor: 0,3 tonn
- Kardanger (anslått): 1,3 tonn
- Turbogir, inkl. kjøler: 1,4 tonn
- Koblingsgir (anslått): 0,5 tonn

Det antas at hjulsatsgiret og elmotorene veier omtrent like mye, så de er ikke tatt med i beregninga.

Tabell 33: Sammenlikning av tekniske spesifikasjoner LT15 og LTR17

	LT15	LTR17
Lengde [m]	16,44	14,24
Egenvekt [tonn]	54	40
Nytte last [tonn] ¹⁸	10	5
Ytelse motor [kW]	640	522
Drivstoffkapasitet [liter diesel]	600+600	700
Opprinnelig drivlinje	Hydrostatisk	Hydrodynamisk traksjon, hydrostatisk ved tungt arbeid
Dimensjonert for aksellast [tonn/aksel]	18	22,5
Anslag av vekt tilgjengelig uten fossildrevet drivlinje [tonn]	5	6,3

I sum er resultatene for LT15 i stor grad overførbare. På maskiner som LTR17 er det lite tilgjengelig vekt, så batteridrift vil medføre redusert rekkevidde.

¹⁸ Vekt av snøryddeutstyr (kost, plog og fres) er anslått til å veie ca. 5 tonn, og ved vinterdrift vil derfor tilgjengelig nytte last reduseres tilsvarende.

Resultater nøkkeltall

Prosjektet har kartlagt lastetraktor LT15 nøyne og kommer frem til at det frigjøres 5038 kg ved å fjerne eksisterende diesel-hydrauliske drivlinje. Volum er ikke noen begrensende faktor for lastetraktor, men det kan frigjøres nesten 9000 liter ved å ta bort eksisterende drivlinje.

Basert på dieselmotorens effekt på 640 kW kan det da utledes nøkkeltall som kan brukes videre for å grovestimere for andre lignende kjøretøy hvor mye tilgjengelig plass og vekt som kan være relevant med tanke på en ombygging av kjøretøyet og utskifting til nye energibærere. Nøkkeltallene som er avledd ut fra kartleggingen av LT15 er:

- $5\,038\text{ kg} / 640\text{ kW} = \mathbf{7,87\text{ kg/kW}}$
- $9000\text{ liter} / 640\text{ kW} = \mathbf{14,062\text{ l/kW}}$

Det sees også på hvilket nøkkeltall dette med tanke på batterikapasitet. Dette vil selvsagt variere fra valgt ladeløsning, derfor listes de ulike opp her.

	Med banestrøm			Uten banestrøm			
	KL i fart	KL i ro	AC-lading	DC-lading			
	AC	AC	Togvarmeposter	Type-2	CCS2	Panto-opp	Panto-ned
Nøkkeltall, kWh batteri/kW installert effekt dieselmotor	0,94	1,11	2,25	2,27	2,28	2,26	2,28

For befart LTR17 blir tilsvarende nøkkel:

- $6\,300\text{ kg} / 522\text{ kW} = \mathbf{12\text{ kg/kW}}$
- Volum er ikke kartlagt i tilstrekkelig grad, men ansees som en ikke-begrensende faktor.

LTR17 har nyttelast på 5 tonn som blir nødvendig å bevare for å kunne bruke snøfres. Derfor er det litt mindre tilgjengelig vekt på LTR17 til batteri og ladeløsning etter at dieselmotor er fjernet sammenlignet med LT15. Til gjengjeld ansees drivlinjen for diesel å være tyngre, så samlet sett er det 6 300 kg tilgjengelig for batteri- og ladeløsning. Ut fra vektene til lading med banestrøm vil dette være problematisk ettersom de veier mellom 6,7-6,2 tonn. LTR17 er derfor lite egnet til å bruke en slik ladeløsning. Med AC eller DC ladeløsning, som veier rundt 2 tonn ekstra på kjøretøyet, vil det være 3,3 tonn tilgjengelig til batteri. Dette gir muligheten til en batteristørrelse på opp mot rundt 600 kWh, som basert på forbruksdata fra logging av LTR17 i kapittel 0 og Tabell 5 gir en rekkevidde på mellom 100-260 km. Med utgangspunkt i den spesifikke forbruksverdien som går igjen i flere litteraturstudier, men som kan ansees som representativt for ren transportkjøring på flat bakke uten mye start og stopp, på 0,02 kWh/tonnkilometer gir det en rekkevidde på 500 km med kjøretøyets egenvekt + nyttelast på 45 tonn som utgangspunkt.