




NULLFIB₂

Nullutslipp - batteridrift på jernbanen

Delrapport 2 – Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen

Delrapport 2
Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen

Prosjekt:
NULLFIB2
Nullutslipp – batteridrift på jernbanen

			<small>Lars-Kristian Njåstad</small>	<small>Eiril Bjonstad</small>	<small>ANJAN</small>	
01E	Korreksjon av kostnadsestimat	15.10.2021	NJALAR	BJOEIR	ANJAN	
00E	Første utgave	01.09.2021	GEBOYV	NJALAR	BJOEIR	
Revisjon	Revisjonen gjelder	Dato	Utarbeidet av	Kontrollert av	Godkjent av	
Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen		Antall sider:	101			
		Produsent:	Bane NOR SF			
		Prod.dok.nr.:				
		Erstatning for:				
		Erstattet av:				
Prosjekt: Nullutslipp - batteridrift på jernbanen		Dokumentnummer:			Revisjon:	
Prosjekt nr.: 600374		MIP-00-A-60144			01E	
		Drift dokumentnummer:			FDV-rev.:	
		N/A			N/A	

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 3 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

1 INNLEDNING

Jernbanedirektoratets prosjekt «Nullutslipp- batteridrift på jernbanen» har utredet teknologier og muligheter ved batteridrift av de ikke-elektrifiserte jernbanene i Norge.

Prosjektet har laget en overordnet hovedrapport og to faglige delrapporter. Den ene delrapporten handler om batterier i tog. Den andre delrapporten, som er denne, handler om hvilke krav batteridrift setter til banestrømforsyningen, og hvordan disse påvirker utformingen av ladepunkter, ladestrekninger og matestasjoner. Store deler av delrapporten er dokumentasjon av resultater fra beregninger av ulike løsninger. Delrapporten er utført av Bane NOR.

Prosjektet har vurdert mulighetene på Nordlandsbanen, Rørosbanen, Solørbanen og Raumabanen. Det er stor forskjell i lengde på disse banene og det stor forskjell på de ulike trafikkopplegg/ruter som skal betjenes. Det er også flere typer tog (persontog, motorvognsett, godstog, tømmerog og malmtog) som skal trafikkere disse rutene. Dette har nødvendiggjort et stort antall beregninger.

En ekstra kompliserende faktor er at batteriteknologien utvikler seg raskt, slik at det er usikkert hvilken batterikapasitet som vil bli mulig å installere når det er aktuelt å ta batteritog i bruk i Norge.

Optimal utforming av banestrømforsyningen henger tett sammen med mulig batterikapasitet i togene på det aktuelle tidspunktet for realisering.

I denne rapporten er det derfor beregnet et større antall forslag til banestrømforsyninger for ulike batteristørrelser, togtyper, baner og ruter. På denne måten er mulighetsrommet for slik togdrift kartlagt.

Sammenheng med NULLFIB

Jernbanedirektoratet gjennomførte i 2020 et prosjekt kalt NULLFIB (Nullutslipp For Ikke-elektrifiserte Baner). Dette prosjektet undersøkte ulike måter å realisere jernbanedrift uten utslipp på de ikke-elektrifiserte banene i Norge. Det ble undersøkt løsninger basert på hydrogen, biogass, biodiesel, deelektrifisering og fullelektrifisering. Deelektrifisering virket mest lovende, det ble derfor utført et konkret og relativt detaljert studium av deelektrifisering av Nordlandsbanen for godstog, etter som godstog på Nordlandsbanen ble ansett som den mest krevende elektrifiseringen.

Også i dette prosjektet var Bane NOR bidragsyter, spesielt i forhold til utforming og beregning av banestrømforsyningen.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 4 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Det er ikke kjent at det finnes eksempler på ordinær batteridrift av godstog noen steder. Det var derfor viktig å gjøre tilstrekkelig detaljerte undersøkelser for å sjekke ut realismen i en slik utbygging, teknologisk og økonomisk.

Studiet konkluderte med at deelektrifisering er realistisk og at en slik banestrømforsyning kunne bygges opp med komponenter som allerede er i bruk i jernbanesammenheng. Et pilotprosjekt for deelektrifisering av banestrømforsyningen ville derfor ikke være nødvendig. Kostnadene for en deelektrifisering ble beregnet til å bli en brøkdel av full elektrifisering.

Dette ga Jernbanedirektoratet et grunnlag for å gå videre med undersøkelser av mulighetene ved deelektrifisering av alle ikke-elektrifiserte baner i Norge gjennom prosjektet «Nullutslipp – batteridrift på jernbanen», altså dette prosjektet.

Bane NORs oppgave i Nullutslipp - prosjektet var å ta ett skritt tilbake i forhold til løsningen som ble undersøkt gjennom NULLFIB. Omfanget ble utvidet til å se med et vidt blikk på alle mulige løsninger for utforming av banestrømforsyning for alle baner og togtyper. Dessuten vurdere bruk av 50 Hz løsninger.

2 INNHOLD

1	INNLEDNING	3
2	INNHOLD	5
3	GENERELT OM DELELEKTRIFISERING OG BATTERITOG	8
4	GRUNNLEGGENDE OM DELELEKTRIFISERINGSLØSNINGER	9
5	BATTERITEKNOLOGI	12
6	ULIKE LOKOMOTIVTYPER MED BATTERI	13
7	BEREGNINGER OG MÅLINGER AV ENERGIFORBRUK	14
7.1	MÅLINGER PÅ ELEKTRISKE GODSTOG PÅ DOVREBANEN	14
7.2	MÅLINGER FRA DIESELDREVNENE GODSTOG PÅ NORDLANDSBANEN	16
8	INNGANGSDATA I ENERGIBEREGNINGENE	19
8.1	KJØREMOTSTANDER	19
8.2	SPESIELLE MOTSTANDSFORHOLD	20
8.3	HASTIGHETER, AKSELERASJONER/RETARDASJONER, STOPP UNDERVEIS	21
8.4	HØYDEPROFILER	21
8.5	BATTERIKAPASITETER.....	21
8.6	C-RATE.....	21
8.7	ENERGIFORBRUK/LEVETID FOR BATTERIET, MARGINER.....	23
8.8	VIRKNINGSGRADER BRUKT I BEREGNINGENE	23
8.9	HJELPEKRAFTFORBRUK	25
8.10	MAKSIMALT EFFEKTOPPTAK	25
8.11	MAKSIMALE PANTOGRAFSTRØMMER OG LADESTOPP.....	26
8.12	ISING PÅ KONTAKTLEDNING	27
8.13	HYPPIGE PANTOGRAF NEDTAK.....	27
9	LØSNINGER FOR BANESTRØMFORSYNING	28
9.1	NORDLANDSBANEN.....	29
9.1.1	2,6 MWh.....	29
9.1.2	3,4 MWh.....	30
9.1.3	5,0 MWh.....	31
9.1.4	7,5 MWh.....	32
9.1.5	Motorvogn.....	33
9.2	RØROSBANEN	34
9.2.1	2,6 MWh.....	34
9.2.2	3,4 MWh.....	35
9.2.3	5,0 MWh.....	36
9.2.4	7,5 MWh.....	37
9.2.5	11 MWh.....	38
9.2.6	Motorvogn Hamar – Elverum.....	39
9.3	RAUMABANEN	40
9.3.1	2,6 MWh.....	40
9.3.2	3,4 MWh.....	41
9.3.3	5,0 MWh.....	42
9.3.4	7,5 MWh.....	43
9.3.5	Motorvogn.....	44
9.3.6	Solørbanen	45
10	DAGENS TOGRUTER OG STREKNINGER	46
11	BRUK AV INFRASTRUKTUREN FOR ANDRE TOGTYPEN	48
11.1	REGIONTOG MED LOK OG VOGN, TRONDHEIM – BODØ	48
11.2	REGIONTOG MED MOTORVOGNSETT, TRONDHEIM - BODØ.....	48

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 6 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

11.3	REGIONTOG OSLO - RØROS - TRONDHEIM	48
11.4	LANGRUTER OSLO - RØROS OG RØROS - TRONDHEIM	49
12	TOGRUTER SOM BARE KREVER ENKEL STRØMFORSYNING	50
12.1	RAUMABANEN	50
12.2	SALTENPENDELEN	51
12.3	TRØNDERBANEN	52
12.4	HAMAR – ELVERUM	52
13	MALMTOG VED RANA GRUBER	53
14	TØMMERTOG PÅ SOLØRBANEN	55
14.1	5 MWH	56
14.2	7,5 MWH	56
15	BEREGNINGSGRUNDLAG – SAMLET OVERSIKT	58
15.1	NORLANDSBAANEN	58
15.2	RØROSBANEN	59
15.3	RAUMABANEN	60
15.4	SOLØRBANEN	61
16	VIRKNING AV ØKT C-RATE	62
17	ENHETSPRISER	70
18	KOSTNADSBILDE	71
18.1	NORLANDSBAANEN	71
18.2	RØROSBANEN	72
18.3	RAUMABANEN	73
19	MATESTASJONER, UTFORDRINGER OG LØSNINGER	74
19.1	SPESIELLE FORHOLD VED DELELEKTRIFISERT JERNBANE	74
19.1.1	<i>Redundansbehov</i>	<i>75</i>
19.1.2	<i>Andre tiltak for å sikre pålitelighet</i>	<i>75</i>
19.1.3	<i>Plassering av matestasjoner og kapasitetsbehov</i>	<i>76</i>
19.1.4	<i>Spenningsystemer</i>	<i>77</i>
19.2	MATESTASJONER FOR 16 2/3 Hz MED FREKVENSSOMFORMERE	77
19.3	MATESTASJONER FOR 50 Hz UTEN FREKVENSSOMFORMERE	78
19.3.1	<i>Usymmetri og minimum kortslutningsytelse</i>	<i>78</i>
19.4	EKSEMPLER PÅ 50 Hz LØSNINGER FRA DANMARK OG FINLAND	79
19.4.1	<i>Dansk løsning for matestasjoner</i>	<i>79</i>
19.5	UTFØRELSE SOM REDUSERER USYMMETRI	82
19.5.1	<i>Enkel transformatorløsning med to seksjoner</i>	<i>82</i>
19.5.2	<i>Enkel transformatorløsning med tre seksjoner</i>	<i>83</i>
19.5.3	<i>Spesialtransformator løsninger</i>	<i>84</i>
19.5.4	<i>Steinmetz metode</i>	<i>85</i>
19.5.5	<i>Avanserte teknologier for å redusere usymmetri</i>	<i>85</i>
19.6	VURDERING AV 50 Hz LØSNINGER FOR NORGE	86
19.7	EFFEKTSTØTTEANLEGG	88
20	SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER	89
21	VEDLEGG 1 - MAKSIMAL LENGDE PÅ LADESTREKNINGER	90
21.1.1	<i>Bakgrunn</i>	<i>90</i>
21.1.2	<i>Forutsetninger for beregningene</i>	<i>90</i>
21.1.3	<i>Normer</i>	<i>90</i>
21.2	DIMENSJONERENDE SITUASJONER	92
21.3	UTFORMINGER AV INFRASTRUKTUR	93
21.4	BEREGNINGSGRUNNLAG	94

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 7 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

21.5	RESULTAT AV BEREGNINGER.....	95
21.6	DISKUSJON OG KONKLUSJONER.....	96
21.7	APPENDIKS: REGNEMODELLER FRA POWER FACTORY.....	97
21.7.1	<i>Utforming 1</i>	97
21.7.2	<i>Utforming 2</i>	99
21.7.3	<i>Utforming 3</i>	101
21.7.4	<i>Referanse</i>	101

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 8 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

3 GENERELT OM DELELEKTRIFISERING OG BATTERITOG

Delelektrifisering innebærer at bare deler av jernbanen blir utstyrt med kontaktledning. Dette gir i seg selv lavere kostnader enn full elektrifisering langs hele banen. I tillegg kan kostnadene ved elektrifisering reduseres ved at de elektrifiseringene bare gjøres på strekningene legges der det ikke er tunneller, overgangsbroer eller andre hindre.

Ulempen med delelektrifisering er at kun lokomotiver og motorvogner med tilstrekkelig stor batterikapasitet som kan trafikkere banen. Slike lokomotiver er mer kostbare, og markedet er begrenset. Store godslokomotiv er foreløpig ikke utviklet.

Det er vektbegrensninger i lokomotivene, slik at en er avhengig av en videre teknologiutvikling for å kunne plassere inn meget store batteri. Generelt er det slik at jo større batterikapasitet det skal installeres i togene, jo dyrere blir lokomotivene. Men jo større batterikapasitet togene har, jo lengere strekninger kan kjøres på batteri, og jo kortere og billigere blir de elektrifiserte strekningene. Med andre ord kan venting på at mulig batteristørrelse når et visst nivå, gjøre at totalkostnaden for elektrifisering går ned. Dette er dokumentert i rapporten.

På ett tidspunkt må en eventuelt velge å bygge. Utformingen av infrastrukturen vil påvirkes av hva som er mulig batterikapasitet i et godslokomotiv på dette tidspunktet. Infrastrukturen som blir bygget blir da endelig.

Det må forventes at mulig batterikapasitet vil fortsette å øke videre framover. Dette kan utnyttes når batteriet i lokomotivet en gang må utskiftes. Batteriteknologien er da trolig blitt enda bedre og større batterikapasitet kan gi lengere batterilevetid. Eventuelt kan batteriene da tillate hurtigere eller tyngre tog.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 9 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

4 GRUNNLEGGENDE OM DELELEKTRIFISERINGSLØSNINGER

Delelektrifisering skiller seg fra full elektrifisering på flere måter:

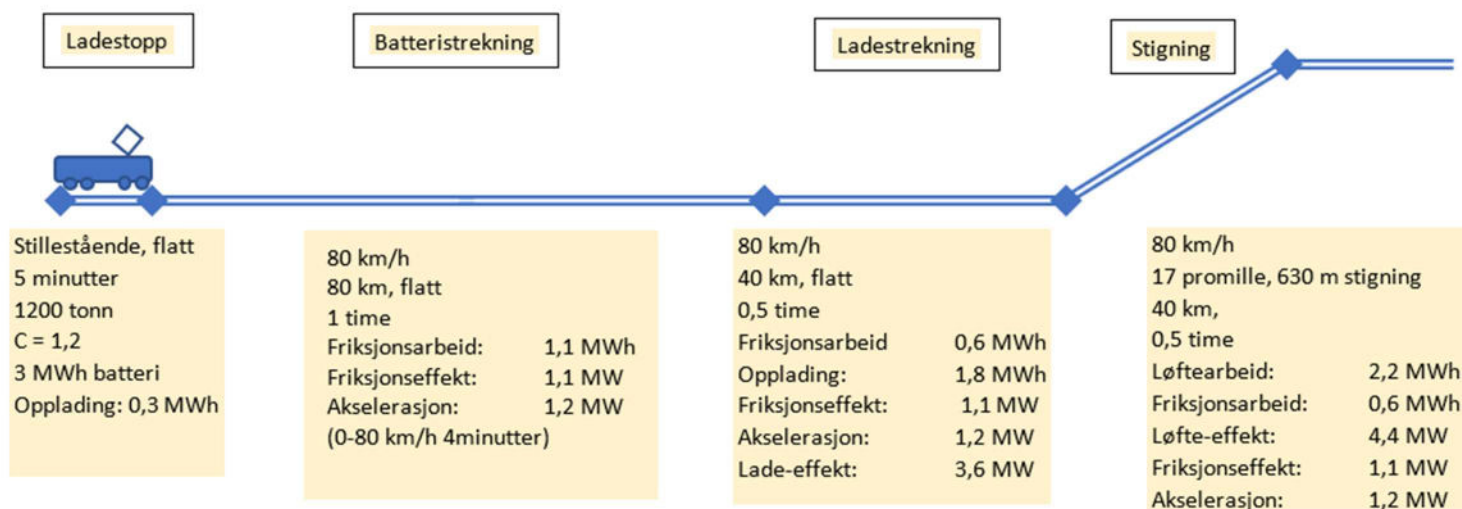
Ved full elektrifisering er kontaktledningssystemet sammenhengende, enten gjennom kontaktledningen (BT system) eller gjennom AT ledere. Det betyr at hvis en matestasjon faller ut av drift, så vil det likevel være spenning på kontaktledningen ved matestasjonen.

Ved delelektrifisering vil det ikke være forbindelse mellom de ulike kontaktledningsseksjonene (ladestrekningene). Dermed vil utfall av matestasjonen på som forsyner en ladestrekning gi null spenning på ladestrekningen og trafikken vil stoppe helt opp. Dette setter ekstra krav til redundans både i matestasjon og i overliggende nett.

Det er strenge krav til pålitelighet også for fullelektrifisert bane, slik at løsningene likevel ikke blir grunnleggende annerledes. Men det må vises ekstra omtanke ved prosjektering, utforming av vaktordninger og beredskapsløsninger.

En annen forskjell er at togene vil trekke betydelig høyere strømmer fra banestrømforsyningen. Dette fordi et tog på ladestrekningene både skal lade og kjøre samtidig. På strekninger med stigning skal det også klatres, noe som krever mye effekt. Batteristrekningene kan være 2-4 ganger lengere enn ladestrekningene. Effektbehov kan i gjennomsnitt bli 3-5 ganger større enn på en konvensjonell elektrifisert bane.

For å hjelpe forståelsen av energi- og effektbehov for banestrømforsyning ved delelektrifisering er det vist et stilisert eksempel i Figur 1. Her er behovene for et 1200 tonn godstog illustrert for typiske strekning som stillstand på stasjon, flat batteristrekning, flat ladestrekning og en batteristrekning med bratt stigning (17 promille). I eksemplet er det antatt typiske verdier for fart, strekningslengde, oppholdstid og kjøremotstand.



Figur 1: Illustrasjon av energi- og effektforhold på typiske strekninger

På et 5 minutt ladestopp, for eksempel på kryssingsspor eller jernbanestasjon, vil et lokomotiv med 3 MWh batteri med ladehastighet C = 1,2 kunne lades opp med 0,3 MWh. Som en ser under neste kolonne, vil toget kunne kjøre ca. 20 km på flat mark på denne oppladingen.

På en flat 80 km lang batteristrekning i 80 km/h vil toget bruke 1 time. Det vil forbruke 1,1 MWh og ha et gjennomsnittlig effektbehov på 1,1 MW. Under en 4 minutter akselerasjon fra 0 til 80 km/t kreves det i tillegg 1,2 MW effekt.

I eksemplet er det videre vist en ladestrekning som er halvparten så lang som batteristrekningen. Også her kjøres det i 80 km/h og tidsforbruket er en halv time. I løpet av denne tiden vil det 3 MWh store batteriet kunne lades opp med 1,8 MWh, der C fortsatt er lik 1,2. Ladeeffekten er 3,6 MW. Det totale effektbehovet inkluderer også framdrift og er lik 4,8 MW. Hvis en også inkluderer en akselerasjon, blir effektbehovet 6,0 MW.

Den siste kolonnen viser energi og effekt på en 40km batteristrekning med stigning. Løftearbeidet er hele 2,2 MWh og det ekstra effektbehovet for løft er 4,4 MW.

Løftearbeidet dominerer effektbalansen i toget på bratte strekninger. Totalt effektbehovet er så stort at dimensjoneringen av matestasjonen på bratte strekninger må gis ekstra oppmerksomhet. En mulighet kan være å sette ned hastigheten i slike lange stigninger.

Mulige akselerasjoner og eventuell lading samtidig vil også kreve ekstra effekt fra matestasjon.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 11 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Eksemplet over er kun ment som en enkel illustrasjon. Virkningsgrader og sikkerhetsmarginer i batteri og i kalkulasjoner er ikke tatt med. I virkeligheten vil hver strekning inneholde mange høyde- og hastighetsforandringer som i stor grad vil påvirke effektbehov og energiforbruk. Det er nødvendig med detaljerte beregninger for å kunne beregne energistatus i batteriet underveis, og dette er gjort for de aktuelle banene. Resultatene er vist senere i rapporten.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 12 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

5 BATTERITEKNOLOGI

Batteriteknologien er under sterk utvikling, der energikapasitet i forhold vekt- og volumenhet årlig blir forbedret.

En rekke nye batterikjemier er under utvikling. Disse kan i tillegg til kapasitetsøkning også gi lavere tap, lavere aldringshastighet, øket antall sykler og de vil være mindre brannfarlige.

Imidlertid kan en observere at batterier for tog henger flere år etter utviklingen i forhold til biler og busser. Dette kan skyldes markedsforhold, det vil si at forventet salgsvolum er for lite til at leverandører vil konstruere årlige forbedrede utgaver for bruk i tog, men heller tilby batterier som er utviklet tidligere og tilpasset togdrift.

Markedet for godslokomotiv med stor batterikapasitet foreløpig er lite. Forventningen er at de første godslokomotiv med batteri ikke vil være nyutviklinger fra grunnen av, men i meget stor grad bygge på eksisterende standardlokomotiv. For eksempel kan et hybrid diesel/elektrisk lokomotiv bli tilpasset ved at alt utstyr til dieseldrift ikke installeres, men at batterier bli satt inn i stedet. Det vil være begrenset plass til batterier i slike lokomotiver.

Det er stor usikkerhet om hvor rask utviklingen i mulig batterikapasitet i lokomotiv vil bli. I denne rapporten er det derfor gjort energiberegninger og laget infrastrukturløsninger for et større antall mulige batterikapasiteter. Godstog krever de lengste ladestrekningene og de beregnede løsningene er derfor tilpasset godstog

I det følgende er det vist beregningsresultater for alle baner for batteristørrelsene 2,6 MWh, 3,4 MWh, 5 MWh, 7,5 MWh og 11 MWh.

Aktuelle og framtidige batterityper, egenskaper og priser for batterier er behandlet detaljert i egen delrapport i dette prosjektet og det henvises til denne.

6 ULIKE LOKOMOTIVTYPER MED BATTERI

Prosjektet har arbeidet med å kartlegge hvilke batterikapasiteter som kan bli mulig for ulike togtyper ved bestilling i 2025 og levering i 2030, samt bestilling i 2030 og levering i 2035. Anslagene er meget usikre og gjengis nedenfor. For øvrig vises det til prosjektets delrapport om batteriteknologi.

Tabell 1: Maksimalt mulig batterikapasitet i ulike togtyper i framtiden

Bestilling i 2025 godkjent og idriftsatt i 2030

	Motorvognsett 195t, 160 seter	6-akslet lok	Dobbelt 6-akslet lok
Optimistisk anslag i 2030	2,4 MWh	3,6 MWh	7,2MWh
Realistisk anslag i 2030.	2,1MWh	3,15MWh	6,3MWh
Konservativt anslag i 2030.	1,5MWh	2,3 MWh	4,5MWh
Dagens situasjon	1,2 MWh	1,8 MWh	3,6MWh

Bestilling i 2030 godkjent og idriftsatt i 2034

	Motorvognsett 195t, 160 seter	6-akslet lok	Dobbelt 6-akslet lok
Optimistisk anslag i 2034	3,0 MWh	4,5 MWh	9,0MWh
Realistisk anslag i 2034	2,4 MWh	3,6 MWh	7,2MWh
Konservativt anslag i 2034	2,1 MWh	3,15 MWh	6,3MWh
Dagens situasjon	1,2 MWh	1,8 MWh	3,6MWh

NB! Tabellene viser hvilken størrelse batterier som prosjektet antar kan installeres i de ulike togtypene på ulike tidspunkt. Imidlertid vil batteriene miste kapasitet under bruk. Det antas at batteriene må skiftes ut når kapasiteten er redusert med 20%.

Lokomotivet må ha tilstrekkelig kapasitet også i de siste årene av batteriets levetid. I beregningene gjort senere i rapporten er derfor den aldrete kapasiteten brukt, ikke den kapasiteten som er installert ved idriftsettelsen av lokomotivet.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 14 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

7 BEREGNINGER OG MÅLINGER AV ENERGIFORBRUK

Bane NOR har avanserte dataprogrammer som regner ut løpende elektrisk forbruk for nærmere spesifisert togtrafikk med ulike togtyper. Programmene brukes til å beregne hvilken effektytelse som er nødvendig å installere i matestasjonene. Men det er foreløpig ikke tilgjengelig programmer som kan regne ut løpende ladestatus på batteriene til et tog som kjører på deelektrifisert jernbane, og som dermed gir mulighet for å dimensjonere lengde og plassering av ladestrekninger.

I forbindelse med NULLFIB prosjektet ble det derfor laget et eget program for dette formålet. Det bygger på elementmetoden, der elementene (strekningene) kan ha vilkårlig lengde og kan tilpasses høydeprofilene og hastighetsprofilene til jernbanen. For å sikre at programmet regner riktig, er det faktiske forbruket på 60 togturer med elektriske lokomotiv på Dovrebanen målt og sammenlignet med utregnede forbruk fra dette programmet.

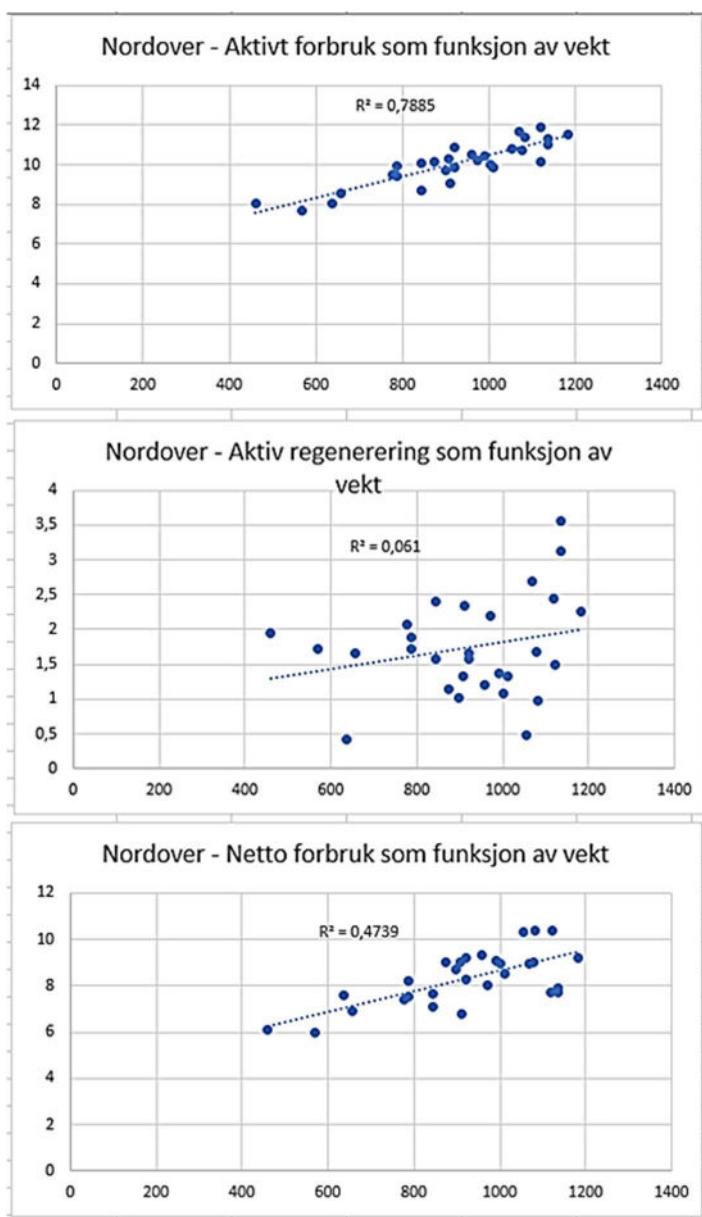
For å få ytterligere gode data for faktisk energiforbruk er det kjøpt inn energimålere til fire dieseldrevne lokomotiver på Nordlandsbanen. Målerne på CargoNets to BR 185 seksakslede lokomotiv har siden april 2021 sendt målinger av forbruket til elektrisk framdrift og disse er analysert. Målere på SJ's to Di4 lokomotiv for persontog er ikke ferdig montert.

7.1 Målinger på elektriske godstog på Dovrebanen

Markedsavdelingen i Bane NOR samler allerede inn energidata fra alle elektriske lokomotiv i Norge gjennom ERESS systemet.

Energiforbruksdata fra 30 nordgående og 30 sydgående godstog ble gjort tilgjengelig for prosjektet. Distansen var Alnabru - Heimdal og retur og loktypen var BR 185.

Disse forbruksdata ble sammenholdt med data for togvekt fra TIOS systemet og resultatet er vist i Figur 2: Målt forbruk som funksjon av togvekt. Figur 8:



Figur 2: Målt forbruk som funksjon av togvekt

Som en ser av kurvene over ligger ikke måleresultatene langs en rett linje, men er spredt som punkter. Regresjonslinjen indikerer et nettoforbruk på 9,7 MWh og 10,4 MWh for henholdsvis nordgående og sydgående tog ved 1200 tonn. Snittforbruk for nordgående og sydgående 1200 tonn tog i utvalget vil da være ca. 10 MWh.

Programmet beregner at tilsvarende tog vil bruke 9,4 MWh.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 16 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Det er mange feilkilder i en slik utregning. Den viktigste er mulige unøyaktigheter i koeffisientene for kjøremotstand. Dessuten er akselerasjoner, oppbremsinger, slipp, kurvemotstand og tunellmotstand ikke er tatt hensyn til i programmet.

Avviket på 0,4 MWh indikerer at programmet er tilstrekkelig nøyaktig til bruk i en utredning, men at det bør legges på en margin for de faktorene som ikke er tatt hensyn til i programmet.

Imidlertid, det holder ikke å dimensjonere for gjennomsnittsforkonsumet. En banestrømforsyning må dimensjoneres for det maksimale forbruket. Ifølge målingene vil et tog på 1200 tonn maksimalt bruke 11 MWh.

For å gi et konservativt estimat må det derfor inn en margin. I beregningene som er vist senere i rapporten er det lagt inn korreksjonsfaktor på 1,2 på kjøremotstanden fra Bane NORS kvalitetssikrede database for ulike togtyper. Det er også lagt inn korreksjonsfaktor på 1,2 på togvekt på de ulike togtypene, slik at forbruket opp bakker ikke blir underestimert.

7.2 Målinger fra dieseldrevne godstog på Nordlandsbanen

Når Nordlandsbanen eventuelt skal deelektrifiseres er det betryggende å ha reelle forbruksdata fra tog som har kjørt på distansen. Når en gang at strømforsyningen skal dimensjoneres og lokomotiv skal spesifiseres og kjøpes inn, vil slike data være nyttige. I Figur 3: Forbruksmålinger for godstog fra togturer på Nordlandsbanen vises innhentede måledata for traksjon fra godstog på Nordlandsbanen i april 2021.

Tidspunkt fra	Tidspunkt til	Tidsforbruk h	Distanse	Energi traksjon MWh
09.04.21 13:44	10.04.21 6:10	16,43	Bodø- Trondheim	8,8
16.04.21 7:22	16.04.21 20:10	12,80	Trondheim -Bodø	11,4
16.04.21 22:02	17.04.21 10:19	12,28	Bodø- Trondheim	11,8
17.04.21 7:14	17.04.21 21:57	14,72	Trondheim -Bodø	13,1
19.04.21 18:57	20.04.21 9:09	14,20	Trondheim -Bodø	10,3
20.04.21 9:22	20.04.21 22:05	12,72	Bodø- Trondheim	10,0
28.04.21 7:27	28.04.21 21:19	13,87	Trondheim -Bodø	11,5
28.04.21 20:11	29.04.21 10:35	14,40	Bodø- Trondheim	12,0
30.04.21 18:58	01.05.21 6:32	11,57	Trondheim -Bodø	12,7
01.05.21 17:38	02.05.21 4:21	10,72	Bodø- Trondheim	10,5
02.05.21 7:24	02.05.21 20:08	12,73	Trondheim -Bodø	9,9
03.05.21 7:44	03.05.21 22:30	14,77	Bodø- Trondheim	11,1
04.05.21 7:47	04.05.21 19:57	12,17	Trondheim -Bodø	12,1
09.04.21 8:57	09.04.21 22:10	13,22	Bodø- Trondheim	10,4
10.04.21 10:05	10.04.21 19:32	9,45	Trondheim -Bodø	9,3
16.04.21 19:13	17.04.21 7:14	12,02	Trondheim -Bodø	13,0
17.04.21 17:58	18.04.21 4:12	10,23	Bodø- Trondheim	10,7
18.04.21 7:05	18.04.21 20:11	13,10	Trondheim -Bodø	9,2
19.04.21 7:55	19.04.21 22:18	14,38	Bodø- Trondheim	10,8
25.04.21 8:10	25.04.21 19:21	11,18	Trondheim -Bodø	9,1
26.04.21 8:13	26.04.21 22:07	13,90	Bodø- Trondheim	11,3
27.04.21 8:00	27.04.21 20:08	12,13	Trondheim -Bodø	11,2
27.04.21 20:08	28.04.21 10:17	14,15	Bodø- Trondheim	11,9
28.04.21 19:39	29.04.21 7:16	11,62	Trondheim -Bodø	12,2
29.04.21 7:16	29.04.21 22:25	15,15	Bodø- Trondheim	12,1
30.04.21 6:50	30.04.21 19:34	12,73	Trondheim -Bodø	11,6
30.04.21 22:25	01.05.21 9:54	11,48	Bodø- Trondheim	10,8
Høyeste:				13,0
Laveste:				8,8

Figur 3: Forbruksmålinger for godstog fra togturer på Nordlandsbanen

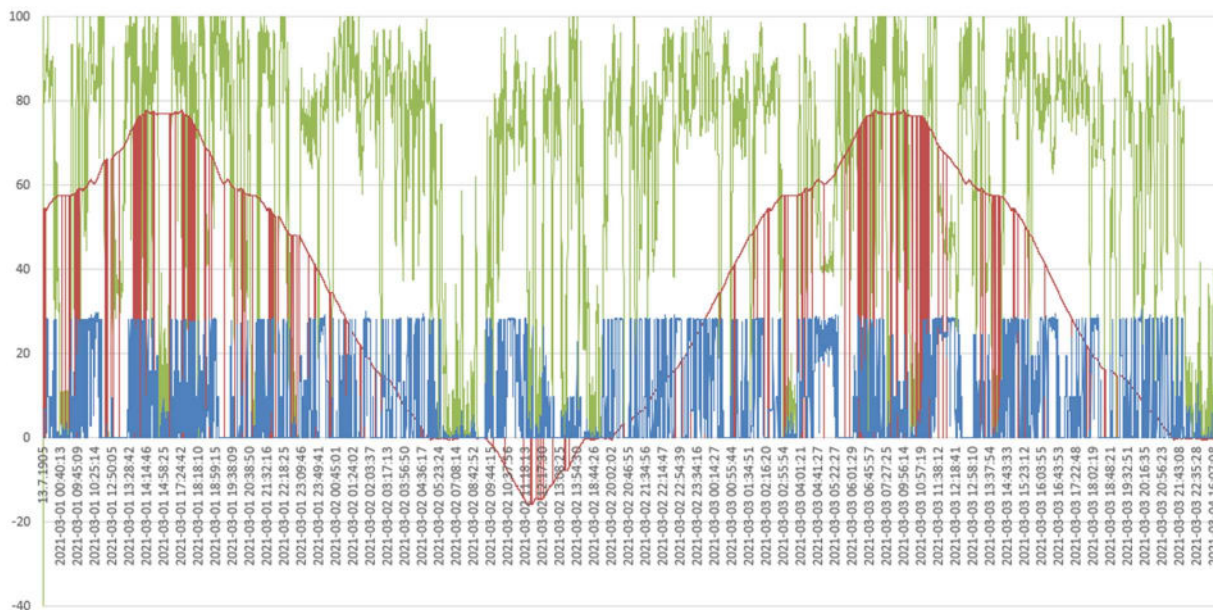
Det har ikke vært mulig å innhente tilhørende togvekter, men i et tilfeldig utvalg av andre godstog på Nordlandsbanen ligger vekten mellom 300 tonn og 1150 tonn.

Høyeste registrerte sum for traksjon er 13 MWh. Tallene for traksjon er uten hjelpekraft og målt på motorene. Virkningsgraden er antatt 0,95 på drivutrustningen, slik at hjulenergien da blir $13 / 0,95 = 13,35$ MWh.

Til sammenligning beregner energiberegningsprogrammet (inklusive korreksjonsfaktor) ut netto hjulenergi til å bli 11 MWh. Da er tilbakemating på 2,3 MWh inkludert, slik at den hjulenergien uten tilbakemating blir 13,3 MWh. I sammenligninger med dieseltog, som ikke har tilbakemating, må denne verdien brukes. Det er derfor betryggende at programmet (med korreksjonsfaktor) regner ut ca. 1 MWh høyere forbruk. Et slikt begrenset antall målinger i april gir likevel ingen garanti for at ikke maksimalt forbruk på andre tider av året kan være høyere.

Konklusjon: Målingene fra dieseltog indikerer at energiberegningsprogrammet kan brukes i beregninger av infrastruktur for deelektrifisering med tilstrekkelig god nøyaktighet for denne prosjektfasen.

Til informasjon gjengis i Figur 3 et tilfeldig utsnitt som dekker nesten to turer tur/retur mellom Trondheim og Bodø for et av godslokomotivene.



Figur 4: Graf med posisjon, fart og effektforbruk fra togturer på Nordlandsbanen

Den røde kurven viser relativ nordlig posisjon til toget. Nullverdien er Trondheim. Kurven viser at toget også har vært syd for Trondheim. Vertikale røde linjer indikerer manglende posisjonsverdier. Den grønne kurven viser hastighet i km/h der høyeste viste verdi er 100 km/h. Den blå viser effekt i MWh i skala 0,1, dvs. høyeste målte effekt er ca. 3 MW.

Måleverdiene har en oppløsning på 5 sekunder.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 19 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

8 INNGANGSDATA I ENERGIBEREGNINGENE

Dette kapitlet omtaler og dokumenterer de inngangsdata som er brukt i energiberegningene for de ulike infrastrukturløsningene på de enkelte banene.

8.1 Kjøre motstander

Kjøre motstanden for et tog oppgis i litteraturen som en formel med tre komponenter:

$$F = F_0 + F_1 + F_2 = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2$$

der v er hastigheten, F er «force» dvs. motstandskraft og f er kraftkoeffisienter

Den første kraftkomponenten F_0 gjenspeiler rulle motstanden til toget, altså motstand i lager, gir og hjul mot skinner. Den tilsvarende kraftkoeffisienten f_0 vil variere med utforming av det mekaniske hjulsystemet og av vekten. For et tog er det en lineær sammenheng mellom rulle motstand og vekt. Komponentene og kraftkoeffisientene har benevnelse i Newton.

Den andre kraftkomponenten F_1 består av en multiplikasjon av koeffisienten f_1 og hastighet. Kraftkomponenten gjenspeiler motstanden som lufttrykket foran og undertrykket etter toget gir, men også motstand fra den laminære luftstrømmen langs toget. Kraftkoeffisienten f_1 har benevnelse Ns/m (Newton sekund per m).

Den tredje kraftkoeffisienten f_2 skal multipliseres med hastigheten i andre potens. Denne koeffisienten gjenspeiler motstanden fra turbulens langs og etter toget. Et tog som ikke er strømlinjeformet, slik som et tog med tomme tømmervogner, vil lage mye turbulens og får dermed høy luftmotstand. Koeffisienten benevnes Ns^2/m^2 . Motorvognsett og høyhastighetstog utformes strømlinjeformet slik at de får lav verdi for f_2 .

Bane NOR har kvalitetssikrede verdier for disse koeffisientene for alle viktige togtyper som trafikkerer norske baner. Disse verdiene brukes blant annet til å simulere effektterspørselen til alle matestasjoner i simuleringsprogrammet μPas . De er dermed en del av grunnlaget for å kunne dimensjonere nye matestasjoner.

I Nullutslipp-prosjektet er behov for å bruke disse faktorene for å beregne energiforbruk på batteristrekningene. Faktorene brukes også i beregningsprogrammet for å kunne dimensjonere lengde og plassering av ladestrekningene, samt dimensjonere nye matestasjoner.

Batteritog er likt andre tog i forhold til kjøre motstander og energiforbruk. Unntaket er den eventuelt økte vekten på grunn av vekten til batterisystemet. Dessuten vil noen tog ha ekstra batterivogn, som bidrar noe til økt kjøre motstand.

Den ekstra vekten vil påvirke f_0 lineært i forhold til totalvekt. De andre koeffisientene blir ikke påvirket hvis batteriet kun er plassert i lokomotivet. Ved egen batterivogn vil

den økte vekten komme i batterivognen. Dette vil påvirke f_0 lineært i forhold til økt vekt. f_1 og f_2 blir i liten grad påvirket ettersom at batterivognen vil være strømlinjeformet med lokomotiv eller tog.

Vekten av batteriene er liten i forhold til den totale togvekten (størrelsesorden 5-15%). For å være på den sikre siden er likevel f_0 øket med 50% i dette prosjektet i forhold til verdiene i μPas . Dette gjelder for togtypene «Motorvognsett» og «Passasjertog med 7 vogner» under.

For togtypen «6 akslet lokomotiv med stor batterivogn med førerhytte» har vi mottatt kvalitetssikrede tall fra togprodusenten Stadler, og disse er brukt direkte i tabellen under:

Tabell 2: Kjøre motstands-faktorer brukt i energiberegningsprogrammet

Kjøre motstands-faktorer	Motor-vogn-sett 147 tonn	Motor-vogn-sett 275 tonn	Passasjer-tog med 7 vogner 508 tonn	Godstog med batterivogn 1200 tonn	Tømmer-tog, 2400 tonn	Tømmer-tog, tomt 800 tonn
f_0 [N]	1320	2640	5940	16563	24150	8050
f_1 [Ns/m]	82,6	82,6	40,4	248	219	219
f_2 [Ns ² /m ²]	6,61	6,61	12,87	47,95	91	91
Hastighet km/h	110	110	100	80	80	80
Hjelpekraft MW	0,1	0,2	0,245	0,2	0,2	0,2

Vekter som er brukt gjelder for fulle tog.

8.2 Spesielle motstandsforhold

For virkelige tog vil kjøre motstandene variere i forhold til snøforhold, svinger, slipp og tunneller. Forbruket vil også variere i forhold til utetemperatur.

Det er krevende å ta hensyn til dette per løpende meter i beregningene. I stedet er det, som vist tidligere, gjort kontroll av beregninger ved faktiske målinger. For å gi et konservativt estimat er det lagt inn en kalibreringsfaktor 1,2 i beregningene. Denne er ment å kompensere for spesielle motstandsforhold som ikke måtte være ivaretatt gjennom kraftkoeffisientene.

Korreksjonsfaktoren på 1,2 innebærer at det legges på en 20% margin på de beregnede energiforbruksverdiene og effektverdiene. I beregningsprogrammet er dette utført ved at algoritmene i programmet øker kjøre motstanden og togvekten med 20% før beregning.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 21 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

8.3 Hastigheter, akselerasjoner/retardasjoner, stopp underveis

Som tidligere nevnt er beregningsmodellen basert på elementer med gjennomsnittsverdier. For hvert element må oppgis gjennomsnittlig hastighet.

For enkelhets skyld er det lagt inn samme gjennomsnittshastighet for alle elementer eller strekninger, men variabelt i forhold til togtyper. De hastighetene som er lagt inn er vist i tabell 2.

I virkeligheten vil det ved retardasjon tilbakemates energi fra hjul med virkningsgradstap. Denne energien er tidligere tatt fra kontaktledningsnettet og matet til hjulene også med virkningsgradstap. Dette betyr at fartsforandringer vil gi noe mer energiforbruk.

Det er omstendelig å kalkulere virkning av alle hastighetsforandringer og beregninger er derfor gjort med jevn fart på hver strekning.

I tillegg til fartsforandringer vil det forekomme stopp underveis. En stopp for et 1200 tonn tog krever ca. 0,08 MWh energiforbruk for å akselerere fra 0 - 80 km/h. Men før stoppet vil tilbakematingen ved retardasjon være ca. 0,06 MWh, slik at netto merforbruk blir lite.

Som tidligere nevnt viser kontroll mot måledata fra virkelige togturer at slikt merforbruk er dekket gjennom konservative verdier for kjøremotstandsfaktorer og kalibreringsfaktor.

8.4 Høydeprofiler

Strekningene må velges slik at betydelige bakketopper og bunner er tilstrekkelig godt representert i energiberegningene. Ladestrekninger og batteristrekninger må deles opp der det er betydelige forandringer i høyder. Høyden ved enden av hver strekning må angis i programmet.

8.5 Batterikapasiteter

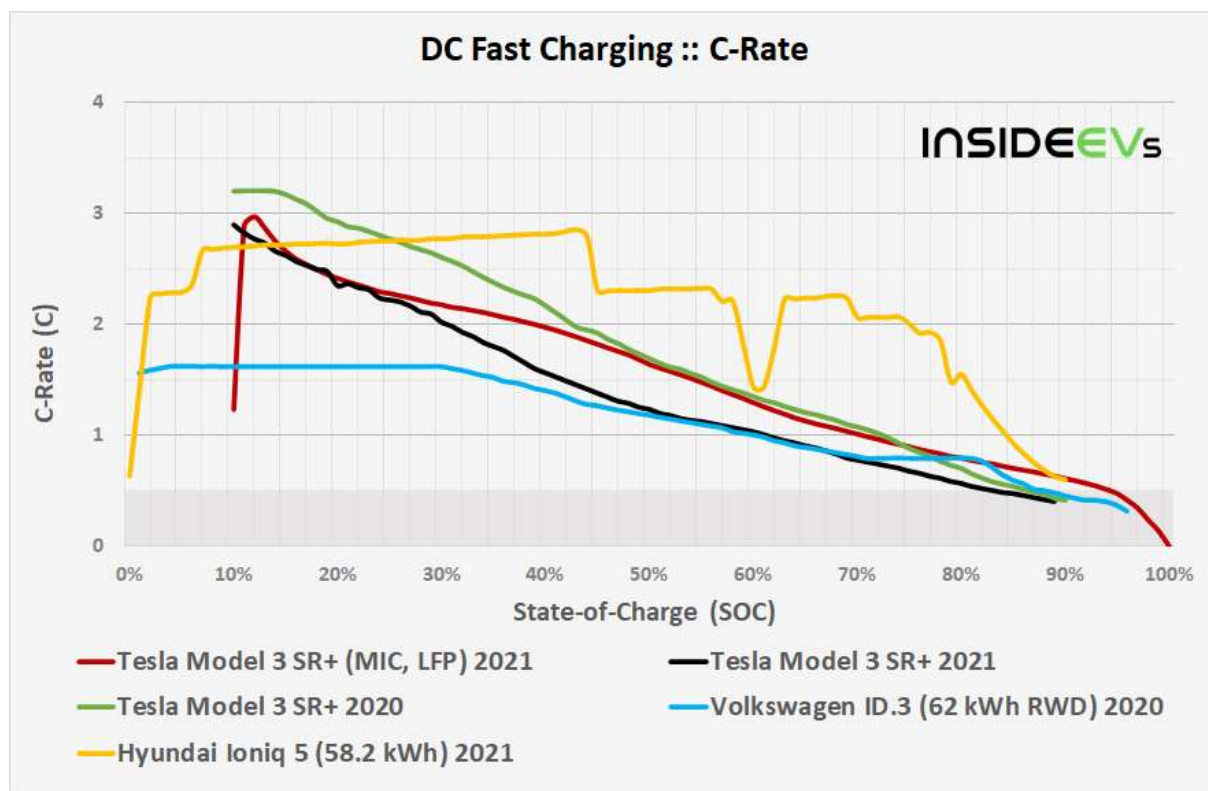
Det er valgt å gjøre beregninger av infrastrukturløsninger for disse batterikapasitetene i godstoglokomotiv: 2,6 MWh, 3,4 MWh, 5 MWh, 7,5 MWh og 11 MWh. Batterikapasitetene er valgt i forhold til hva som er antatt mulige størrelser i dag og i framtiden, med spredning for å dekke alle mer og mindre realistiske tilfeller.

8.6 C-rate

C-rate er et mye brukt mål for et batteris ladeegenskaper og oppgis ofte som funksjon av ønsket levetid (antall ladesykler) for ulike batteriteknologier.

C=1 betyr at batteriet lades med samme strøm som den teoretiske strømmen som leverer den nominelle kapasiteten til batteriet i løpet av en time.

C-raten er altså et uttrykk for hvor raskt en velger å lade et batteri. I en bil vil ladeelektronikken tilpasse C etter hvert som batteriet lades opp på beste måte ut ifra kompromiss mellom kort ladetid og ønsket levetid, blant annet. På Figur 5 er C-rate i forhold til ladestatus på batteriet vist for ulike biler.



Figur 5: Eksempel på ladekurver for batteri i biler fra InsideEV

Som en ser varierer C-raten, altså også ladehastigheten, med økende mengde energi i batteriet. Innenfor ladestatusområde fra 10% til 80% er C-raten rimelig høy. For Tesla er faller den lineært fra 3 til ca. 0,8.

Batteriprodusenter oppgir ofte en anbefalt C-rate som en fast gjennomsnittsverdi innenfor et ladestatusområde. For NMC batterier kan dette for eksempel være $C=1,2$.

I energiberegningsprogrammet er det brukt en fast gjennomsnittsverdi verdi $C=1,2$ under opplading og utlading. I virkeligheten vil det også for togbatterier være en ladeelektronikk som tilpasser ladehastigheten optimalt i løpet av en ladesyklus. Utladehastigheten vil avhenge av togets behov for kraft. Men når batteriet nærmer seg lav ladestatus kan tilgjengelig strøm fra batteriet bli styrt ned slik at akselerasjonen blir langsommere. På et senere planstadium må dette tas hensyn til under utformingen av banestrømforsyningen. En kan da for eksempel velge å elektrifisere noe lengere i stigninger.

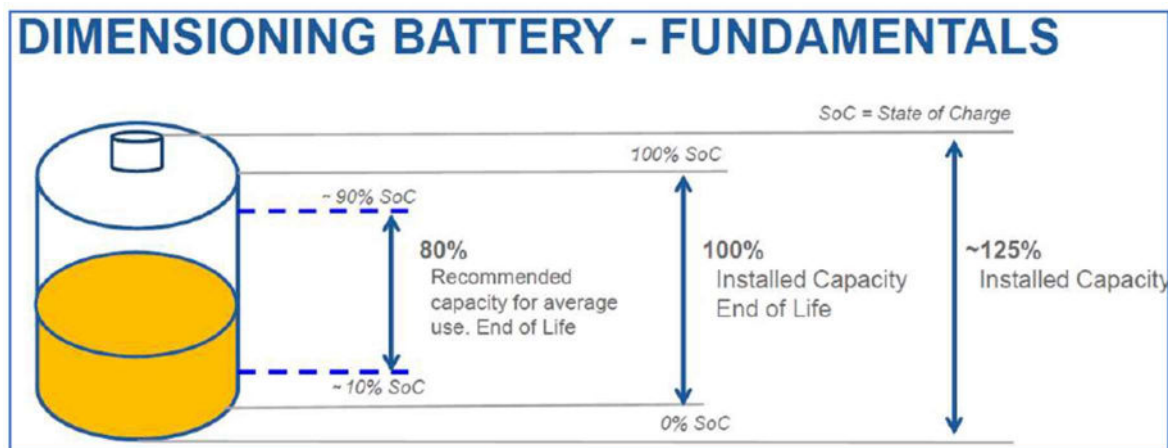
Batteriteknologien er, som tidligere nevnt, i rask utvikling. C-raten kan bli forbedret også for batterier som er aktuelle for tog. Konsekvens av økt C-rate er derfor behandlet i et eget kapittel i rapporten.

8.7 Energiforbruk/levetid for batteriet, marginer

Levetiden til batteriet avhenger av antall sykler og utnyttelse av batteriet. Den er også påvirket av forholdet mellom den dimensjonerende, og dermed installerte kapasiteten, og den gjennomsnittlige utnyttelsen av denne kapasiteten.

I denne rapporten er det antatt en utnyttelse som gir en levetid på ca. 10 år.

Ved batteribytte etter 10 år vil teknologiutviklingen antas å gi ca. dobbel kapasitet med samme vekt. Dessuten antas det at batteriene blir billigere. Det betyr at en kan sette inn større batteri og vil kunne få svært lang levetid på dette neste batteriet.



Figur 6: Forhold mellom installert og utnyttbar batterikapasitet

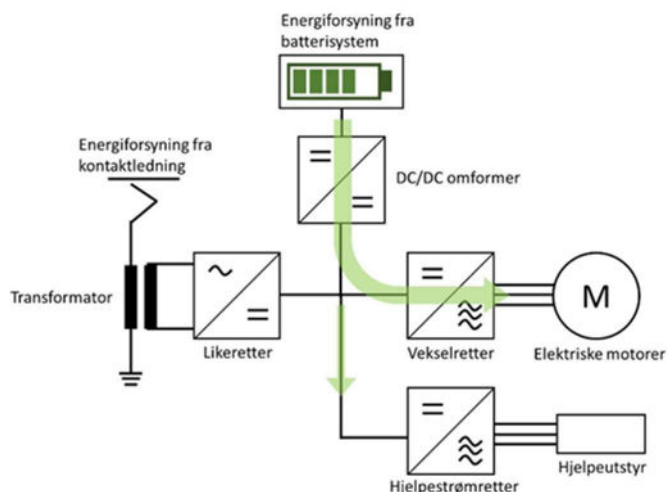
Som vist i Figur 6 er den utnyttbare kapasiteten betydelig mindre enn den installerte. I beregningene er det forutsatt at batteriene bare lades opp til 90% og lades ut bare til 10% av den kapasiteten som er igjen i batteriene ved livsende.

Beregningen er gjort i forhold til det maksimale kraftbehovet som et tog kan tenkes å ha. Det gjennomsnittlige kraftbehovet vil være lavere, blant annet fordi togvekten i gjennomsnitt vil være lavere enn for et fullastet tog. I gjennomsnitt vil derfor batteriene bli tappet mindre enn i det dimensjonerende tilfellet, og dette vil øke levetiden.

8.8 Virkningsgrader brukt i beregningene

Hver av de elektriske hovedkomponentene i et lokomotiv har sin virkningsgrad. Lokomotivets totale virkningsgrad er avhengig av hvilke komponenter som er i bruk

og belastet, -under stillstand, på batteristrekninger og på ladestrekninger. På Figur 7 er hovedkomponentene og energistrømmen vist for batteristrekninger.



Figur 7 - Energistrøm under batteridrift

På ladestrekninger vil energistrømmen gå fra pantograf, gjennom transformator og likeretter til vekselrettere for motor og hjelpestrøm. I tillegg vil det da også gå en energistrøm til batterier gjennom en DC/DC omformer, som vil fungere som en batterilader.

Ved kjøreforhold som gir elektrisk bremsing vil energistrømmen gå fra motorene og til batteri så langt laderen vil tillate det. Eventuell overskytende energi vil bli matet tilbake til kontaktledningsnettet.

For å kunne regne på energiforbruket er det hentet inn tall for virkningsgrader fra ulike leverandører. I energiberegningene er det besluttet å bruke disse virkningsgradene:

- Transformator: 95%
- Omformere: 97% (likeretter og motor vekselretter)
- Drivutrustning: 94,5% (motorer og gear)
- DC/DC omformer: 97%
- Batteri: 97,6%

Dette gir følgende utregnede virkningsgrader:

- Fra pantograf til hjul: $95\% \times 97\% \times 94,5\% = 87\%$
- Fra pantograf til batteri: $95\% \times 97\% \times 97\% = 89\%$

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 25 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

- Fra batteri til hjul: $97,6\% \times 97\% \times 94,5\% = 90\%$

Disse virkningsgradene gjelder ved nominell effekt. Lokomotiver har relativt jevn virkningsgradkurve, slik at disse verdiene likevel er faste i beregningene.

Hjelpekraftbehovet antas å være likt hele turen og forbruket er dermed en funksjon av tid og ikke energiforbruk til traksjon. Hjelpekraften er derfor behandlet separat i energiberegningsprogrammet.

8.9 Hjelpekraftforbruk

Disse hjelpekraftforbrukene er oppgitt av leverandører, og brukt i energiberegningene:

- Godsløkomotiv: 200 kW
- Persontog: 245 kW (Lokomotiv og 7 personvogner)
- Motorvognsett: 200 kW

8.10 Maksimalt effektopptak

Det dimensjonerende maksimale effektopptaket for et lokomotiv er en viktig størrelse. Jo større maksimalt effektopptak et lokomotiv er bygget for, jo hurtigere kan batteriene lades opp, og jo kortere kan ladestrekningene lages. Det maksimale effektopptaket vil dermed påvirke utformingen av banestrømforsyningen og investeringskostnaden. Imidlertid er det en rekke forhold som kan begrense det mulige maksimale effektopptaket, både i banestrømforsyningen og i lokomotivet.

En jernbane med deelektrifisering er bygget opp av mange ladestrekninger som hver er forsynt fra en omformerstasjon. Når toget befinner seg på enden av en ladestrekning vil det bli et betydelig spenningsfall fra matestasjon til toget. I vedlegg til rapporten er dette spenningsfallet beregnet for AT og BT type kontaktledningsanlegg, samt 15 kV og 25 kV anlegg. Beregningene viser at opptil 9 MW kan ansees som realistisk, og det er derfor lagt inn 9 MW som begrensning i de videre energiberegningene. Spenningsfallet vil imidlertid være avhengig av lengden på ladestrekningene som igjen er avhengig av batteristørrelsen i det lokomotivet som skal brukes. Når et slikt banestrømanlegg eventuelt skal prosjekteres må disse beregningene gjøres på nytt for de aktuelle batteristørrelser og togtyper en har mulighet for på dette tidspunktet.

Det er også naturlige begrensninger i lokomotivene. De største lokomotivene som kan være aktuelle for godstog i Norge er på 9 MW. Dette er en naturlig begrensning for et 6 akslet lokomotiv, da det ikke er praktisk mulig å overføre mere kraft fra hjul til relativt glatte skinner (i forhold til andre underlag). Slike lokomotiv er kommersielt tilgjengelig i dag og de elektriske hovedkomponentene er dimensjonert for 9 MW effektopptak.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 26 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Det er klare vekt- og plassbegrensninger i et lokomotiv. Når et batterilokomotiv skal konstrueres vil disse begrensningene sette rammer for hvor mye batteri det er plass til. Det er selvfølgelig mulig å nykonstruere svært store lokomotiv med tilknyttede batterivogner og et stort antall aksler. Foreløpig framstår dette som urealistisk, spesielt i forhold til det lille markedet som norske ikke-elektrifiserte jernbaner representerer.

Til opplysning nevnes det at dagens dieselelektriske lokomotiver har en maksimal ytelse på under 3 MW.

For at beregningene i dette prosjektet skal være mest mulig realistiske er det derfor valgt å sette en begrensning på effektopptaket på 9 MW.

Vurderingen er også at matestasjoner for hver ladestrekning bør dimensjoneres for tre samtidige tog, da dette er den teoretiske maksimale trafikk på en ensporet ladestrekning. Et av togene vil da stå på kryssingsspor å vente. For dette prosjektet er det antatt at matestasjonene bør dimensjoneres for 18 MW samtidig forbruk. Men dette må vurderes nøyere i et realiseringsprosjekt, når det er klart hvilke batterikapasiteter som vil bli installert i togene. Det kan være aktuelt å øke størrelsen på matestasjoner på strekninger der et høyt forbruk forventes.

8.11 Maksimale pantografstrømmer og ladestopp

“Ordinære” pantografer har nominelle maksimale strømmer slik:

- I fart: 800 A (tilsvarer 13 MW ved 16,5 kV)
- Ved stillstand: 80 A (tilsvarer 1,3 MW ved 16,5 kV)

I fart er tillatt maksimal strøm tilstrekkelig i forhold til maksimalt effektopptak slik det er omtalt over. Med andre ord kan ordinære pantografer benyttes også for batteritog.

I stillstand er det lavere grense for hvor fort det kan lades. Dette fordi kontaktledningen vil berøre det samme punkt på pantografen under stillstanden. Dette punktet vil varmes opp utillatelig.

Det kan være ønskelig å benytte stopp på stasjoner eller ved kryssingsspor til ekstra lading. En løsning for å få tilstrekkelig ladeeffekt kan være dobbel kontaktråd på stasjonsområdet og høyere kontaktrykk fra pantografene. Dessuten kan effekten dobles ved å heve begge pantografer under stillstand. Teoretisk maksimal ladeeffekt blir da ca. 5 MW.

Slike løsninger bør uansett vurderes i senere arbeider med batteritog. På ensporede baner vil godstog uansett få flere venteopphold på kryssingsspor. Persontog vil uansett stoppe på stasjoner. Ekstra opplading vil kunne øke levetiden på batteriene.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 27 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Hvis stoppmønstret på en rute er fast, kan lading på holdeplasser utnyttes ved at lengden på ladestrekninger reduseres. Eksempelvis vil et opphold på 6 minutter med 4 MW ladeeffekt kunne gi en opplading på 0,4 MWh. Dette tilsvarer friksjonsarbeidet for et 1200 tonn godstog i 80 km/h over ca. 25 km flat strekning.

I beregningene som er gjort er det ikke regnet med den positive muligheten som lading under stopp utgjør.

8.12 Ising på kontaktledning

Kjøring og lading samtidig krever 3 til 5 ganger høyere strøm. Det er uklart om dette kan føre til sterkere lysbue og gi høyere slitasje på pantografene ved is på kontaktledning. Det er likevel vurdert slik at eventuell mer slitasje under isingsforhold ikke vil være et betydelig vedlikeholdsproblem. Det vises til delrapport om batteri for mer utdypende opplysninger.

8.13 Hyppige pantograf nedtak

Delelektrifisering innebærer at det blir mange seksjoner uten kontaktledning. På disse strekningene må pantografene senkes. Spesielt viktig er dette ved broer og tunneller, der pantograf som blir stående oppe vil bli revet av.

Mange senkninger og hevinger av pantografer vil gi betydelig ekstra slitasje på pantografer.

Utfordringer i forbindelse med pantografer er diskutert med NTNU og omtalt i delrapport om batterier.

Konklusjonen er at pantografene trolig vil få ekstra slitasje på grunn av høyere strømmer ved stillstand, fart og ved ising. Dessuten ved stadig hevinger/senkninger. Det vurderes likevel at dette er en håndterbar konstruksjons- og vedlikeholdsutfordring, og ikke et avgjørende moment mot delelektrifisering.

Det vil være nødvendig med nykonstruksjon av automatikk som sikrer nedtak av pantografer etter endt ladestrekning.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 28 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

9 LØSNINGER FOR BANESTRØMFORSYNING

I det følgende kapittelet er det presentert løsninger for deelektrifisering for alle større ikke-elektrifiserte baner. Hver løsning består av konkrete elektrifiserte ladestrekninger og batteristrekninger, samt matestasjoner og eventuelle overføringslinjer for kraft. Optimal utforming av disse løsningene er sterkt avhengig av hvilken batterikapasitet det er mulig å installere i lokomotivene.

De ulike typene av tog, -godstog, persontog med 7 vogner, lite motorvognsett og stort vognsett krever ulike krav til strømforsyningen i form av kontaktledning og matestasjoner.

Det viser seg at den togtypen som krever mest av en deelektrifisering er tunge godstog. Disse skal trafikkere hele banens lengde uten stopp. Det er derfor laget banestrømløsninger og beregninger for 1200 tonn godstog som basis. Senere i rapporten er det undersøkt hva som kreves av de andre togtypene for å kunne bruke den infrastrukturen som er laget for godstog, på lange så vel som korte ruter.

Det er forutsatt en gjennomsnittshastighet på 80 km/h for godstog og 100 km/h for persontog og 110 km/h for motorvognsett.

Mulig batteristørrelse i et lokomotiv er den største usikkerheten i prosjektet. Det er derfor utarbeidet løsninger for de ulike batterikapasitetene 2,6 MWh, 3,4 MWh, 5 MWh, 7,5 MWh og 11 MWh. Dette er gjort for å gi et større bilde av hvordan batteristørrelsen påvirker infrastrukturen og dermed kostnader for deelektrifisering. Ut fra antagelser om batterikapasiteter i tog i framtiden er det da også mulig å si noe om når det er gunstig å deelektrifisere en bane.

De grafiske figurene i det følgende kapittelet viser batteri ladestatus langs hele banen. Energiinnholdet i batteriet er markert med en linje med gult areal under. Maksimal opplading og utlading er markert med tynne linjer, henholdsvis grønn og rød.

Høydeprofilen for banen vises under ladestatuskurven. I høydeprofilen er utvalgte stasjoner markert med et blått punkt, med tilhørende kilometrering og høyde over havet. Grafene kan zoomes inn for bedre lesbarhet. Over høydeprofilen er ladestrekninger markert med rødt, mens batteristrekningene er umarkert.

Det er laget separate figurer for hver retning toget går i, nordgående øverst og sydgående nederst.

Matestasjonene må plasseres i nær tilknytning til de elektrifiserte strekningene, og er markert med grønne punkter. I noen tilfeller er det behov for å dele opp ladestrekningene og knytte disse sammen med kraftledning som løper langs banen. Dette er vist med tykkere rød strek.

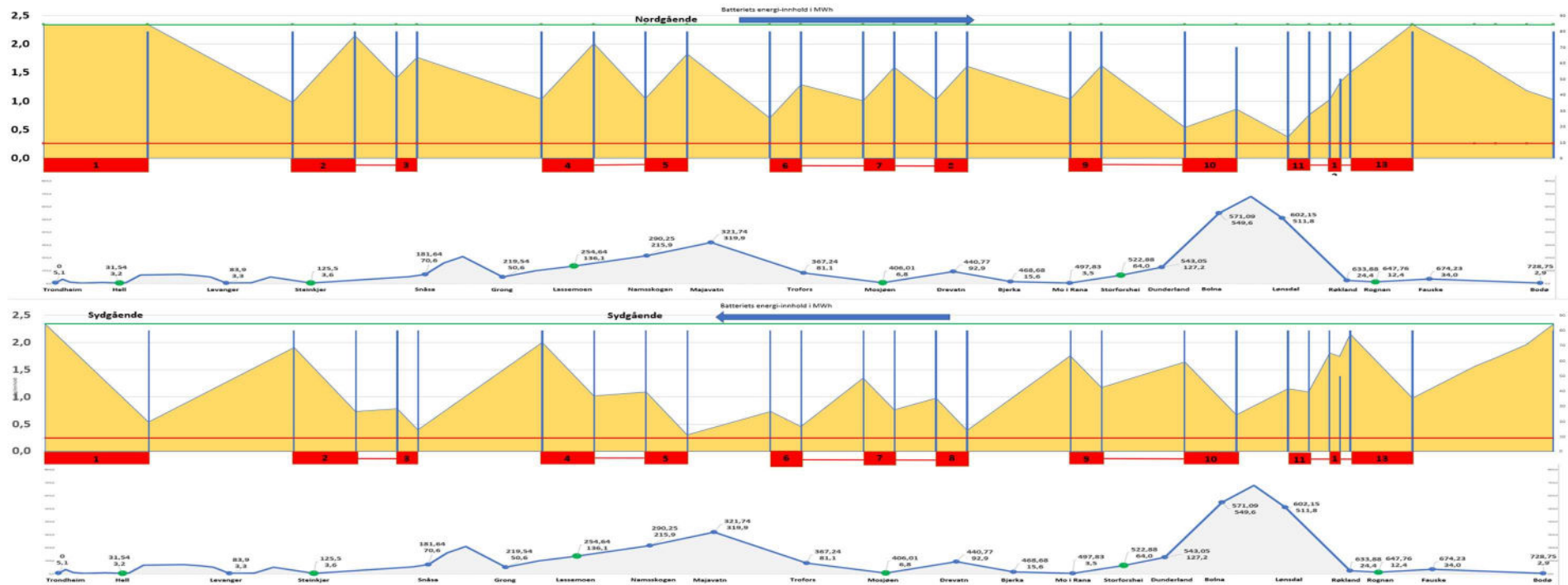
9.1 Nordlandsbanen

Resultater fra beregninger:

9.1.1 2,6 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 31,68 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)

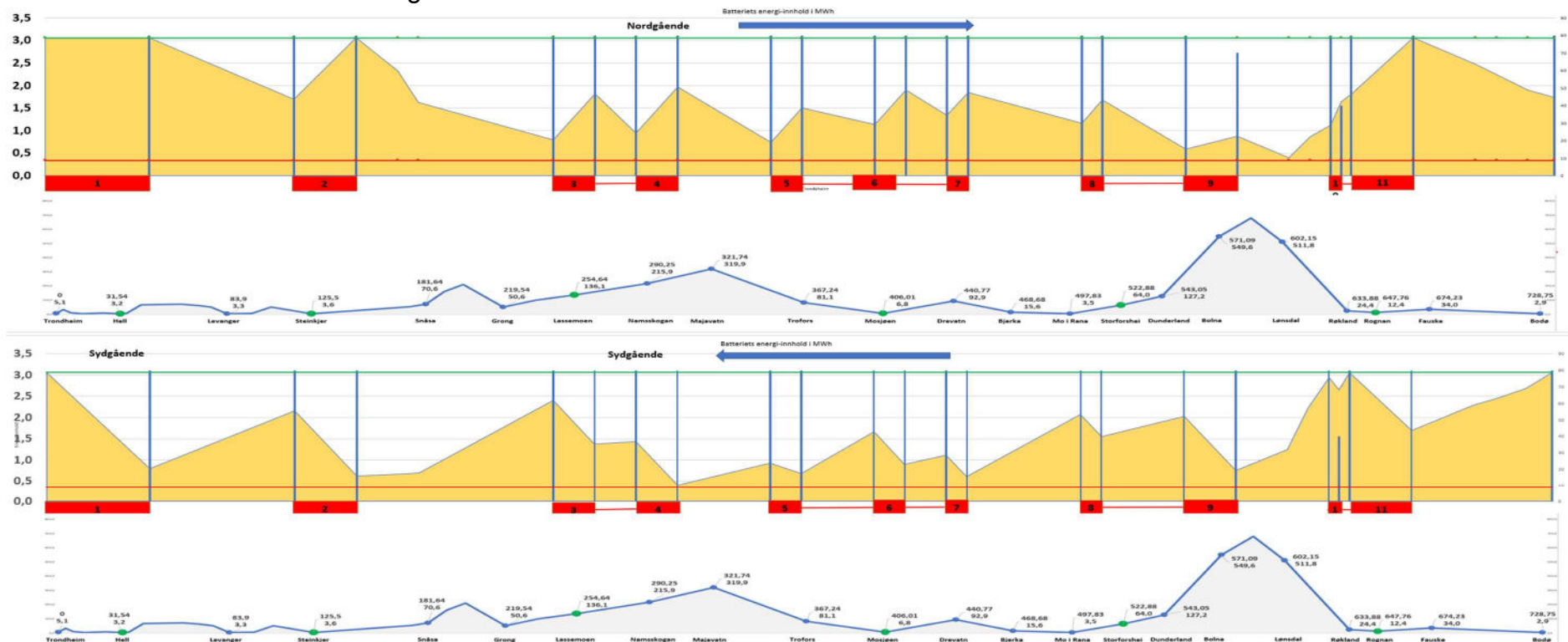
- Antall omformere: 5 + endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 13
- Mengde kraftledning: 150 km
- Mengde kontaktledning: 265 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 1,4 MWh for å bruke denne banestrømforsyningen.



Figur 8: Diagram for batteriforbruk til godstog på Nordlandsbanen med batterikapasitet på 2,6 MWh

9.1.2 3,4 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 26,52 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 5 + Endepunktlanding i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 11
- Mengde kraftledning: 120 km
- Mengde kontaktledning: 230 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 1,7 MWh for å bruke på denne banestrømforsyningen.

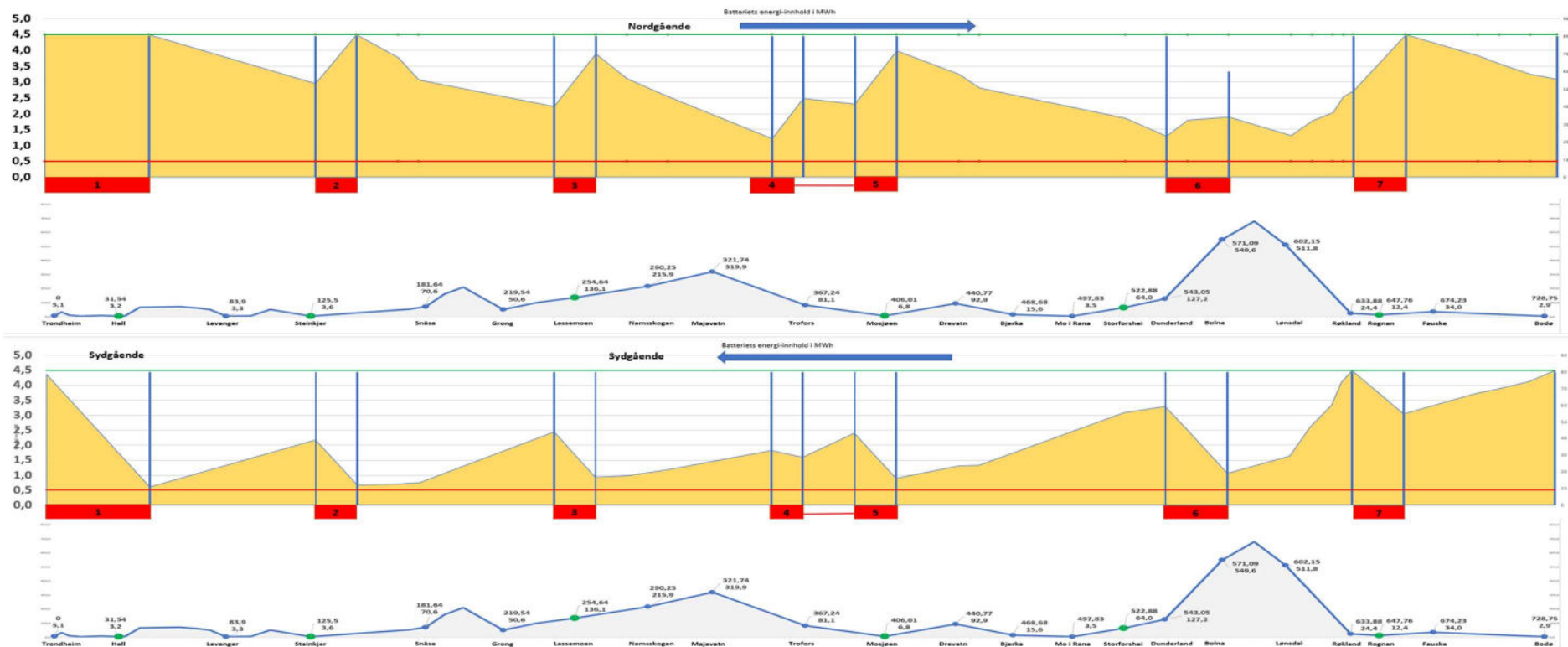


Figur 9: Diagram for batteriforbruk til godstog på Nordlandsbanen med batterikapasitet på 3,4 MWh

9.1.3 5,0 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 19,15 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 5 + Endepunktloading i Bodø

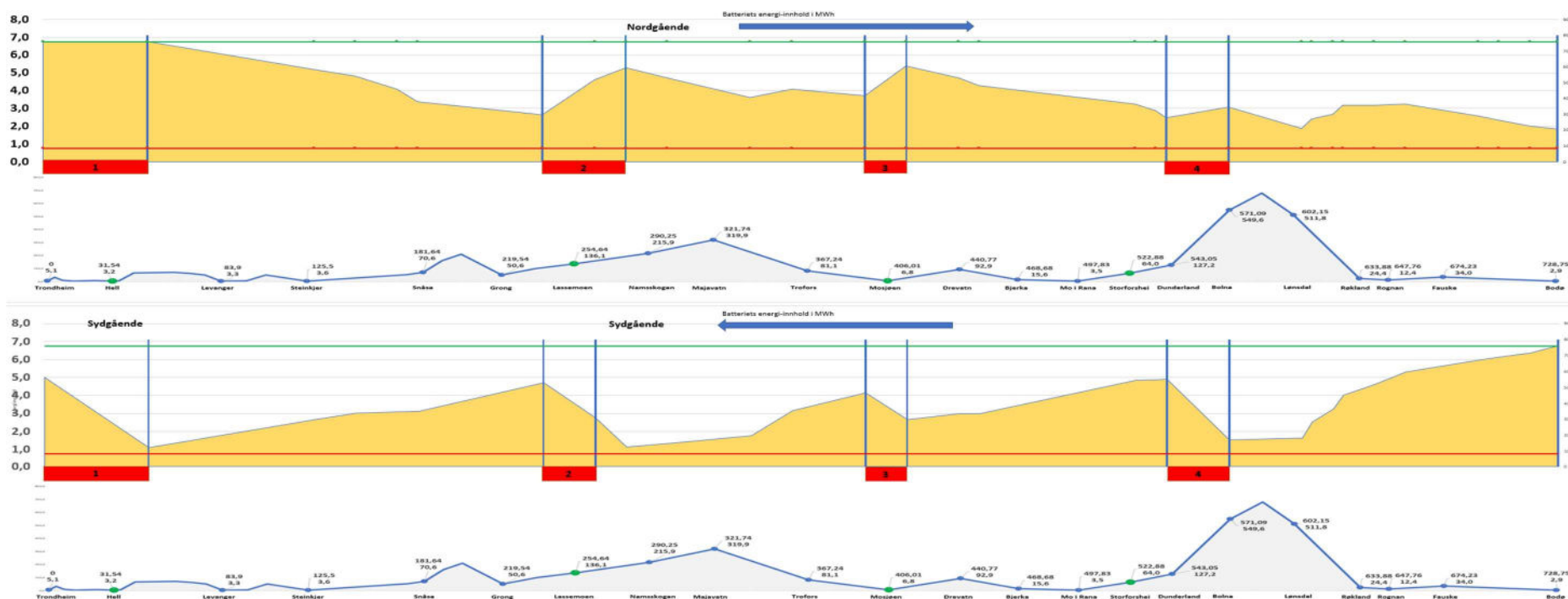
- Antall elektrifiserte strekninger: 8
- Mengde kraftledning: 25 km
- Mengde kontaktledning: 180 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 2,4 MWh



Figur 10: Diagram for batteriforbruk til godstog på Nordlandsbanen med batterikapasitet på 5,0 MWh

9.1.4 7,5 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 13,26 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 3 + Endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 11
- Mengde kraftledning: 15 km
- Mengde kontaktledning: 140 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 3,4 MWh



Figur 11: Diagram for batteriforbruk til godstog på Nordlandsbanen med batterikapasitet på 7,5 MWh

9.1.5 Motorvogn

Motorvogn kan kjøre tur/retur fra Bodø med en batterikapasitet på 1,3 MWh uten noen elektrifisering, hvis DC-lading i Bodø. NB! Det passer med matestasjon på Rognan for godstransport. Hvis denne bygges trengs enda mindre batterikapasitet (under 1 MWh)



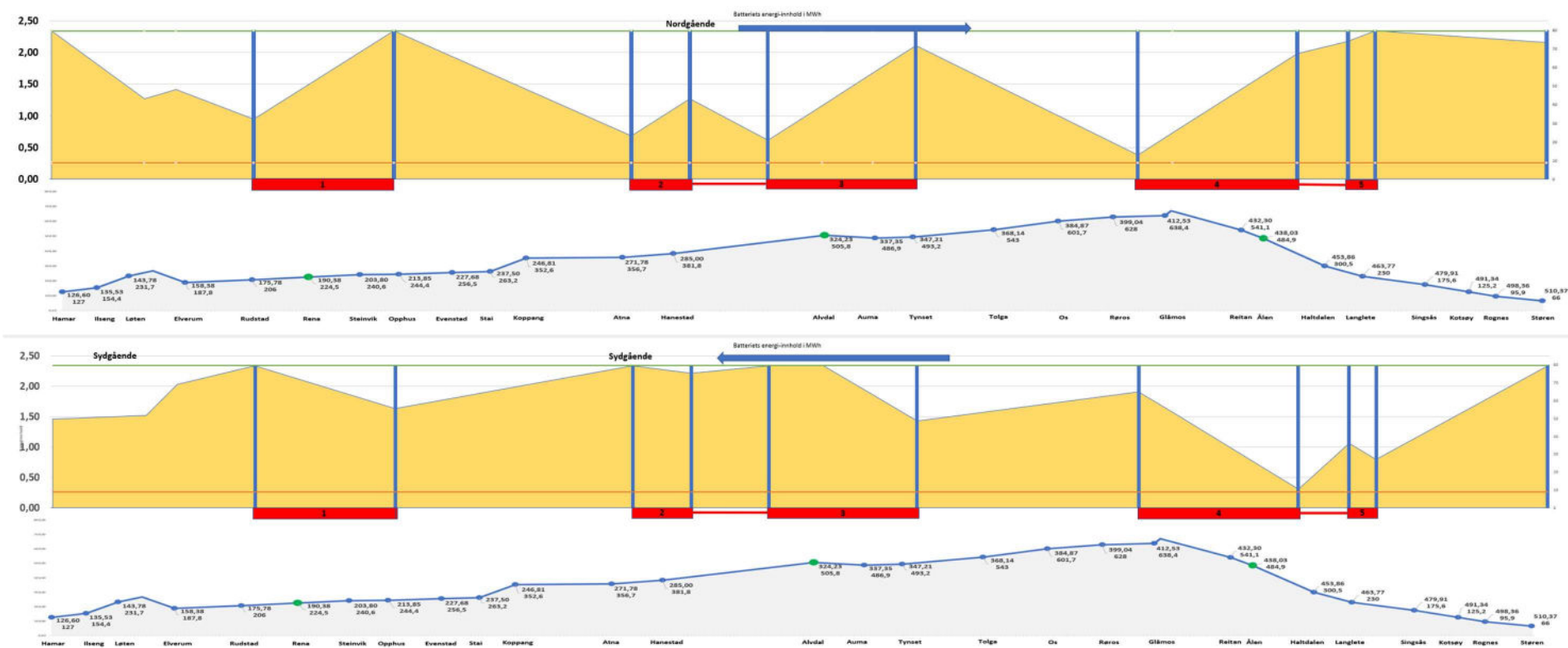
Figur 12: Diagram for batteriforbruk til motorvogn på Saltenpendelen med batterikapasitet på 1,3 MWh

9.2 Rørosbanen

9.2.1 2,6 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 35,76 %
- Antall omformere: 3

- Antall elektrifiserte strekninger: 5
- Mengde kraftledning: 33 km
- Mengde kontaktledning: 137 km

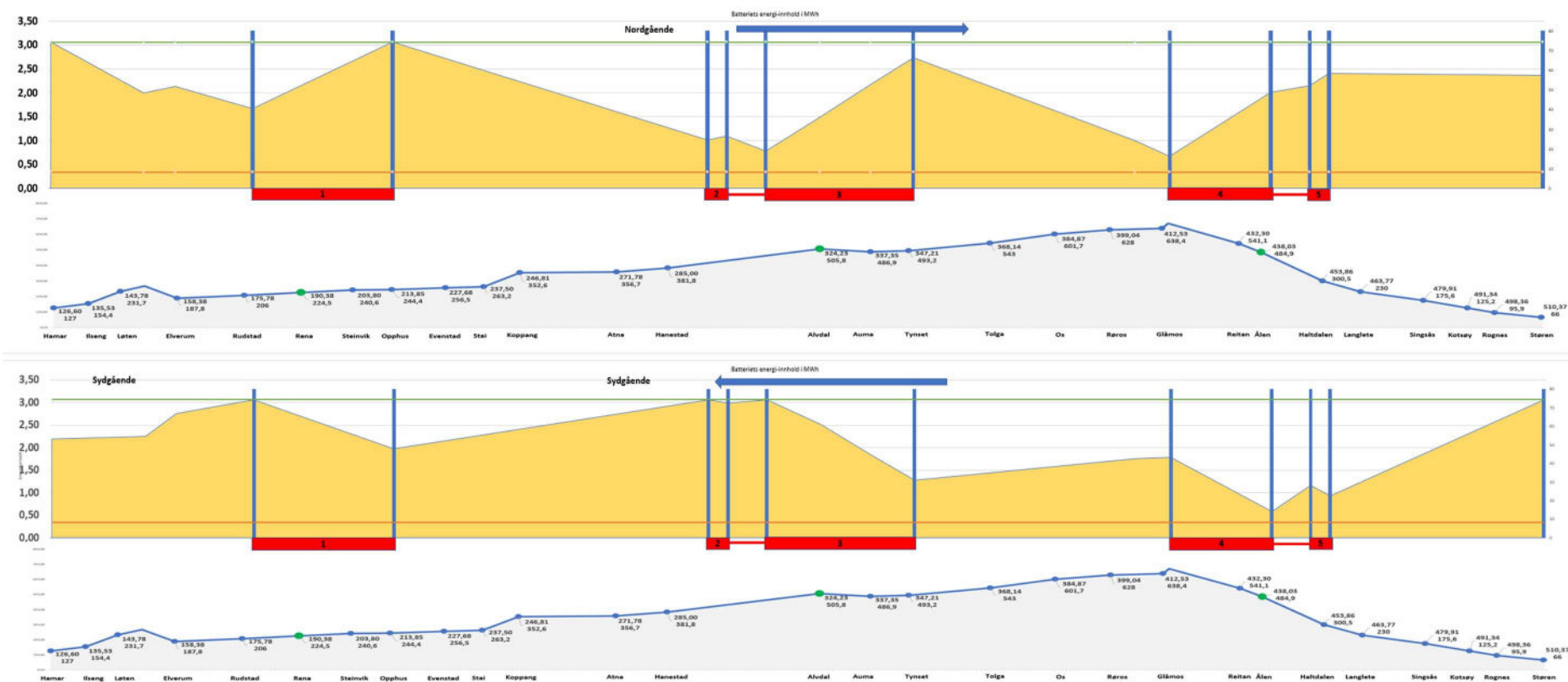


Figur 13: Diagram for batteriforbruk til godstog på Rørosbanen med batterikapasitet på 2,6 MWh

9.2.2 3,4 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 28,72 %
- Antall omformere: 3

- Antall elektrifiserte strekninger: 5
- Mengde kraftledning: 20 km
- Mengde kontaktledning: 110 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 1,5 MWh

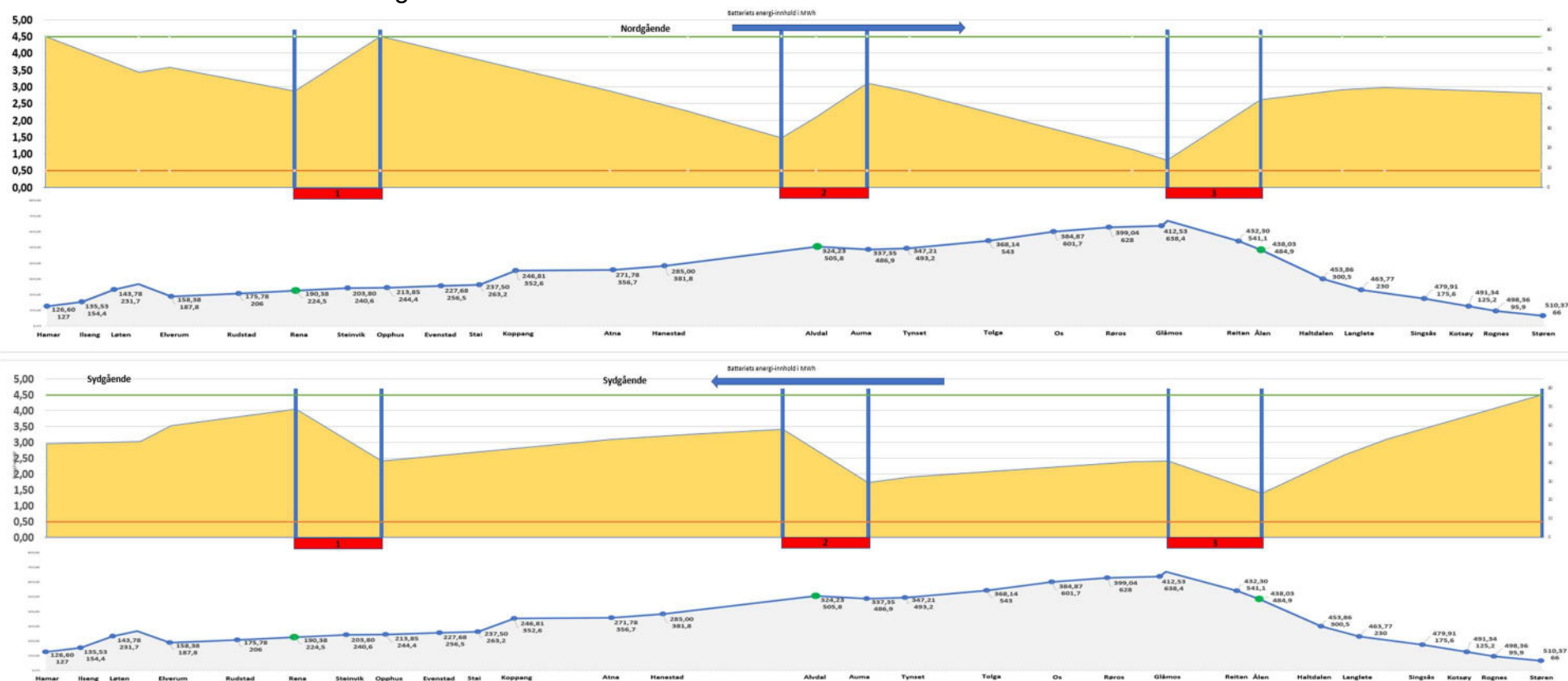


Figur 14: Diagram for batteriforbruk til godstog på Rørosbanen med batterikapasitet på 3,4 MWh

9.2.3 5,0 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 17,81 %
- Antall omformere: 3
- Antall elektrifiserte strekninger: 3

- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 68 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 2,3 MWh



Figur 15: Diagram for batteriforbruk til godstog på Rørosbanen med batterikapasitet på 5,0 MWh.

9.2.4 7,5 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 35,76 %
- Antall omformere: 1

- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 28 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 3,0 MWh



Figur 16: Diagram for batteriforbruk på Rørosbanen med batterikapasitet på 7,5 MWh

9.2.5 11 MWh

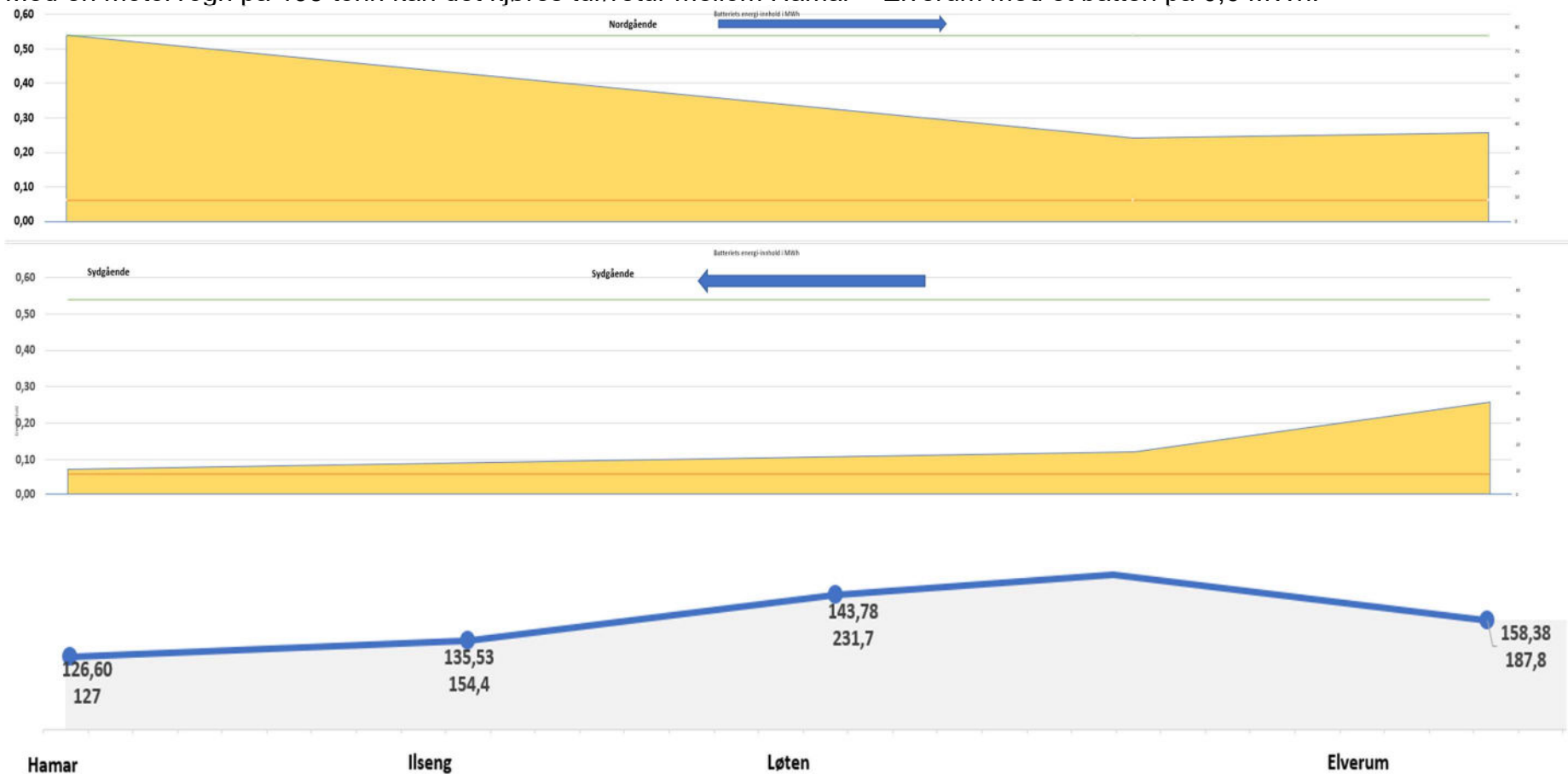
Kommentar: Det er på grensen til at det går uten nye matestasjoner på strekningen.



Figur 17: Diagram for batteriforbruk til godstog på Rørosbanen med batterikapasitet på 11 MWh

9.2.6 Motorvogn Hamar – Elverum

Med en motorvogn på 195 tonn kan det kjøres tur/retur mellom Hamar – Elverum med et batteri på 0,6 MWh.



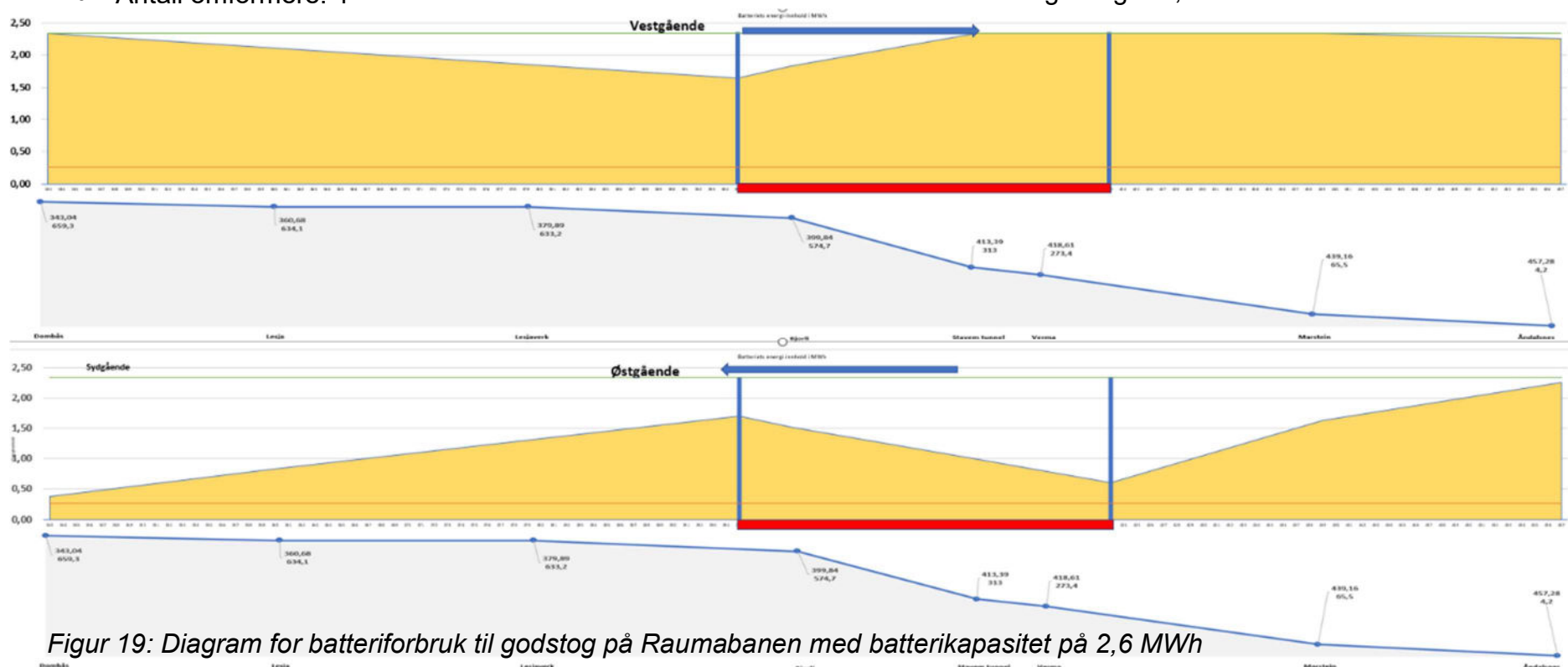
Figur 18: Diagram for batteriforbruk mellom Hamar og Elverum med batterikapasitet på 0,6 MWh

9.3 Raumabanen

9.3.1 2,6 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 24,51 %
- Antall omformere: 1

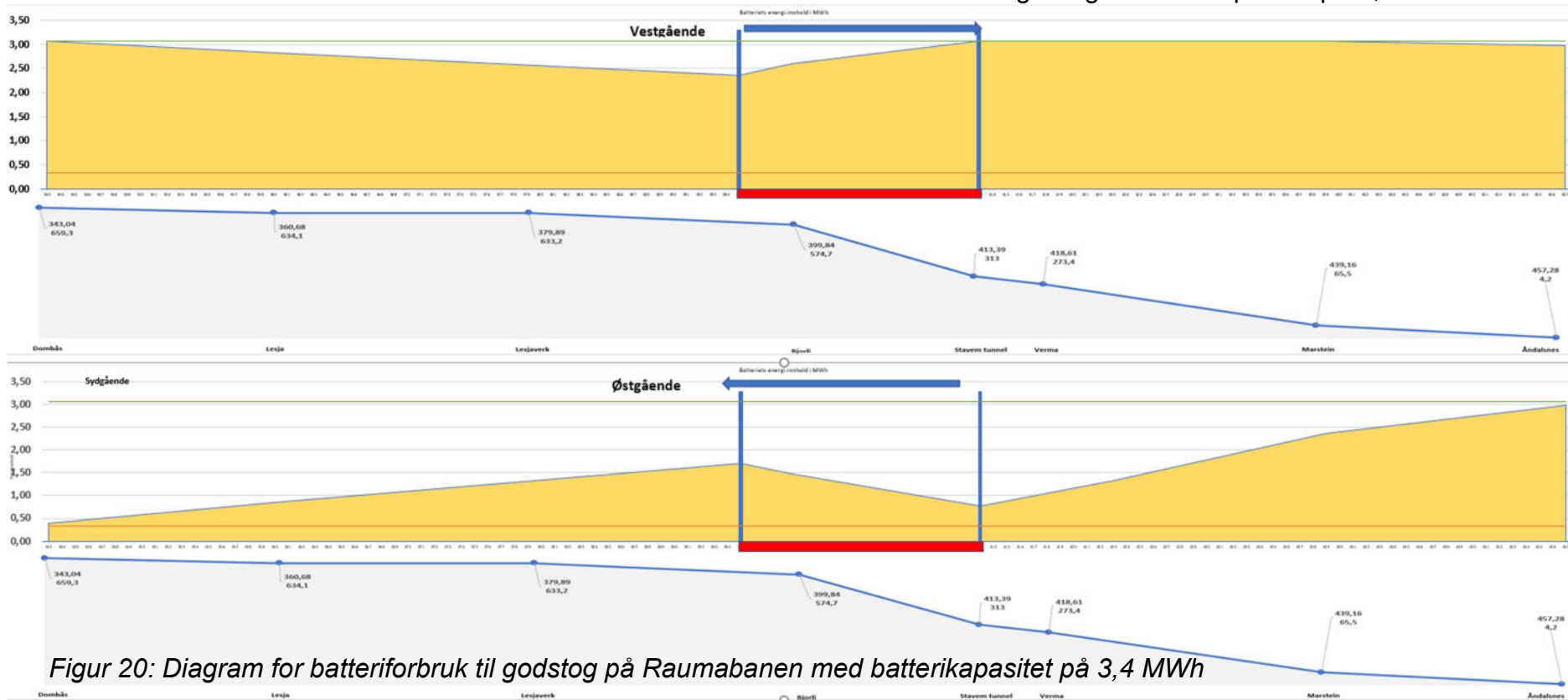
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 28 km
- Persontog trenger 1,2 MWh



Figur 19: Diagram for batteriforbruk til godstog på Raumabanen med batterikapasitet på 2,6 MWh

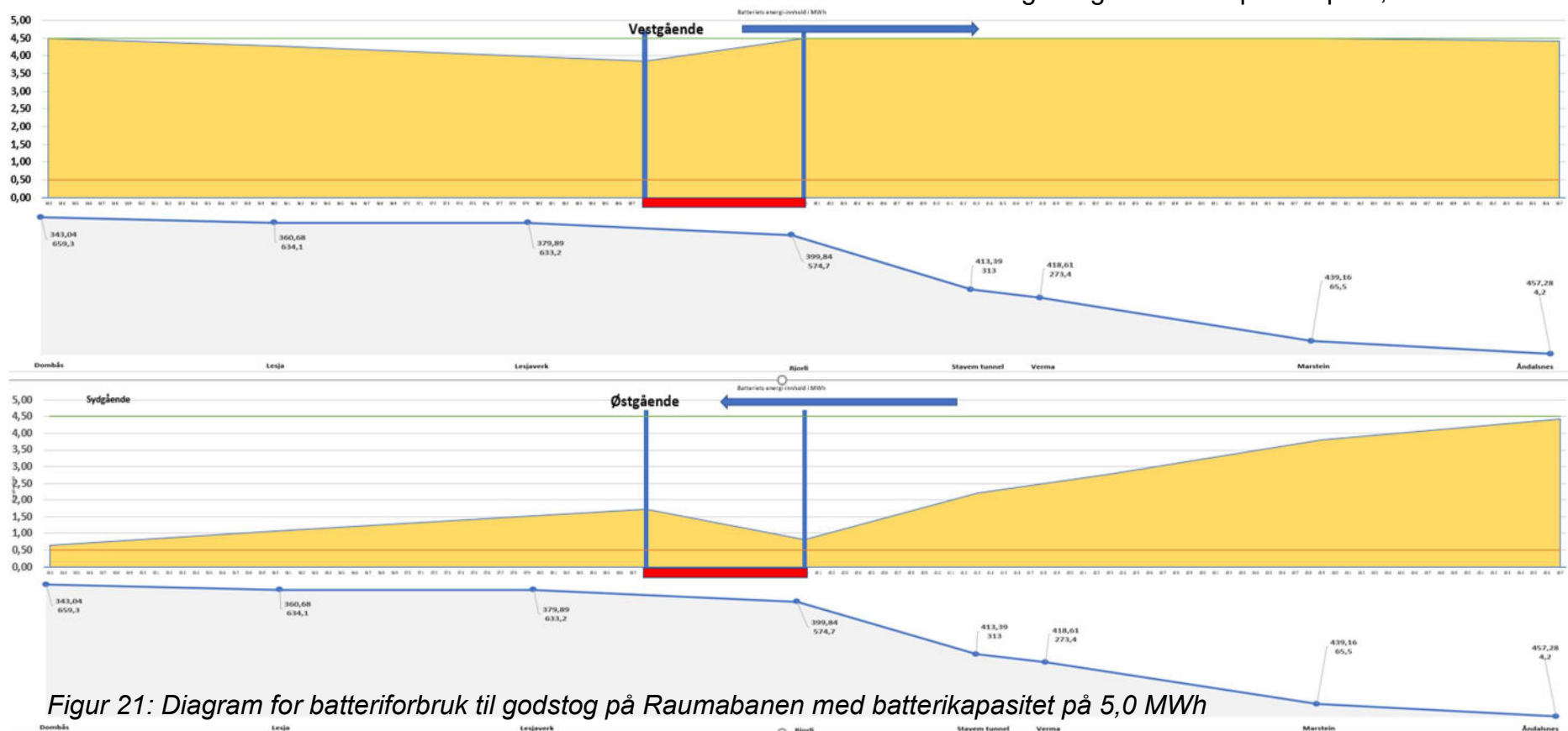
9.3.2 3,4 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 16,10 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 18,39 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 1,6 MWh



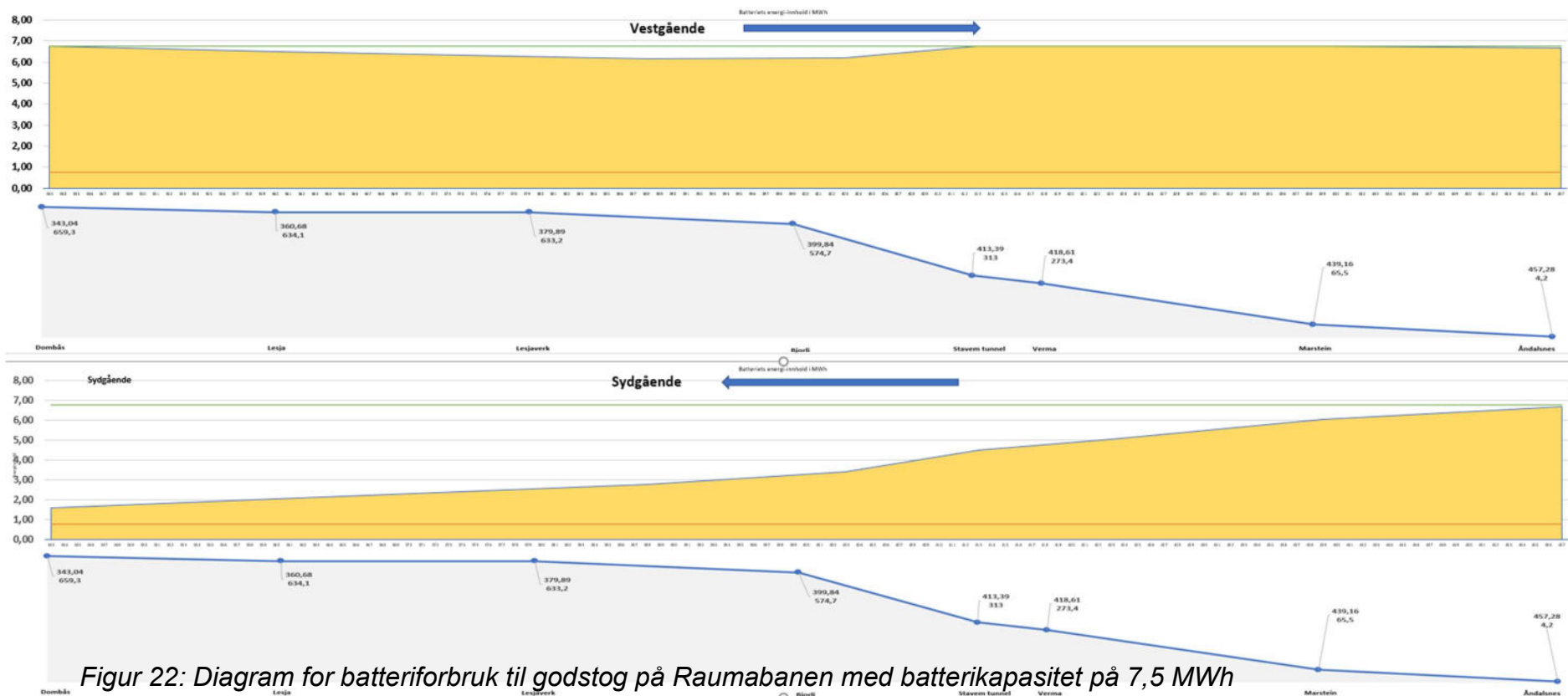
9.3.3 5,0 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 10,50 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 12 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 2,3 MWh



9.3.4 7,5 MWh

- Elektrifiseringsgrad: 0 %
- Antall omformere: 0
- Antall elektrifiserte strekninger: 0
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 0 km
- Persontog trenger batterikapasitet på 2,9 MWh

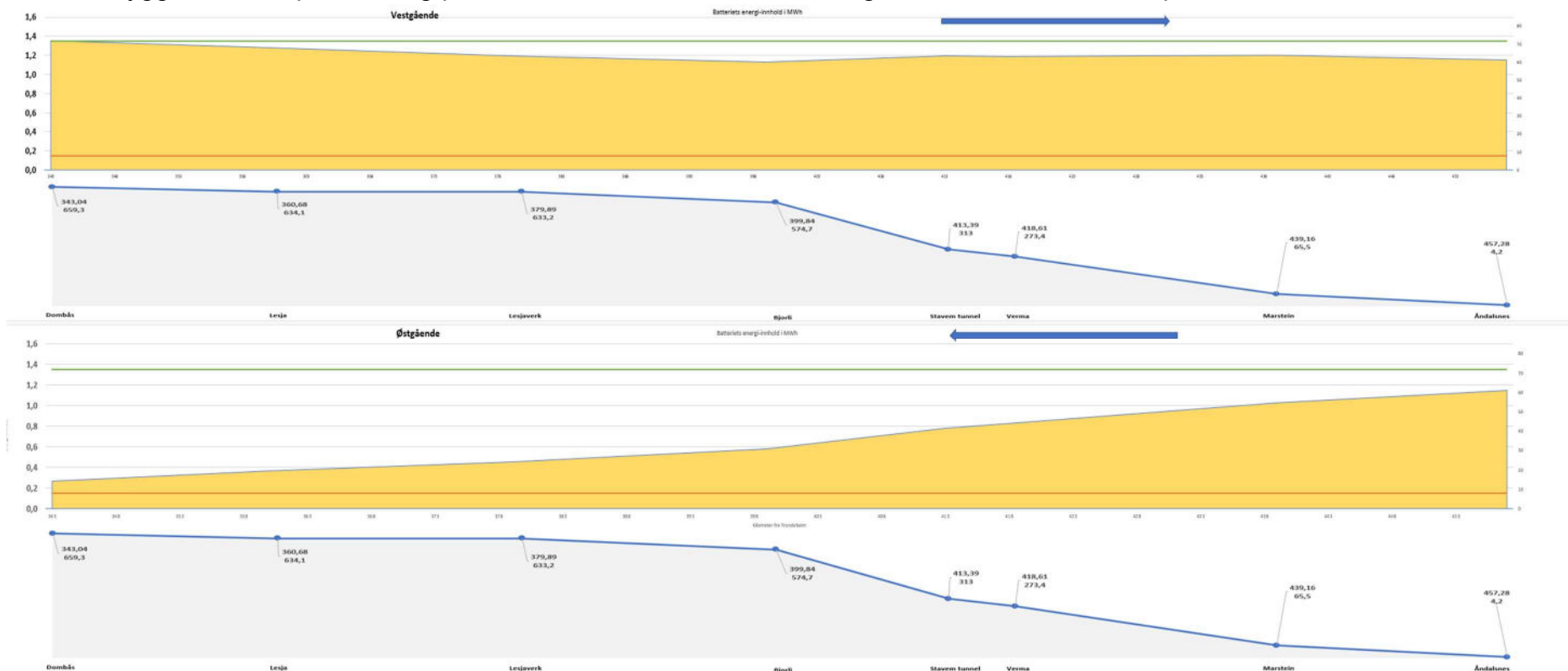


Figur 22: Diagram for batteriforbruk til godstog på Raumabanen med batterikapasitet på 7,5 MWh

9.3.5 Motorvogn

Det kan kjøres et lite motorvognsett tur/retur uten utbygging av ekstra matestasjon hvis batterikapasiteten er på 1,5 MWh.

Hvis det bygges ut endepunktlading på Åndalsnes er det bare nødvendig med 1,1 MWh batterikapasitet



Figur 23: Diagram for batteriforbruk til motorvogn på Raumbanen med batterikapasitet på 1,5 MWh

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 45 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

9.3.6 Solørbanen

Solørbanen er spesiell ved at det nesten utelukkende går tømmertransport på banen.

Tømmertransport på Solørbanen er derfor omtalt spesielt senere i rapporten.

10 DAGENS TOGRUTER OG STREKNINGER

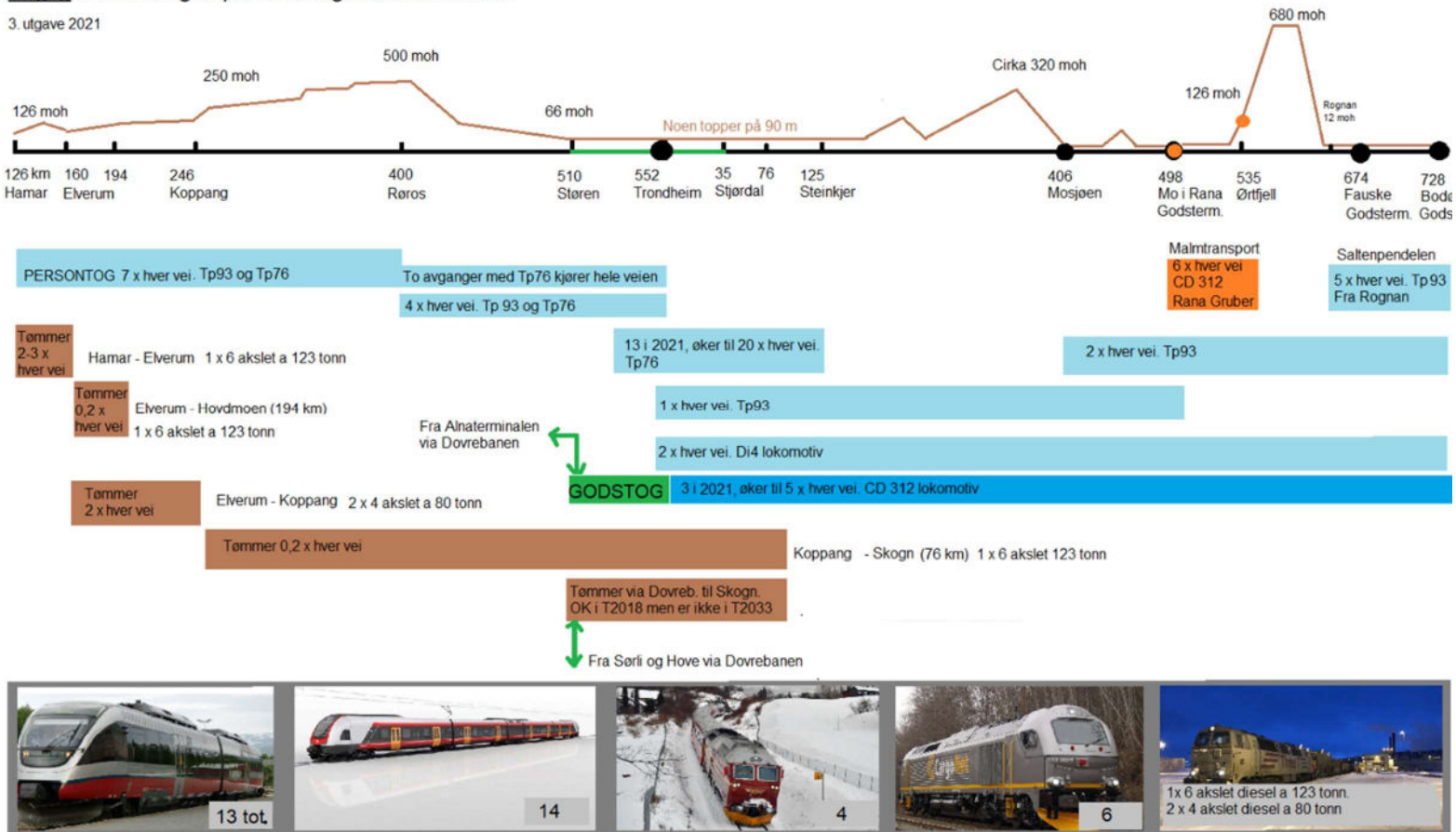
Som nevnt er 1200 tonn godstog funnet å være den mest krevende togtypen for deelektrifisering. Banestrømforsyningen må derfor dimensjoneres i forhold til denne togtypens behov.

I følgende kapittel er det sett på hvilken batteristørrelse som kreves for at de andre togtypene på aktuelle ruter skal kunne bruke de ulike banestrømforsyningene dimensjonert for godstog.

Dagens togtyper og ruter er vist under i Figur 24.

Daglig trafikkmengde på Røros og Nordlandsbanen

3. utgave 2021



Figur 24: Daglig trafikkmengde på Røros- og Nordlandsbanen

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 47 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Ved overgang til batteritog må dagens lokomotiv/motorvognsett erstattes med noe tyngre utgaver med batteri. Det er ikke kjent hvilke kjøremotstander og vekter som vil gjelde for de nye lokomotiv/motorvognsett.

For å beregne hvilke batteristørrelser som vil være nødvendig ved batteridrift på rutene vist i Figur 24, er tatt utgangspunkt i dagens togtyper. Data som er brukt i beregningene er nevnt i kapittelet «Inngangsdata i energiberegningene».

NB! Det nevnes igjen at batteristørrelsene som er beregnet er den kapasiteten som er nødvendig for å trafikkere ruten på enden av batteriets levetid. Det må altså installeres et større batteri, avhengig av hvilken batterikjemi som vil være aktuell på installasjonstidpunktet.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 48 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

11 BRUK AV INFRASTRUKTUREN FOR ANDRE TOGTYPEN

De kortere rutene som for eksempel Saltenpendelen, Trønderbanen og Raumabanen er energibehovet lite og det er ikke nødvendig å lade i fart. For enkelte togtyper holder det at disse lades under stillstand på endepunktet eller endepunktene av ruten. Endepunktslading krever nødvendigvis ikke kontaktledning og matestasjonene kan gjøres enklere og billigere. Endepunktslading kan etableres raskt uten forstyrrelser av togtrafikken.

Togruter som bare krever enkel strømforsyning, er omtalt i neste kapittel.

Togruter som er lange (regiontog) vil kreve lading i fart. Disse rutene er energikrevende og det er nødvendig med mange oppladninger underveis. Stopp på stasjoner og ved venting på kryssingsspor vil kunne redusere behovet for batterikapasitet noe. Dette er ikke tatt hensyn til i beregningene som er gjort.

11.1 Regiontog med lok og vogn, Trondheim – Bodø

Dette toget vil kjøre på elektrifisert bane fra Trondheim til Værnes. Deretter vil det kjøre på deelektrifisert bane.

Ifølge ruteoversikten i forrige kapittel trafikkeres denne ruten med lokomotiv Di4 og 7 vogner. I beregningene av batteribehov er det regnet med kjøremotstander for tilsvarende togtype.

Toget vil ha behov for en noe mindre batterikapasitet enn godstoget:

- Infrastruktur for 2,6 MWh godstog krever 1,4 MWh batterikapasitet i persontog
- Infrastruktur for 3,4 MWh godstog krever 1,7 MWh batterikapasitet i persontog
- Infrastruktur for 5,0 MWh godstog krever 2,4 MWh batterikapasitet i persontog
- Infrastruktur for 7,5 MWh godstog krever 3,4 MWh batterikapasitet i persontog

Alle tall er oppgitt som aldret batterikapasitet ved livsende. Den installerte kapasiteten i nytt lokomotiv må være høyere.

11.2 Regiontog med motorvognsett, Trondheim - Bodø

Ifølge ruteoversikten kjøres det også type 93 på denne strekningen. En tilsvarende type tog med batteri kalt «lite motorvognsett» vil kreve enda mindre batterikapasitet:

- Infrastruktur for 2,6 MWh godstog krever 0,9 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 3,4 MWh godstog krever 0,9 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 5,0 MWh godstog krever 1,6 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 7,5 MWh godstog krever 2,2 MWh i lite motorvognsett

11.3 Regiontog Oslo - Røros - Trondheim

Dette toget vil kjøre på elektrifisert bane fra Oslo til Hamar. Deretter vil det kjøre på deelektrifisert bane til Støren, og deretter på elektrifisert bane til Trondheim.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 49 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Ifølge ruteoversikten vil strekningen trafikkeres med typ 76. I beregningene av nødvendig batterikapasitet er det regnet med tilsvarende type med batteri, kalt «stort motorvognsett»:

- Infrastruktur for 2,6 MWh godstog krever 0,9 MWh i stort motorvognsett
- Infrastruktur for 3,4 MWh godstog krever 1,0 MWh i stort motorvognsett
- Infrastruktur for 5,0 MWh godstog krever 1,4 MWh i stort motorvognsett
- Infrastruktur for 7,5 MWh godstog krever 2,1 MWh i stort motorvognsett

11.4 Langruter Oslo - Røros og Røros - Trondheim

I ruteoversikten er det også vist to ruter som har endepunkter på Røros, fra hver sin side. De trafikkeres i dag av type 93, men kan erstattes av et batteritog kalt «lite motorvognsett».

På samme måte som regiontog Oslo - Røros - Trondheim vil toget både gå på elektrifisert og deelektrifisert bane.

For enkelhets skyld er disse to rutene beregningsmessig slått sammen til en rute, og batteribehovet ved de ulike infrastrukturene er vist under:

- Infrastruktur for 2,6 MWh godstog krever 0,6 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 3,4 MWh godstog krever 0,8 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 5,0 MWh godstog krever 1,1 MWh i lite motorvognsett
- Infrastruktur for 7,5 MWh godstog krever 1,6 MWh i lite motorvognsett

12 TOGRUTER SOM BARE KREVER ENKEL STRØMFORSYNING

Som nevnt er det noen kortere ruter der det ikke må lades underveis. Energibehovet er så lite at det holder å lade under stillstand på endestasjoner.

For noen ruter er det allerede kontaktledning på endepunktet, slik at det kun trengs ladeutrustning på det andre endepunktet (Raumabanen og Trønderbanen). Dette innebærer i så fall at lokomotivet må kunne lade via pantograf på minst det ene endepunktet. På det nye punktet kan en vurdere lade via pantograf (16 2/3 Hz) eller via manuelle og kontakter (1000 V AC eller 1000 V DC). Dette er omtalt i kapittel om endepunktlading. Uansett betinger det opphold for lading ved endepunkt.

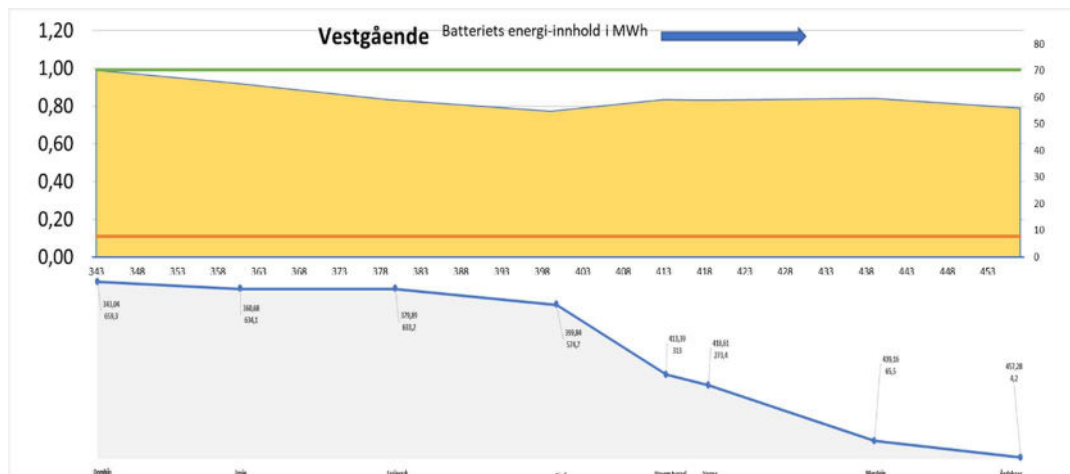
Saltenpendelen har så lavt energibehov at toget kan kjøre fram og tilbake på en lading.

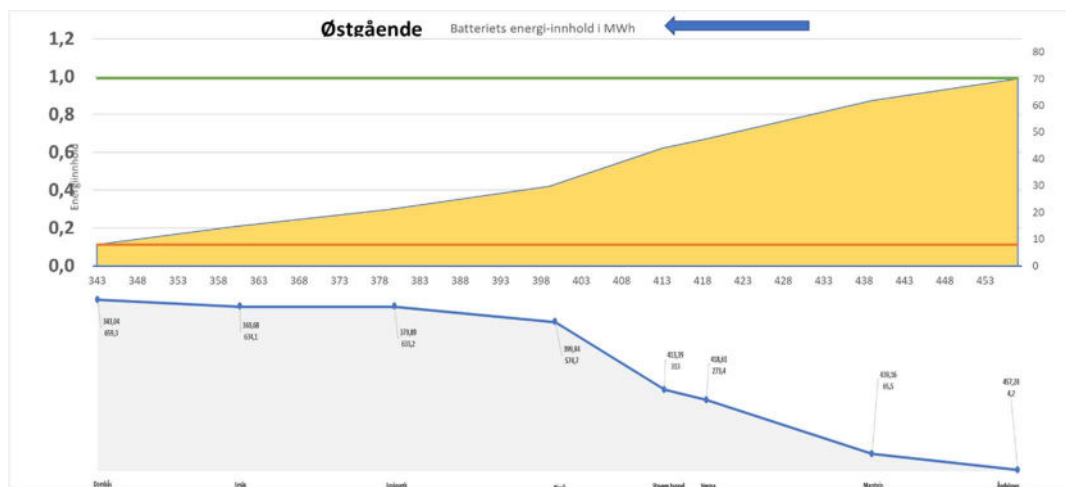
12.1 Raumabanen

Ruten trafikkeres i dag med lite motorvognsett.

Banen starter i Dombås og har fall ned mot Åndalsnes, slik at energibehovet for vestgående tog er svært lavt. Toget trenger kun en mindre lading i Åndalsnes for å greie stigningen tilbake til Dombås.

Nødvendig batterikapasitet i toget er 1,1 MWh. Ved noe økning av batterikapasiteten er det ikke behov for lading i Åndalsnes.

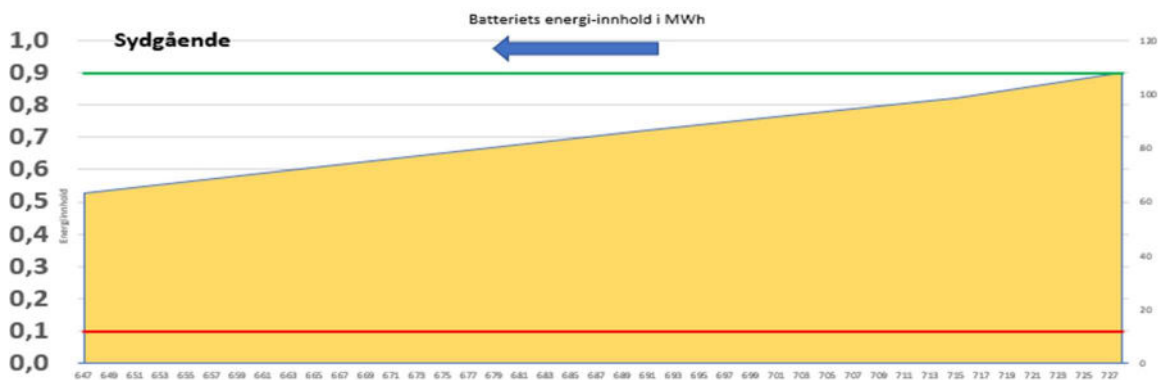


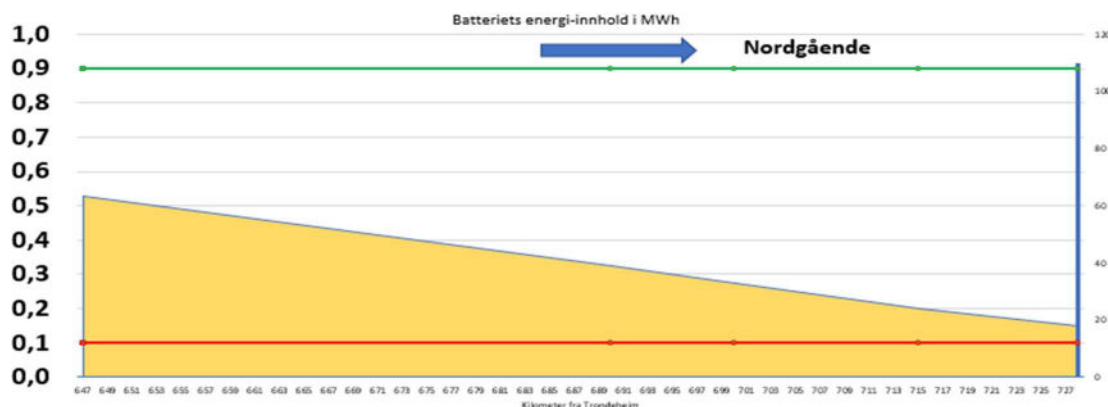


12.2 Saltenpendelen

Ruten trafikkeres i dag med lite motorvognsett

Banen har liten stigning og er kort. Energibehovet er lite, og det er kun behov for lading i den ene enden.

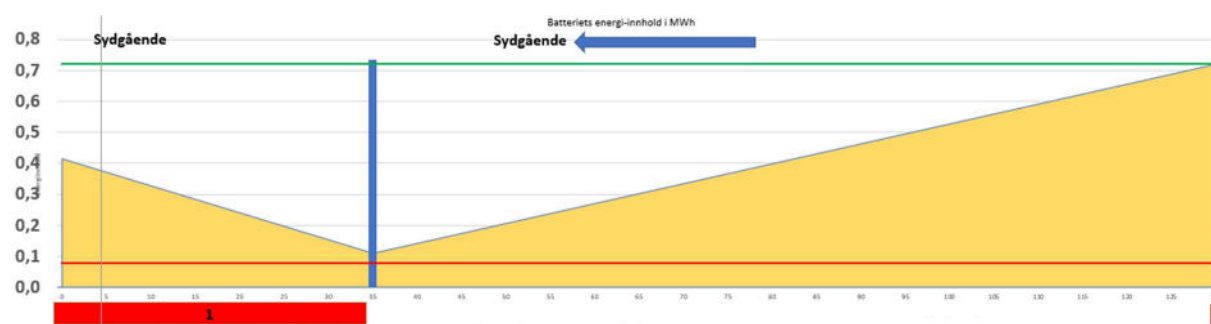
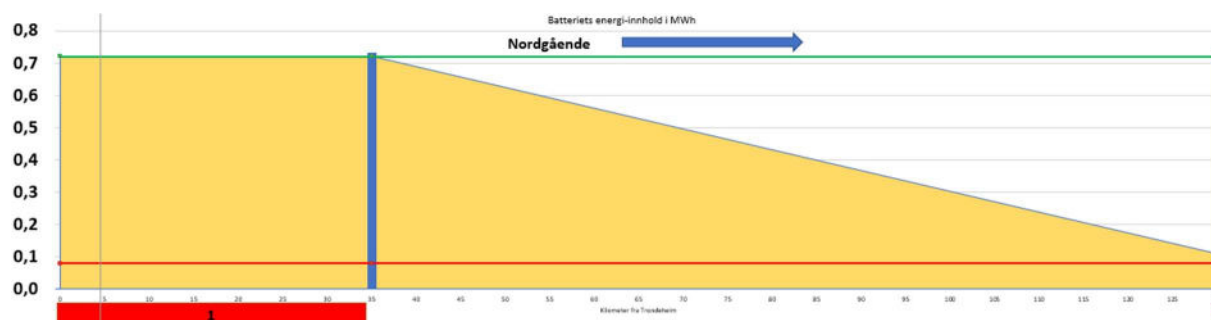




Ved lite motorvognsett er behovet 1,0 MWh. Ved stort motorvognsett er behovet 1,3 MWh.

12.3 Trønderbanen

Trønderbanen er navnet på rute fra Støren til Steinkjer. Ruten trafikkeres i dag med stort motorvognsett



Det er kun behov for endepunktslading i Steinkjer ettersom batteriene vil være fullt oppladet etter å ha kjørt tur/retur Støren eller Trondheim..

Det er behov for 0,8 MWh batterikapasitet i toget.

12.4 Hamar – Elverum

En mulig rute er trafikk fra Hamar til Elverum med stort motorvognsett. Her vil det være behov for 0,6 MWh batterikapasitet for strekningen tur/retur.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 53 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

13 MALMTOG VED RANA GRUBER

Rana Gruber bruker del av Nordlandsbanen til malmtransport fra Ørtfjell til utskipping i Mo i Rana. Det er et sidespor inn til gruvene. Hele transport lengden er 37 km.

Togene kjører i 50 km/h med last nedover og 80 km/h oppover. Vekten oppover er 630 tonn + lok 120 tonn, mens vekt nedover er 3000 tonn + lok 120 tonn. Høydeforskjellen er 124 m. Lasting og lossing skjer under sakte fart, ca. 3 km/h. Toget trafikkerer ca. 6 – 8 runder per dag.

Beregninger viser at forbruket fra batteri er 1,8 MWh for en runde tur/retur.

Lading kan gjøres på flere måter:

- Lading under lasting/lossing på Ørtfjell eller Mo i Rana, sakte fart
- Lading under opphold på Ørtfjell eller Mo i Rana, stillstand
- Lading begge steder, under stillstand eller under lasting/lossing
- Lading under fart mellom endepunktene

Lading under lasting/lossing vil kreve vekselstrøm med høy spenning. 15 kV 16 2/3 Hz og 25 kV 50 Hz er standard spenninger for lokomotiv. Begge disse spenningene vil kreve avansert og kostbart omformingsutstyr.

Lading under stillstand kan være et aktuelt alternativ. En vil da lade med likestrøm på en fast plass der det er montert en kontaktrobot. (En robot som selv finner og beveger støpselet og slutter kontakt, slik det er løst for mange ferger.) En slik lademetode kan bli vesentlig rimeligere, men det har den ulempen at toget må stå stille under lading. Ifølge Rana Gruber er driftsopplegget nå slik at det ikke vil være tilstrekkelig tid til lading.

Lading på begge endepunkter reduserer batteribehovet noe (1,56 MWh), men ikke vesentlig på grunn av tilbakemating på vei ned fra Ørtfjell. Ladetiden blir ca 39 minutt på Ørtfjell og 6 minutt i Mo i Rana. Hurtigheten på opplading er begrenset av batteriets C-rate = 1,2, slik det er forutsatt i beregningene.

Lading under fart mellom endepunktene vil redusere batteribehovet til nær halvparten, avhengig av hvor ladestrekningen legges. Ladestrekningens lengde er gitt av ladebehovet, ladehastighet og kjørehastighet. Ved C = 1,2 og 80 km/h vil ladestrekningen bli ca. 6 km.

Ladetid og ladestrekning kan reduseres hvis det i framtiden er mulig å bruke batterier med større kapasitet eller større C-rate.

Foreløpig finnes ikke godslokomotiv med tilstrekkelig batterikapasitet. Disse må derfor utvikles. Den enkleste og rimeligste løsningen kan være å bruke eksisterende

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 54 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

diesellokomotiv og koble til en semipermanent liten batterivogn (kort, lav med smalt overbygg lik snuten på et skiftelokomotiv). Batterivognen må kobles til DC linken i lokomotivet. Dieselmotoren vil dermed bare stå som reserve.

En mer praktisk løsning er å ta utgangspunkt i tegningene for et hybrid diesel/KL lokomotiv og fjerne diesel med alt utstyr (generator, kjøling, tank, styring), og bruke plass og lasteevne til batterier. Dette innebærer utvikling og innkjøp av nytt lokomotiv.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 55 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

14 TØMMERTOG PÅ SOLØRBANEN

På Solørbanen kjøres det overveiende tømmeretog. I hovedsak går tømmeret fra ulike tømmerterminaler sydover til videreforedling i Sverige. Noen av terminalene ligger på Rørosbanen i Østerdalen nord for Elverum. Tømmeret fra disse terminalene går på Rørosbanen og Solørbanen til Sverige, men noe går også nordover til Trøndelag (Skogn).

Den vanlige driften er at tomme tømmeretog kommer fra Sverige og tar Solørbanen opp fra Kongsvinger til aktuell terminal. Der lastes vognene opp med tømmer, eventuelt er tømmeret allerede lastet ferdig på et annet sett med vogner. Lokomotiv og vogner returnerer deretter direkte til Sverige uten stopp på andre terminaler. Tømmerterminalene fungerer dermed som individuelle endestasjoner på rutene.

I dette prosjektet er det undersøkt hvordan tømmertransporten med tog fra terminalene i Østerdalen til Sverige kan utføres med batteritog.

Ladealternativer

Batteritog på Solørbanen kan gjennomføres på tre ulike måter:

1. Ingen nye ladestrekninger (Lading i fart fra eksisterende kontaktledning i Sverige til Kongsvinger).
2. Delelektrifisering. (Ladestrekninger/kontaktledning og batteristrekninger).
3. Endepunktlading. (Lading under opplasting på hver tømmerterminal).

Den enkleste løsningen er ladealternativ 1, det vil si at batteriet i lokomotivet er fullt oppladet fra de allerede elektrifiserte strekningene før toget svinger inn på Solørbanen fra syd. Dette alternativet er undersøkt først:

Forutsetninger

Som basis for beregningene er det valgt:

Tømmeretog med:

- Batteristørrelse 5 MWh eller 7,5 MWh
- Togvekt tom: 800 tonn (nordgående)
- Togvekt full: 2400 tonn (sydgående)
- Hastighet, begge veier: 80 km/h

Tømmerterminaler på Solørbanen som skal betjenes:

- Elverum 94 km
- Vestmo 90 km
- Braskereidfoss 70 km

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 56 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

- Norsenga 4 km

(Avstander fra Kongsvinger angitt)

Tømmerterminaler på Rørosbanen som skal betjenes:

- Auma 179 km 273 km
- Koppang 88 km 182 km
- Hovdmoen 32 km 126 km

(Avstander fra henholdsvis Elverum og Kongsvinger angitt)

14.1 5 MWh

Ladealternativ 1:

Terminalene Norsenga og Braskereidfoss kan betjenes med batteritog fra Kongsvinger tur/retur. Det er da ikke behov for infrastrukturtiltak. Togene må da lades opp fullt før Kongsvinger.

Det kreves ca. 6 MWh batteri for å også kunne betjene terminalen Vestmo uten infrastrukturtiltak.

Ladealternativ 2:

Terminalene på Rørosbanen (Auma, Koppang og Hovdmoen) ligger for langt unna Kongsvinger til at strekningen tur/retur kan trafikkeres uten ny opplading.

For å kunne betjene Hovdmoen og Koppang må det bygges matestasjon ved Elverum, samt en strekning med kontaktledning. For å betjene Auma må det bygges ytterligere en matestasjon med kontaktledning.

Dette antas å være svært kostbart i forhold til nytten, ekstra kostnad på over 300 MNOK per ladestrekning. Et slikt tiltak må eventuelt sees i sammenheng med deelektrifisering av Rørosbanen.

Ladealternativ 3:

Se omtale i neste avsnitt.

14.2 7,5 MWh

Ladealternativ 1:

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 57 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Terminalene på Solørbanen kan betjenes med batteritog fra Kongsvinger tur retur. Det er da ikke behov for infrastrukturiltak. Togene må da lades opp fullt før Kongsvinger.

Ladealternativ 2:

Terminalene Hovdmoen, Koppang og Auma ligger for langt unna Kongsvinger.

For å kunne betjene Koppang må det bygges matestasjon ved Elverum, samt en strekning med kontaktledning. For å betjene Auma må det bygges ytterligere en matestasjon med kontaktledning.

Dette antagelig svært kostbart i forhold til nytten, ekstra kostnad på over 300 MNOK per ladestrekning. Et slikt tiltak må eventuelt sees i sammenheng med deelektrifisering av Rørosbanen.

Ladealternativ 3, endepunktslading

Som vist over kan ladealternativ 1 og 2 kombineres ved at de nærmeste terminalene betjenes uten ladestrekning, men at de fjerneste må ha opplading underveis. På samme måte kan det i stedet for ladestrekninger installeres ladeutrustning på hver eneste terminal som ligger langt unna Kongsvinger.

Slik opplading vil kreve ekstra utstyr på lokomotivet, både i form av kontakter og omformere. Det vil også kreve ladeutrustning med kraftforsyning på terminalen (se kapittel om endepunktslading). Terminalene ligger så langt fra hverandre at det blir nødvendig med ladestopp på mellomliggende terminaler for de fjerneste terminalene.

En slik løsning med mange ladestasjoner for stillestående lading er ikke undersøkt videre. Løsningen krever mange installasjoner og kan synes kostbar i forhold til nytten. Løsningen vil komplisere driften av tømmertransporten.

Det er også et alternativ 4. Dette er full elektrifisering av Solørbanen på strekningen Kongsvinger – Elverum - Hamar. Planer for slik elektrifisering er allerede utarbeidet som en del av et prosjekt for opprustning av Solørbanen. Full elektrifisering er relativt rimelig i dette tilfellet, ettersom det allerede er matestasjoner i begge ender med ledig kapasitet, og ingen nye matestasjoner er nødvendig. Imidlertid vil ikke en slik elektrifisering gi nullutslipp for tømmerogene til terminaler nord for Elverum uten ekstra investeringer i ladestasjoner og batteritog.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 58 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

15 BEREGNINGRESULTATER – SAMLET OVERSIKT

15.1 Nordlandsbanen

2,6 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 31,68 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 5 + Endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 13
- Mengde kraftledning: 150 km
- Mengde kontaktledning: 265 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,4 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 0,9 MWh

3,4 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 26,52 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 5 + Endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 11
- Mengde kraftledning: 120 km
- Mengde kontaktledning: 230 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,7 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 0,9 MWh

5,0 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 19,15 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 5 + Endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 8
- Mengde kraftledning: 25 km
- Mengde kontaktledning: 180 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 2,4 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 1,6 MWh

7,5 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 13,26 % (ser bort ifra strekningen Trondheim – Stjørdal)
- Antall omformere: 3 + Endepunktloading i Bodø
- Antall elektrifiserte strekninger: 11
- Mengde kraftledning: 15 km
- Mengde kontaktledning: 140 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 3,4 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 2,2 MWh

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 59 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Motorvogn:

Kan kjøre tur/retur fra Bodø med en batterikapasitet på 1,2 MWh uten noen elektrifisering, gitt at det er endepunktloading i Bodø. NB! Det passer med matestasjon på Rognan for godstransport. Hvis denne bygges trengs enda mindre batterikapasitet (under 1 MWh).

15.2 Rørosbanen

2,6 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 35,76 %
- Antall omformere: 3
- Antall elektrifiserte strekninger: 5
- Mengde kraftledning: 33 km
- Mengde kontaktledning: 137 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,3 MWh
- Stort motorvognsett må ha batterikapasitet på 0,9 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 0,6 MWh

3,4 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 28,72 %
- Antall omformere: 3
- Antall elektrifiserte strekninger: 5
- Mengde kraftledning: 20 km
- Mengde kontaktledning: 110 km
- Trenger batterikapasitet på 1,5 MWh for å kjøre persontog på denne traséen.
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,5 MWh
- Stort motorvognsett må ha batterikapasitet på 1,0 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 0,8 MWh

5,0 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 17,81 %
- Antall omformere: 3
- Antall elektrifiserte strekninger: 3
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 68 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 2,3 MWh
- Stort motorvognsett må ha batterikapasitet på 1,4 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 1,1 MWh

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 60 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

7,5 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 35,76 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 28 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 3,0 MWh
- Stort motorvognsett må ha batterikapasitet på 2,1 MWh
- Lite motorvognsett må ha batterikapasitet på 1,6 MWh

15.3 Raumabanen

2,6 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 24,51 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 28 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,2 MWh

3,4 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 16,10 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 18,39 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 1,6 MWh

5,0 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 10,50 %
- Antall omformere: 1
- Antall elektrifiserte strekninger: 1
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 12 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 2,3 MWh

7,5 MWh:

- Elektrifiseringsgrad: 0 %

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 61 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

- Antall omformere: 0
- Antall elektrifiserte strekninger: 0
- Mengde kraftledning: 0 km
- Mengde kontaktledning: 0 km
- Persontog må ha batterikapasitet på 2,9 MWh

Motorvogn:

Det kan kjøres liten motorvogn uten utbygging av ekstra matestasjon hvis batterikapasiteten er på 1,1 MWh. Dette fungerer bare hvis det er endepunktlading på endestasjonen i Åndalsnes, hvis ikke blir det nødvendig med noe større batterikapasitet.

15.4 Solørbanen

Godstransport

Et godstog på 1200 tonn med 2,6 MWh eller større batteri kan kjøre gjennom hele Solørbanen uten noen form for elektrifisering. Dette krever at Rørosbanen er elektrifisert, slik at godstog kan være fullt oppladet ved innkjøring på Solørbanen fra syd eller nord.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 62 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

16 VIRKNING AV ØKT C-RATE

Tidligere i denne rapporten er det undersøkt hvordan en optimal infrastruktur påvirkes av størrelsen på batteriet i ulike togtyper ved ulike baner (med optimal infrastruktur menes her den minst kostbare miks av lengde og plassering av ladestrekninger samt plassering og antall av matestasjoner).

Mange kombinasjoner med batteristørrelser, togtyper og baner er beregnet på fordi det er stor usikkerhet knyttet til hvor stor batterikapasitet kan installeres i et lokomotiv i framtiden.

Det er også usikkerhet om utviklingen av andre sider ved batteri. Det forventes at framtidens batteri kan få:

- Større energitetthet
- Høyere ladehastighet (som henger sammen med C-rate)
- Lavere aldringstakt
- Høyere antall sykler før utskifting
- Større utnyttelse av installert kapasitet
- Lavere interne tap
- Lavere pris
- Redusert bruk av sjeldne metaller
- Høyere sikkerhet mot brann

Batteri som er særlig god på en egenskap vil som regel være dårligere på andre egenskaper, ellers ville det bare være en type batteri som blir brukt. Lokomotiv/tog har begrenset plass og tillatt akselvekt. Det må derfor prioriteres hvilke batteriegenskaper som er viktig for eget bruk, både nå og sannsynligvis i framtiden..

Per i dag er det to hovedtyper batterier som er aktuelle for tog. Disse benevnes NMC (Nikkel, mangan, cobolt) og LTO (Litium titanat oksid). Det arbeides med videreutvikling av begge batterityper. Per i dag har NMC batteri høy energitetthet. LTO batterier har lavere energitetthet og dobbel vekt i forhold til NMC med samme kapasitet. Men LTO batterier kan lades med høy C-rate (og dermed høy ladehastighet) uten stor forringelse av levetid. (C-rate er definert og omtalt tidligere i rapporten.)

Ved å bruke batterier med høy ladehastighet kan banestrømforsyningen lages med kortere ladestrekninger og dette kan gi lavere investeringskostnader. Det er derfor viktig å ha en oversikt over hvordan valg av høyere C-rate i togbatteri vil påvirke utformingen av infrastrukturen, og dermed også investeringskostnaden.

For å kunne sammenligne egenskaper og kostnader ved ulike kombinasjoner av batteristørrelse og C-rate er det beregnet følgende tilfeller:

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 63 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

- A: **Base case** 3,4 MWh batteri med C=1,2
- B: Samme infrastruktur som A, men med C=3, optimalisert for å redusere batteristørrelse
- C: 3,4 MWh batteri med C=3, optimalisering av infrastruktur for å korte kontaktledning
- D: 5 MWh batteri med C=1,2 til sammenligning med alternativ C
- E: 6,8 MWh batteri med C=1,2 til sammenligning med alternativ C

Her er det å bemerke at batteriene i alternativene C og D har samme vekt hvis høyenergibatterier i D har 1,5 ganger så stor energitetthet som høyeffektbatterier i C. Likeså at batteriene i C og E har samme vekt hvis høyenergibatterier i C har dobbelt så stor energitetthet som høyeffektbatterier i E.

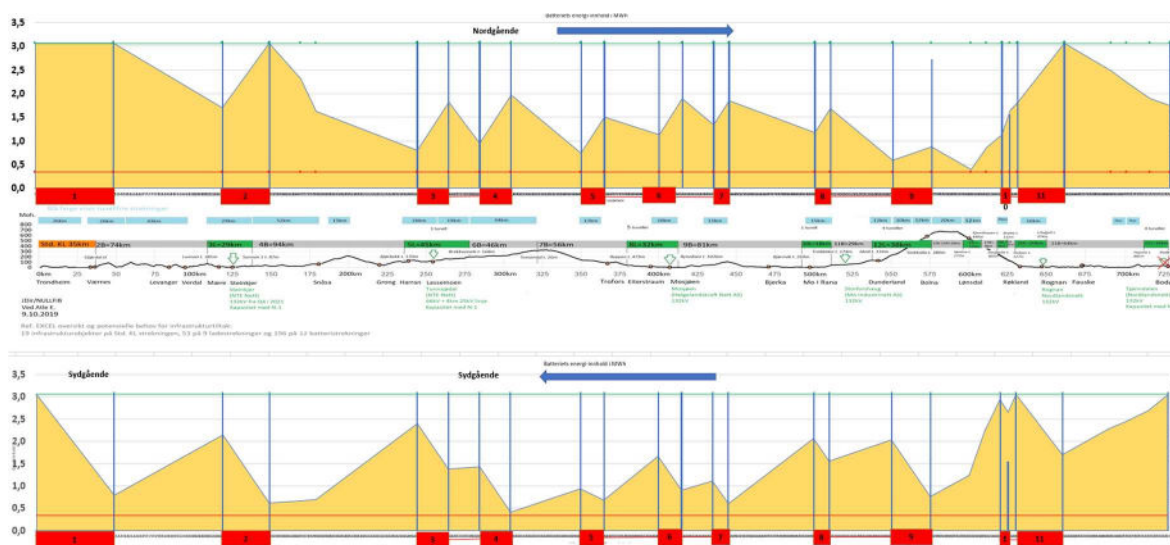
Nordlandsbanen er brukt som eksempel.

I det følgende er det for hvert alternativ vist en tabell med utregning av utstyrsmengder og kostnader.

Deretter er det vist en graf med batteristatus underveis nordover og sydover. Røde bokser markerer ladestrekninger. I alternativene A, B og C er en del av ladestrekningene forbundet med kraftlinjer og tilknyttet en matestasjon.

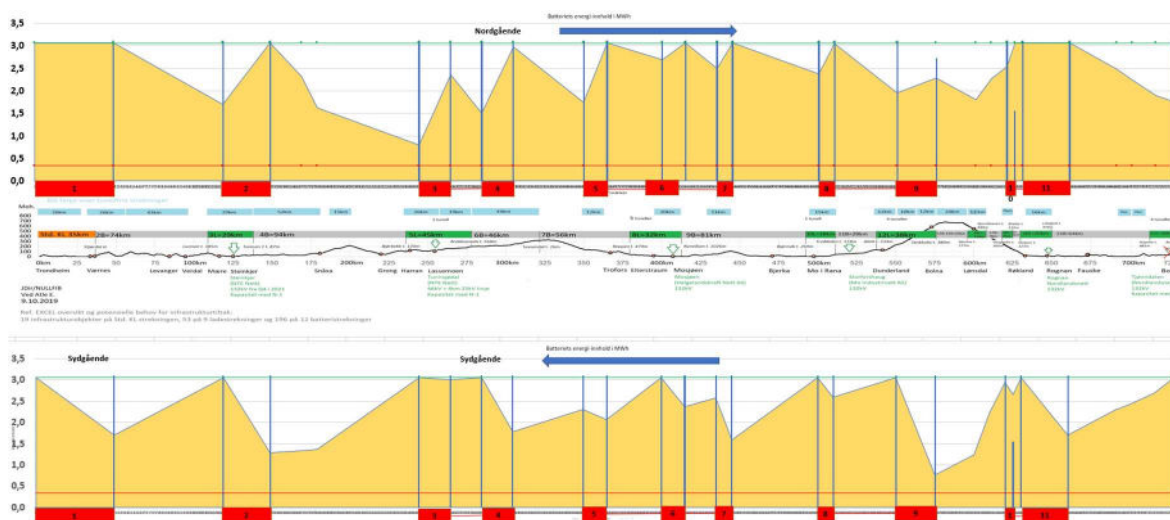
A: 3,4 MWh batteri med C=1,2 Base case

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Mate-stasjoner	Kostnad [MNOK]
A	3,4	Base case	1,2	32	230	120	6	3740



B: Samme infrastruktur som A, men med C=3, optimalisert for å redusere batteristørrelse

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Mate-stasjoner	Kostnad [MNOK]
A	3,4	Base case	1,2	32	230	120	6	3740
B	2,4	1	3	36	262	120	6	4060

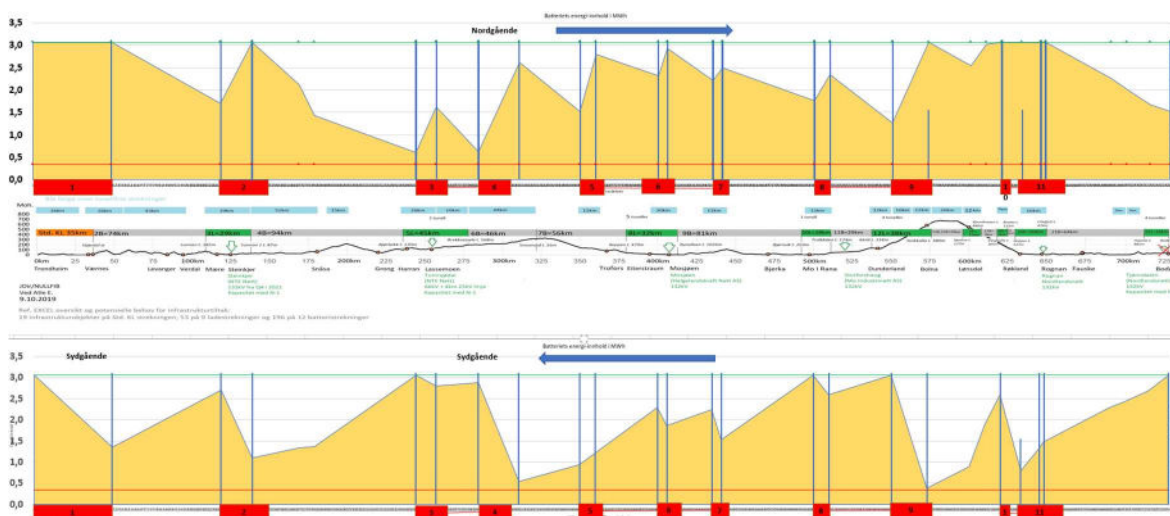


Her er det satt inn C=3 i stedet for C=1,2. Det er tydelig at toget lader opp raskere, slik at batteriet er nærmere fullt i store deler av turene. Det er gjort noen få forskyvninger/økninger av ladestrekninger for å vise at en batteriet kan reduseres med ca. 1 MWh hvis en C-raten øker fra 1,2 til 3. Dette kan være viktig da kanskje et LTO batteri kan brukes i stedet for NMC i et slikt tilfelle.

Men en slik løsning krever altså noe lengere ladestrekninger slik at investeringskostnaden blir noe høyere enn alternativ B.

C: 3,4 MWh batteri med C=3, optimalisering av infrastruktur for å korte kontaktledning

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Mate-stasjoner	Kostnad [MNOK]
A	3,4	Base case	1,2	32	230	120	6	3740
C	3,4	1	3	25	183	120	6	3270



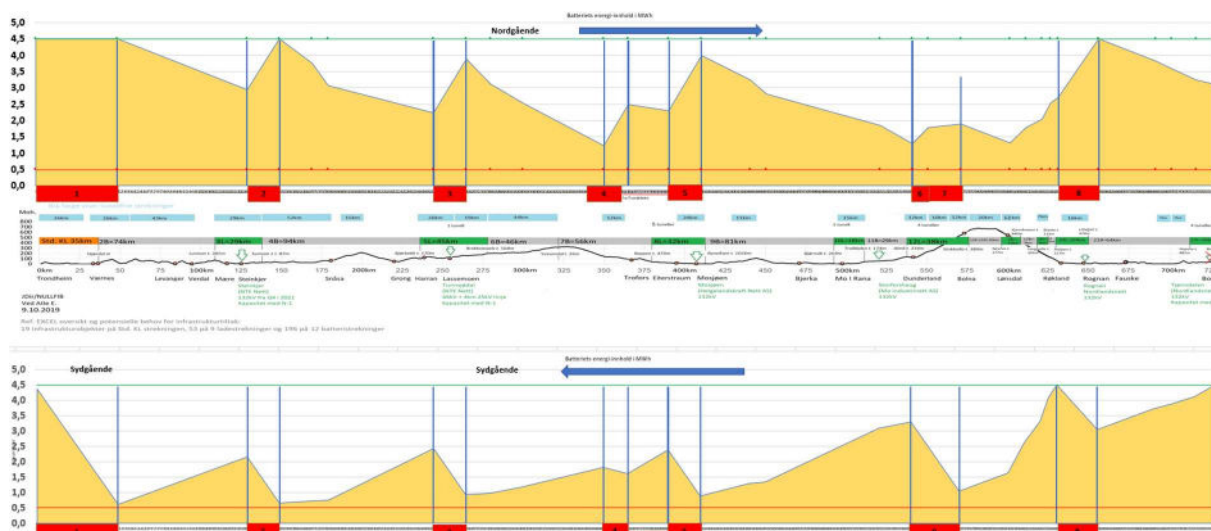
Her er det i stedet gått videre med å redusere alle ladestrekninger for å utnytte at batteriet kan lade raskere. Nedkorting av ladestrekninger gjør at investeringskostnaden blir noe redusert i forhold til base case som er alternativ A.

Hvis det blir slik at framtidens høyeffektbatteri har like stor energitetthet som høyeffektbatteri, så vil en velge et batteri med høy C-rate.

Imidlertid vil valg av batteritype vil også alle de andre aspektene som er nevnt tidligere i kapitlet telle. Ettersom batteriteknologien er i rask utvikling, er det vanskelig å spå hva som blir tilgjengelig om 5 -10 -15 år. Men såfremt ikke høyere C-rate går ut over de andre egenskapene til batteriet, er høy C-rate i seg selv gunstig, og kan gjøre det mulig å redusere lengden på ladestrekningene.

D: 5 MWh batteri med C=1,2 til sammenligning med alternativ C

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Mate-stasjoner	Kostnad [MNOK]
C	3,4	1	3	25/20	183	120	6	3270
D	5	1,5	1,2	25/19	180	0	6	3000



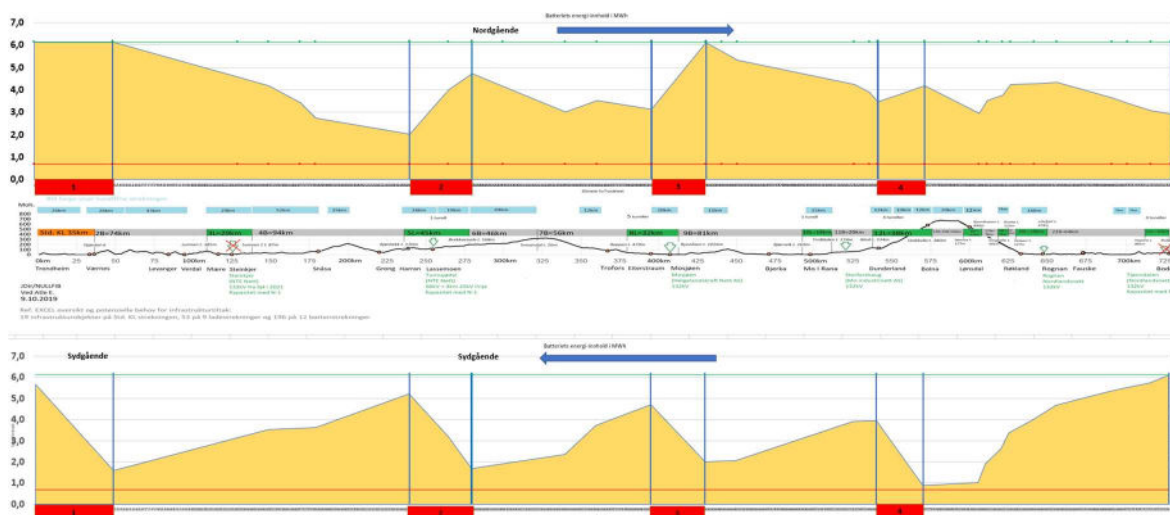
Hvis derimot et framtidig høyenergi-batteri har 1,5 ganger høyere energitetthet enn et høyeffektbatteri så må en sammenligne alternativ C og D for å gjøre et valg.

I dette tilfellet vil et høyenergibatteri på 5 MWh, C=1,2 veie like mye som et høyeffektbatteri på 3,4 MWh, C=3, og derfor kan ytelsene og kostnadene sammenlignes direkte.

Det viser seg at lengden på KL da blir ganske lik, og at investeringskostnadene også blir ganske like.

E: 6,8 MWh batteri med C=1,2 til sammenligning med alternativ C

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Matestasjoner	Kostnad [MNOK]
C	3,4	1	3	25/20	183	120	6	3270
E	6,8	2	1,2	25/19	155	0	4	2350



Hvis et framtidig høyenergi-batteri har 2 ganger høyere energitetthet enn et høyeffektbatteri så må en sammenligne alternativ C og E for å gjøre et valg.

I dette tilfellet vil et høyenergibatteri på 6,8 MWh, C=1,2 veie like mye som et høyeffektbatteri på 3,4 MWh, C=3, og derfor kan ytelsene og kostnadene sammenlignes direkte.

Her viser det seg at alternativ E er den beste løsningen, med færre matestasjoner, kortere kontaktledning og dermed lavere investeringskostnader.

Økt C-rate på store batterier

I eksemplene over der tatt utgangspunkt i base case på 3,4 MWh. Ved denne relativt mindre batteristørrelsen har økt C-rate en betydning. Ladestrekningene kan kortes noe ned. Ved installasjon av større batterier vil økt C-rate ha mindre betydning. Dette fordi store batteri uansett kan lades med større ladeeffekt enn mindre batteri med samme C-rate.

Ved de aller største batteriene vil mulig ladeeffekt bli begrenset av omformere og transformator i toget, pantograf, spenningsfall i kontaktledning, effektkapasitet i matestasjoner og overliggende nett. En økt C-rate vil da ikke ha noen betydning.

Begrensningene som er nevnt er til en viss grad mulig å overskride ved å oppdimensjonere mange av komponenter nevnt over utover standard. Dette kan likevel være vanskelig, spesielt i lokomotiv, der det er absolutte begrensninger i forhold til plass og akselvekt.

Konklusjoner

	Batteri [MWh]	Relativ batteri vekt	C-rate	Elektrif. prosent	KL [km]	Linje [km]	Mate-stasjoner	Kostnad [MNOK]
A	3,4	Basecase	1,2	32/27	230	120	6	3740
B	2,4	1	3	36/31	262	120	6	4060
C	3,4	1	3	25/20	183	120	6	3270
D	5	1,5	1,2	25/19	180	0	6	3000
E	6,8	2	1,2	25/19	155	0	4	2350

Beregningseksemplene viser at en økning av C-rate på batteri med ellers samme kapasitet og andre egenskaper gir mulighet for besparelser. Gevinsten kan enten tas ut i form av mindre batteri i toget eller redusert lengde på kontaktledning. Infrastruktur investeringskostnadene kan reduseres med ca. 13 % i det tilfellet det er regnet på her.

Batterier med høy C-rate henger foreløpig sammen med en lavere energitetthet. Avhengig av hvor mye lavere energitettheten er kan det heller lønne seg å sette inn batteri større energikapasitet, men med lavere C-rate, og med samme vekt.

Imidlertid vil et framtidig valg av batteriteknologi avhenge av en rekke andre egenskaper som det arbeides i kommersielle og statlige forskningsmiljø med å forbedre.

Hvis batteriutviklingen går raskt, og det er mulig å installere svært store batterier i togene, så vil det være spenningsfallet i kontaktledningen som til slutt setter begrensninger i ladeeffekten som er mulig å overføre. Økt C-rate vil da ikke kunne utnyttes og dermed ikke ha noen betydning.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 70 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

17 ENHETSPRISER

Full elektrifisering av en jernbane er kostbart. Dette gjelder både for investeringer og senere driftskostnader.

Det er finnes enhetskostnader fra norske elektrifiseringer og fra planer for elektrifisering. Men disse er bare delvis relevante for denne utredningen ettersom de kan gjelde for:

- Kortere strekninger
- Ombygging fra BT til AT
- Ombygging under drift (inkluderer riving av gammel BT kontaktledning)
- AT -anlegg, og ikke BT anlegg, som her er aktuelt.

Det antas at det vil bli tilgjengelig reelle priser fra elektrifiseringen av Meråkerbanen før Nullutslipp prosjektet er avsluttet.

Enhetsprisene som brukes i dette prosjektet er mangelfulle. Inntil videre er det gjort følgende grove estimat for enhetspriser:

- Elektrifisering med BT anlegg: 10 MNOK/km
- Kraftlinjer, 30 kV eller 15 kV 2 MNOK/km
- Matestasjoner, 2x18 MW: 250 MNOK/stk.
- Stasjonært batterianlegg, 6 MWh: 50 MNOK/stk.
- Ladestasjon på endestasjon: 30 MNOK/stk.

Kostnad for matestasjon inkluderer 132 kV tilkobling til og forsterkning av overliggende nett

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 71 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

18 KOSTNADSBILDE

I det følgende er det vist grove kostnadsoverslag for optimaliserte løsninger for 1200 tonn godstog. De absolutte kostnadene er usikre, men de relative kostnadene i kostnadsoverslagene er interessante fordi de viser hvordan kostnadene påvirkes av den installerte batterikapasitet i lokomotivene.

18.1 Nordlandsbanen

2,6 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	265 km	10 MNOK/km	2650 MNOK
Kraftledning	150 km	2 MNOK/km	300 MNOK
Omformere	5 stk.	400 MNOK	2000 MNOK
DC ladere	1 stk.	30 MNOK	30 MNOK
Sum			4980 MNOK

3,4 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	230 km	10 MNOK/km	2300 MNOK
Kraftledning	120 km	2 MNOK/km	240 MNOK
Omformere	5 stk.	400 MNOK	2000 MNOK
DC ladere	1 stk.	30 MNOK	30 MNOK
Sum			4570 MNOK

5,0 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	180 km	10 MNOK/km	1800 MNOK
Kraftledning	25 km	2 MNOK/km	50 MNOK
Omformere	5 stk.	400 MNOK	2000 MNOK
DC ladere	1 stk.	30 MNOK	30 MNOK
Sum			3880 MNOK

7,5 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	140 km	10 MNOK/km	1400 MNOK
Kraftledning	15 km	2 MNOK/km	30 MNOK
Omformere	3 stk.	400 MNOK	1200 MNOK
DC ladere	1 stk.	30 MNOK	30 MNOK
Sum			2660 MNOK

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 72 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

18.2 Rørosbanen

2,6 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	137 km	10 MNOK/km	1370 MNOK
Kraftledning	33 km	2 MNOK/km	66 MNOK
Omformere	3 stk.	400 MNOK	1200 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			2636 MNOK

3,4 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	110 km	10 MNOK/km	1100 MNOK
Kraftledning	20 km	2 MNOK/km	40 MNOK
Omformere	3 stk.	400 MNOK	1200 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			2340 MNOK

5,0 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	68 km	10 MNOK/km	680 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	3 stk.	400 MNOK	1200 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			1880 MNOK

7,5 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	28 km	10 MNOK/km	280 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	1 stk.	400 MNOK	400 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			680 MNOK

18.3 Raumabanen

2,6 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	28 km	10 MNOK/km	280 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	1 stk.	400 MNOK	400 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			680 MNOK

3,4 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	18 km	10 MNOK/km	180 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	1 stk.	400 MNOK	400 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			580 MNOK

5,0 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	12 km	10 MNOK/km	120 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	1 stk.	400 MNOK	400 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			520 MNOK

7,5 MWh batteri	Mengde	Enhetspris	Investeringskostnad
Kontaktledning	0 km	10 MNOK/km	0 MNOK
Kraftledning	0 km	2 MNOK/km	0 MNOK
Omformere	0 stk.	400 MNOK	0 MNOK
DC ladere	0 stk.	30 MNOK	0 MNOK
Sum			0 MNOK

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 74 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

19 MATESTASJONER, UTFORDRINGER OG LØSNINGER

Rørosbanen og Nordlandsbanen er så lange at det må lades flere ganger underveis. Lading kan foregå under de stoppene som togene uansett har på en togtur. Dette kan være under stillstand på jernbanestasjoner eller ved venting på kryssingsspor. Opplading under stillstand kan gi et bidrag, men vil på langt nær være tilstrekkelig. Slik lading vil være tilfeldig og usikker ettersom tid på stasjon og ventetid ved kryssingsspor vil variere. Dessuten, slik lading kan bare kunne skje på den andel av banen som har kontaktledning og er en ladestrekning.

I denne rapporten er det regnet med at all ordinær lading på lange baner vil være under fart. Lading ved stillstand er bare tenkt på som en mulig reserve dersom energiinnholdet i batteriene skulle bli ekstra lavt i en avvikssituasjon.

På lengere banestrekninger er det altså nødvendig med et antall ladestrekninger med plassering og lengde slik at det blir tilstrekkelig energi i batteriene gjennom hele togturen. Hver ladestrekning må forsynes av en matestasjon. Unntaket infrastrukturløsninger for små batterier i togene. Da vil batteristrekningene måtte gjøres kortere og flere, og ladestrekninger må deles opp og forbindes med kraftledninger.

Det er en rekke utfordringer ved valg av løsning for matestasjoner og disse er omtalt i det følgende.

19.1 Spesielle forhold ved deelektrifisert jernbane

Ved deelektrifisering vil det ikke være sammenhengende kontaktledning mellom ladestrekningene. Hver ladestrekning vil være helt uavhengig de andre. Dette betyr at nabomatestasjoner ikke kan hjelpe eller avlaste hverandre, slik det ellers er i det norske banenettet. Det vil ikke være mulig, slik det ellers er, å kjøre med forsiktig pådrag for å kunne få trafikk forbi en matestasjon som ikke fungerer. Togtrafikken er altså helt avhengig av at hver eneste matestasjon fungerer til enhver tid.

Et annet spesielt forhold er at effektbehovet for hvert tog kan bli ca. 3 til 5 ganger større enn for konvensjonelle tog. Dette fordi toget skal lade batteriet for en lang batteristrekning samtidig som det skal kjøre på ladestrekningen.

Det tredje spesielle forholdet er at togets effektbehov er konstant høyt (opptil 9 MW varierende etter lokomotivtypen) helt til batteriet er oppladet. Deretter blir effektbehovet mindre og likt med konvensjonelle tog. Når ladingen er unnagjort blir effektbehovet lavere, men da variabelt i forhold til akselerasjoner, retardasjoner, stigninger og helninger. Slik hurtig variasjon i last kan være utfordrende å håndtere for svake overliggende nett, slik det kan være langs dagens ikke-elektrifiserte jernbaner. Tog med batteri kan imidlertid programmeres slik at effektbehovet blir mer

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 75 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

jevnt når det ikke lader for fullt, og det kan gi mindre forstyrrelser på overliggende nett.

19.1.1 Redundansbehov

Alt teknisk utstyr vil ha nedetid på grunn av feil eller vedlikehold. Jernbanedrift foregår etter faste ruteplaner og er spesielt sårbar for svikt i strømforsyningen. Forsinkelser er svært uønsket. For å unngå forsinkelser må alle matestasjonene på en del-elektrifisert jernbane alltid levere.

En vanlig løsning i matestasjoner med frekvensomformere er å installere to like omformeraggregater, som hver har tilstrekkelig kapasitet til å forsyne banen. Ved feil eller vedlikehold veksles det automatisk eller fjernstyrt over til en frisk enhet. Frekvensomformere er kostbare i seg selv, og to omformere i hver stasjon bidrar til at matestasjonene blir kostbare.

Ved bruk av 50 Hz 25 kV banestrømforsyning er det ikke behov for komplekse omformere. Da kan matestasjonene bestå av kun brytere og transformatorer, men bare dersom forhold i overliggende nett tillater dette. En 50 Hz løsning består av færre, rimeligere og mer pålitelige komponenter. Etersom komponentene er mer pålitelige, kan det vurderes enklere redundans. Matestasjoner uten frekvensomformere har imidlertid en betydelig ulempe ved at de krever et overliggende nett med stor kortslutningsytelse.

19.1.2 Andre tiltak for å sikre pålitelighet

Etersom togdriften er helt avhengig av at hver matestasjon er i drift og leverer effekt, må kompliserte matestasjoner med mange komponenter ha installert redundans. For matestasjoner som kun inneholder enkle, robuste komponenter kan man akseptere en enklere form for redundans.

Dette kan for eksempel være:

- Reservekomponenter på lager som raskt kan brukes til utskifting
- Komplette matestasjon montert på togvogn klar til å rykke ut for plassering på forberedt sidespor
- Hele matestasjonen montert i containere som enkelt og raskt kan skiftes ut med reserve
- Større batterikapasitet montert i lokomotiv/motorvogn, slik at toget kan komme seg til den neste ladestrekningen uten å gå tom.
- Diesellokomotiv i beredskap som kan trekke tog forbi ladestrekning der matestasjon er ute av drift
- Kombinasjoner av tiltakene over

Plassering av matestasjoner

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 76 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

19.1.3 Plassering av matestasjoner og kapasitetsbehov

Det overliggende nettet må ha tilstrekkelig kapasitet til å forsyne matestasjonen.

Under NULLFIB prosjektet ble det rettet en forespørsel til aktuelle netteiere om ledig kapasiteten i aktuelle tilknytningspunkter. Det ble spurt om en kapasitet på 18 MW både ved normal drift i overliggende nett (n-0) og der en matelinje er ute av drift (n-1). Bane NOR ønsker normalt tosidig mating, altså n-1 forsyning. Dessuten ønskes det tilknytning på 132 kV regionalnett-nivå på grunn av større kapasitet og høyere pålitelighet. Svaret fra netteiere er gjengitt i Tabell 3 under.

Tabell 3: Kapasitet og styrke til overliggende nett på utvalgte punktert

Transformatorstasjon	Spenningsnivå	Netteier	Kapasitet med N-0	Kapasitet med N-1	Kortslutningsytelse Megavoltampere (MVA)
Steinkjer	66 kV	NTE Nett AS	Ja	Ja	190
Tunnsjødal	132 kV ¹	NTE Nett AS	Ja	Ja	700 ²
Mosjøen	132 kV	Helgelandskraft Nett AS	Ja	Nei	900
Storforshei	132 kV	MIP Industrinett AS	Ja	Nei	< 850 ³
Rognan	132 kV	Nordlandsnett AS	Ja	Nei	213
Tjørndalen	132 kV	Nordlandsnett AS	Ja	Ja	325

Det er ikke gjort tilsvarende henvendelser i Nullutslipp-prosjektet. En årsak til dette er usikkerhet om mulige batteristørrelser som resulterte i et store antall infrastrukturløsninger med ulik plassering av ladestrekninger. Det ble ansett uhensiktsmessig å be om utredninger fra netteier for så mange varianter.

På grunn av spenningsfall langs kontaktledning er det ønskelig å plassere matestasjonene omtrent midt på ladestrekningene. Selv om det er forsøkt å plassere ladestrekninger med matestasjon i nærheten av 132 kV linjer eller koblingsstasjoner, så vil det i flere tilfeller kreve nye linjer og koblingsstasjoner.

Tilstrekkelig forsyningskapasitet er et viktig spørsmål. Det må regnes med at noen matestasjoner vil kreve fordyrende styrking og kapasitetsøkning i det overliggende nettet. Alternativ kan det bli nødvendig å knytte seg lavere spenningsnivå, men da med statiske batterier som energi- og effektstøtte.

¹ Fra fjerde kvartal 2021

² Estimert verdi, avhenger av endelig transformatorkonstruksjon

19.1.4 Spenningsystemer

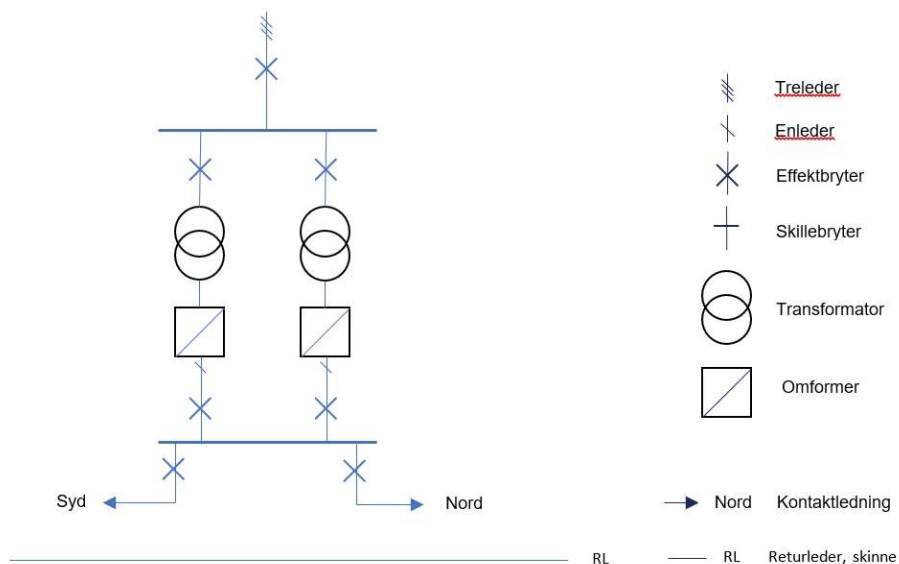
For deelektrifisering i Norge er det to aktuelle standardiserte strømforsyningssystemer. Disse er 15 kV 16 2/3 Hz, som brukes ellers i Norge, og 25 kV 50 Hz, som blant annet brukes i Danmark og Finland. De to spenningsystemene krever ulike matestasjoner. 16 2/3 Hz systemet krever omforming av frekvensen og nedtransformering av spenningen. 50 Hz systemet krever kun nedtransformering av spenningen.

19.2 Matestasjoner for 16 2/3 Hz med frekvensomformere

Denne teknologien er karakterisert ved at den belaster overliggende nett symmetrisk. Den er ikke avhengig av et stivt overliggende nett med høy kortslutningsytelse. Den innebærer imidlertid bruk frekvensomformere med et større antall halvlederkomponenter og med avansert utstyr for styring og kjøling.

Utfordringen med frekvensomformere, i tillegg til investeringskostnadene, er noe lavere pålitelighet. Dette må løses ved å installere ekstra enhet, såkalt redundans.

Figuren under viser et typisk forenklet enlinjeskjema for matestasjon med omformer og parallell redundans. Hver omformer med tilhørende transformator og brytere har tilstrekkelig kapasitet til å forsyne jernbanens effektbehov.



Figur 1: Enlinjeskjema for matestasjon med parallell redundans

Erfaringsmessig er nedetid for denne løsningen i gjennomsnitt over mange år ca. 1 time per år. Erfaringstallet er fra eksisterende roterende og statiske matestasjoner med til dels ulik teknologi i forhold til det som bygges nå. Tallet kan likevel si hvilken størrelsesorden nedetiden ligger på.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 78 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Matestasjoner med frekvensomformere og full parallell redundans er kostbare, men har den egenskapen at de belaster overliggende nett symmetrisk. Løsningen har derfor lave krav til minimum kortslutningsytelse i tilknytningspunktet.

Løsninger med frekvensomformere inneholder svært mange avanserte komponenter med kompliserte styring- og kontrollanlegg. Slike anleggene forventes å trenge mer vedlikehold og ha kortere levetid enn enklere matestasjoner uten frekvensomformere, som omtales i det følgende.

19.3 Matestasjoner for 50 Hz uten frekvensomformere

I Danmark, Finland og flere land i Midt- og Sør-Europa drives togene med 50 Hz og 25 kV. Som oftest inneholder matestasjonen da kun trafoer og brytere, og ikke frekvensomformere.

Maksimal tillatt usymmetri i overliggende nett er en viktig faktor som må tas hensyn til under utforming av en slik strømforsyning.

19.3.1 Usymmetri og minimum kortslutningsytelse

Elektriske tog går på enfaset strøm, mens det overliggende nett har tre faser. Når det overliggende nettet bare blir belastet på en fase skapes det usymmetriske spenninger og strømmer i tilknytningspunktet. Dette skaper igjen problemer for andre trefasekunder i nettet. Høy prosent usymmetri i overliggende nett vil gi varmgang i tilknyttede motorer og generatorer, og kan skade utstyr.

Paragraf 3-6 i «Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet» setter krav til nettselskap om maksimal usymmetri. Det heter: *Nettselskap skal sørge for at grad av spennings-usymmetri ikke overstiger 2 % i tilknytningspunkt, målt som gjennomsnitt over ti minutter.* Spennings-usymmetri er en tilstand der linjespenningenes effektivverdier, eller fasevinklene mellom etterfølgende linjespenninger, ikke er helt like.

Ettersom det kan være annen usymmetri i nettet, kan ikke jernbanen regne med å få lov til å disponere rammen for usymmetrien i tilknytningspunktet alene. Det er her antatt at matestasjonen ikke kan belaste nettet med mer enn 1% usymmetri i tilkoblingspunktet.

I hvor stor grad en gitt last påvirker spenningene i et system, bestemmes av hvor stivt nettet er. Den såkalte kortslutningsytelsen på et tilknytningspunkt er et mål på hvor stivt et nett er på dette stedet. Kortslutningsytelsen vil variere over året med nettkonfigurasjon (koblingsbilde i nettet) og roterende maskiner som er tilknyttet. Spesielt om sommeren kan det være færre kraftstasjonsgeneratorer i drift og linjer kan være utkoblet for vedlikehold. Den forventede minimum kortslutningsytelse må tas hensyn til ved utforming av matestasjonene. Verdier for denne er innhentet fra de aktuelle nettselskapene og angitt i foregående kapittel.

Dersom usymmetrien fra en enfaselast skal holdes under 1 % krever det at denne lasten er under 1 % av minimum kortslutningsytelse. En enfaset matestasjon som skal levere til tog med 18 MVA krever følgelig minimum kortslutningsytelse på minst 1800 A i tilknytningspunktet.

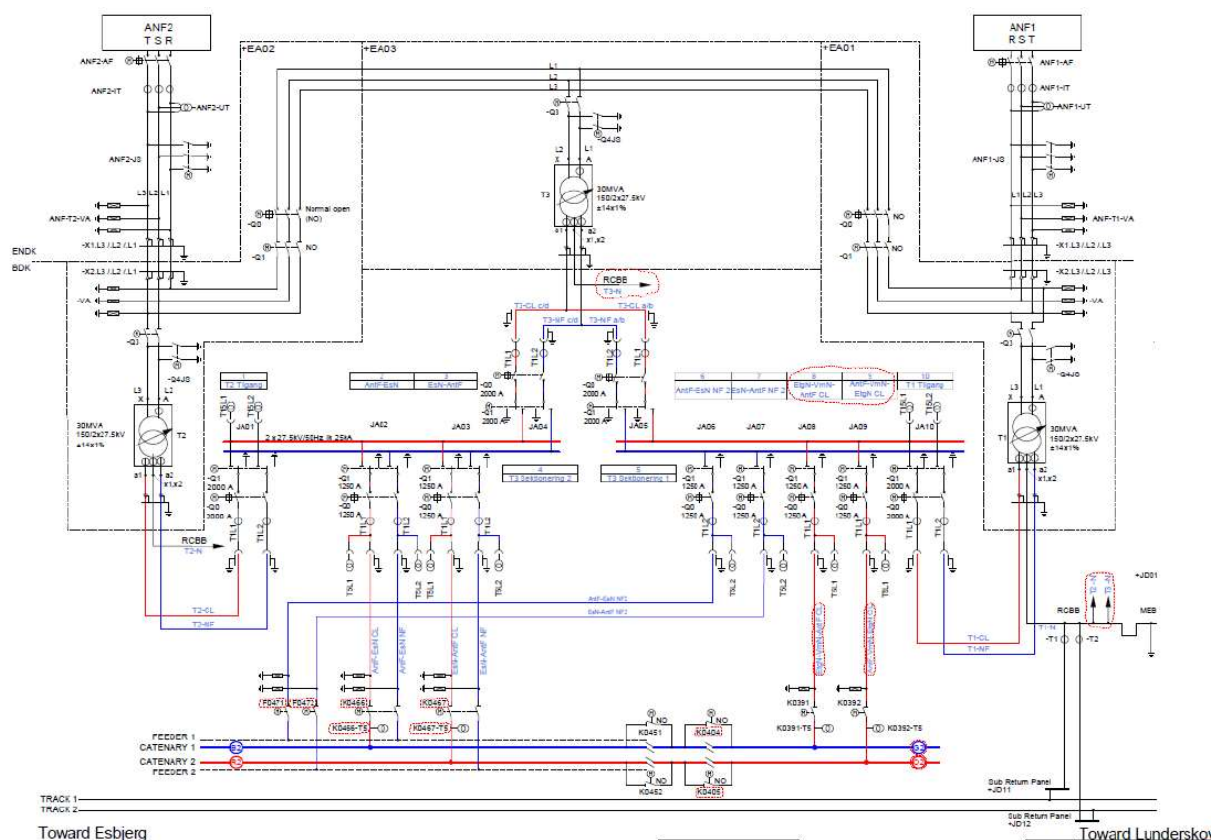
Nettselskapene er ansvarlig for at forskriftskravet for leveringskvalitet overholdes. Hvor stor usymmetri som faktisk kan tillates fra en bestemt kunde, må derfor vurderes av nettselskapene for det aktuelle tilknytningspunktet.

19.4 Eksempler på 50 Hz løsninger fra Danmark og Finland

19.4.1 Dansk løsning for matestasjoner

Det danske jernbanenettet er karakterisert ved at det alltid er dobbeltspor og at det er betydelig større trafikk enn på ikke-elektrifiserte jernbaner i Norge. Danmark elektrifiserte jernbanen langt senere enn Norge og fortsatt legges stadig nye strekninger til.

Banedanmark har valgt 50 Hz system uten omformere i matestasjonene. Enlinjeskjema for en matestasjon er vist under.



Figur 25: Standard enlinjeskjema for dansk omformerstasjon, dobbeltspor

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 80 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Løsningen består av to innmatinger på 150 kV nivå som går inn på en trefaset samleskinne. Det er tre utmatinger fra samleskinnen, en til hver av de tre 30 MVA transformatorene. Det er normalt to transformatorer i drift og med den i midten som reserve for de to andre. Transformatorene er enfaset på primærsiden og knyttet til ulikt sett av faseledninger på 150 kV samleskinnen. Sekundærsidene for de enkelte transformatorene blir da 120 grader forskjøvet i forhold til hverandre. Sekundærsiden er tofaset 180 grader med retur i midten. Nominell sekundær spenning er 2 x 27,5 KV. På sekundærsiden er det to sett med tofaset samleskinner 2 x27,5 kV som forsyner dobbeltsporet i hver sin retning.

Det er en rekke omkoblingsmuligheter. Den midterste trafoen kan kobles til og forsyne en eller begge faser på hver av 27,5 kV samleskinnen. Hver av samleskinnene kan forsyne hver av sporene i begge retninger. På denne måten kan en mate alle sporene fra alle tre faser 120 grader forskjøvet og dermed redusere usymmetrien i belastningen. Likefullt, det er 4 spor og kun 3 faser, slik at teoretisk symmetri ikke er mulig. Men sammen med nabo matestasjoner med annen fasekobling, vil en totalt sett oppnå tilstrekkelig god balanse. Det er ca. 6 mil mellom hver matestasjon.

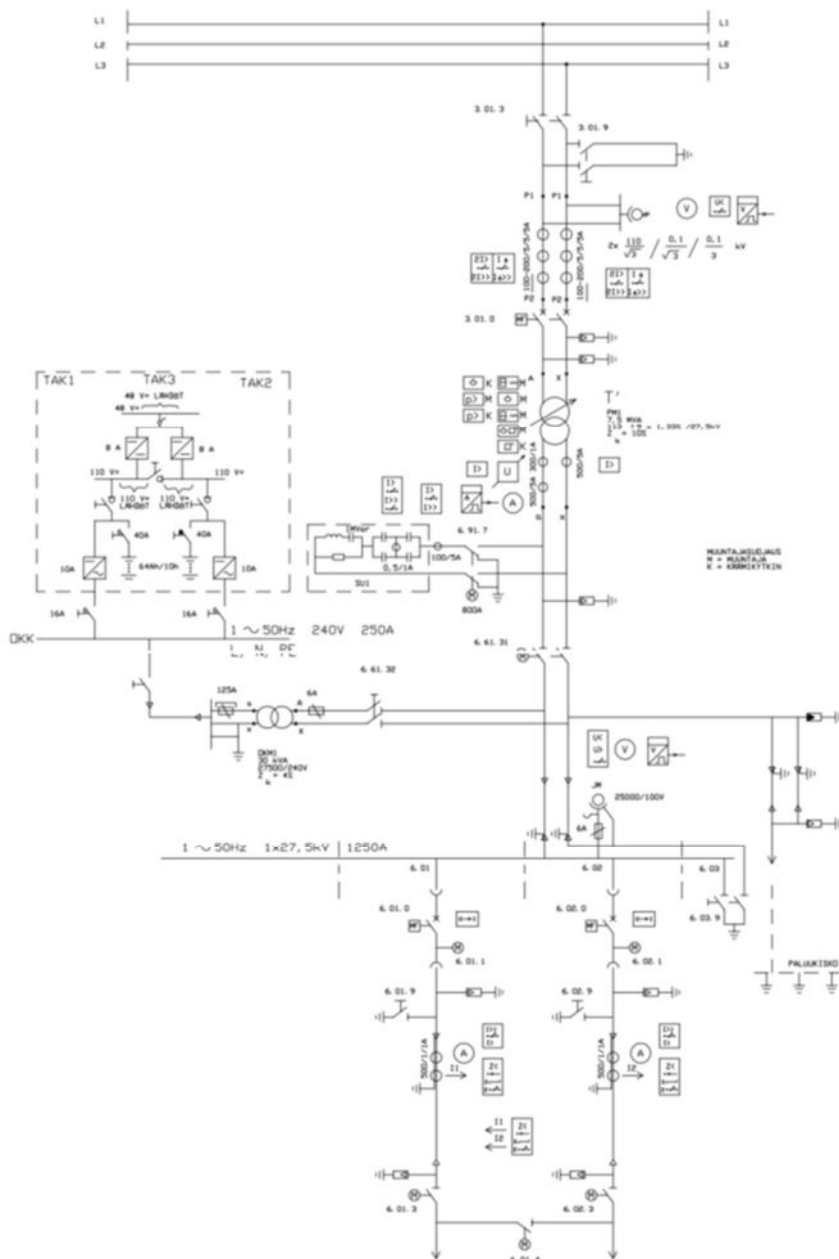
Kommentar: Løsningen er svært fleksibel og har stor redundans, men relativt kostbar i forhold til finsk løsning.



Figur 26: Foto av dansk matestasjon ovenfra med jernbane og vei

Finsk løsning for matestasjon til enkeltspor

Det finske jernbanenettet er et 25 kV 50 Hz strømforsyningssystem (og bruker for øvrig russisk sporvidde). Elektrifisering startet på slutten av 60-tallet og har fortsatt suksessivt til nå. Standardløsningen for finske matestasjoner for enkeltspor er vist under.



Figur 27: Standard enlinjeskema for finsk matestasjon, enkeltspor

150 kV inngang til stasjonen er direkte knyttet til to faser på det overliggende 150 kV nettet. Inngangen er igjen knyttet direkte til en enkelt enfase transformator på 7,5 MVA der utgangen er enfase 27,5 kV og der den ene faseledningen er retur. Den andre fasen mater jernbanen i to retninger. Enlinjeskjemaet er altså det enkleste tenkbare og løsningen ligger på et helt annet nivå enn det danske når det gjelder kompleksitet, kapasitet og redundans, og også investeringsnivå.

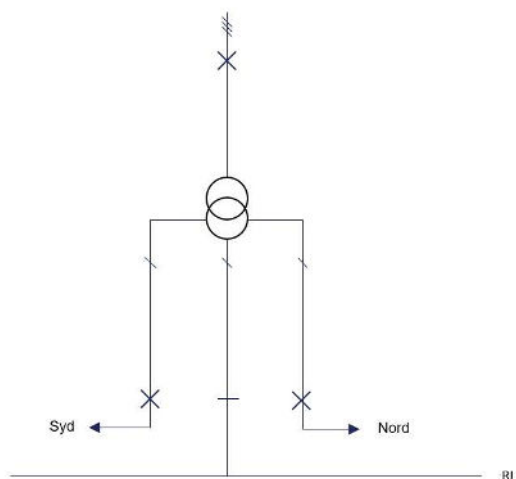
Usymmetrien i belastningen på det overliggende nettet er den maksimalt tenkbare.

19.5 Utførelser som reduserer usymmetri

19.5.1 Enkel transformatorløsning med to seksjoner

I den finske løsningen er det tilsynelatende ikke gjort noe for å redusere usymmetrien. Dette vil antagelig være nødvendig i Norge, og det finnes transformator- og koblingsløsninger i litteraturen som har denne egenskapen. I det følgende er det vist eksempler som kanskje kan kombineres med den finske løsningen for å redusere usymmetrien tilstrekkelig for norske forhold.

Under vises enlinjeskjema for matestasjon med den enkleste form for transformatorløsning:



Figur 28: Enlinjeskjema for enkel 50 Hz matestasjon med to seksjoner

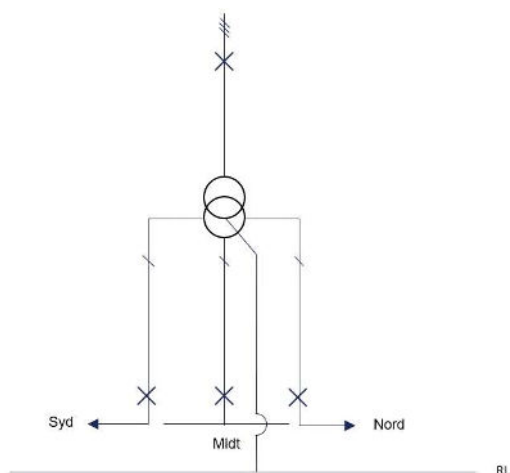
Kontaktledningen er her seksjonert på midten av ladestrekningen. De to seksjonene er tilknyttet hver sin fase med den tredje fase som felles tilbakeleder.

Hvis det kun er ett tog på strekningen, som eksempelvis trekker 9 MW, vil usymmetrien være 9 MW. Hvis det derimot er to tog på strekningen vil usymmetrien fortsatt være 9 MW. Dette er altså en måte å redusere den totale usymmetriske belastningen, men det gir operasjonelle begrensninger for togene. Togene bør møtes omtrent på midten.

(Retningslinjene krever at den overskridende usymmetrien ikke skal være mer enn 10 minutter, slik at det er noe tid.)

19.5.2 Enkel transformatorløsning med tre seksjoner

En variant av overnevnte løsning gir noe mer fleksibilitet:



Figur 29: Enlinjeskjema for 50 Hz matestasjon med tre seksjoner

Hver av seksjonene er tilknyttet tre ulike faser.

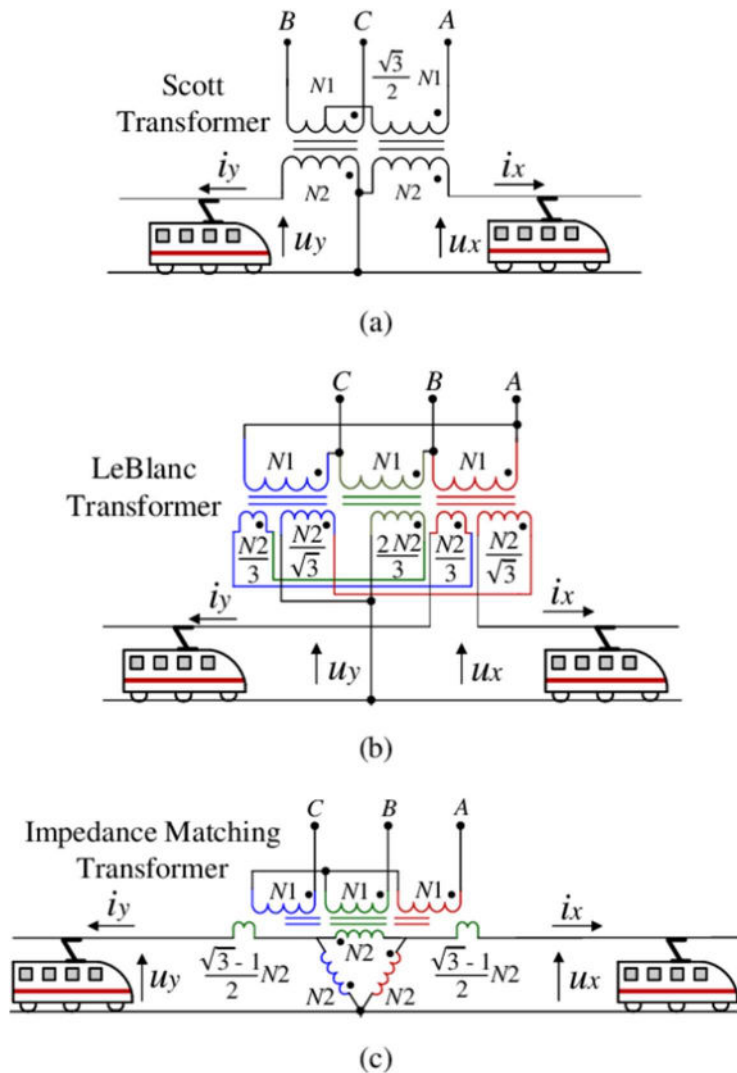
Her er det også slik at to tog på forskjellig delstrekning ikke vil gi usymmetrisk last på mer enn 9 MW. Løsningen er mer fleksibel ved at delstrekningene er kortere og tillater tettere tog.

Ved en mulig framtidig trafikk tetthet vil tre tog kunne kjøre samtidig på hver sin delstrekning uten at usymmetrisk belastning er mer enn 9 MW. Hvis alle togene trekker like mye vil usymmetrien falle til 0.

Løsningen er noe mer kostbar ved at ekstra leder til ytterstrekninger må føres langs den midterste strekningen, og den krever to seksjoneringer.

19.5.3 Spesialtransformator løsninger

Fra eldre tider var det behov for å forbinde enfaselaster til trefaseforsyning uten stor usymmetri. Det ble da utviklet ulike spesialtransformatorer som også er brukt i forbindelse med jernbanedrift:

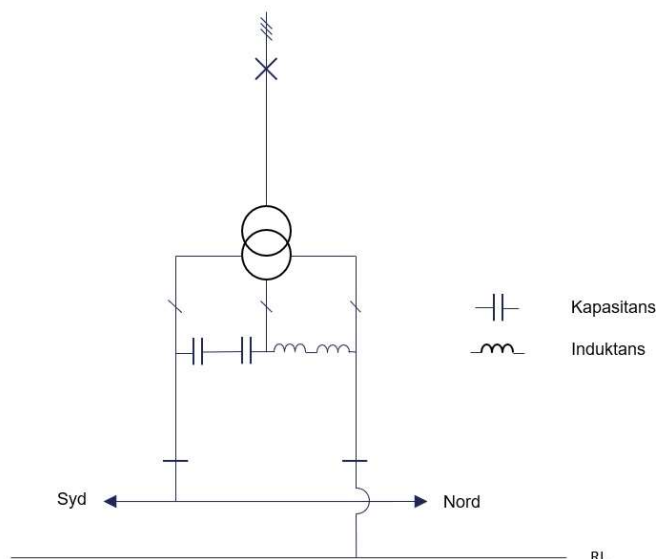


Figur 30: Skjema over spesialtransformatorer

Spesialtransformatorer som vist over vil redusere usymmetrien. Disse transformatorene er konstruert slik at ett tog på ene siden av matestasjonen vil motvirke usymmetrien fra toget på den andre siden. I beste fall (ved lik belastning) elimineres usymmetrien mot overliggende nett.

19.5.4 Steinmetz metode

En annen kjent måte å fjerne usymmetri fra enfaselaster er å bruke Steinmetz metode.



Figur 31: Eliminering av usymmetri ved Steinmetz metode

Ved å knytte den tredje faselederne til de to andre med henholdsvis kondensatorer og spoler kan en lage en kunstig reaktiv belastning på tredje fase. Med riktig dimensjonering av kapasitansen og induktansen vil belastningen sett fra trefasesiden se symmetrisk ut.

Hvis lastens admittans tallverdi er lik G må den kapasitive suseptansen være lik $G/\sqrt{3}$ og den induktive suseptansen være lik $-G/\sqrt{3}$

Hvis lasten er konstant er dette en mulig metode. Ved delelektrifisering vil togene trekke konstant effekt mens de lader. Når de ikke lader vil de ha et betydelig lavere effektbehov, slik at suseptansene må tilpasses. Dette kan gjøre ved å dele opp kondensatorene og spolene i mindre enheter, der hver kan kortsluttes ved bryter. Alle komponentene, transformator, kondensator, spole og lastbrytere er svært pålitelige enheter. Slik kan en oppnå en betydelig lavere usymmetri.

Ulempen er at store spoler og kondensatorer er kostbare og at teknikken er ikke kjent brukt i forbindelse med matestasjoner og jernbane.

19.5.5 Avanserte teknologier for å redusere usymmetri

Høyhastighetsjernbanene som nå bygges ut i mange land krever meget store matestasjoner. Usymmetri fra enfaset jernbane er også blitt en utfordring i sterke nett. Dette har ført til meget kostbare tilkoblinger i sentralnettet på spenninger over 220 kV. Det er også utviklet løsninger basert på halvlederteknologi som kompenserer for usymmetri i overliggende nett (STATCOM) eller i matestasjonen (RPC – Railway

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 86 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Power Conditioner). Felles for disse er at de er kompliserte, kostbare, lite brukt og det er kort driftserfaring.

Slike løsninger kunne være anvendelig ved deelektrifisering av Nordlandsbanen. Imidlertid er fordelene med 50 Hz forsyningen, -enklere, rimeligere, mer robuste og vedlikeholdsfrie matestasjoner, da borte.

19.6 Vurdering av 50 Hz løsninger for Norge

Valg av spenningsystem har også konsekvenser for en rekke andre forhold. 50 Hz spenningsystem krever ca. 10 cm lengere isolasjonsavstander mot tunneltak og bruer, og noen steder kan dette bety betydelige kostnadsøkninger. Også i lokomotivene vil 25 kV spenning kreve 10 cm lengere isolasjonsavstand fra uisolerte deler. Dette har mindre betydning fordi nye lokomotiv og til dels motorvognsett uansett er forberedt for begge spenningsystemer.

16 2/3 Hz spenningsystem krever betydelig større og tyngre transformatorer i lokomotivet, men det er uklart om de ulike lokomotivprodusentene setter inn de samme trafoene uansett spenningsystem.

Valg av spenningsystem påvirker også spenningsfallet langs ladestrekningene og dermed maksimal lengde på disse strekningene. Dette er beregnet i vedlegget til denne rapporten.

Både infrastrukturselskapene Banedanmark og finske Väjälä opplyser at det har vært stor usikkerhet om utfordringer rundt 50 Hz usymmetrisk belastning fra jernbanen før løsning ble valgt. Det har vært tunge diskusjoner med kraftnettere, som har ansvaret for å holde usymmetrien i overliggende nett på akseptabelt nivå. Det er svært vanskelig å beregne slik usymmetri på forhånd ettersom belastningen fra flere samtidige tog er svært uforutsigelig. Belastningene på overliggende nett er avhengig av togenes plassering mellom matestasjonene, togtyper, togførers kjørestil, tilfeldige akselerasjoner/oppbremsinger, av rutetider og avvikssituasjoner. Togene har stor masse og relativt liten trekraft, slik at forbruket ofte er fullt på eller fullt av, slik det observeres ved målinger.

I tillegg er det også stor tilfeldig symmetrivariasjon i overliggende nett som skyldes andre forhold. Kortslutningsytelse og usymmetri hele tiden vil variere avhengig av andre kunders forbruk, antall og størrelse av motorer og generatorer tilknyttet og dessuten koblingsbildet i overliggende nett. Det sistnevnte vil avhenge av årstid og utkoblinger på grunn av feil eller vedlikehold i nettet. På tross av dette har det i praksis vist seg at usymmetri har skapt få problemer.

Det norske regelverket for usymmetri gjelder for tilknytning per punkt. Men siden jernbanenettet har en utstrekning og flere tilknytningspunkter underveis, kan det

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 87 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

argumenteres for at det er den resulterende usymmetrien som må legges til grunn. Ved å revolvere tilknytningen av matestasjonene vil den resulterende usymmetrien fra banestrømforsyningen kunne bli begrenset. Det er behov for å undersøke videre om bestemmelsene som er satt i regelverket er nødvendige holdt opp mot de reelle usymmetriene som jernbanen måtte forårsake.

Ved en eventuell deelektrifisering i Norge, må en også forvente tilsvarende bekymring og motstand mot 50 Hz og usymmetri fra netteiere. Deelektrifisering kan skape større usymmetri enn i Danmark og Finland ettersom togene på deelektrifisert jernbane trekker mangedobbel strøm under samtidig lading og kjøring. De overliggende nettene ved Nordlandsbanen og Rørosbanen har relativt lav kortslutningsytelse og dermed lav toleranse for usymmetrisk belastning. Disse forholdene gjør at den finske løsningen ikke kan brukes ukritisk på de ikke-elektrifiserte strekningene i Norge.

Den danske løsningen er ikke relevant for deelektrifisering, ettersom det på de aktuelle banene ikke er 4 spor å fordele usymmetrien fra. Trafikken på de norske banene er også mye lavere, slik at kansellering av de usymmetriske komponenter blir mindre.

Den finske løsningen er interessant å studere nærmere. Ved samarbeid med Väylä vil en kunne innhente opplysninger/målinger fra et reelt singelsporet jernbanenett med 50 Hz i drift. Opplysningene kan brukes til å ekstrapolere og simulere for norske deelektrifiserings-forhold. Ved å bruke spesialtransformatorer, spesielle koblinger eller spesielle driftsrestriksjoner, så kan kortslutningsytelsen i overliggende nett vise seg å være tilstrekkelig på enkelte tilkoblingspunkter. Ettersom det overliggende nettet stadig styrkes, kan kortslutningsytelse bli tilstrekkelig på enkelte tilkoblingspunkter på det tidspunktet deelektrifisering blir aktuell.

En slik utredning vil være nødvendig for å kunne velge mellom 16 2/3 Hz løsning og 50 Hz løsning før et realiseringsprosjekt. Den vil også være helt nødvendig som underlag for diskusjoner med eiere av overliggende nett og NVE.

Matestasjonskostnaden utgjør grovt sett en tredjedel av investeringskostnadene ved deelektrifisering. Valg av 50 Hz spenningssystem uten frekvensomformere har potensiale til å minst halvere matestasjonskostnadene. Det samme gjelder for vedlikeholdskostnader og elektriske tapskostnader. Det er derfor vel verdt å gå dypere inn i disse problemstillingene senere.

Imidlertid, dette prosjektet er en mulighets-studie og må så langt legge følgende konservative forutsetninger til grunn:

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 88 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

Minimum kortslutningsytelse for tilkoblingspunktene langs de ikke-elektrifiserte banene er for liten til at 50 Hz matestasjoner uten frekvensomformer med sikkerhet kan brukes.

19.7 Effektstøtteanlegg

For tiden foregår det en hurtig utvikling av stasjonære batteriløsninger for høyspent og lavspentnett. Disse stasjonære batteriene brukes til å støtte spenningen i netteierens lokalnett, regionalnett og sentralnett.

I lokalnettet brukes de for å sikre nok effekt og tilstrekkelig høy spenning der det ikke er lønnsomt å styrke nettet, som for eksempel avsidesliggende bygninger eller byggeplasser. Stasjonære batterier settes også opp ved ladestasjoner til ferger. Elektriske ferger trenger stor kortvarig effekt, og det kan bli kostbart å føre fram sterkt nok nett til disse ofte usentralt beliggende forbrukerne. Generelt er det gunstig for strømkunder bruke å stasjonære batterier der forbruket varierer sterkt, og der en stor del av nettleien bestemmes av høye effekttopper. I tillegg brukes stasjonære batterier til å jevne ut energiproduksjonen fra vindmølleparker og solkraftinstallasjoner.

Det interessante for jernbanedrift er at det bygges et større antall av slike anlegg i hele verden. Dermed skjer det en utvikling og en standardisering, og prisen på slike anlegg faller. Matestasjoner til jernbanen har et sterkt varierende forbruk og dette uheldige forbruksmønsteret vil bli enda mer framtreddende ved en eventuell deelektrifisering eller endepunktsmating. Matestasjoner må plasseres i forhold til behovet til jernbanen, og dette kan medføre at det ikke er mulig å knytte seg til et tilstrekkelig sterkt nett. Det kan dermed bli et teknisk behov for å installere effektstøtteanlegg i form av stasjonært batterianlegg ved flere matestasjoner. Det kan i tillegg også være økonomisk lønnsomt.

Vurdering av eventuell installasjon av effektstøtteanlegg ved matestasjoner må gjøres på et senere planstadium.

I denne rapporten er det ikke regnet med å installere noen effektstøtteanlegg.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 89 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

20 SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Arbeidet i prosjektet «Nullutslipp – batteridrift på jernbanen» har vist at bruk av batterier som energikilde på ikke-elektrifiserte jernbaner i Norge er teknisk mulig og har betydelig lavere investeringskostnader enn full elektrifisering.

I denne delrapporten er det foretatt beregninger og foreslått løsninger for alle lengere ikke-elektrifiserte baner i Norge på et overordnet plan. Optimale løsninger er sterkt avhengig av hvilke størrelser på batteri som kan plasseres i toget når realisering er aktuelt. Etter som om dette er usikkert, er det foreslått og beregnet løsninger for en rekke ulike batteristørrelser. Løsningene som er foreslått er dimensjonert for 1200 tonn godstog. Deretter er det beregnet hvilke batteristørrelser andre aktuelle togtyper må ha for å kunne bruke de foreslåtte banestrømforsyningene.

Kostnaden for optimalt dimensjonert delelektrifisert banestrømforsyning minsker med størrelsen på batteriet til toget. Det kan dermed lønne seg å vente til batterier med enda større kapasitet per vekt er utviklet. Dette gjelder for lange baner slik som Nordlandsbanen og Rørosbanen. Disse banene krever lading i fart underveis. Det er foreløpig ikke konstruert batterilokomotiv for slik jernbanedrift.

For kortere ruter, slik som Saltenpendelen, Trønderbanen og Raumabanen, kan det holde å lade under stillstand ved endestasjoner. Slike motorvognsett med tilstrekkelig batterikapasitet er allerede i drift på flere europeiske jernbanenett.

Banestrømforsyningen blir da rimeligere, ettersom det ikke er nødvendig med kontaktledning annet enn på ladeområdet.

For lange baner kan 50 Hz banestrømforsyning være et alternativ med lavere investeringskostnader, vedlikeholdskostnader og tap. 50 Hz banestrømforsyning er mulig ved delelektrifisering fordi kontaktledningsnettet ikke er sammenhengende og moderne lokomotiv/motorvognsett er konstruert for både 50 Hz og 16 2/3 Hz spenningssystem. Imidlertid, siden banestrømforsyningen er enfaset vil slik direkte tilkobling kunne gi uakseptabel usymmetrisk belastning i det trefasede overliggende nettet. Spørsmålet om slik betydelig usymmetrisk belastning kan aksepteres i det overliggende nettet er komplisert. Bruk av 50 Hz banestrømforsyning vil kreve egen utredning.

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 90 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

21 VEDLEGG 1 - MAKSIMAL LENGDE PÅ LADESTREKNINGER

21.1.1 Bakgrunn

Delelektrifisering av jernbanen innebærer at annenhver strekning blir elektrifisert og at påfølgende strekning forblir ikke-elektrifisert. På de ikke-elektrifiserte strekningene må energien til framdrift hentes fra batteri på toget, mens den på de elektrifiserte strekninger vil hentes fra kontaktledningen. På den elektrifiserte strekningen må toget kunne både lade og kjøre + løfte i oppoverbakke. Dette krever stor effekt, som igjen gir opphav til betydelig spenningsfall langs kontaktledningen. Det maksimalt tillatte spenningsfallet vil være med å begrense mulig lengde på den delelektrifiserte strekningen.

Ved å regne ut maksimale lengder under ulike forhold kan en senere finne den optimale fordelingen av antall, lengder og plasseringer av strekningene ved ulike utforminger av kontaktledningsanlegget.

21.1.2 Forutsetninger for beregningene

Jernbanedirektoratet har oppgitt hvilke togvekter som det skal dimensjoneres for. Godstogene er tyngst og veier opp mot 1200 tonn.

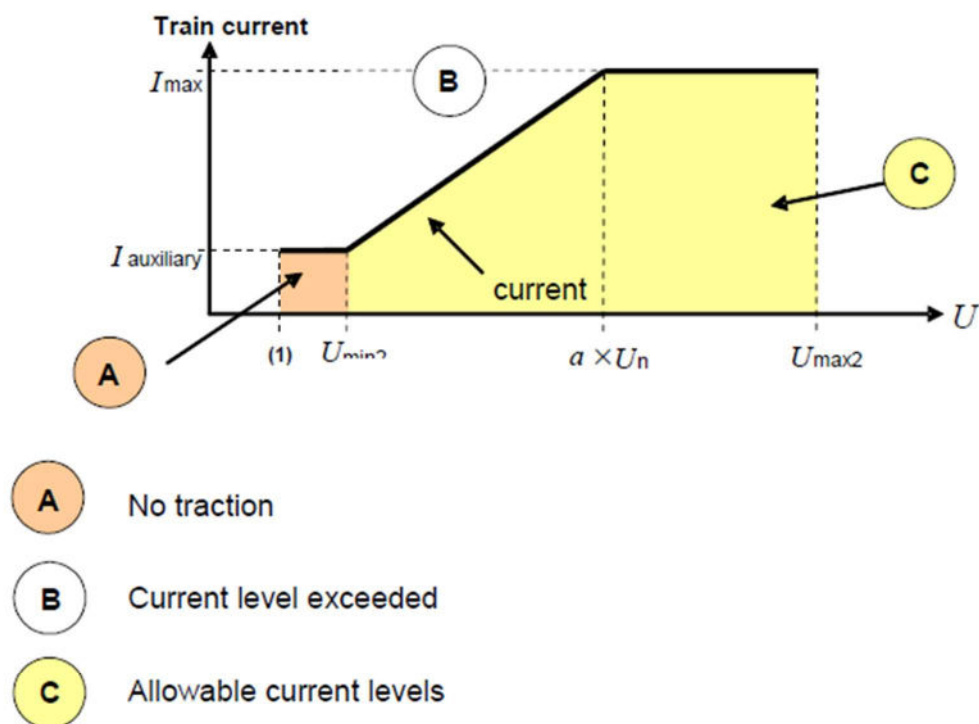
Tidligere beregninger har vist at slike godstog krever ca. 1,5 MW pantografeffekt for å holde 80 km/h hastighet på flat mark. Effekten til løft vil variere med stigning, men kan bli mer enn 4 MW. Dagens lokomotiv har 3,1 MW hjuleffekt, og må derfor kjøre betydelig saktere i lange stigninger. I beregningene er det rimelig å ta utgangspunkt i et «standard lokomotiv» med 6 MW ytelse. Det vil kunne holde god fart i bakkene og vil ha gode ressurser til akselerasjon og lading på moderate stigninger og flat mark.

I bakker med sterk stigning vil ikke beregningene gjelde ettersom det meste av motoreffekten vil gå med til hjularbeidet og effekt til lading av batterier kommer i tillegg.

21.1.3 Normer

Ved lav spenning forutsettes det at toget reduserer sitt effektopptak og dermed sitt strømforbruk etter norm EN 50388.

Dette er en norm som nye lokomotiv må følge. Normert strømkurve i forhold til spenning er vist under:



Key

U contact line voltage according to EN 50163

I_{max} is the maximum current consumed by the train at nominal voltage.

(1) With regard to the setting values of the under-voltage releases, see EN 50163:2004, 4.1, Note 2.

Figur 32: Tillatt strømopptak i lokomotiv som funksjon av kontaktledninsspenning

Kurven leses fra høyre mot venstre. Når spenningen U faller til et punkt kalt $a * U_n$ krever normen at strømforbruket til toget skal avta på en bestemt måte. Tallverdien av a går fram av tabellen under:

Power supply system	Value of a
a.c. 25 000 V 50 Hz	0,9
a.c. 15 000 V 16,7 Hz	0,95
d.c. 3 000 V	0,9
d.c. 1 500 V	0,9
d.c. 750 V	0,8

$a * U_n$, tilsvarer da 14,25 kV og 22,5 kV for henholdsvis et 16,67 Hz system og 50 Hz system

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 92 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

På delelektrifiserte strekninger er det ikke ønskelig at effektopptaket reduseres. I beregningene brukes derfor 14,25 kV og 22,5 kV som nedre grense.

21.2 Dimensjonerende situasjoner

Spenningsfallet vil være høyest når toget er på enden av ladestrekningen. Den dimensjonerende situasjonen er antatt å være når ett tog kommer inn på ene enden av ladestrekningen, det andre toget er på andre siden av matepunktet og det tredje er i nærheten av midten av ladestrekningen. Alle togene forutsettes å trekke 6 MW. Maksimal effekt fra matestasjon blir da 18 MW, som også er dimensjonerende for matestasjonen. Dette er den situasjonen det er regnet på og vist senere i dette dokumentet.

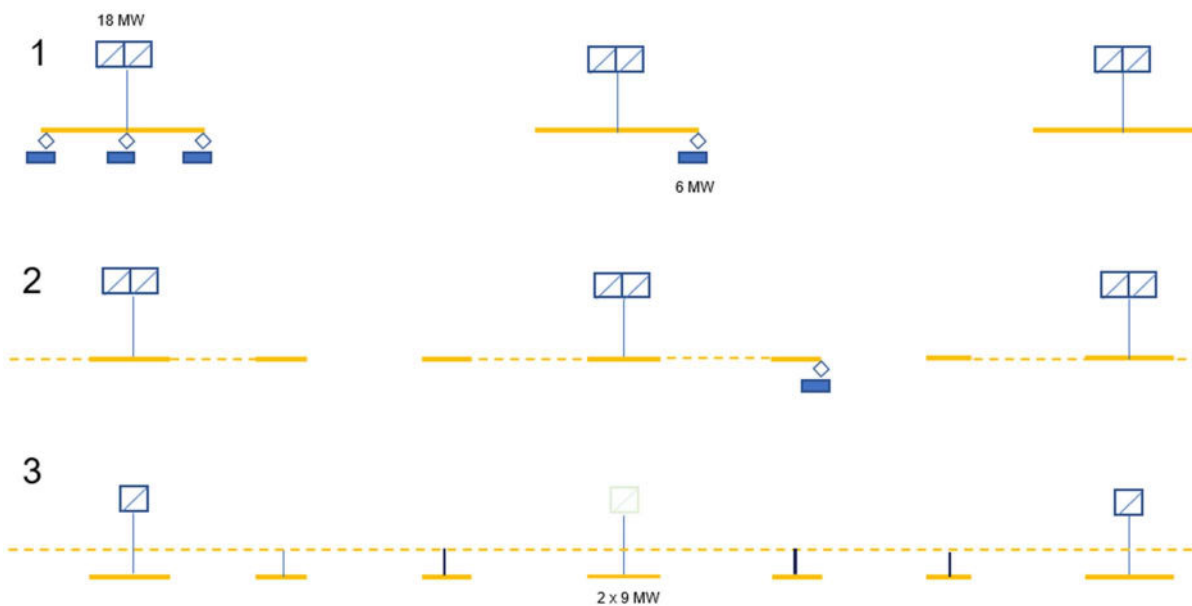
En annen krevende situasjon oppstår når to tog møtes på samme side av matepunktet. Men på grunn av ensporet drift, må eventuelt møtende tog stå stille og vente på kryssingsspor og vil da bare trekke ladestrøm. Det kan også tenkes at to tog i fart følger etter hverandre på samme side av matepunktet, men det antas det ikke er behov for mye kraft til akselerasjon i dette tilfellet og at det derfor ikke er en dimensjonerende situasjon.

Det forutsettes at DAS (Driver Assistance System) på togene eller hos togledelsen vil forhindre ekstreme situasjoner der togene ikke får ladet nok.

Det er også regnet på samme situasjon med kun ett tog på enden, men at togene trekker 4 MW hver. Det forutsettes at trafikkleddningen og DAS styrer tog og trafikken slik at den likevel avvikles godt.

21.3 Utforminger av infrastruktur

For å undersøke egenskapene til forskjellige varianter av infrastruktur vil det her beregnes spenningsfall for tre forskjellige utforminger, se figur under:



Figur 33: Ulike utforminger av ladestrekninger til deelektrifisert banestrømforsyning

1 Basisutforming:

Lengde på kontaktledning fra matepunkt til ende på 20 km

2 Elektrifiserte mellomstrekninger:

Lengde på kontaktledning fra matepunkt til ende: 2x10 km, i tillegg 20 km enfase kraftledning

3 Kraftledning langs hele jernbanen

9 MW transportert via kraftledning fra nabo-matestasjon til defekt matestasjon

De forskjellige variantene som blir undersøkt er:

- 1 BT-system, 15 kV 16,67 Hz
- 2 AT-system, 15 kV 16,67 Hz
- 3 BT-system, 25 kV 50 Hz

Prosjekt: Nullutslipp - Batteridrift på jernbanen	Delrapport 2 Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen	Side: 94 av 101 Dok.nr.: MIP-00-A-60144 Rev: 01E Dato: 15.10.2021
Prosjektnr.: 600374		

I tillegg vil det for utforming 3 beregnes på ytterligere én variant:

4 Asymmetrisk AT-system, 15 kV på PL og 35 kV på NL (Linjespenning på 50 kV)
16,67 Hz

Selv om det tidligere er nevnt at en ikke ønsker spenning under 14,25 kV, er det verdt å nevne at det ifølge **TRV:03197** er erfart at tog klarer å holde ruten sin så lenge spenningen er over 13,5 kV. Som følge av denne opplysningen vil det gjøres beregninger på den maksimale lengden til kontaktledning/kraftledning hvis maks tillatt spenningsfall er 13,5 kV, deretter skal det sammenlignes med tilsvarende beregninger for et maksimalt tillatt spenningsfall på 14,25 kV. Disse beregningene vil bare bli gjennomført for utforming 1 og 2, og bare for BT og AT med 16,67 Hz. For utforming 1 vil lengden være basert på den totale lengden på kontaktledning. For utforming 2 vil den maksimale lengden til kraftledningen gitt at kontaktledningen er 20 km undersøkes.

21.4 Beregningsgrunnlag

Beregningene er utført av modeller i Power Factory. Modellen består av en fremleder (kl og bærelinje), en returkrets (skinner og/eller returlinjer) og en rent ohmsk last på 4 eller 6 MW. De tre ovennevnte utformingene er som sagt sett på for et BT 16,67 Hz system, et AT 16,67 Hz system, og et BT 50 Hz system. For å kunne beregne impedansen i fremlederne og i returkretsen må en del informasjon om lederne testes inn i Power Factory. Først og fremst er det nødvendig å oppgi materiale og tverrsnitt av lederne. Dette er oppgitt i Tabell 4. Videre så benyttes Elutforming B med System 20B som utformingen for BT-systemene, og Elutforming F med System 25 for AT-systemene.

Tabell 4: Beregningsgrunnlag

Kontaktledningsmateriale	Bærelinjemateriale	NL/PL-materiale	Kraftledningsmateriale
CuAg, 100 mm ²	Bz 19, 50 mm ²	Al, 294 mm ²	Al, 400 mm ²

21.5 Resultat av beregninger

Se Tabell 5, Tabell 6, og Tabell 7 for resultatene fra beregningene knyttet til henholdsvis utforming 1, utforming 2 og utforming 3.

Tabell 5: Resultater for utforming 1

Last [MW]	System [-]	Laststrøm [kA]	Lastspenning [kV]	Spenningsfall [kV]	Virkningsgrad [%]
4	BT 16,67 Hz	259,73	15,4	1,1	93,68
	AT 16,67 Hz	247,25	16,18	0,32	98,04
	BT 50 Hz	166,23	24,06	0,94	96,62
6	BT 16,67 Hz	407,13	14,73	1,77	89,96
	AT 16,67 Hz	373,9	16,01	0,49	96,93
	BT 50 Hz	255,41	23,49	1,51	94,64

Tabell 6: Resultater for utforming 2

Last [MW]	System [-]	Laststrøm [kA]	Lastspenning [kV]	Spenningsfall [kV]	Virkningsgrad [%]
4	BT 16,67 Hz	278,4	14,37	2,13	87,91
	AT 16,67 Hz	250,08	15,99	0,51	96,85
	BT 50 Hz	171,89	23,27	1,73	94,34
6	BT 16,67 Hz	473,93	12,66	3,84	79,16
	AT 16,67 Hz	381,66	15,72	0,78	95,24
	BT 50 Hz	273,89	21,9	3,1	90,63

Tabell 7: Resultater for utforming 3

Last [MW]	System [-]	Laststrøm [kA]	Lastspenning [kV]	Spenningsfall [kV]	Virkningsgrad [%]
4	BT 16,67 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	AT 16,67 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	BT 50 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	AT 50 kV (8 mil)	257,58	15,55	0,95	94,99
	AT 50 kV (15 mil)	285,19	14,03	2,47	86,28
6	BT 16,67 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	AT 16,67 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	BT 50 Hz	N/A	N/A	N/A	N/A
	AT 50 kV (8 mil)	410,82	14,61	1,89	89,64
	AT 50 kV (15 mil)	N/A	N/A	N/A	N/A

Videre så ligger resultatene av beregningene for maksimal lengde på utforming 1 og 2 i henholdsvis Tabell 8 og Tabell 9

Tabell 8: Maksimal lengde på kontaktledning for utforming 1

Last [MW]	System [-]	Lengde; 14,25 kV [km]	Lengde; 13,5 kV [km]	Ekstra lengde [km]
4	BT 16,67 Hz	36	45	9
	AT 16,67 Hz	126	157	31
6	BT 16,67 Hz	24	30	6
	AT 16,67 Hz	83	104	21

Tabell 9: Maksimal lengde på kraftledning for utforming 2

Last [MW]	System [-]	Lengde; 14,25 kV [km]	Lengde; 13,5 kV [km]	Ekstra lengde [km]
4	BT 16,67 Hz	22	33	11
	AT 16,67 Hz	163	208	45
6	BT 16,67 Hz	6	14	8
	AT 16,67 Hz	97	127	30

21.6 Diskusjon og konklusjoner

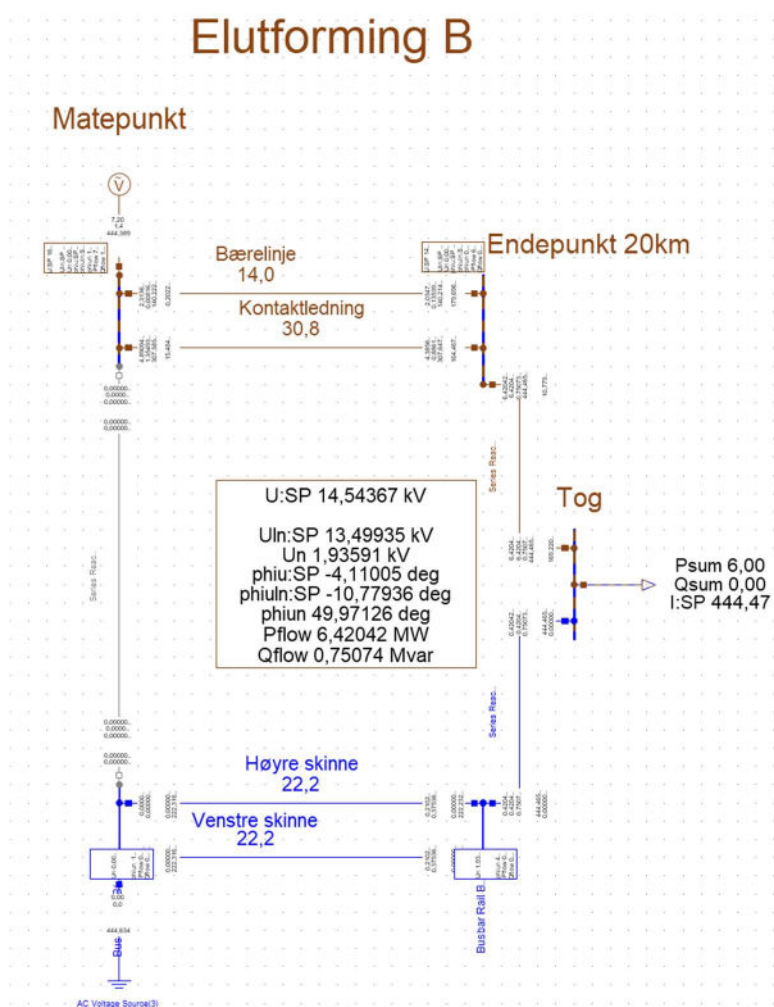
Resultatene fra Tabell 5 til Tabell 7 kan brukes til å fastslå hvilke systemvarianter som egner seg til å levere spenning i en gitt utforming. Som kommer klart frem fra Tabell 5 så klarer alle tre systemvariantene å holde spenningen over 14,25 kV i utforming 1. Dette betyr i praksis at en kan bygge BT-system på slike strekninger, og dermed spare seg kostnaden det innebærer å bygge AT-strekninger. Videre er det verdt å merke at ved bruk av et 50 Hz system så reduseres tapene merkbart. Det er derimot klart at bruk av utforming 2 stiller mye strengere krav til kontaktledningssystemet, som en kan se ut av Tabell 6. Resultatene for denne utformingen viser klart at bruk av BT-system ikke er tilstrekkelig hvis lasten som skal føres til et tog er på 6 MW, uavhengig av om 16,67 Hz eller 50 Hz blir brukt. Som en konsekvens blir det klart at det er nødvendig med AT-system for å forsikre en spenning på over 14,25 kV for hele ladestrekningen. Til slutt kan en se fra Tabell 7 at den eneste måten å gjennomføre utforming 3 er ved å benytte seg av løsningen med asymmetrisk AT-system.

Fra resultatene i Tabell 8 og Tabell 9 kommer det frem to merkbare elementer. Det første er at bruk av AT-system i stedet for BT-system øker mulighetene for lange ladestrekninger. For rene kontaktledningsstrekninger kan en bygge nesten fire ganger så lange strekninger ved bruk av AT sammenlignet ved bruk av BT, og lengden på en kraftlinje kan økes ytterligere over det igjen. Dette indikerer at bruk av AT-system tillater en større grad av fleksibilitet i valg av kontaktledningsplassering i bytte mot en høyere kostnad. Det andre elementet som er verdt å merke er at ved å tillate spenninger ned til 13,5 kV kan en øke lengden på kontakt- og/eller kraftledning

med en ikke-neglisjerbar mengde. Hvis dette spenningsnivået blir ansett å være tilstrekkelig, så kunne en øke fleksibiliteten til kontaktledningsplasseringen ytterligere. Lavere spenning på pantograf gir mindre maksimalt effektuttak, slik at dette må vurderes i forhold til effektbehovet for den enkelte strekning. Eventuelt må toget ha en automatikk som slår av effektsenkningen når toget er på deelektrifisert bane.

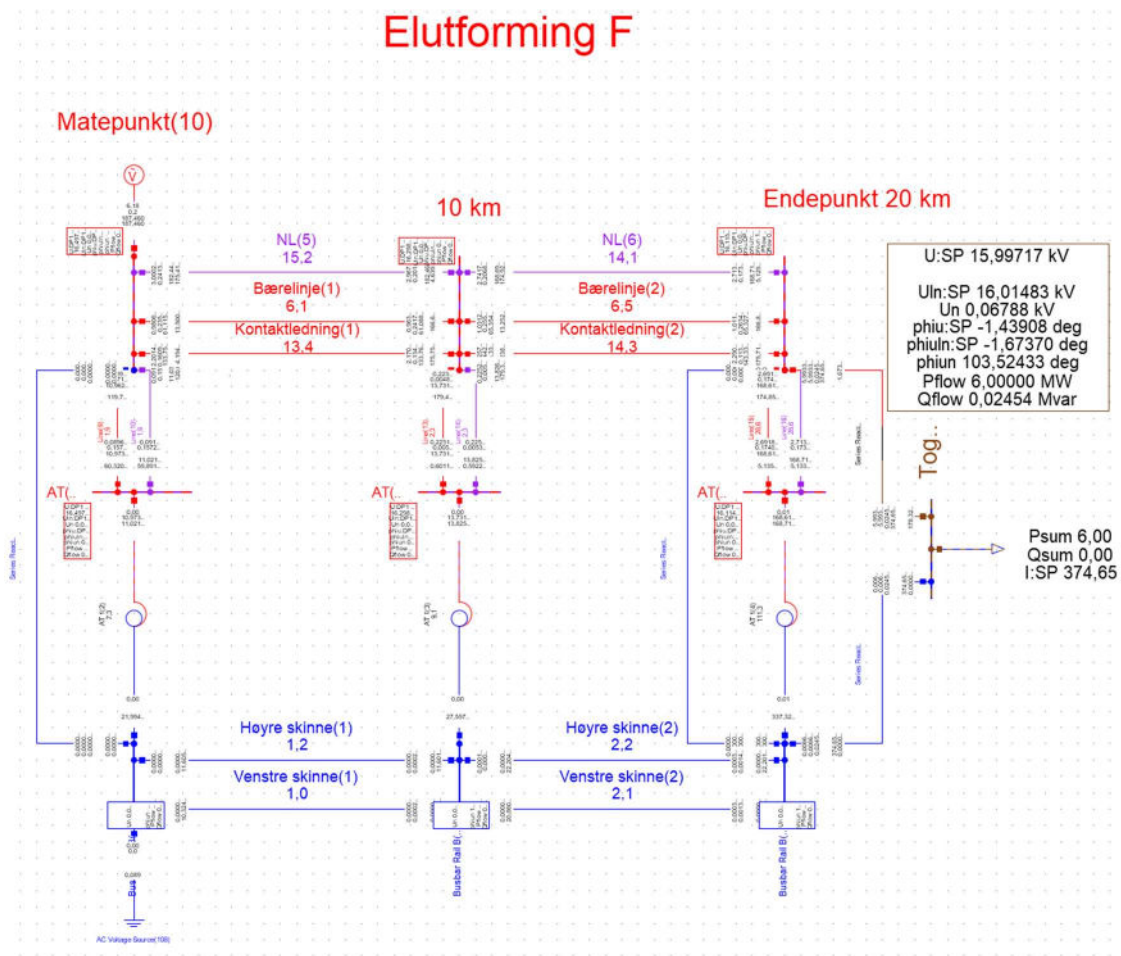
21.7 Appendiks: Regnemodeller fra Power Factory

21.7.1 Utforming 1 BT-system



AT-system

Elutforming F

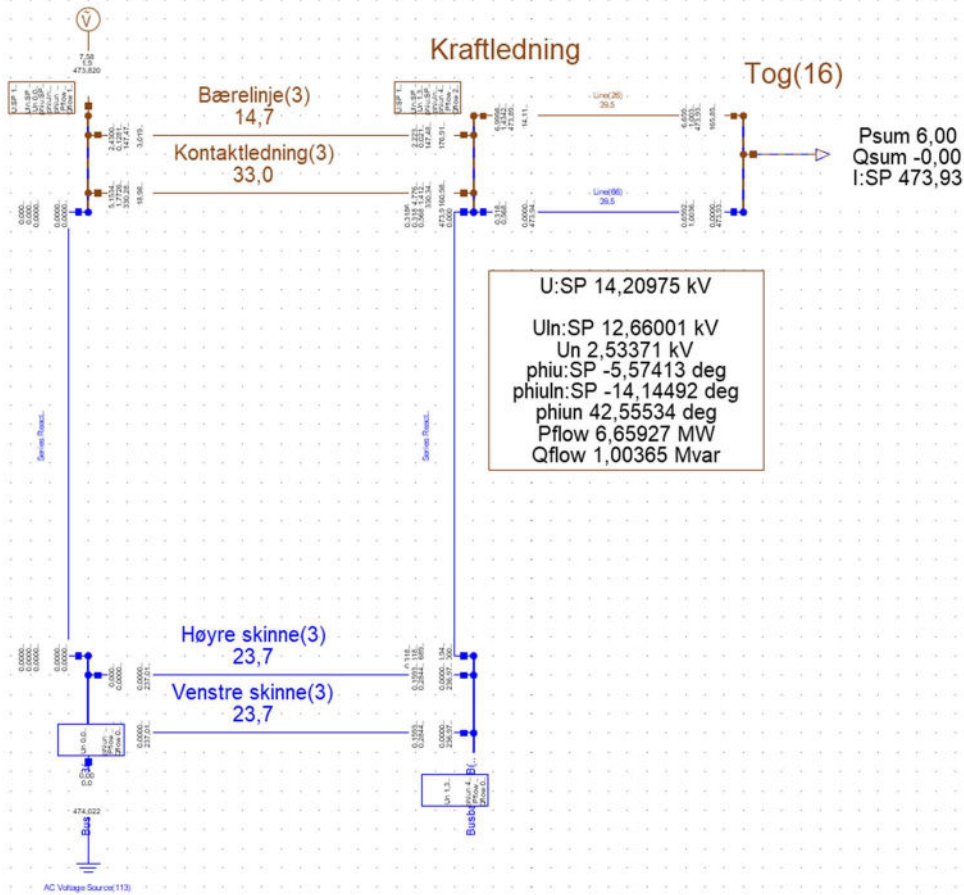


21.7.2 Utforming 2

BT-system

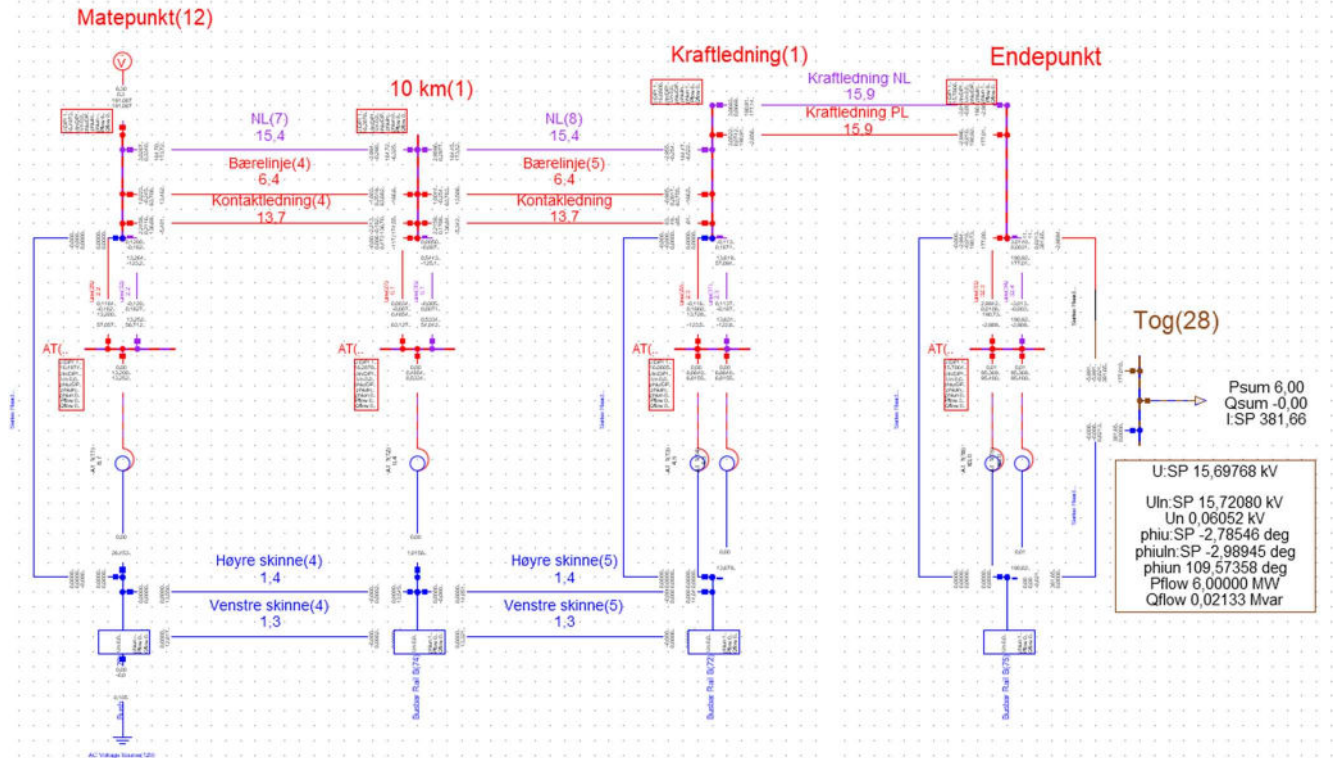
Elutforming B m/kraftledning

Matepunkt(11)



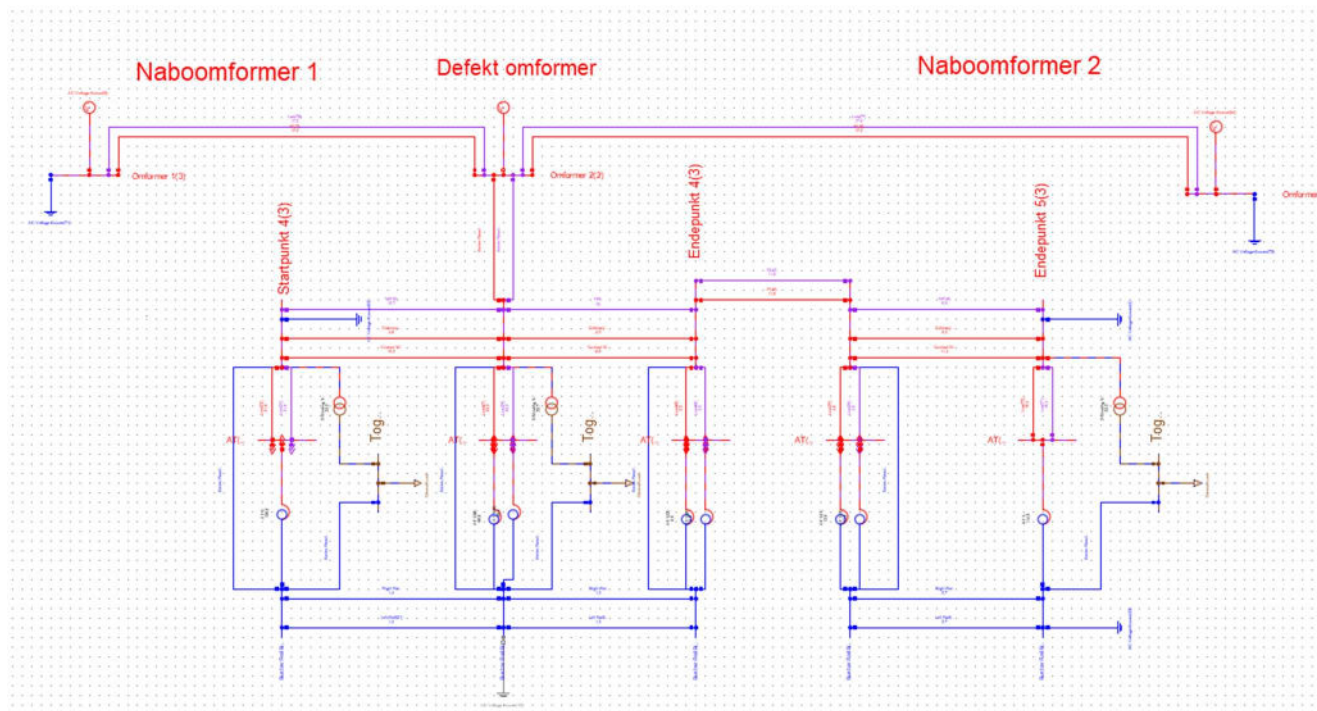
AT-system

Elutforming F m/kraftledning



21.7.3 Utforming 3

Asymmetrisk AT



21.7.4 Referanse

Excel regneark «Nullutslipp – spenningsfallsberegninger», Lars-Kristian Njåstad