

Energisimulering

Vedlegg 6.2 KVU GREEN



Utarbeidet av WSP	Saksnummer 202300894
Godkjent av Jernbanedirektoratet	Dokumentnummer 202300894-8
Dato 14.09.2023	Versjon 01
Endringslogg:	

Innhold

1	Innledning.....	6
1.1	Bakgrunn	6
1.2	Hensikt	6
1.3	Avgrensninger og forutsetninger.....	6
1.3.1	Overbygningsklasser	7
1.3.2	Samme togvekt for alle typer energibærere.....	7
1.3.3	12 MW til kjøretøyet.....	8
1.4	Definisjoner og begreper	8
2	Beskrivelse av arbeidsprosessen	9
2.1	Beskrivelse av simuleringsverktøy.....	10
2.1.1	Beregning av kjøremotstand	12
2.1.2	Grunnleggende prinsipper i energiberegning.....	13
2.1.3	Elektrisk drift.....	14
2.1.4	Batteridrift.....	15
2.1.5	Hydrogendrift	16
2.1.6	Dieseldrift.....	17
2.1.7	Grunnleggende forutsetninger	19
2.2	Beskrivelse av inngangsdata.....	19
2.2.1	Kjøretøy.....	19
2.2.2	Infrastruktur	24
2.3	Nøyaktighetsanalyse.....	26
2.4	Validering av simuleringsmodell	26
2.4.1	Energimålinger fra Cargonet	27
2.4.2	Strekningene som brukes for validering	27
2.4.3	Kjøringer, energimålingene og format.....	28
2.4.4	Forutsetninger i valideringssimuleringene	30
2.4.5	Hva som vil bli analysert for å validere modellen og hvorfor.....	30
2.5	Simuleringer for beregning av elektrifisering og energiforbruk.....	30
2.5.1	Val av seksjoner for del-elektrifisering	30
2.5.2	Beregning av energiforbruk for hver linje og konsept	31
2.5.3	Stasjonsstopp brukt i simuleringene.....	34
3	Nøyaktighetsanalyse.....	36
4	Validering av modell	38
4.1	Kjøring 1	38
4.1.1	Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka.....	38
4.1.2	Seksjon 2, Bolna – Dunderland	42
4.1.3	Seksjon 3, Rognan – Lønsdal	43
4.2	Kjøring 2	45
4.2.1	Seksjon 1, Bjerka – Mo I Rana.....	45
4.2.2	Seksjon 1, Bjerka – Mo I Rana, togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5.....	47
4.2.3	Seksjon 2, Dunderland – Bolna	49
4.2.4	Seksjon 2, Dunderland – Bolna, togvekt 597 tonn.....	51

4.2.5	Seksjon 3, Lønsdal – Rognan	52
4.2.6	Seksjon 3, Lønsdal – Rognan, togvekt 597 tonn	53
4.3	Kjøring 3	54
4.3.1	Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka.....	54
4.3.2	Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka, togvekt 770 tonn	55
4.3.3	Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka, togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5	56
4.3.4	Seksjon 2, Bolna – Dunderland	58
4.3.5	Seksjon 3, Rognan – Lønsdal	59
4.3.6	Seksjon 3, Rognan – Lønsdal, togvekt 770 tonn.....	61
4.3.7	Seksjon 3, Rognan – Lønsdal, togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5.....	62
4.4	Konklusjon fra validering.....	64
5	Resultater fra energisimuleringer.....	65
5.1	Forslag til elektrifisering brukt for energisimulering	65
5.2	Energiforbruk Konsept 0 – Diesel	67
5.2.1	Utvalg av simuleringsresultat.....	67
5.3	Energiforbruk Konsept 2a – Hydrogen	69
5.3.1	Utvalg av simuleringsresultat.....	70
5.4	Energiforbruk Konsept 2b – Hydrogen med del-elektrifisering.....	72
5.4.1	Utvalg av simuleringsresultat.....	73
5.5	Energiforbruk Konsept 3 – Batteri.....	79
5.5.1	Utvalg av simuleringsresultat.....	80
5.6	Energiforbruk Konsept 4 – Elektrifisering	88
5.6.1	Utvalg av simuleringsresultat.....	89
5.7	Sammenligning.....	91
5.8	Høyeffekt- vs høyenergibatterier.....	92
5.9	Økt energiforbruk for hjelpeutstyr og kjøremotstand.....	93
5.10	Endret effektgrens fra 12 MW til 9 MW	98
5.11	Endret togvekt for energibærere.....	100
5.12	Makshastighet 90 km/t for godstog	101
5.13	Kjøretidsgevinst til samfunnsøkonomisk analyse.....	102
6	Sammenligning av resultat mellom to simuleringsverktøy	104
6.1	Beskrivelse av RaJA.....	104
6.1.1	Simuleringsverktøyet.....	104
6.1.2	Simuleringsmodellen	105
6.2	Arbeidsprosessen	106
6.3	Sammenligning av resultat.....	106
6.3.1	Banedata	106
6.3.2	Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a).....	106
6.3.3	Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a).....	109
6.3.4	Godstog, nordgående, batteri (konsept 3).....	112
6.3.5	Godstog, sørgående, batteri (konsept 3).....	114
6.3.6	Godstog, nordgående, elektrifisert (konsept 4)	116
6.3.7	Godstog, sørgående, elektrifisert (konsept 4).....	118
6.4	Konklusjon.....	120
7	Konklusjon.....	121

8	Vedlegg A: Togvekt og toglengde fra Bane NOR.....	122
---	---	-----

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Det gjennomføres en konseptvalgutredning for reduserte klimagassutslipp på jernbane (KVU GREEN), og i den forbindelse har det blitt gjennomført simuleringer for å beregne og kvantifisere energiforbruk og utslipp for konseptene. Dette er basert på den trafikkmengden som er lagt til grunn for konseptene. Hensikten med denne delrapporten er å dokumentere dette arbeidet, som grunnlag til usikkerhetsanalyse og samfunnsøkonomisk analyse. Simuleringsverktøyet D3S utviklet av WSP er benyttet som verktøy for simuleringene.

Som det fremgår av delkapittel 2.1, så simuleres kjøretøy med ulike energibærere. Se hovedrapporten for alternativanalysen for nærmere beskrivelse av konseptvalgutredningens konsepter. Konseptene er gjengitt i listen nedenfor.

Konsept 0	Diesel	(energi fra diesel og KL)
Konsept 2a	Hydrogen	(energi fra hydrogen og KL)
Konsept 2b	Hydrogen med del-elektrifisering	(energi fra hydrogen og KL)
Konsept 3	Batteri med del-elektrifisering	(energi fra KL)
Konsept 4	Elektrifisering	(energi fra KL)

1.2 Hensikt

Delrapportens hensikt er følgende:

- Grunnlag for driftskostnader for hvert konsept
- Grunnlag for utslipp CO₂ fra drift for hvert konsept
- Utvikle et realistisk og robust forslag til del-elektrifisering
- Foreslå rimelige batteristørrelser for de konsept som bruker batterier
- Foreslå hydrogenbehov for hver simulert jernbanestrekning
- Analyse av forskjellige parametervariasjoner, f.eks. sammenligning av resultat fra forskjellige batterikjemier
- Grunnlag for estimering av kjøretidsgevinst

Utover dette er det gjennomført noen parametervariasjoner for å svare på hvor følsomt resultatene er for endringer i indata, slik som batterikjemi, togvekt og maksimal effekt.

1.3 Avgrensninger og forutsetninger

Ettersom arbeidet har benyttet seg av et simuleringsverktøy for beregningen av energiforbruket, så vil det her redegjøres for grunnleggende forutsetninger for verktøyet.

Simuleringer er en gunstig metode for å kunne studere systemer som har en høy kompleksitetsgrad, der enklere analytiske metoder ikke er tilstrekkelig, og der virkelige implementeringer er for kostbare, ikke er teknisk gjennomførbare, eller er for tidkrevende å gjennomføre.

Som det kommer frem av delrapporten er det gjennom validering og nøyaktighetsanalyser vurdert at verktøyet har hatt en tilfredsstillende nøyaktighet. Simuleringer er imidlertid alltid en forenkling av virkeligheten, og detaljeringsgraden i verktøyet er utslagsgivende for hvordan resultatene bør anvendes, og med hvilke forbehold. Avvik mot virkeligheten blir avhengig av antakelsene og kompleksiteten i å modellere driften på et enda mer nøyaktig nivå.

Energioptimerende tiltak, som for eksempel frikjøring og optimal hastighetsprofil for linjene er ikke analysert som del av dette arbeidet. Dette påvirker energiforbruket. Det er heller ikke analysert ruteplaner der faktisk oppholdstid og kryssinger, og hvordan disse påvirker energiforbruk.

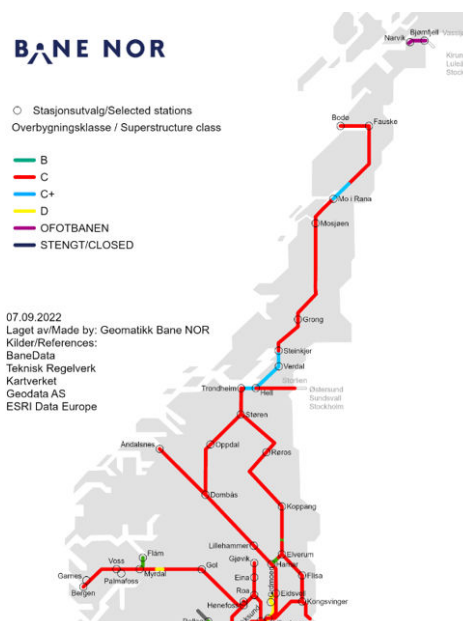
1.3.1 Overbygningsklasser

Kjøretøyenes egenskaper og linjens kurvatur er ikke den eneste faktoren som påvirker hastigheten. Tillatt hastighet på banen gitt kjøretøyets aksellast utgjør også en begrensende faktor. For dette benyttes overbyggingsklasser, som beskriver hvilken hastighet som er tillatt gitt aksellasten, hvilken kjøretøytype og hvilken overbygningsklasse som gjelder for strekningen. Dette fremgår av figuren nedenfor. For de ikke-elektrifiserte strekningene i denne utredningen (Nordlandsbanen, Rørsbanen, Solørbanen og Raumabanen) er det overbygningsklasse C og C⁺ som er aktuelle, hvor sistnevnte gjelder for strekningen Trondheim-Steinkjer og Mo i Rana-Ørtfjell.

Tabell: Tillatt hastighet og maksimal aksellast for overbygningsklasser

Overbygningsklasse	Vogner i persontog		Motorvognsett		Godstog/arbeidsmaskiner		
	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Maks hastighet boggier godkjent iht EN 14363 (km/h)
a	16	90	16	90	22,5 16,5	30 70	30 70
b	18	100	18	100	22,5 20,5 18	30 70 80	30 70 80
c	18	160	20,5 18	130 160	22,5 20,5 18	80 90 100	90 100 110
c+	18	160	20,5	160	24 ¹ 22,5 20,5 18	50 90 100 110	50 100 110 120
d	18	230	20,5 20 18 17	160 200 250 300	25 22,5 18	70 100 110	70 120 120
Ofofbanen	18	130	20,5	130	31 22,5	50 70 ²	50 70 ²
Ofofbanen 35t	18	130	20,5	130	35 22,5	50 70 ²	50 70 ²

1. Gjelder bare Nordlandsbanen mellom Guldsmedvik (km 499,517) og Ørtfjell (km 534,630)
2. Maksimal hastighet for tomme malmvogner er 60 km/h



Figur 1: Overbygningsklasser^{1,2}. Kilde: Bane NOR.

Det er dermed for godstogene hastigheten 90-110 km/t, avhengig av aksellast, som er aktuell. Det fremgår i resultatene fra energimålingene at hastigheten går over 100 km/t ved flere tilfeller.

Der er satt en begrensning på 120 km/t på godstogene i simuleringene, men sjeldent oppnås fordi togets vekt og effekt begrenser hastigheten. Hastigheten varierer mellom 80-120 km/t, hvor 100km/t er den dimensjonerende hastigheten.

Basert på det ovenstående kan det argumenteres for at det lagt til grunn en høyere hastighet i simuleringen enn det overbygningsklassene tillater. Prosjektet har ikke sett på hva som er fremtidsutsiktene til disse baneoverbygningsklassene, og hvor det kan endres i fremtiden. Med den hastigheten som er lagt til grunn for simuleringene, så blir energiforbruket noe høyere sammenliknet med hva som vil være resultatet med den hastighet som det kjøres med per i dag.

Utover dette er ikke begrensningen på 60 km/t for malmtog medtatt, noe som gir en høyere framføringshastighet på strekningen Mo i Rana-Ørtfjell enn det som benyttes i dag.

Det er gjort en parametervariasjon i kapittel 5.12 for å se hvordan denne tilnærming påvirker simuleringresultatene.

1.3.2 Samme togvekt for alle typer energibærere

For alle konsepter for energibærere så er det antatt samme togvekt. Dette er en forenklet tilnærming, og hvor kjøretøyen vil i virkeligheten ha noe forskjellig vekt avhengig av energibærere. F.eks. så er det slik at en energivogn til lokomotiv for batterikonseptet (eller hydrogenkonseptet) vil innebære en ekstra vekt på

¹ [Overbygning/Prosjektering/Generelle tekniske krav – Teknisk regelverk \(banenor.no\)](#) brukt 20230420

² [Aksellast / Axle Load \[Network statement\] \(banenor.no\)](#) brukt 20230420

minst 60 tonn. Dette skal imidlertid settes i sammenheng med togets totalvekt, som for godstogene er antatt å være 1200 tonn. Det betyr at den ekstra vekten utgjør omtrent 5% av togets totalvekt. Det er vurdert at selv om energien vil påvirkes av togvekten så er endringen i vekt i forhold til togets totale vekt relativt liten. Grunnet begrensede tid og ressurser så er det valgt at bruke den samme vekt for alle konseptene.

Det er gjort en parametervariasjon i kapittel 5.11 for å se hvordan denne tilnærming påvirker simuleringsresultatene.

1.3.3 12 MW til kjøretøyet

I simuleringsverktøyet så er det brukt en begrensning i effekt på 12 MW som kjøretøyet kan trekke fra strømvtageren (basert på at det er satt en spenning på 15 kV og en strømgrens på 800 A – i stillstand er grensen satt til 80 A).

Det er drøftet i hovedrapporten for alternativanalysen hvorvidt de kjøretøy som denne antakelse forutsetter er teknisk realiserbart. Utover dette er det gjort en parametervariasjon i kapittel 5.10 for å se hvordan en endring i effektgrens påvirker simuleringsresultatene.

Det er i dette arbeid ikke analysert dypere hvorvidt omformerstasjonen kan levere denne effekten til flere kjøretøy samtidig. Som nevnt i rapporten for alternativanalysen så er det lagt til grunn omformerstasjoner med en effekt på 2x18 MVA, hvor det er to parallelle omformere i stasjonen for å sikre redundans.

1.4 Definisjoner og begreper

C/D-verdi	Verdi som beskriver lading og utlading av batteri. Batteriet kan lades med en strøm tilsvarende fulladet over 1/C timer, og utlades over 1/D timer. Skal ikke blandes med C-koeffisienten i kjøremotstanden.
D3S	Simuleringsverktøy utviklet av WSP
Kjedebrudd	Et tillegg (positivt eller negativt) til den opprinnelige kilometreringen. Oppstår etter ombygging som påvirker lengden på jernbanen.
KL	Kontaktledningsanlegg
RaJA	Simuleringsverktøy utviklet av SINTEF
SoC	«State of Charge» er ladetilstanden til et elektrisk batteri i forhold til batterikapasiteten. SoC uttrykkes vanligvis som en prosentandel av den totale batterikapasiteten.

2 Beskrivelse av arbeidsprosessen

I dette kapittelet oppsummeres arbeidsprosessen. I påfølgende kapitler beskrives hvert steg mer inngående.

Arbeidsprosessen for energisimuleringene startet med å få på plass inngangsdataene som skulle benyttes i simuleringene. Disse dataene er *infrastrukturdata* og *kjøretøydata*.

For å kunne gjennomføre validering av modellen, så er det også benyttet energimålinger fra drift med et kjøretøy på en av strekningene. Formålet med valideringen av modellen er å redegjøre for hvorvidt modellen gir riktige resultater som reflekterer virkeligheten. Valideringen gjennomføres ved å gjenskape de forutsetningene som var aktuelle ved energimålingen, og sammenlikne målt energiforbruk med simuleringsresultatene.

Parallelt med valideringen ble det gjennomført en nøyaktighetsanalyse koblet til steglengde i simuleringsverktøyet. Dette var for å identifisere en steglengde som ga tilstrekkelig nøyaktighet i resultatene.

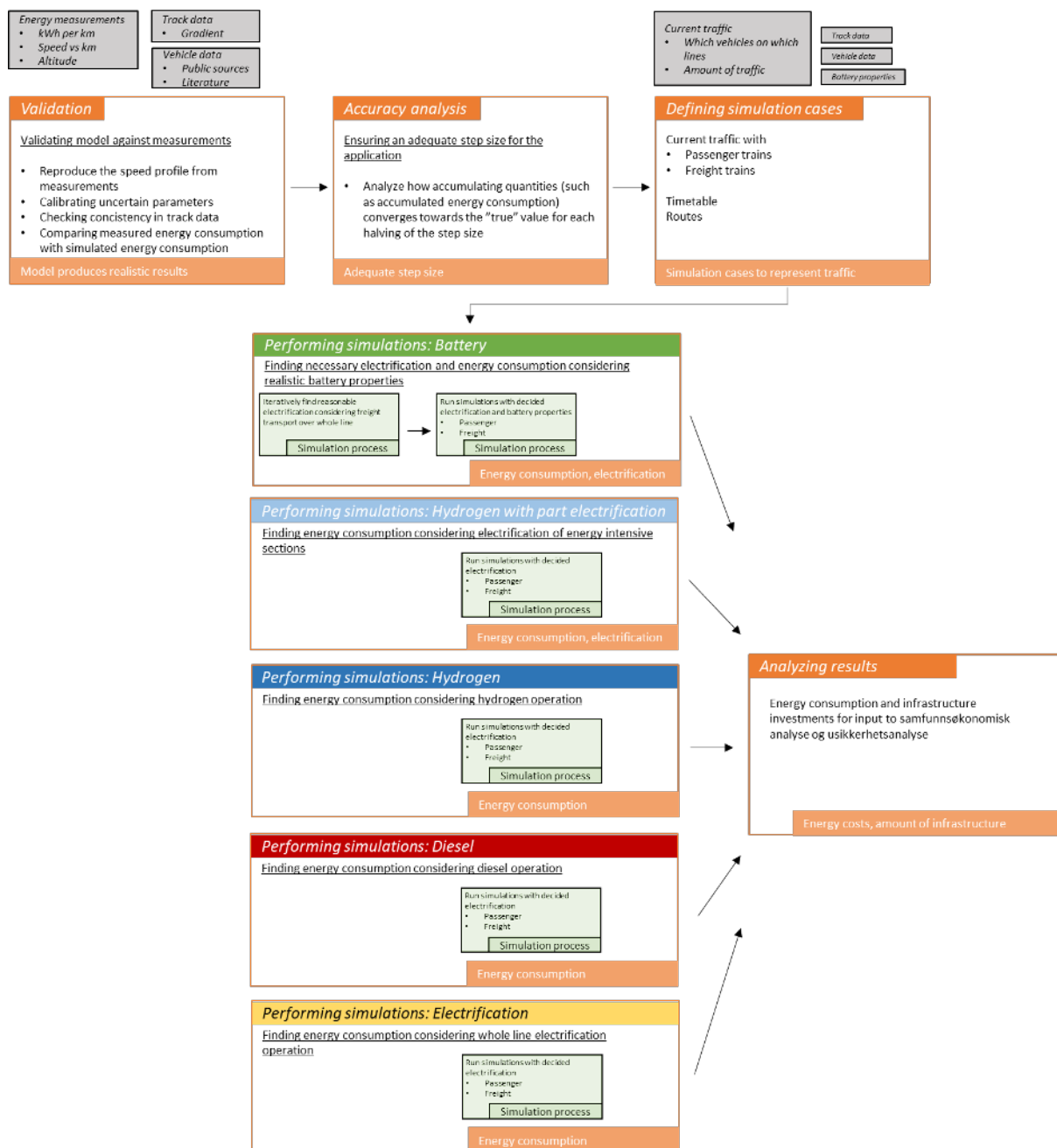
Når valideringen var gjennomført, konkluderte prosjektet med nøyaktigheten var tilstrekkelige, og neste steg var å definere de simuleringene som skulle gjennomføres til bruk i etterfølgende analyser. I dette stadiet er det vesentlig å reflektere over simuleringenes hensikt, noe som presenteres i kapittel 1.2. Ut fra dette defineres følgende:

- Utvalgte linjer som skal simuleres
 - Banedata
 - (Del-)Elektrifisering
- Utvalgte tog som skal simuleres på de utvalgte linjene
 - Fjerntog (FJ), regiontog (R), regiontog i distrikt (RD), godstog (G)
 - Egenskaper tilknyttet energibærerne

Hensikten er å beregne energiforbruket, og gi grunnlag for infrastrukturinvesteringer.

Arbeidsprosessen for batterikonseptet er noe mer iterativ og tidskrevende enn for de øvrige konseptene. Dette utdypes nærmere i kommende kapittel.

Foreslått løsning for del-elektrifisering har blitt utarbeidet i samarbeid mellom Jernbanedirektoratet og WSP, men simuleringsresultater i form av energiforbruk og batteristørrelser er arbeid utført av WSP.



Figur 2: Arbeidsprosessen for energisimuleringer, D3S.

2.1 Beskrivelse av simuleringsverktøy

Simuleringsverktøyet som er benyttet i dette arbeidet er navngitt *Distance Step Simulation Software (D3S)*, og er et simuleringsverktøy utarbeidet av WSP. Verktøyet er tidligere blitt benyttet i arbeid med lokaliseringstudning av tunnelbanelinje Älvsjö-Fridhemsplan³ i Stockholm, og er også blitt benyttet til prosjekter som *Alternativ til dieseldrift for AB Transitio*⁴ i Sverige. Utover dette, så har verktøyet også blitt benyttet til interne prosjekter hos WSP. Verktøyet kan blant annet benyttes for beregning av energiforbruk for drift av et kjøretøy langs en definert linje, og hvor ulike kjøretøytyper og energibærere kan modelleres.

³ I utredningen for TUB Älvsjö så ble verktøyet validert mot målt energiforbruk og hvor modellen viste god samsvar mellom simulering og energimålinger. Underlaget ble videre brukt i beslutning av linjedragning for tunnelbanelinje Älvsjö-Fridhemsplan, Stockholm.

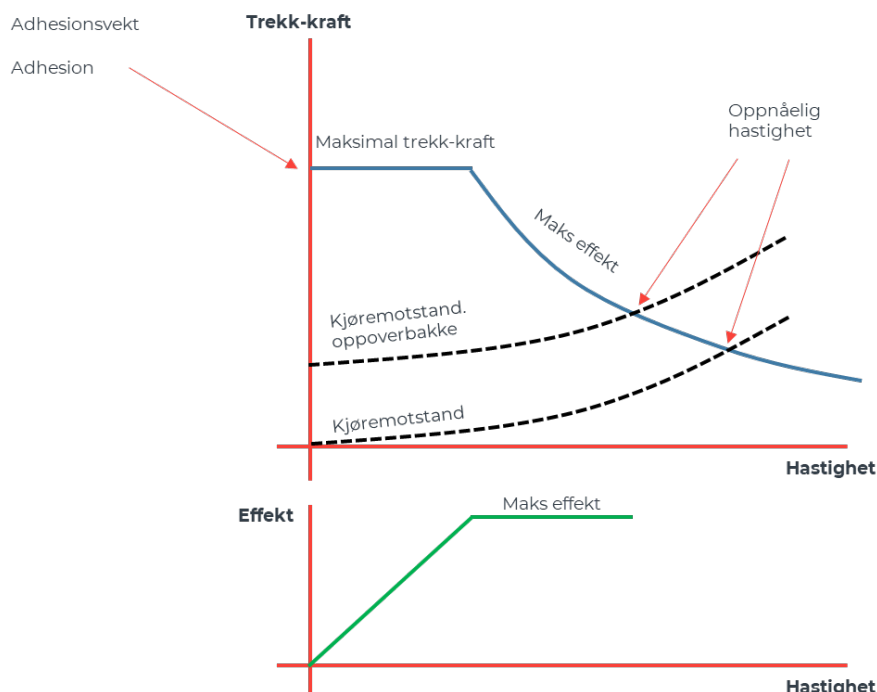
⁴ I utredningen for AB Transitio ble alternativ til diesel analysert, hvor batteridrift og hydrogendrift ble simulert på aktuelle ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger for persontog i Sverige.

Det finnes forskjellige metoder for å gjennomføre denne type av energiberegninger gjennom simuleringer. Noen typiske numeriske steg-metoder er tidsskritt-integrering, avstandsskritt-integrering og hastighets-integrering. Simuleringsverktøyet som benyttes i dette prosjektet bygger på avstandsskritt-integrering. Metoden innebærer at kjøretøyets «tilstandsinformasjon» beregnes for hvert ekvidistant punkt langs linjen fra startpunkt til sluttunkt. Kjøretøyets tilstandsinformasjon ved neste posisjon beregnes ut fra tilstandsinformasjon fra nåværende posisjon og omkringliggende forhold. Metoden for å løse ligningene for bevegelse og effektforbruk kalles Eksplisitt Endelig Differensmetode. Avstanden mellom startpunkt og sluttunkt diskretiseres og ligninger for bevegelse og effekt beregnes for hvert skritt.

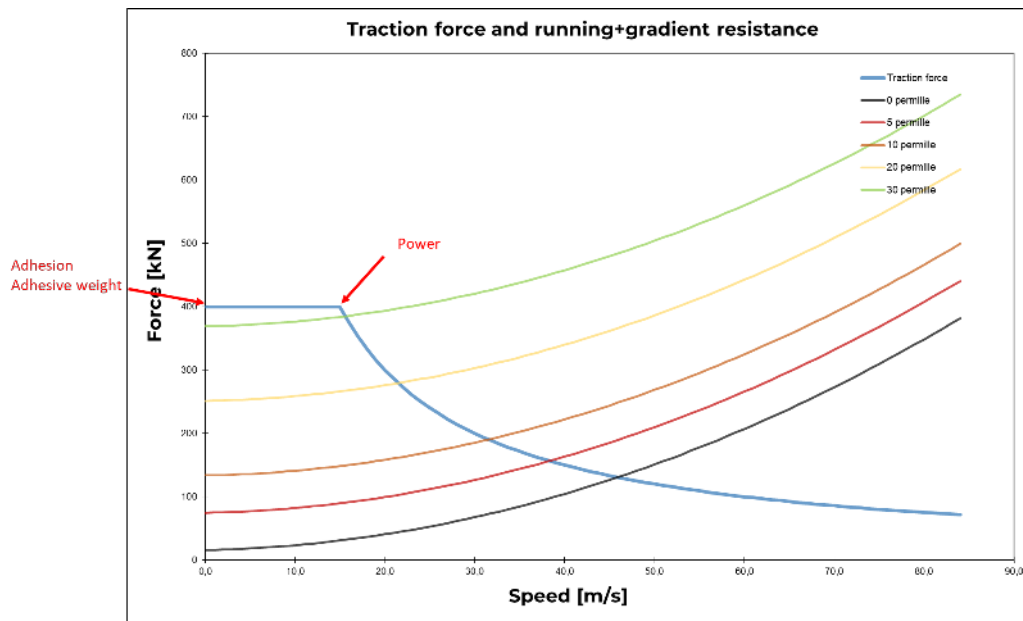
Simuleringsmodellen er en punktmassemodell av et skinnegående kjøretøy som simuleres langs den definerte banen. Punktmassemodellens bevegelse styres av Newtons andre lov som beskriver at en masse som blir utsatt for en eller flere krefter kommer å akselerere proporsjonalt mot summen av alle de krefter som virker på massen. Modellen tar kun hensyn til longitudinell bevegelse og de krefter som virker på kjøretøyet i longitudinell retning. De krefter som virker på kjøretøyet er i denne sammenheng kraften mellom hjul og skinne som produseres av motorer og bremseutstyr, kombinert rolle- og aerodynamisk motstand og gradientmotstand (oppover- og nedoverbakker). Massen er den ekvivalente massen som også inkluderer rotasjonstregghet:

$$a = \frac{F_{tot}}{m} = \frac{F - D_R - D_G}{m_{eq}} \quad [1]$$

Kjøretøyets evne til akselerasjon er derfor avhengig av trekkraft produsert av motorene. Trekkraften defineres i form av et såkalt trekkraftdiagram, med trekkraften på vertikalaksen og hastighet på horisontalaksen. Figur 3 viser prinsippet for et slikt diagram. Den blå kurven viser trekkraften. Kurven illustrerer at ved lavere hastighet begrenses trekkraften av adhesjon og vekten på drevne aksler. Ved høyere hastighet er det effekten (i motorene) som begrenser trekkraften. Figuren viser også prinsippet for hvordan kjøremotstand og motstand fra gradient kan se ut (D_R , D_G i ligning 1), og hvordan denne påvirkes av stigning. Skjæringspunktet mellom kurver for trekkraft og kjøremotstand viser den teoretiske makshastigheten ved en spesifikk stigning.



Figur 3: Trekkraftdiagram, prinsipp.



Figur 4: Trekkraftdiagram fra simuleringsverktøy, godstog.

2.1.1 Beregning av kjøremotstand

Kjøretøyets kjøremotstand, beskrevet som D_R i ligning 2, beregnes med utgangspunkt i data fra gjeldende litteratur innenfor området (KTH⁵), og verdiene er sjekket mot de verdier som blitt brukt og kvalitetssikret i NULLFIB2. Disse presenteres i kapittel 2.2.1. Kjøremotstanden som benyttes i simuleringene er basert på Davis formel, som beskriver kjøremotstanden som summen av tre termer:

$$D_R = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad [2]$$

Den første termen tilsvarer rullemotstand som ikke varierer med hastighet. Denne komponenten avhenger typisk av friksjon i lager og gir, og den er avhengig av vekten på akslene.

For lokomotiver og motorvogner, beregnes A slik:

$$A = n_{ax} \cdot (30 + a_Q \cdot Q_i)$$

$$a_Q = 0,55 \cdot 10^{-3}$$

For godsvogner benyttes følgende formel:

$$A = n_{ax} \cdot (65 + a_Q \cdot Q_i)$$

$$a_Q = 0,75 \cdot 10^{-3}$$

Det er antatt en jevn fordeling av vekten (kraften Q_i) på hver aksel (n_{ax} = antall aksler), unntatt godstogene som har en annen beregning for lokomotivet og vognene. Antall aksler er for persontogene oppgitt som del av maltogene i Jernbanedirektoratets tilbudskonsept som legges til grunn for KVU-er med leveranse til NTP 2025-2036 – dette presenteres nærmere i kapittel 2.2.1. For godsløkomotivet er seks aksler lagt til grunn. For godsvognene er det beregnet et antall aksler ut fra togets lengde, og hvor togets lengde er angitt for godstogene i dette arbeidet. Det er trukket fra godsløkomotivets lengde, og total lengden på vognene er delt med 18, som resultatet av at 18 meters godsvogner er lagt til grunn. Dette er rundet opp til nærmeste heltall for å gi antall vogner. Videre, så er det lagt fire aksler per vogn til grunn.

⁵ Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm

Den andre termen er lineært proporsjonal med hastigheten, og tilsvarer motstand forbundet med luftstrømmen langs toget, avhengig av togets lengde, men økes også av økt akselvekt.

$$B = n_{ax} \cdot (b_Q \cdot Q_i) + C_o \cdot L_t$$

$$b_Q = 10^{-5}$$

$$C_o = 0,3$$

$$L_t = \text{Togets lengde}$$

Den tredje termen er proporsjonal med hastigheten i kvadrat, og den tilsvarer aerodynamisk motstand fra turbulens som skapes langs og etter toget. Den er avhengig av togets aerodynamiske utforming.

$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D$$

$$\rho = 1,3$$

For godstogene brukes følgende verdi:

$$A \cdot C_D = 8,1 + 13,3 \cdot 10^{-2} \cdot L_t$$

For persontogene brukes følgende verdi:

$$A \cdot C_D = 3,8 + 5 \cdot 10^{-2} \cdot L_t$$

2.1.2 Grunnleggende prinsipper i energiberegning

Modellen er den samme for hvert kjøretøy, der prinsippet for kjøretøyets bevegelse beregnes på samme måte. Variasjonen ligger i energibærernes virkningsgrad, effekt (påvirker trekkraftdiagram) og mulige energiflyt om bord i kjøretøyet. Disse forholdene utdypes i påfølgende kapittel.

For hel-elektrifisering, hydrogen og diesel modelleres kjøretøyet som om det ikke er noe begrensning i energimengde. For hel-elektrifisert er dette åpenbart, men for hydrogen og diesel finnes det i virkeligheten en begrensning i energimengde. Denne begrensningen påvirker rekkevidden som i sin tur er omtrent 1000km⁶ (hvor også leverandører av kjøretøy står bak disse), og påfylling av energi skjer uten bevegelse ved en pumpe. For batteridrift er situasjonen annerledes. Energien tilføres fra strømvogter og energimengden setter begrensninger i rekkevidden før kjøretøyet trenger å lade. Denne rekkevidden varierer avhengig av kjøretøy, topografi, klima etc. men kan forenkles til omtrent 100 km⁷. I dette arbeidet simuleres det ikke med hensyn til bestemte lokasjoner for tanking av diesel og hydrogen.

For diesel-, hydrogen- og batteridrift, så defineres det et separat trekkraftsdiagram for disse tre energibærere som er forskjellige fra trekkraften for drift med strømvogter. Det er lagt til grunn at det på ikke-elektrifiserte strekninger er den samme effekten på kjøretøyene uavhengig av energibærer; med andre ord, så er effekten fra batteri, hydrogen og diesel antatt å være den samme. Disse verdiene presenteres i kapittel 2.2.1. Alle kjøretøyene er i simuleringverktøyet utstyrt med en strømvogter slik at de er bimodale. Dette inkluderer diesel- og hydrogenkjøretøyene. Med andre ord, så fremføres de med strømvogter på de delene av banene som allerede er elektrifisert.

I simuleringverktøyet, så defineres det en spenning for kontaktledningen, og en strømgrense for kjøretøy i bevegelse og stillstand. Disse er satt til hhv. 15 kV og 800/80 A. Dette innebærer at effekten som trekkes fra kontaktledningen aldri vil overstige 12 MW i bevegelse og 1,2 MW i stillstand. Dette påvirker mulig energistrøm til lading av batteriene for enkelte av konseptene. Logikken i simuleringverktøyet er definert slik at følgende prioriteringsrekkefølge gjelder for energiforsyning i drift med elektriske kjøretøy og batterikjøretøy:

⁶ Sluttrapport NULLFIB, Jernbanedirektoratet.

⁷ Delrapport 1 NULLFIB 2, Batteriteknologi for jernbanekjøretøy, Jernbanedirektoratet.

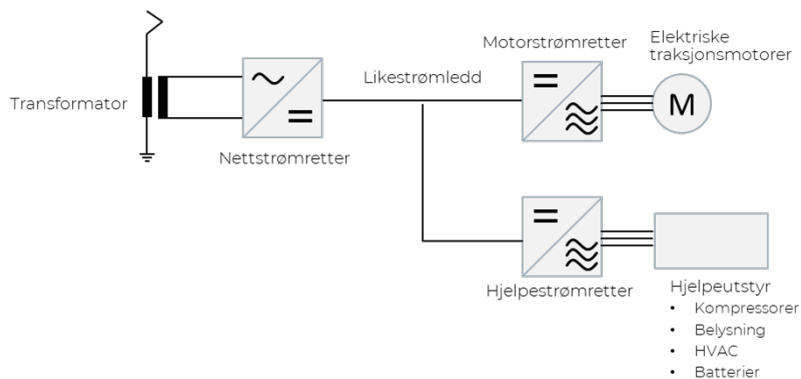
1. Energi til hjelpeutstyr
2. Energi til traksjonsmotorer
3. Energi til lading av batterier

Som det fremgår i påfølgende kapittel, så er hydrogen- og dieselskjøretøyene utstyrt med et (mindre) batteri for energioptimalisering. Følgende prinsipp er lagt til grunn for forbruket:

- Batteriet lades kun av energi fra elektrodynamisk bremsing, og dette kun på ikke-elektrifiserte strekninger. På elektrifiserte strekninger skal energien i førsteomgang gå til kontaktledningsanlegget (etter hjelpeutstyr)
 - Batteriet lades ikke av strøm fra kontaktledningen
- Batteriet brukes kun på ikke-elektrifisert strekning, og batteriet vil brukes til forsyning av traksjonsmotorer og hjelpeutstyr, før energi blir trukket fra diesel eller hydrogen. Dette innebærer at den energimengden som defineres på batteriene er den energimengden som er tilgjengelig for energioptimalisering, og når den energien er forbruket, vil kjøretøyet bruke enten hydrogen eller diesel
 - Det kan også være slik at effekten fra batteriene ikke er tilstrekkelig for forsyning av traksjonsmotorer og hjelpeutstyr. Da vil diesel eller hydrogen «toppe opp» det som mangler.

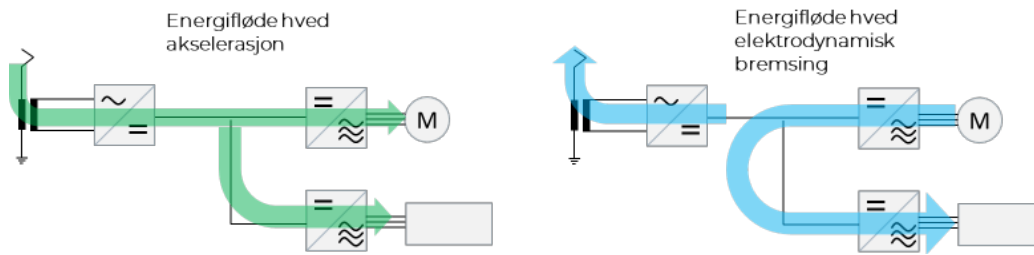
2.1.3 Elektrisk drift

Figuren nedenfor viser en skjematisk skisse av traksjonsutstyret og hjelpeutstyret i et elektrisk kjøretøy, som også er hvordan kjøretøymodellen er bygget opp i simuleringsverktøyet (Figur 5). Strømmen (15 kV, 16,7 Hz) fra kontaktledningen går gjennom strømavtakeren og ned til transformatoren, og transformeres til en lavere spenning videre til en likeretter som omformer strømmen fra vekselstrøm til likestrøm. Strømmen går deretter videre til traksjonsvekselrettere og hjelpestrømrettere for å forsyne traksjonsmotorer og hjelpeutstyr.



Figur 5: Illustrasjon, elektrisk kjøretøy.

For drift på elektrifiserte strekninger, så brukes energi fra strømavtaker, og mulig energistrøm presenteres i figuren nedenfor (Figur 6). Som illustrert, så mates energien til motorer og hjelpekraft fra strømavtaker. Ved elektrodynamisk bremsing, så kan energien mates fra motorene til hjelpekraft, og overskuddet blir matet tilbake til kontaktledningsanlegget. Det kan være slik at bremseenergien ikke er tilstrekkelig for hjelpeutstyret, og da vil kontaktledningsanlegget kompensere for manglende energi.

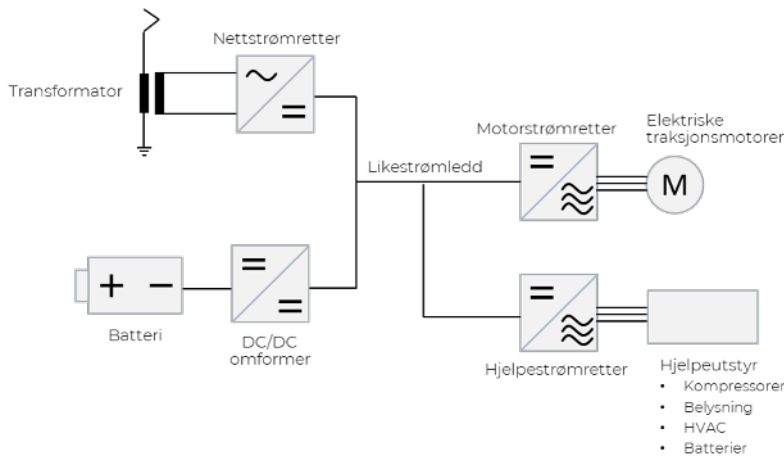


Figur 6: Illustrerer mulige energifloden ombord et elektrisk kjøretøy.

Det er antatt en reseptivitet på 40% i kontaktledningsanlegget, noe som utdypes nærmere i kapittel 2.2.1. Dette gjelder for alle konsepter som innebærer tilbakeføring av energi til kontaktledningsanlegget.

2.1.4 Batteridrift

For batterikjøretøy, så tilkommer det en batteripakke som er tilkoblet likestrømleddet i kjøretøyet (Figur 7). Denne blir benyttet for energiforsyning til traksjonsmotorer og hjelpeutstyr når kjøretøyet fremføres på en ikke-elektrifisert strekning.

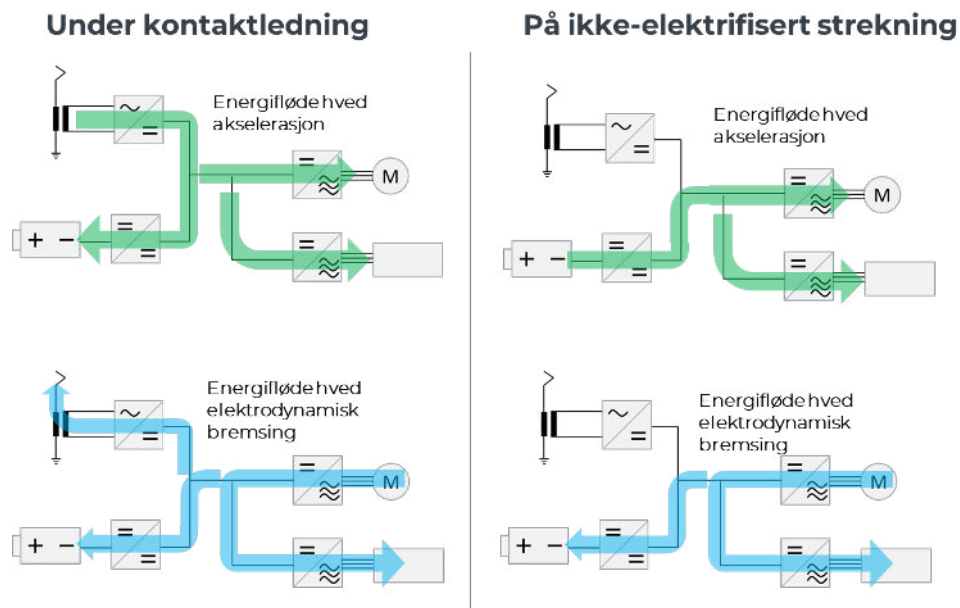


Figur 7: Illustrasjon, batteri-kjøretøy.

Prinsippet for lading av batteriet, er at det lades raskest mulig på ladestrekning, og at det kun benyttes på ikke-elektrifiserte strekninger (også omtalt som batteristrekning i utredningen). På elektrifisert strekning, så har kjøretøyet samme effekt som de kjøretøyene som kun kjører på elektrifiserte strekninger. Dette gjelder alle konsepter som innebærer deelektrifisering.

Ved elektrodynamisk bremsing, så vil energien prioriteres til å forsyne hjelpeutstyr (Figur 8). Det som blir til overs mates til batteriene hvis de ikke er fulladet, og etter dette går resterende energi tilbake til kontaktledningsanlegget hvis toget befinner seg under en kontaktledning. Det som ikke blir mottatt av kontaktledningsanlegget på grunn av reseptivitet, går til bremseresistorer om bord i kjøretøyet.

Det kan også være slik at bremseenergien ikke er tilstrekkelig til å forsyne batteriene med ladeeffekt, eller at det heller ikke er tilstrekkelig for hjelpeutstyret. Da vil kontaktledningsanlegget kompensere for det som mangler innenfor kontaktledningsanleggets strømgrense, gitt at toget befinner seg på en elektrifisert strekning.

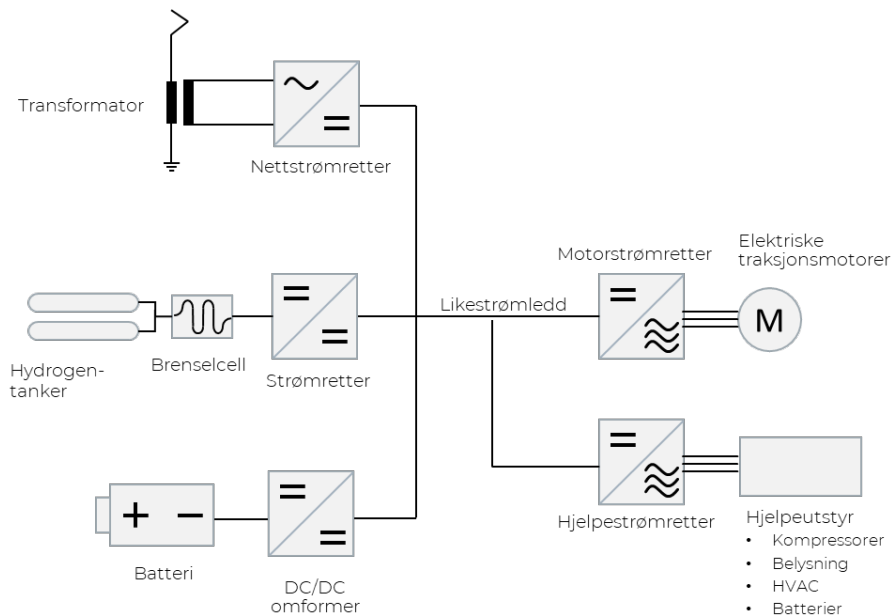


Figur 8: Illustrerer mulige energifloden ombord et batteri-kjøretøy.

Lading av batteriet vil maksimalt kunne lade med den verdien som tillates av dets Charge-verdi (C-verdi). Dersom batteriet eksempelvis har en størrelse på 1MWh, og $C=5$, så vil batteriet kunne lades med 5 MW. Det samme prinsippet gjelder for bruk av batteriets energi, der D-verdien begrenser effekten ut fra batteriet.

2.1.5 Hydrogendrift

For hydrogenkjøretøy, så er kjøretøyet likt et batterikjøretøy, men det er lagt til hydrogentanker, brenselceller og en likeretter for den energiforsyningen som kommer fra hydrogen (Figur 9).

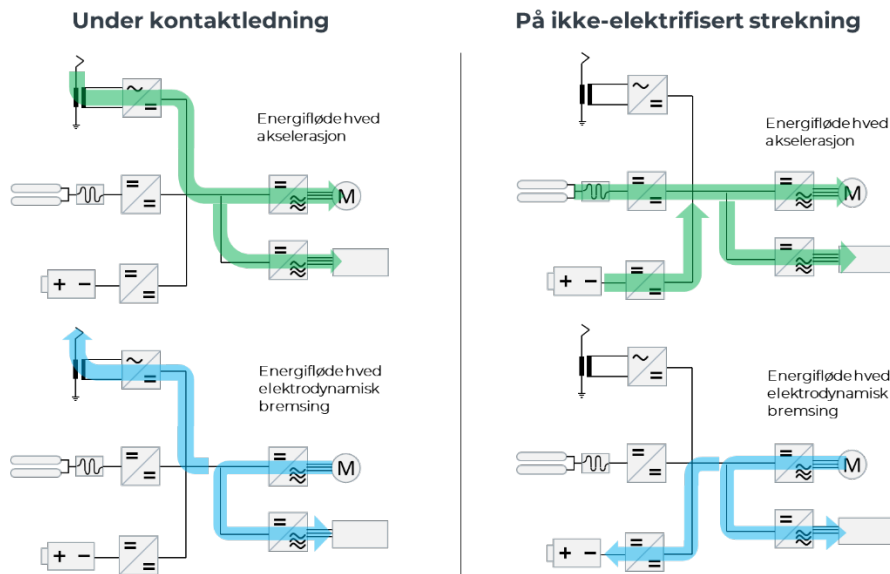


Figur 9: Illustrasjon, hydrogen-kjøretøy.

Hydrogentankene og brenselcellene blir benyttet dersom kjøretøyet fremføres på en ikke-elektrifisert strekning. Ved elektrodynamisk bremsing, så vil energien gå til hjelpeutstyr, og som allerede redegjort for tidligere, så vil energien som blir igjen gå til batterier dersom disse ikke er fulladet (Figur 10).

På elektrifiserte strekninger, så anvendes energien fra kontaktledningsanlegget til fremdrift. Ved elektrodynamisk bremsing, så vil energien i førsteomgang gå til kontaktledning og etter dette til batterier og, hvis batteriene er fulladet, til bremseresistorer. Kontaktledningsanlegget vil kompensere dersom bremseenergien ikke er tilstrekkelig til å forsyne hjelpeutstyret.

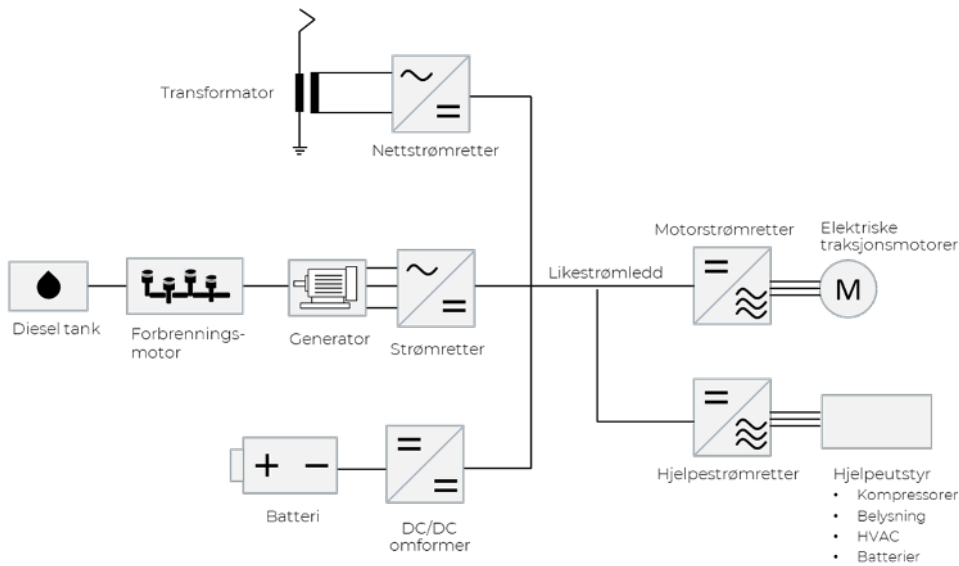
Det er vesentlig å trekke frem at brenselcellene ikke har en definert effekt i simuleringverktøyet. Det trekkraftsdiagrammet som defineres (basert på en motoreffekt) for ikke-elektrisk drift (som er lavere enn for elektrisk drift) er valgt for å være rimelig med hensyn til hydrogendrift.



Figur 10: Illustrerer mulige energifloden ombord et hydrogen-kjøretøy.

2.1.6 Dieseldrift

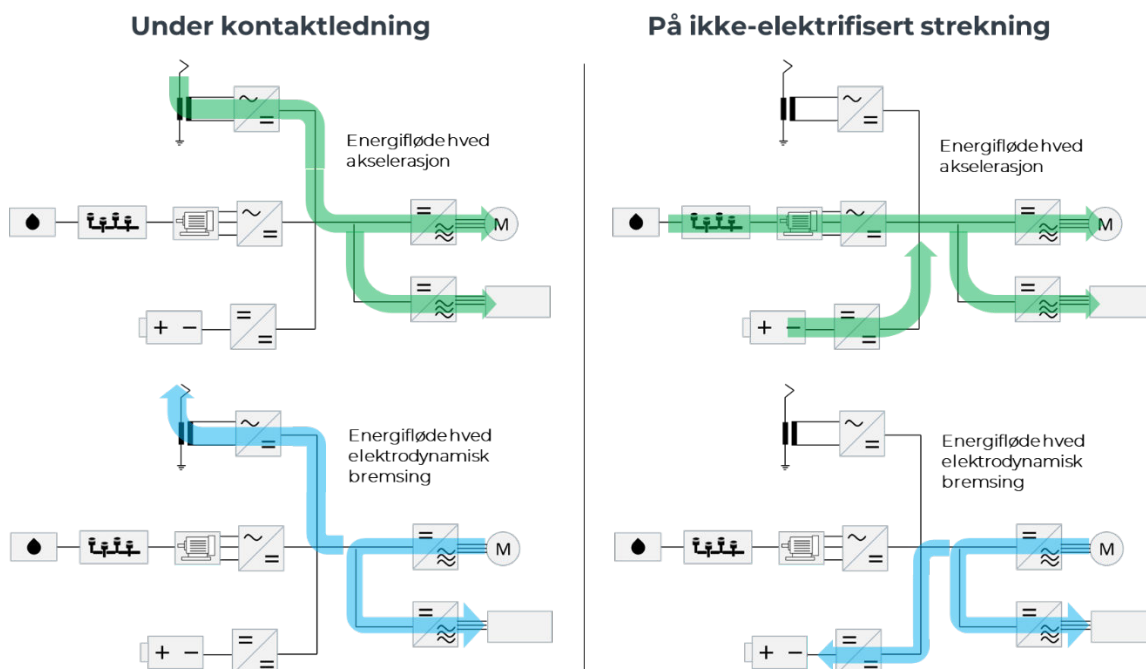
Med samme prinsipp som for hydrogenkjøretøy til grunn, så er dieselskjøretøy utstyrt med en dieseltank, forbrenningsmotor, generator og likeretter i tillegg til det som finnes i et batterielektrisk kjøretøy (Figur 11).



Figur 11: Illustrasjon, diesel-kjøretøy.

På ikke-elektrifiserte strekninger så anvendes diesel som energikilde. Ved elektrodynamisk bremsing, så vil energien gå til hjelpeutstyr, og som allerede redegjort for tidligere, så vil energien som blir igjen gå til batterier (Figur 12).

På elektrifiserte strekninger, så anvendes energien fra kontaktledningsanlegget til fremdrift. Ved elektrodynamisk bremsing, så vil energien i førsteomgang gå til kontaktledning og etter dette til batterier og, hvis batteriene er fulladet, til bremseresistorer. Kontaktledningsanlegget vil kompensere dersom bremseenergien ikke er tilstrekkelig til å forsyne hjelpeutstyret.



Figur 12: Illustrerer mulige energifløden ombord et diesel-kjøretøy.

2.1.7 Grunnleggende forutsetninger

Hastighetsprofil

I simuleringsverktøyet, så defineres det en hastighetsprofil som funksjon av banestrekningen. Kjøretøyene vil tilstrebe å følge den hastighetsprofilen gitt det definerte trekkraftsdiagrammet, togvekten og kjøremotstanden som påvirker togets bevegelse. Det betyr at det ikke blir modellert frikjøring, der føreren ikke benytter trekkraft. Dersom toget oppnår tillatt hastighet, så vil kjøretøyet kun anvende den energien som kreves for å overvinne kjøremotstanden.

Det er også definert en konstant innbremsing som kjøretøyet vil benytte, og denne presenteres sammen med hvert mal-tog som er benyttet i simuleringene i kapittel 2.2.1.

Det er verdt å merke seg at det i Banedata er to hastighetsprofiler, normal og pluss. Det er antatt at godstogene benytter normalhastighet, mens persontogene benytter pluss-hastighet, som er noe høyere.

2.2 Beskrivelse av inngangsdata

I dette delkapittelet vil det redegjøres for inngangsdata for de kjøretøyene og den infrastruktur som er benyttet i simuleringene.

2.2.1 Kjøretøy

Det er simulert fire ulike kjøretøy, basert på hvilken type trafikk som betjener de aktuelle banene:

- Godstog à 1200 tonn (3500 tonn for malmtogene i sørgående retning)
- Regiontog i distrikt (RD002)
- Regiontog (R004)
- Fjerntog (FJ002)

Standardtogtyp

Tidligere definerte togkategorier for persontrafikk⁸ er lagt til grunn for simuleringene.

For persontogene er det antatt et gjennomsnittsforkbruk på 15 kW til HVAC og 10kW til øvrig hjelpeutstyr i (motor-)vognen. Dette innebærer at det for et fjerntog med åtte vogner blir forbrukt 200 kW. Dette er sjekket mot de nye fjerntogene som blir anskaffet hos Norske tog. Det er også gjort en parametervariasjon knyttet til dette i kapittel 5.9. For godstogene er det antatt et hjelpekraftforbruk på 100 kW.

Tabell 1: Standardtogtyper persontrafikk

Standardtogtype	RD002	R004	FJ002
Togkategori	Regiontog i distrikt	Regiontog	Fjerntog
Dimensjonerende maksimalhastighet:	160 km/t	160 km/t	200 km/t
Akselerasjon, minimum:	0,65 m/s ² , opp til 80 km/t	0,65 m/s ² , opp til 80 km/t	0,50 m/s ² , opp til 80 km/t
Trekkraftkurve, mal	KL: [123,44,L];[34,160,H] ikke-KL: [123,35,L];[18,160,H] (P=1,5MW/0,8MW brukt i simuleringer)	KL: [160,68,L];[52,200,H] ikke-KL: [160,35,L];[35,160,H] (P=3.0MW/1,6MW brukt i simuleringer)	KL: [240,68,L];[78,200,H] ikke-KL: [240,35,L];[53,160,H] (P=4.4MW/2,5MW brukt i simuleringer)
Retardasjon:	0,65 m/s ² , 80-0 km/t	0,65 m/s ² , 80-0 km/t	0,5 m/s ² , 80-0 km/t

⁸ Standardtogtyper persontrafikk, Jernbanedirektoratet. Dokument nr.: 202200165-1. Dato: 08.04.2022

Toglengde:	55 meter	110 meter	165 meter
Bruttovekt (egenvekt + passasjerer):	135 (125+10) tonn (Adh.vekt=63t)	286 (250+36) tonn (Adh.vekt=81t)	395 (375+20) tonn (Adh.vekt=122t)
Hastighetsprofil:	Pluss	Pluss	Pluss
Kapasitet (sitte/stå), minimum:	150 (150/0) passasjerer	550 (300/250) passasjerer	300 (300/0) passasjerer
Maks teknisk opphold på stoppested:	30 sek	30 sek	30 sek
Hjelpekraftforbruk:	$2 \cdot (15+10) = 50 \text{ kW}$	$5 \cdot (15+10) = 125 \text{ kW}$	$8 \cdot (15+10) = 200 \text{ kW}$
Maltog:	Type 76x0,5	Type 76x1	Type 79-NB, Kjøredynamisk: Type 76x1,5
Nåværende togtyper som tilfredsstillerspesifikasjonene:	Ingen	Type 76	Ingen

På de ikke-elektrifiserte strekningene er det benyttet samme effekt på alle konseptene. I RFI-en som er gjennomført som del av KVV-arbeidet, så foreligger det informasjon som peker i retning av at effekten for hydrogenkjøretøy kan være opptil 10% høyere enn for diesel, mens det for batteri kan være opptil 30% høyere. På samme tid finnes det indikasjoner på at den overkapasiteten som finnes relativt diesel ikke nødvendigvis blir benyttet, fordi det foretrekkes et optimalisert forbruk av energi. Av den grunn er det valgt å ikke analysere dypere hvilket prosentpåslag på ikke-elektrifisert strekning som muligens skiller konseptene fra hverandre på ikke-elektrifisert strekning. Dette vil også gi likebehandling når det kommer til hastighetsprofil og energioptimal kjøring.

Funn fra RFI underbygger forutsetningen om en dobling av effekt på kjøring under KL sammenliknet mot kjøring på ikke-elektrifiserte strekninger. Tidligere RFI-er gjennomført av Jernbanedirektoratet underbygger at det i batteridrift sammenliknet med drift med strømvaktaker er rimelig å anta å være i spennet 50-60%.

Den forutsatte hastighetsbegrensningen på 160 km/t for regiontog og regiontog i distrikt, og 200 km/t for fjerntog understøttes også av RFI for alle konseptene, til tross for at den reduserte effekten på ikke-elektrifisert strekning vil begrense muligheten til å rekke topphastigheten. Utover dette vil hastigheten begrenses av linjehastigheten i banedata.

Jernbanedirektoratet har ikke utarbeidet et tilbudskonsept med maltog for godstogene. Det er derfor lagt til grunn et eksisterende lokomotiv av typen CD312 med diesel som energibærer. Denne presenteres i tabellen nedenfor (Tabell 2). For drift under KL, så er det lagt til grunn en installert motoreffekt på 6 MW, mens for drift på ikke-elektrifisert strekning er forutsatt at motorene kun benytter 3 MW. Valg av den lavere effekten er gjort på bakgrunn av at f.eks. dieseldrift har lavere effekt enn drift på elektrifisert strekning. Denne forutsetningen understøttes av tidligere RFI-arbeid gjennomført av Jernbanedirektoratet, der det fremgår at det for et slikt seksakslet lokomotiv er en rimelig forutsetning for batteridrevne kjøretøy på ikke-elektrifiserte og elektrifiserte strekninger.

Tabell 2: Togtype, godstrafikk

Togtype	CD312 (lokomotiv) + vogner (antatt høyere effekt for kjøretøyet brukt i disse simuleringer)
Togkategori	Godstog
Dimensjonerende maksimalhastighet:	120 km/t

Akselerasjon, minimum:	-
Trekraftkurve, mal	KL: P=6MW, F=400kN Ikke-KL: P=3MW, F=400kN
Retardasjon:	0,4 m/s ²
Toglengde:	Lokomotivets lengde er antatt til 23 meter, og hver vogn har lengde 18 meter. For godstogene er det antatt en total lengde på toget (inkludert lokomotivet) på 502 meter. Ut fra dette beregnes antall vogner, noe som i sin tur påvirker kjøremotstand.
Bruttovekt (egenvekt):	123 tonn lok + vogner. Brukt 1200 tonn og 3500 tonn (inkl. lok) i simuleringene
Hastighetsprofil:	Bas
Hjelpkraftforbruk:	100kW
Maltog:	(CD312)

Virkningsgrad

Følgende virkningsgrader (Tabell 3) har blitt brukt som inputdata for simulering av kjøretøy. Hvilke komponenter og virkningsgrader knyttet til den respektive virkningsgraden ble presentert i kapittel 2.1.

Tabell 3: Virkningsgrad, kjøretøy i simulering

Komponent	Virkningsgrad	Forklaring
Transformator	95%	Verdi fra NULLFIB2 delrapport 2. Verdiet er også sjekket mot litteratur innenfor jernbanekjøretøy.
Likeretter	97%	Verdi fra NULLFIB2 delrapport 2. Verdiet er også sjekket mot litteratur innenfor jernbanekjøretøy.
Vekselretter (gjelder både til motorer og til hjelpkraft)	97%	Verdi fra NULLFIB2 delrapport 2. Verdiet er også sjekket mot litteratur innenfor jernbanekjøretøy.
Batteri og DC/DC-omformer	95%	I NULLFIB2 delrapport 2 ble det brukt et verdi på 97%. Det er antatt et noe mer konservativt verdi på 95% som også inkluderer energitap i batteriet.
Trekkmotor og gir	94%	I virkeligheten varierer denne med hastighet og last. Brukt 94,5% i NULLFIB2 delrapport 2. Verdiet er rundet ned til 94%. Verdiet er også sjekket mot litteratur innenfor jernbanekjøretøy.
Hydrogentanker og brenselceller	55%	Verdi basert på uttalelse fra eksperter på hydrogenteknologi fra SINTEF.

Motor og generator (diesel)	40%	Verdi basert på uttalelse fra eksperter på dieselmotorer fra Norske tog. Verdiet er også sjekket mot litteratur innenfor jernbanekjøretøy.
-----------------------------	-----	--

I denne sammenheng er det viktig å skille mellom kjøretøyets evne å regenerere energi fra elektrodynamisk bremsing med motorene, og infrastrukturens evne til å ta vare på den energi som den får matet til seg fra kjøretøyenes strømvagter. Det er antatt at den samme virkningsgrad appliseres i begge retningene på energiens flytretning, og at den effektive energien ved elektrodynamisk bremsing reduseres basert på virkningsgraden i Tabell 3.

For infrastrukturen er det antatt at den elektriske infrastrukturens reseptivitet, eller mottaksevne, er 40%. Dette betyr at infrastrukturen vil kunne ta vare på 40% av den energien som kjøretøyet ønsker å mate tilbake til infrastrukturen. Denne størrelsen er konstant og dermed uavhengig av kjøretøyets effekt. Dette representerer imidlertid en forenklet tilnærming, da mottaksevne er en kompleks størrelse som er avhengig av flere faktorer, bl.a. hvor mange kjøretøy som trafikkerer den samme elektriske strekningen.

Kjøremotstand

Se kapittel 2.1.1 for forklaring av kjøremotstandskoeffisienter.

Tabell 4: Kjøremotstandskoeffisienter brukt i simuleringene og NULLFIB2.

Koeffisient	KVU GREEN	NULLFIB2
Regiontog i distrikt		
A [N]	968	-
B $\left[\frac{N}{m/s}\right]$	30	-
C $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$	4	-
Regiontog		
A [N]	2 143	-
B $\left[\frac{N}{m/s}\right]$	61	-
C $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$	6	-
Fjertog		
A [N]	3 091	-
B $\left[\frac{N}{m/s}\right]$	88	-
C $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$	8	-
Godstog		
A [N]	15 788	16 563
B $\left[\frac{N}{m/s}\right]$	268	248
C $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$	49	47,95

Batteristørrelse for hvert konsept

Som det fremgår i delkapittel 2.1.4, så har batterikjøretøy en begrenset rekkevidde avhengig av flere egenskaper, hvor batterienes energikapasitet er en av disse. I denne utredningen, så har det blitt lagt til grunn batteristørrelser for hvert enkelt maltog. Disse gjengis i tabellen nedenfor, inkludert begrunnelse til hvorfor den benevnte størrelsen er forutsatt. Det bemerkes at denne KVV-en ikke har til formål å spesifisere hvor store batterier som bør installeres i kjøretøyene som anskaffes for hver enkelt bane. Formålet er å finne et rimelig del-elektrifiseringskonsept basert på hva som kan anskaffes og er rimelig å anta for hver kjøretøykategori. Gjennom videre optimaliseringsarbeid kan det komme frem at enkelte linjer har behov for en noe justert batteristørrelse.

Tabell 5: Batteristørrelse, batterikjøretøy

Togkategori	Batteristørrelse [kWh]	Forklaring
Regiontog i distrikt	400	Tilgjengelige produkter på markedet.
Regiontog	800	Tilgjengelige produkter på markedet.
Fjerntog	1300	Tilgjengelige produkter på markedet. Justert for fjerntogets lengde og vekt.
Godstog (godsløk)	2600	Dette drøftes i Alternativanalyse, hovedrapport kapittel 8.5.

Tabell 6: Batteristørrelse, hydrogenkjøretøy

Togkategori	Batteristørrelse [kWh]	Forklaring
Regiontog i distrikt	200	Basert på Alstom Coradia iLint og nødvendig effektbehov.
Regiontog	400	Skalert fra Alstom Coradia iLint basert på lengde og vekt
Fjerntog	600	Skalert fra Alstom Coradia iLint basert på lengde og vekt
Godstog (godsløk)	800	Anatt størrelse utifra persontogene og vekten på et slikt høyeffektbatteri.

Tabell 7: Batteristørrelse, dieselskjetøy

Togkategori	Batteristørrelse [kWh]	Forklaring
Regiontog i distrikt	50	Skalert fra Type-76 basert på lengde og vekt
Regiontog	100	Basert på Type-76 (Mal-tog, diesel-hybrid) som har 112 kWh installert.
Fjerntog	150	Skalert fra Type-76 basert på lengde og vekt
Godstog (godsløk)	200	Anatt størrelse utifra persontogene og vekten på et slikt høyeffektbatteri.

2.2.2 Infrastruktur

I utredningen simuleres det energiforbruk på et representativt utvalg av de persontog og godstog som går på de ikke-elektrifiserte strekningene. Ettersom enkelte av togene også går på deler av strekninger som allerede er elektrifisert, så vil også deler av Dovrebanen være med i grunnlaget for infrastrukturdata. Det har blitt innhentet banedata fra Bane NOR på følgende strekninger:

- Nordlandsbanen
- Rørosbanen
- Solørbanen
- Raumabanen
- Dovrebanen

For hver banestrekning ble banedataene som definerer det vertikale profilet (gradient) brukt. Dataattributtene brukt i simuleringene er listet opp nedenfor.

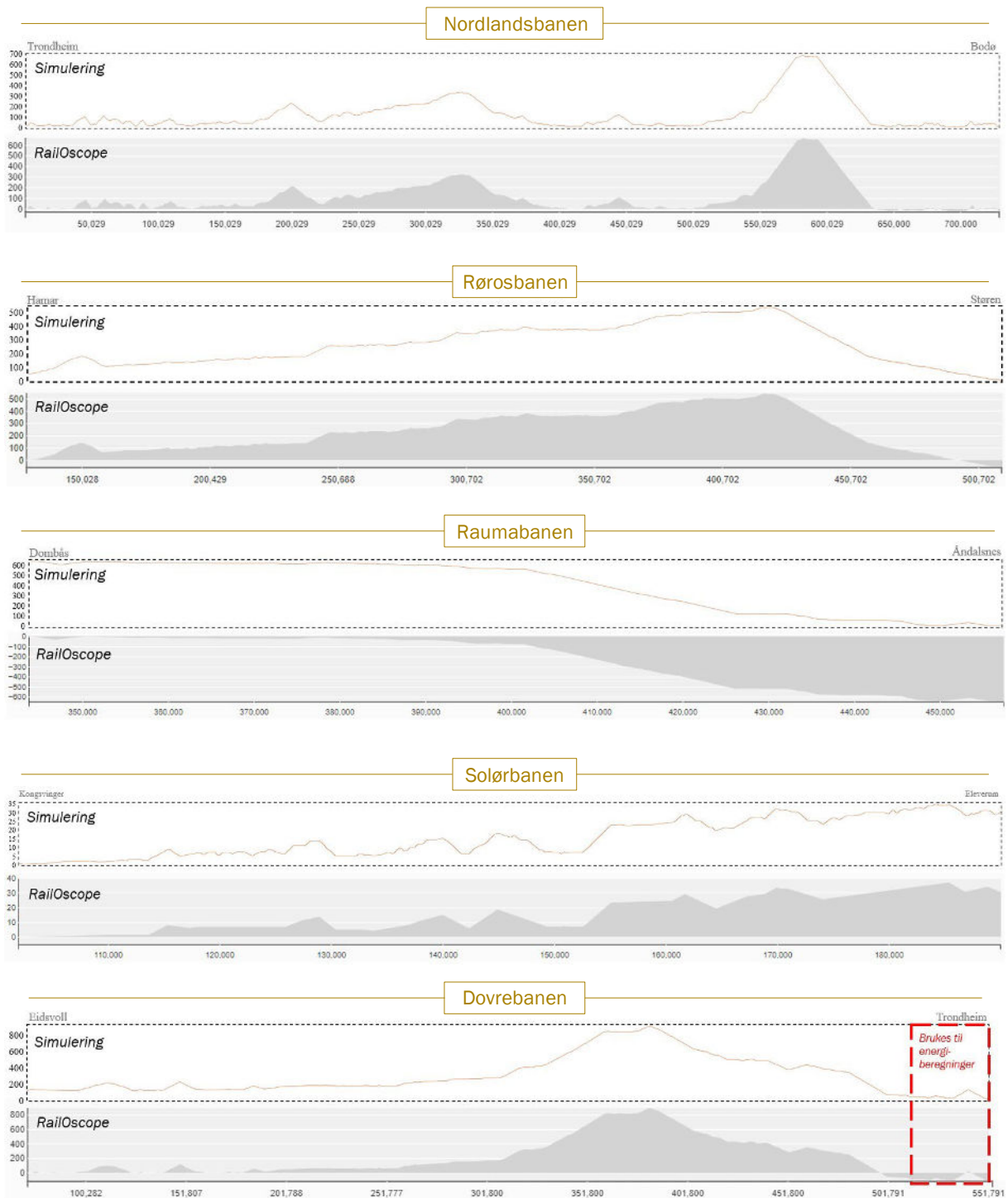
- Gradient (‰)
- Hastighetsprofil normal (km/t)
- Hastighetsprofil pluss (km/t)
- Stasjoner (plattformsnittpunkt)
- Eksisterende/besluttet elektrifisering
- Tunneler (påvirker ikke energiforbruk, er kun for grafisk illustrasjon og analyse)
- Overgangsbruer (påvirker ikke energiforbruk, er kun for grafisk illustrasjon og analyse)



Figur 13: Ikke-elektrifiserte baner inkludert i studien.

Gradient

Figur 14 nedenfor angir en visuell sammenligning mellom den topografiske kurven fra simuleringene og den samme kurven fra RailOscope for hvert bane. En slik sammenligning gjøres for å kontrollere at det er hentet ut riktige seksjoner mellom de riktige stasjonene, og at dataene er håndtert riktig.



Figur 14: Topografi sammenligning. Merk at nullpunktet for simuleringene er definert fra det laveste punktet på banen mens nullpunktet er definert fra startpunktet i grafene fra railOscope.

Hastighetsprofil

I banedata fra Bane NOR er det inkludert to hastighetsprofiler for hver bane; normal og pluss. Normal blir brukt for simuleringer av godstog, mens for persontogene brukes pluss.

Hastighetsprofilene vises i kapittel 5 hvor simuleringresultatene for hver bane og for et utvalg av simuleringer presenteres.

Stasjoner og kryssinger

I banedata fra Bane NOR er det inkludert lokasjoner for noen stasjoner og kryssingsspor, men ikke alle. For å kvalitetssjekke plasseringene av disse og at alle relevante stopp er inkludert, så er det sjekket tjenesteruteboken for hver bane, publisert av Bane NOR. Der ble det hentet ut informasjon, og hvor den informasjonen vurderedes å være mer pålitelig enn det fra Bane NORs banedata.

I tjenesteruteboken ble det også sjekket hvilke stasjonsstopp som er rimelig å inkludere for hver persontoglinje. Det er antatt 60 sekunder stopp for hver stasjon. Se Figur 18 for illustrasjon over hvor togene stopper på de simulerte strekningene.

Det er ikke analysert stopp på kryssingsspor i dette arbeid, og slike stopp er derfor heller ikke inkludert i simuleringene, verken for persontogene eller godstogene. For godstogene er det kun for Nordlandsbanen hvor det er antatt et antall stopp på stasjonene på banen.

Eksisterende/besluttet elektrifisering

I prosjektet er det blitt inhentet informasjon fra Bane NOR om hvilke strekninger som det er besluttet å elektrifisere. Dette gjelder fra Trondheim opp til Steinkjer. Denne strekning er antatt å allerede være elektrifisert i simuleringene, slik at den vil benyttes som del-elektrifisering i alle konsepter untatt hel-elektrifiseringskonseptet (hvor hele banen er elektrifisert).

Tunneler og overgangsbruer

For tunneler og overgangsbruer er det innhentet data fra Bane NOR og som også er sjekket mot data fra tidligere NULLFIB-prosjekt. Disse dataene invirker ikke i simuleringen i den mening at det påvirker kjøretøyet. Det er kun brukt for å kunne inkludere informasjonen i de grafer som produseres.

2.3 Nøyaktighetsanalyse

I nøyaktighetsanalysen blir det analysert hvilken steglengde som vurderes å gi tilstrekkelig nøyaktige resultater. Simuleringsverktøyet bygger på at strekningen diskretiseres i ekvidistante delstrekninger. Jo kortere diskretiseringer som brukes, jo mindre blir trunkeringsfeilen i resultatene. Når skrittlengden blir liten, blir det imidlertid flere ligninger som skal løses og dermed mere tid- og ressurskrevende å utføre simuleringen. Derfor er det av interesse å finne ut hvilken steglengde som gir tilstrekkelig nøyaktighet for resultatene.

Nøyaktigheten analyseres ved å beregne den relative endringen i verdi for et utvalg av mengdene i resultatene når steglengden halveres. De mengder som analyseres trenger å være mengder som akkumuleres over simuleringens gang og derfor har et akkumulert trunkeringsfeil.

$$\text{Relativ endring} = \frac{(\text{Resultat fra distanssteg } x) - (\text{Resultat fra distanssteg } 2x)}{\text{Resultat fra distanssteg } 2x}$$

Resultatene som analyseres er verdiene i mengdene ved slutten av simuleringen. Nøyaktighetsanalysen gjennomføres for suksessivt halverede steg, og analysen ender i en steglengde hvor tilstrekkelig nøyaktighet i form av relativ endring er oppnådd. Når steglengden halveres så minker den relative endringen i slutverdi, og en konvergens kan skilles. Gjennom å analysere hvor stort den relative endringen er for hver halvering, så gir det også svar på hvor stort trunkeringsfeilen er i resultatet.

2.4 Validering av simuleringsmodell

Valideringen av simuleringsmodellen innebærer at resultatene sammenliknes med målinger av energi fra virkelig drift og hvor kjøretøyet som blir brukt i simuleringene etterlikner det virkelige kjøretøyet. Hensikten med denne analysen er å validere at simuleringsmodellen gir resultater som er i tråd med virkelig energiforbruk fra energimålinger, og at modellen ikke kun er teoretisk korrekt, men også i praksis.

Valideringen gjennomføres ved hjelp av energimålinger av et godslokomotiv som er fremført på Nordlandsbanen, og dette forklares nærmere i påfølgende kapittel. Mengden strekninger og kjøring som anvendes i valideringen må velges varsomt, for å holde arbeidsomfanget på et håndterbart nivå samtidig som kvaliteten på valideringen ivaretas.

2.4.1 Energimålinger fra CargoNet

Energimålinger til bruk i valideringen er foretatt på lokomotiv av type CD312. Disse benyttes av CargoNet til kombitrafikk på Nordlandsbanen. Målingene ble utført i april 2021, og Tabell 8 gir en sammenstilling av tidspunkt for og energiforbruket i målingene. Merk at tabellen angir samtlige utførte målinger og at det kun benyttes et utvalg av disse i analysen, disse presenteres i Tabell 10.

Tabell 8: Resultater fra energimålinger

Tidspunkt fra	Tidspunkt til	Tidsforbruk h	Distanse	Energi traksjon MWh	Energi generator MWh	Vekt	Lokomotiv
09-04-21 13:44	10-04-21 6:10	16,43	Bodø- Trondheim	8,8	8,7		1
16-04-21 7:22	16-04-21 20:10	12,80	Trondheim -Bodø	11,4	11,3		1
16-04-21 22:02	17-04-21 10:19	12,28	Bodø- Trondheim	11,8	11,8		1
17-04-21 7:14	17-04-21 21:57	14,72	Trondheim -Bodø	13,1	13,0		1
19-04-21 18:57	20-04-21 9:09	14,20	Trondheim -Bodø	10,3	10,3		1
20-04-21 9:22	20-04-21 22:05	12,72	Bodø- Trondheim	10,0	10,0		1
28-04-21 7:27	28-04-21 21:19	13,87	Trondheim -Bodø	11,5	11,5		1
28-04-21 20:11	29-04-21 10:35	14,40	Bodø- Trondheim	12,0	12,0		1
30-04-21 18:58	01-05-21 6:32	11,57	Trondheim -Bodø	12,7	12,7		1
01-05-21 17:38	02-05-21 4:21	10,72	Bodø- Trondheim	10,5	10,5		1
02-05-21 7:24	02-05-21 20:08	12,73	Trondheim -Bodø	9,9	9,9		1
03-05-21 7:44	03-05-21 22:30	14,77	Bodø- Trondheim	11,1	11,0		1
04-05-21 7:47	04-05-21 19:57	12,17	Trondheim -Bodø	12,1	12,0		1
09-04-21 8:57	09-04-21 22:10	13,22	Bodø- Trondheim	10,4	10,5		6
10-04-21 10:05	10-04-21 19:32	9,45	Trondheim -Bodø	9,3	9,4		6
16-04-21 19:13	17-04-21 7:14	12,02	Trondheim -Bodø	13,0	13,1		6
17-04-21 17:58	18-04-21 4:12	10,23	Bodø- Trondheim	10,7	10,9		6
18-04-21 7:05	18-04-21 20:11	13,10	Trondheim -Bodø	9,2	9,3		6
19-04-21 7:55	19-04-21 22:18	14,38	Bodø- Trondheim	10,8	10,9		6
25-04-21 8:10	25-04-21 19:21	11,18	Trondheim -Bodø	9,1	9,2		6
26-04-21 8:13	26-04-21 22:07	13,90	Bodø- Trondheim	11,3	11,4		6
27-04-21 8:00	27-04-21 20:08	12,13	Trondheim -Bodø	11,2	11,3		6
27-04-21 20:08	28-04-21 10:17	14,15	Bodø- Trondheim	11,9	12,0		6
28-04-21 19:39	29-04-21 7:16	11,62	Trondheim -Bodø	12,2	12,3		6
29-04-21 7:16	29-04-21 22:25	15,15	Bodø- Trondheim	12,1	12,2		6
30-04-21 6:50	30-04-21 19:34	12,73	Trondheim -Bodø	11,6	11,7		6
30-04-21 22:25	01-05-21 9:54	11,48	Bodø- Trondheim	10,8	10,8		6
Høyeste:				13,0	13,1		
Laveste:				8,8	8,7		

Energiforbruket til traksjon varierer mellom 8,8 og 13 MWh. Dette betyr at den mest energikrevende turen har 48% høyere energiforbruk enn den minst energikrevende. Siden samme lokomotivtype benyttes i målingene skyldes differansen i hovedsak to faktorer:

- Togets vekt
- Togets utnyttelse av hastighetsprofilen (som også er et resultat av kjørestil)

Togets utnyttelse av hastighetsprofilen er lagret sammen med energimålingen, derfor kan valideringen ta høyde for denne faktoren gjennom å gjenskape hastighetsprofilen som ble brukt ved den spesifikke kjøringen. Det fremgår ikke av energimålingene hvilken togvekt som var aktuell da målingene ble utført. Dette er en størrelse som er etterspurt i etterkant for et utvalg av energimålingene. Vedlegg A gjengir togvekt og tog lengde fra dette utvalget av kjøringer.

2.4.2 Strekningene som brukes for validering

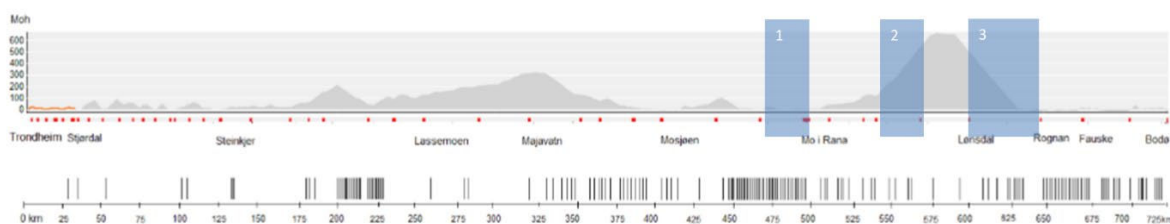
Det er valgt tre delstrekninger på Nordlandsbanen til bruk i valideringen. Disse er markert i Figur 15 og Figur 16 nedenfor og presentert som Seksjon 1-3 i

Tabell 9 under. Hensikten med valget av disse har vært å inkludere strekninger med:

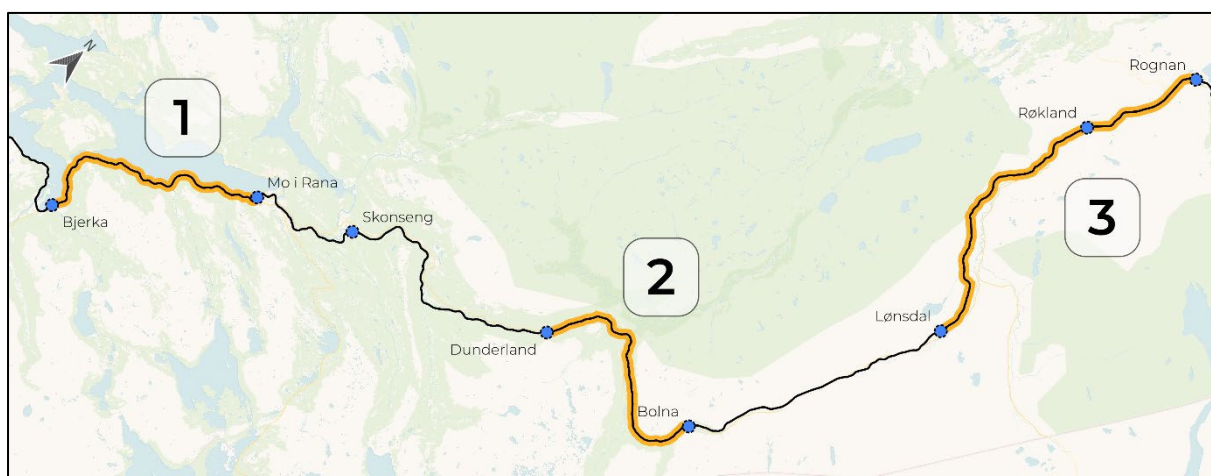
- oppoverbakke - for å sikre at modellen modellerer tilsvarende akselerasjon korrekt
- nedoverbakke - for å sikre at modellen modellerer tilsvarende bremsing korrekt
- relativt flate spor - for å sikre at togets egenskaper ved lavere effektforbruk til motorene modelleres korrekt.

Tabell 9: Seksjoner som er brukt til validering av simuleringmodell.

	Rute	Km-løp	GPS				Lengde på strekning
			Latitude fra	Longitudo fra	Latitude til	Longitudo til	
Seksjon 1	Bjerka – Mo i Rana	467,0 – 497,0	66,136902	13,82557	66,309601	14,133065	30,0 km
Seksjon 2	Dunderland – Bolna	542,7 – 570,3	66,449043	14,843632	66,493385	15,237699	27,6 km
Seksjon 3	Lønsdal – Rognan	602,0 – 646,4	66,742821	15,462675	67,092201	15,393857	44,3 km



Figur 15: Topografi, stasjonene (rødt), tunnelene (vertikale stolper) og validerings-seksjonene (blå) langs Nordlandsbanen. Kilde: Bilde fra railOscope med tillegg av forfatter.



Figur 16: Validerings-seksjon 1, 2 og 3 i oransje på Nordlandsbanen.

2.4.3 Kjøringer, energimålingene og format

Målingene brukt i valideringen

Det er valgt tre forskjellige kjøring, og disse er valgt for å få forskjellige:

- Tidspunkter,
- retninger (1 av turene går i den andre retningen),
- totale energiforbruk på hele strekningen,
- togvekt, og
- lokomotiver.

Resultatet fra kjøringene er gjengitt i Tabell 10. Merk at to av kjøringene har samme lokomotiv.

Tabell 10: Kjøringene brukt til validering

Kjøring	Tidspunkt fra	Tidspunkt til	Tidsforbruk (h)	Rute	Energi traksjon MWh	Energi generator MWh	Lokomotiv
1	09-04-21 13:44	10-04-21 6:10	16,43	Bodø - Trondheim	8,8	8,7	1.
2	16-04-21 7:22	16-04-21 20:10	12,80	Trondheim - Bodø	11,4	11,3	1.
3	17-04-21 17:58	18-04-21 4:12	10,23	Bodø - Trondheim	10,7	10,9	6.

Fra dette kan det konstateres at kjøring 1 burde ha en lavere togvekt enn kjøring 2 og 3, selv om også hastighetsprofilen påvirker resultatet, fordi energiforbruket er lavere. Det skal også noteres at tidsforbruket for kjøring 1 er 6 timer mer enn for kjøring 3. Lavere hastighet gir også lavere energiforbruk per kilometer (fordi kjøremotstandet øker med økt hastighet), noe som også kan forklare forskjellen i energiforbruk. Men det kan også være kryssinger som er grunnen til forskjellen i tidsforbruk.

For disse kjøringene så har Bane NOR levert informasjon om togvekten og tog lengden for spesifikt disse kjøringene. Disse finnes i Vedlegg A.

CargoNet har hatt måleenheter installert på to av sine godslokomotiv og foretatt energimålinger som presentert i kapittel 2.4.1. Den informasjonen fra disse målingsenheter som brukes i dette prosjektet er:

- Dato og tid (på format yyyy-mm-dd hh:mm:ss)
- Hovedgeneratorens
 - Spenning
 - Strøm
- Effektforbruk på motorene
- Hastighet (odometri)
- Latitude og longitude

Fra denne informasjonen så kan det beregnes andre mengder som brukes i valideringen (for sammenligningen med simuleringsresultat). Disse er:

- Tid mellom hver tidssteg
- Avstand kjørt mellom hver tidssteg
- Akkumulert avstand
- Akkumulert energiforbruk fra hovedgeneratoren

Gjennom å sjekke GPS-koordinater så kan start- og slutt punkt for valideringsstrekningene løftes ut, og hastighetsprofilen mellom disse punkter blir gjenskapt i simuleringsverktøyet. Det sjekkes også så at høydedata (gradient) er (cirka) den samme mellom måling og simulering.

2.4.4 Forutsetninger i valideringssimuleringene

Det er antatt at energimålingene viser den riktige energiforbruket fra kjøringen. Det er også, etter samråd med Bane NOR, antatt at energien som brukes fra energimålingene er målt på den inngående akselen til hovedgeneratoren. I simuleringene blir det antatt at hovedgeneratoren forsyner en likestrøms likestrømledd som i sin tur forsyner vekselrettere til motorer og hjelpeutstyr.

2.4.5 Hva som vil bli analysert for å validere modellen og hvorfor

Det som vil analyseres er at:

- Akkumulert energiforbruk (fra generatoren) følger hverandre (de går så mye som mulig parallelt og tett på hverandre) for målinger og simuleringer
 - Dette samtidig som hastighetsprofilen gjenskapes så nøyaktig som mulig
 - Dette samtidig som effekten til motorene også gir godt samsvar
 - Dette samtidig som høydeprofilen har godt samsvar mellom målinger og simuleringer

Det skal noteres at det som er viktig med denne type av validering ikke nødvendigvis er at det akkumulerte energiforbruket ender opp på den samme verdi. Det som skjer mellom start- og slutt punktet er av minst like (om ikke enda mer) betydelse, fordi det er der som modellen viser hvis den fungerer som tiltenkt eller hvis samsvaret i den endelige verdien kun var en tilfeldighet.

Det er i noe sammenheng vanskelig å bruke kvantitative metoder for å vurdere samsvar mellom målinger og simulering, fordi de kvantitative resultatene ikke nødvendigvis gir mye av verdi (f.eks. beregning av root mean square på differensen mellom målt verdi og simulert verdi). Det som er vurdert av å gi verdi i denne utredningen er en kvalitativ vurdering av hver sammenligning av simulering og energimåling. Dette vil også gi økt verdi i den mening at det kan identifiseres de spesifikke forhold som muligvis resulterer i dålig samsvar, uten å være i behov for å kvantifisere avviket.

2.5 Simuleringer for beregning av elektrifisering og energiforbruk

Dette kapittelet beskriver hvordan valget av del-elektrifisering er foretatt, og hvordan energiforbruket er beregnet knyttet til hver toglinje og konsept.

2.5.1 Val av seksjoner for del-elektrifisering

Batteri med del-elektrifisering

Metodikken for valg av elektrifiserte strekninger var for batterikonseptet en iterativ prosess utført i simuleringssprogramvaren med et godstog på 1200 tonn som dimensjonerende kjøretøytype. Utgangspunktet har for flere av banene vært den elektrifisering som ble foreslått i Jernbanedirektoratets tidligere arbeid med NULLFIB2, og hvor elektrifiseringen ble justert for å få en rimelig bruk av energien i batteriene. For noen baner er det foreslått en elektrifisering som ikke er basert på NULLFIB2.

Kjøretøyet ble simulert mellom endepunktene på hver bane, som i denne utredningen blir:

- Trondheim-Bodø (for Nordlandsbanen)
- Hamar-Elverum-Støren (for Rørosbanen)
- Hamar-Elverum-Kongsvinger (for Solørbanen)
 - For Solørbanen er det foreslått hel-elektrifisering grunnet banens korte lengde og mulighet for forsyning av hele banen med kun en matestasjon.
- Dombås-Åndalsnes (for Raumabanen)

Det ble i utgangspunkt simulert med batterier som tilsvarer høyenergibatterier, og dette ble gjort ved å sette C- og D-verdien til 2. Resultatene fra de simuleringene ble basis for del-elektrifiseringskonseptet (se kapittel 5.8 for resultater fra simulering med høyenergibatterier). Det skal noteres at det i løpet av prosjektet ble vurdert at det for beregning av energiforbruk og investeringskostnader burde antas at det er høyeffektbatterier som vil bli brukt i virkeligheten for å oppnå en rimelig levetid på batteriene, men også ivareta jernbanens behov til høy sikkerhet, hvor høyeffektbatterier er generelt sikrere (mot oppvarming og termisk rusning) sammenlignet med høyenergibatterier.

Siden gitt pris per ny elektrifisert kilometer jernbane er fast (og ikke avhengig av mengden elektrifisering), ble elektrifiseringen dimensjonert med mål om å minimere mengden elektrifisering samtidig som konseptet forblir robust.

Faktorer som påvirket dimensjoneringen av elektrifiseringen:

- Egenskaper og virkningsgrader til kjøretøyet og batteriet
- Tunneler og overgangsbroer med konflikt for KL
 - Det skal presiseres at det ble brukt det dataset som ble tatt fram tidlig i arbeidet, hvor videre arbeid etter at del-elektrifiseringen ble bestemt viste at noen tunneler og overgangsbruere ikke begrenser profilen for elektrifisering og derfor ikke tenger noe tiltak.
- Energikrevende strekninger (f.eks. Saltfjellet)
- Trafikkopplegg for persontog og godstog

Verdivurdering av reisetidsgevinst ble ikke evaluert sammen med andre faktorer. Reisetidsgevinster antas imidlertid å falle sammen med energikrevende strekninger fordi motoreffekten under kontaktledning er høyere enn motoreffekten på batteristrekning.

Hydrogen med del-elektrifisering

Det er tre hovedgrunner til å delvis elektrifisere en linje som betjenes av hydrogenkjøretøy.

- Lavere driftskostnader (høyere virkningsgrad og lavere energipris) med energi fra KL enn fra hydrogen
- Begrenset effekt ved bruk av hydrogen
- Begrensning i mengden hydrogen som kan transporteres om bord i kjøretøyet (tankvolum)

Disse tre grunnene faller godt sammen på svært energikrevende strekninger. Strategien for valg av strekninger for delelektrifisering tar derfor utgangspunkt i de strekningene som er valgt for batterikonseptet hvor de mest energikrevende strekningene er valgt og justert for hydrogendrift. Mengden elektrifisering for dette konsept er derfor mye mindre enn for batterikonseptet.

Hydrogen og diesel

For disse konseptene så blir det ikke bygget noe mer elektrifisering. Disse kjøretøy er imidlertid bimodale, slik at de benytter eksisterende elektrifisering for drift med strømtager. Dette er aktuelt mellom Støren - Lundamo - Trondheim - Stjørdal.

2.5.2 Beregning av energiforbruk for hver linje og konsept

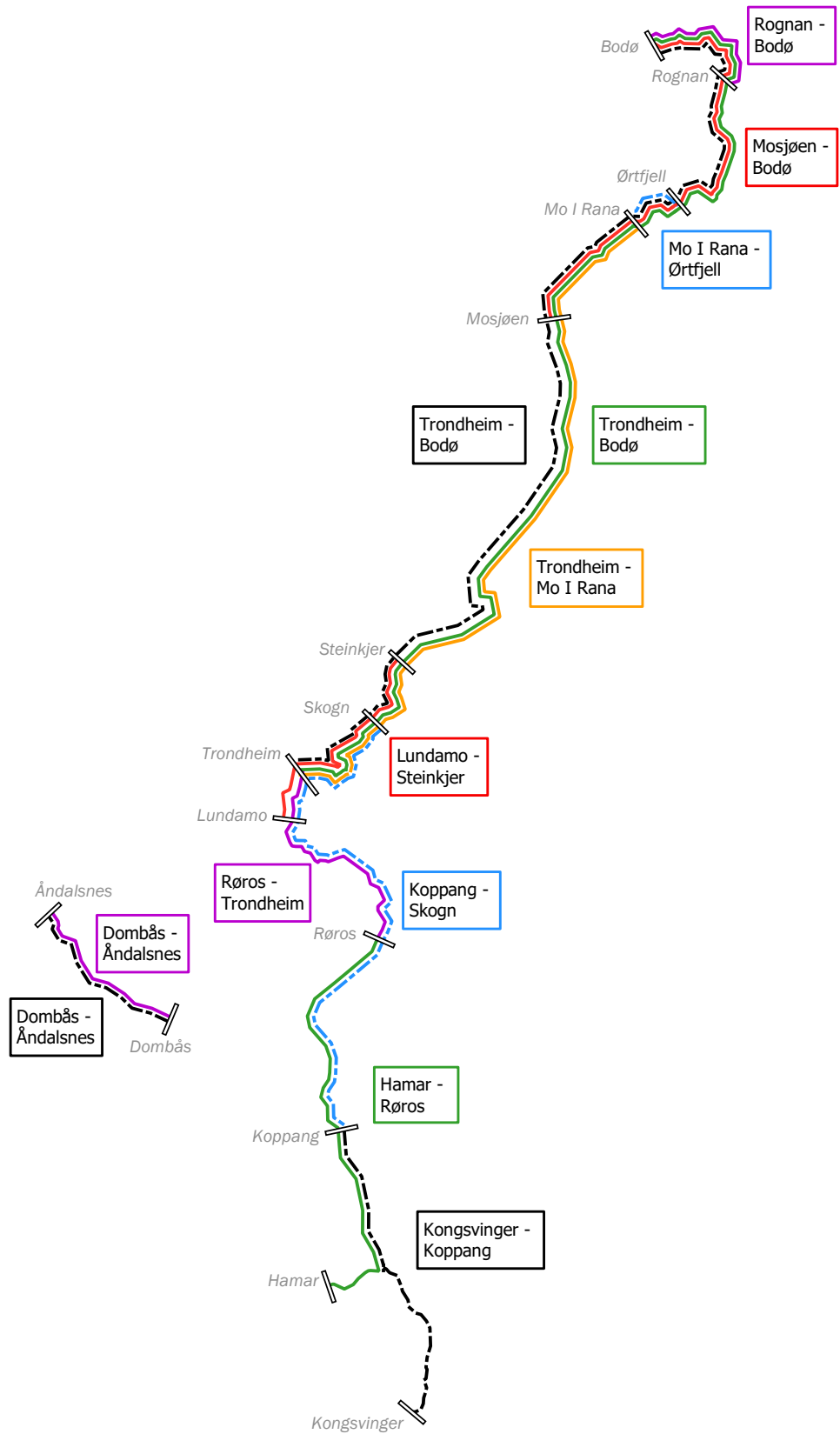
Etter at det ble valgt en elektrifisering for del-elektrifiseringskonseptene så ble det gjennomført beregninger av energiforbruket på en begrenset mengde linjer som er representativ for trafikken på de ikke-elektrifiserte strekningene.

Toglinjene ble simulert i hver retning med bruk av inngangsdata som beskrevet i kapittel 2.2 og mal-toget beskrevet i samme kapittel. For videre bruk av simuleringresultatene i prosjektet så ble det beregnet en gjennomsnittlig energiforbruk mellom hver kjøreretning.

Følgende ruter er simulert for hvert konsept i begge retninger. Disse er angitt med tekst i Tabell 11 og grafisk i Figur 17.

Tabell 11: Simulerte seksjoner.

Rute	Lengde på strekning	Bane	Trafikk	Kjøretøy
Trondheim-Bodø	727,1 km	Nordlandsbanen	Godstrafikk (GK25a)	Godstog 1200t
Mo I Rana-Ørtfjell	36,7 km	Nordlandsbanen	Godstrafikk (GSM25)	Godstog 3500t sørover, 1200t nordover
Koppang-Skogn	389,5 km	Rørosbanen, Dovrebanen og Nordlandsbanen	Godstrafikk (GST18x)	Godstog 1200t
Kongsvinger-Koppang	182,2 km	Solørbanen og Rørosbanen	Godstrafikk (GST13x)	Godstog 1200t
Dombås-Åndalsnes	114,2 km	Raumabanen	Godstrafikk (GK23)	Godstog 1200t
Dombås-Åndalsnes	114,2 km	Raumabanen	Persontrafikk (RD65)	Regiontog i distrikt
Rognan-Bodø	81,0 km	Nordlandsbanen	Persontrafikk (R75)	Regiontog i distrikt
Mosjøen-Bodø	322,7 km	Nordlandsbanen	Persontrafikk (F7)	Regiontog i distrikt
Røros-Trondheim	162,9 km	Rørosbanen og Dovrebanen	Persontrafikk (RD60)	Regiontog i distrikt
Lundamo-Steinkjer	161,9 km	Dovrebanen og Nordlandsbanen	Persontrafikk (R70)	Regiontog
Hamar-Røros	272,2 km	Rørosbanen	Persontrafikk (RD60)	Regiontog
Trondheim-Bodø	727,1 km	Nordlandsbanen	Persontrafikk (F7)	Fjerntog
Trondheim-Mo I Rana	496,3 km	Nordlandsbanen	Persontrafikk (F7)	Fjerntog

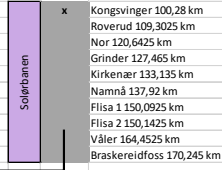


Figur 17: Trafikkopplegg, godstrafikk (stiplet linje) og persontrafikk (solid linje). Hver linje (med tilhørende boks) representerer simulert trafikk. Fargebruken har til hensikt å skille mellom linjene og angir ikke type trafikk.

2.5.3 Stasjonsstopp brukt i simuleringene

Figur 18 viser stasjonsstoppene for persontogene og godstogene. Notere at stasjoner markert med «x» betyr at toget stopper, og at tiden på stasjonen er 60 sekunder (gjelder ikke start-stasjonen hvor toget starter direkte uten opphold fra hastighet null, og slut-stasjonen hvor toget stopper og simuleringen stopper også). Stasjoner ikke markert med «x» betyr at toget passerer uten noe stopp.

	Regiontog i distrikt				Regiontog		Fjerntog		Godstog				
	RT6 Rognan- Bodo	F7 Mosjøen- Bodo	RD60 Rana- Trondheim	RD65 Dombås- Andenes	RT0 Lundamo- Steinkjer	RD60 Hamar- Rana	F7 Trondheim- Bodo	F7 Trondheim- Mo i Rana	GK25 Trondheim- Bodo	Malmog Mo i Rana- Gjettfjell	GST18 Koppang- Skopp	GK23 Dombås- Andenes	
Raumbanen				x							x		
Dombås 343,04 km				x								x	
Lesja 360,68 km				x									
Lesjaverk 379,89 km				x									
Bjørli 399,84 km				x									
Verma 418,09 km				x									
Marstein 439,16 km				x									
Åndalsnes 457,28 km				x								x	
Rorosbanen													
Hamar 126,26 km						x							
Ilseeng 135,292 km						x							
Løten 143,7625 km						x							
Elverum 158,3715 km						x							
Rudstad 175,817 km						x							
Rena 190,389 km						x							
Steinvik 203,814 km						x							
Opphus 213,874 km						x							
Evenstad 227,6625 km						x							
Stal 237,42235 km						x							
Koppang 246,88 km						x				x			
Atna 271,787 km						x						x	
Hanestad 284,9095 km						x							
Bellingmo 311,6955 km						x							
Alvdal 324,326 km						x							
Auma 337,3235 km						x							
Tynset 347,1595 km						x							
Tolga 368,1175 km						x							
Os 384,865 km						x							
Rørøs 399,1065 km			x			x							
Glåmos 412,5275 km			x										
Reitan 432,3175 km			x										
Ålen 438,0345 km			x										
Haltadalen 453,8425 km			x										
Langlete 463,7335 km			x										
Singsås 479,9075 km			x										
Kotsøy 491,351 km			x										
Rognes 498,379 km			x										
Støren 501,2 km			x										
Dovrebanen													
Krogstad Bp 504,44 km													
Hovin 507,89 km			x										
Horg Bp 511,2 km			x										
Lundamo 514,78 km			x		x								
Helgemo Bp 517,69 km			x		x								
Ler 520,49 km			x		x								
Kvål Bp 524,77 km			x		x								
Kvål 525,32 km			x		x								
Søberg 528,77 km			x		x								
Melhus Skystasjon 531,42 km			x		x								
Melhus 532,09 km			x		x								
Nypan 537,11 km			x		x								
Heimdal 541,41 km			x		x								
Kolstad Bp 544,11 km			x		x								
Selsbakk 546,44 km			x		x								
Stavne Bp 548,82 km			x		x								
Marienborg 549,95 km			x		x								
Trondheim M 550,76 km			x		x								
Skansen 551,67 km			x		x								
Nordlandbanen													
Trondheim 0,921 km / 552,87			x		x		x	x	x				
Leangen 3,3286 km			x		x								
Ranheim 7,3435 km			x		x								
Vikhammer 12,7155 km			x		x								
Midsand 18,55 km			x		x								
Hommelvik 23,14 km			x		x								
Hell 31,54 km			x		x								
Værnes 32,753 km			x		x		x	x					
Stjørdal 34,6475 km			x		x		x	x					
Skatval 41,9 km			x		x								
Langstein 50,5325 km			x		x								
Åsen 61,3965 km			x		x								
Ronglan 69,6655 km			x		x								
Skogn 75,9815 km			x		x								
Levanger 83,9265 km			x		x		x	x					
Bergsgrø 93,6525 km			x		x								
Verdal 96,272 km			x		x								
Røra 105,437 km			x		x								
Mære 112,9305 km			x		x								
Steinkjer 125,3895 km			x		x								
Stod 144,5 km			x		x								
Starrgrasmyra 170,07 km			x		x								
Jørstad 173,5365 km			x		x								
Snåsa 181,6245 km			x		x								
Agle 190,72 km			x		x								
Grong 219,562 km			x		x								
Harran 235,8275 km			x		x								
Lassemoen 254,664 km			x		x								
Namsskogan 290,2395 km			x		x								
Majavatn 321,74 km			x		x								
Svenningdal 354,49 km			x		x								
Trofors 367,1865 km			x		x								
Eitertraum 388,7 km			x		x								
Mosjøen 406,037 km		x			x				x				
Drevvatn 440,7875 km		x			x				x				
Bjerka 468,705 km		x			x				x				
Mo i Rana 497,9 km		x			x				x	x			
Skonseng 512,68 km		x			x				x				
Ørtfjell 534,63 km		x			x				x				
Dunderland 543,039 km		x			x				x				
Bolna 571,09 km		x			x				x				
Lønsdal 602,1435 km		x			x				x				
Røklund 633,875 km		x			x				x				
Rognan 647,7075 km		x			x				x				
Fauske 674,323 km		x			x				x				
Valnesfjord 685,5025 km		x			x				x				
Oteråge 704,06 km		x			x				x				
Tverlandet 709,955 km		x			x				x				
Mørkved 720,575 km		x			x				x				
Bodø 728,75 km		x			x				x				



Figur 18: Tabell som viser stasjonstoppene for person- og godstogene. Notere at stasjonens navn er etterfulgt av jernbanekilometreringen for stasjonen på den spesifikke linjen.

3 Nøyaktighetsanalyse

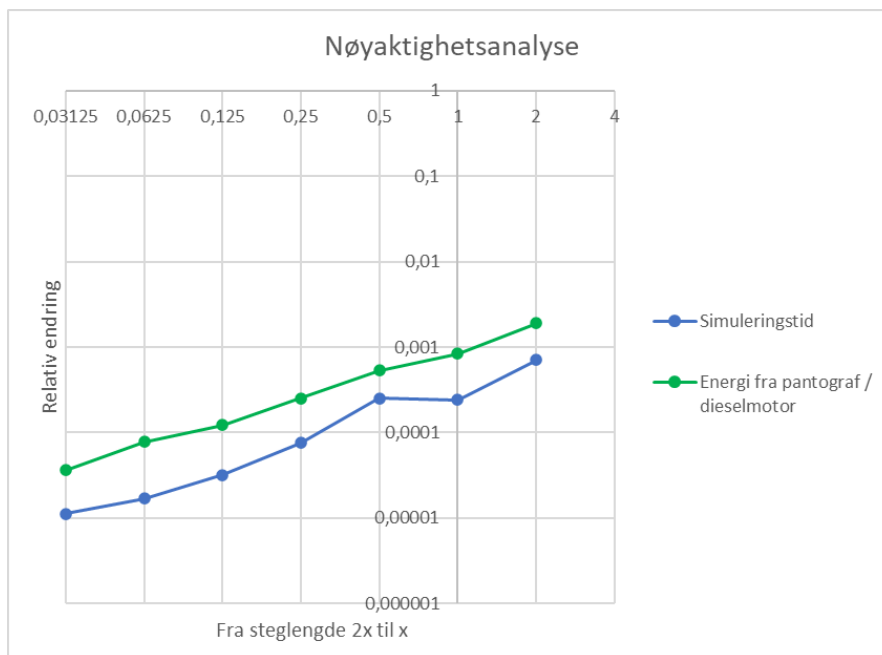
I nøyaktighetsanalysen benyttes det samme kjøretøy som i valideringen, se beskrivelse i kapittel 2.4. Analysen er gjennomført på strekningen Mo i Rana – Bjerka på Nordlandsbanen, og det blir benyttet Banedata som beskrevet i kapittel 2.2.2. Hastighetsprofilen er den samme hastighetsprofil som er blitt brukt i valideringen, noe som presenteres i kapittel 2.4.

De mengdene som analyseres er det akkumulerte energiforbruket fra dieselmotoren (eller strømvtager – det som skiller disse fra hverandre er virkningsgraden) og simuleringstiden (tiden fra Mo i Rana til Bjerka).

Analysen innebærer å se på hvordan disse mengdene endres ved endret steglengde. Det blir valgt følgende steglengder:

- 4
- 2
- 1
- 0,5
- 0,25
- 0,125
- 0,0625
- 0,03125

Disse er valgt ut fra erfaringer med hvilke steglengder som gir nøyaktige resultater, samtidig som det er numerisk håndterbart med denne typen simuleringstøytøy. Figur 19 viser den relative endringen i disse mengdene ved halvering av steglengden. Eksempelvis kan det ses at ved halvering av steglengde fra 4 til 2, så er den relative endringen i energiforbruk omtrent 0,2% (0,002). Simuleringstiden har noe lavere relativ endring, omtrent 0,07% (0,0007).



Figur 19: Nøyaktighetsanalyse

Det kan fastslås at den relative endringen følger en stadig minking for energi, og viser nesten det samme mønsteret for simuleringstid. Stigningen på grafen forteller hvor mye den relative endringen fortsatt vil minke for hver halvering av steglengden, og det kan fra denne informasjonen beregnes omtrent hvor stor trunkeringsfeilen i disse mengdene er. Det kan utledes at det kreves omtrent 4 halveringer for å redusere den relative endringen med en faktor 10. Dette gjelder for energiforbruket, og det kan dermed også (med relativt stor sikkerhet) antas at dette gjelder for simuleringstiden.

Med steglengde 1 meter som startpunkt, der vi kaller den resulterende verdien som denne steglengden gir for E_{ref} , kan det antas hvordan verdien vil endres som følge av fire halveringer:

$$E_{fire\ halveringer} = E_{ref} \cdot \left(1 + 0,001 + \frac{0,001}{2,5} + \frac{0,001}{5} + \frac{0,001}{7,5} \right) = 1,0017 \cdot E_{ref}$$

Verdien 0,001 er den relative endringen ved halvering av steglengden fra 2 til 1. Etter ytterligere fire halveringer (åtte totalt) vil det samme mønsteret gjenta seg, men med en tidel sammenliknet med kun fire halveringer. Dette betyr med andre ord at vet åtte halveringer, kommer følgende:

$$E_{\ddot{a}tte\ halveringer} = (1,0017 + 1,00017) \cdot E_{ref} = 1,00187 \cdot E_{ref}$$

Dette vil fortsette videre for hver halvering av steget fire ganger, hvilket innebærer at trunkeringsfeilen er mindre enn 0,2% relativt til verdien en infinitesimal steglengde vil gi. Den samme konklusjonen, med økt nøyaktighet, kan trekkes fra linjen som viser den relative endringen i simuleringstid. En trunkeringsfeil på 0,2% er i denne sammenheng svært lav, og det konkluderes med at en steglengde på 1 meter gir tilstrekkelig nøyaktige resultater i analysearbeidet.

4 Validering av modell

I dette kapittelet presenteres valideringsresultatene og det drøftes hvorvidt inngangsdata og simuleringresultater sikrer at modellen fungerer etter hensikten. Som en del av valideringsprosessen kan det være behov for en del inngangsdata til bruk i kalibrering for å oppnå samsvar mellom simulering og faktiske energimålinger. Årsaken til dette er at det for en del inngangsdata kan være utfordrende å finne nøyaktige tall. Eksempler på dette er:

- Virkningsgrader
- Rulle- og aerodynamisk motstand
- Vekt

Denne type av kalibrering blir veldig iterativ, særlig hvis det brukes flere turer som data skal valideres mot. I dette sammenheng så brukes det totalt 9 kjøring.

Tabellen under summerer den vekt som er angitt av Bane NOR for hver av kjøringene (se Vedlegg A). Noe som er blitt tydelig i arbeidet er at det er et avvik mellom den vekt som er rapportert, og den vekt som kan resultere i det energiforbruk som er målt. Noe av de rapporterte vektene stemmer godt overens med de resultat som kommer fra simuleringene, mens andre kjøring krever justering av vekten for å kunne reprodusere den samme resultat som målt hved kjøringen. Dette presenteres løpende i kapitlene under, og togvektene som er blitt brukt i valideringen summeres under.

Tabell 12: Kjøring for validering av modell, godstog på Nordlandsbanen. Togvekter og lengder enligt Bane NOR. *Brukt verdi, forklart i tilhørende kapittel.

	Bjerka – Mo I Rana		Bolna – Dunderland		Lønsdal – Rognan	
	Vekt [tonn]	Lengde [meter]	Vekt [tonn]	Lengde [meter]	Vekt [tonn]	Lengde [meter]
Kjøring 1	675 000	359	329 000 (452 000)*	257 (149)*	329 000 (452 000)*	257 (149)*
Kjøring 2	1 135 000	502	720 000	366	720 000	366
Kjøring 3	893 000	502	893 000	502	893 000	502

4.1 Kjøring 1

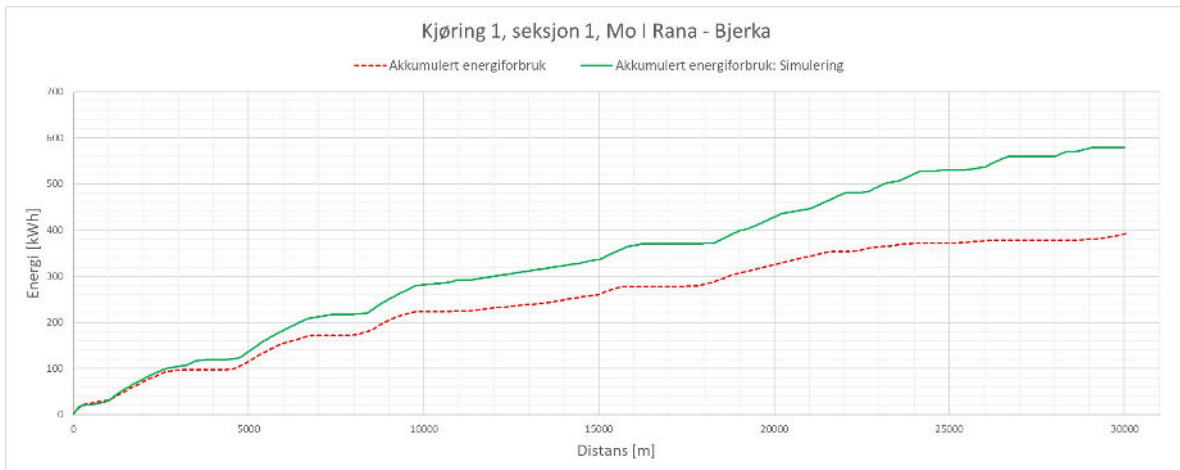
Kjøring: 1 (av 3)
Dato: 2021-04-09
Rute: Bodø-Trondheim
Lokomotiv: Nr. 1

4.1.1 Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka

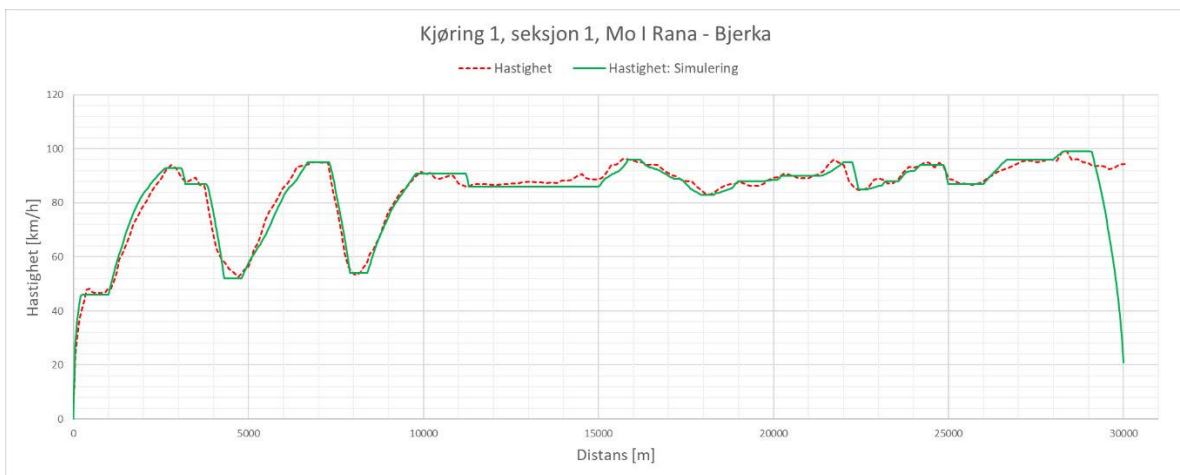
Resultat med 675 tonn togvekt

Som vist i Figur 20 er det et relativt stort avvik mellom målt energiforbruk og simulert energiforbruk. Avviket er på nesten 50%, dette til tross for at det er brukt en mer eller mindre identisk hastighetsprofil. Det som er mest rimelig å anta som årsaken til dette avviket er ulik togvekt og/eller kjøremotstand. Det kan f.eks. være utfordrende å bruke samme metode for beregning av C-koeffisient for alle godstogene fordi luftmotstand påvirkes av bl.a. hvordan containere plasseres i toget. Det er derfor utført simuleringer med noe redusert togvekt, dette forholdet beskrives i det påfølgende kapitlet.

Kjøremotstandskoeffisientene A og B påvirkes mye av antatt antall vogner som vekten er fordelt på. Dette gjør at forfatteren av denne tekst mener at en enda bedre tilpasning kan gjøres med relativt små justeringer i antatt tog lengde og antall vogner uten å risikere urimelige aksellaster. Toglengden er oppgitt av Bane NOR, og det er beregnet et antall vogner ut fra forhold beskrevet i kapittel 2.1.1.

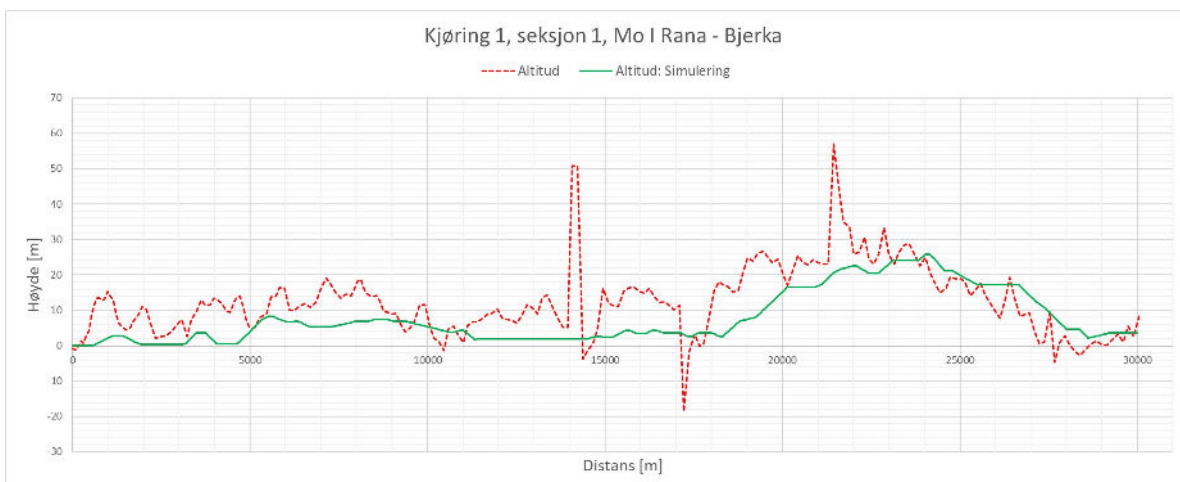


Figur 20: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk.



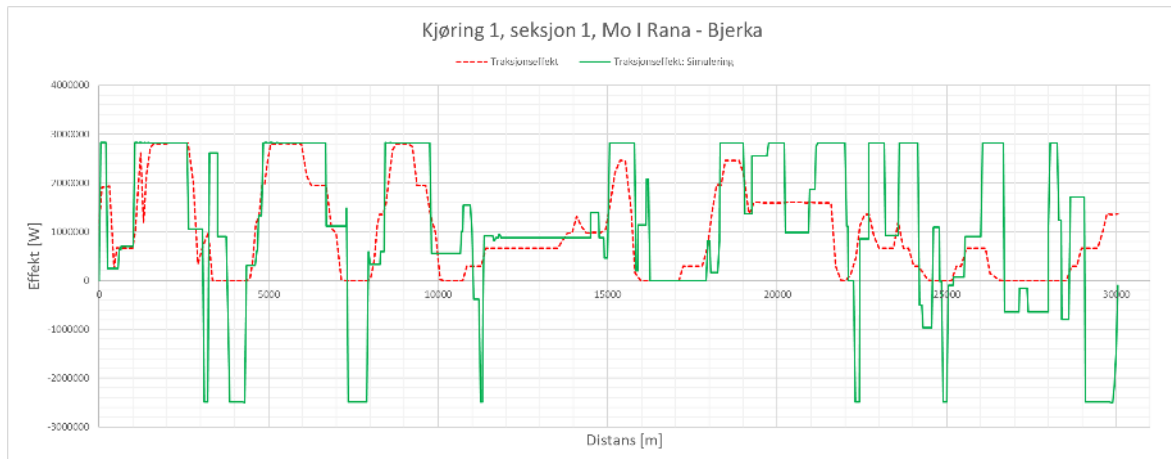
Figur 21: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Hastighet.

Høydeprofilen fra målingene (basert på GPS) varierer mer enn høydeprofilen gitt i Banedata. Det mistenkes også at det er en liten forskyvning mellom disse to datasettene, noe som kan få påvirkning hvis føreren har brukt topografien for frikjøring.



Figur 22: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Høydeprofil

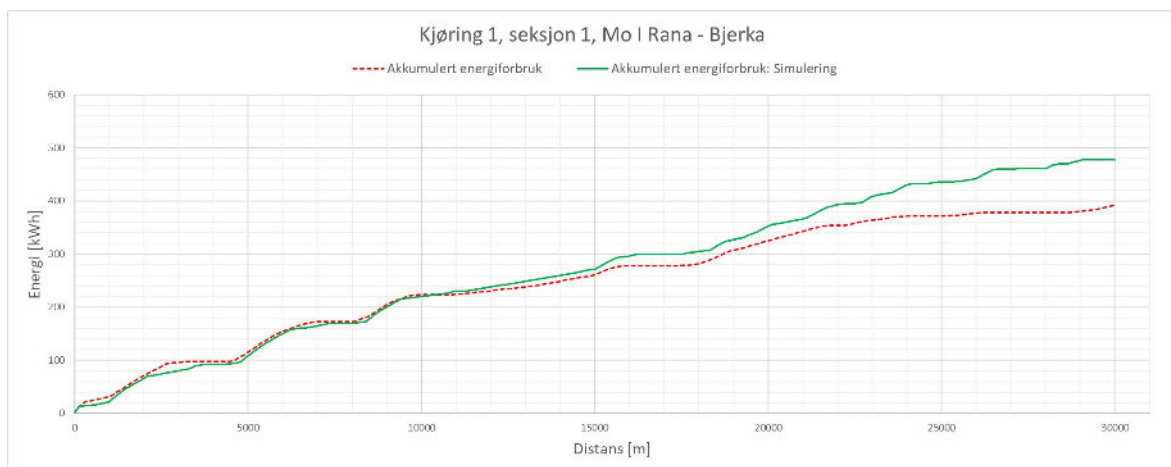
Et forhold verdt å merke seg er at motorenes effekt er vanskelig å gjenskape i simuleringene fra energimålingene. Dette skyldes at hastigheten styrer effektbehovet samtidig med at det er hastigheten som blir gjenskapt. Det kan konstateres at det er brukt mer effekt til motorene i simuleringen, særlig for den andre halvdel av kjøringen, som også forklarer hvorfor avviket i akkumulert energiforbruk blir størst på den andre halvdel.



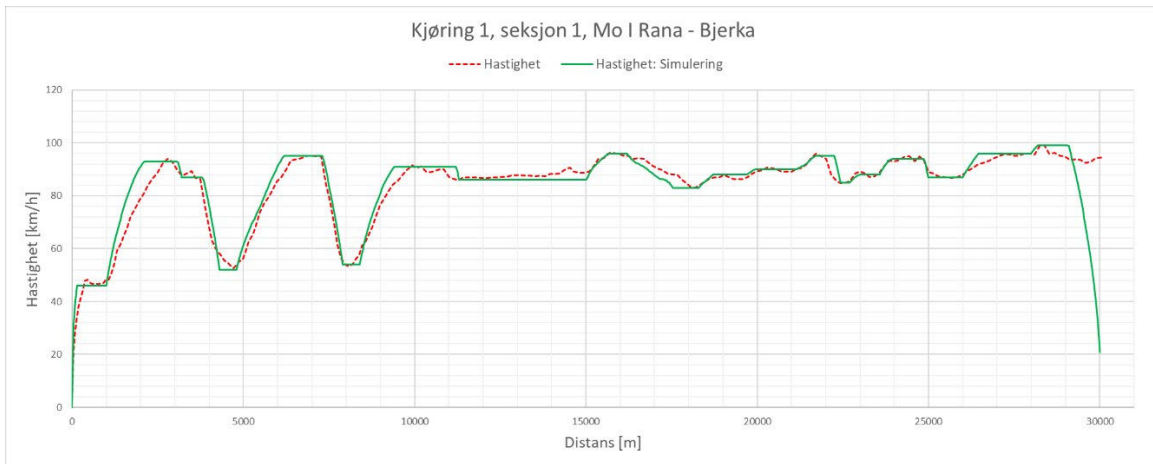
Figur 23: Validering - Kjøring 1, Seksjon 1. Traksjonseffekt.

Resultat med 462 tonn togvekt

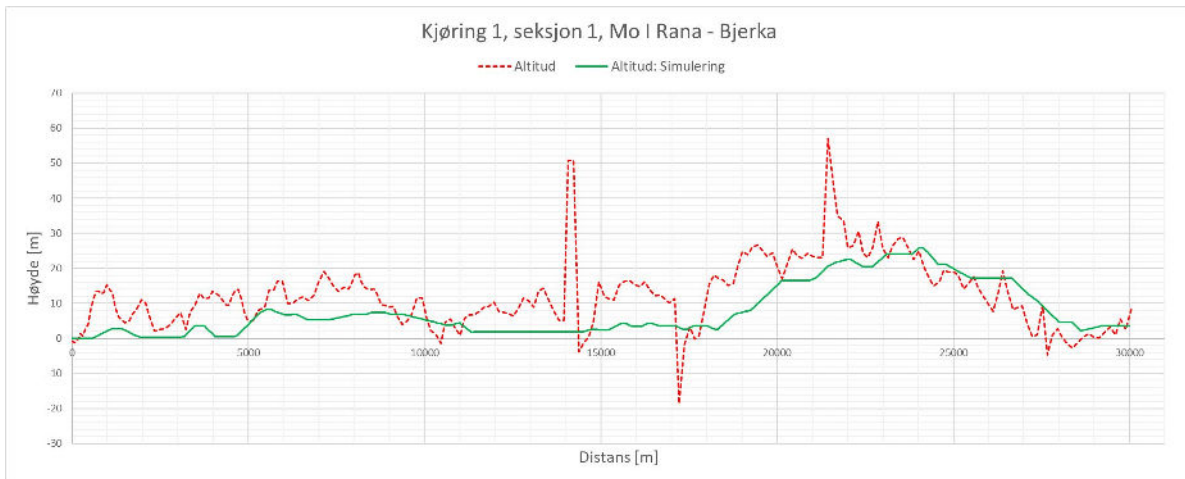
I dette eksempelet reduseres togvekten fra 675 tonn til 462 tonn. Grafene i Figur 24 viser at det er godt samsvar mellom målt og simulert energiforbruk på første halvdel av turen. Etter cirka 21 km blir avviket noe større, og det endelige energiforbruket ender på cirka 400 kWh for målingene og 480 kWh for simuleringene, noe som representerer et samlet avvik på 20%. Det er godt samsvar mellom utnyttelsen av hastighetsprofilene, men det ses av Figur 27 (som gjengir traksjonseffekten) at simuleringen bruker mer energi på slutten. Her indikerer målingene at føreren bruker en noe mer energioptimal fremdrift. Noe som også kan bidra til avviket er at det ikke er godt samsvar mellom høydeprofilen i simuleringene og målingene, noe som kan gjøre at førerens energieffektive fremføringshastighet med bruk av frikjøring ikke blir realisert på samme måte i simuleringen.



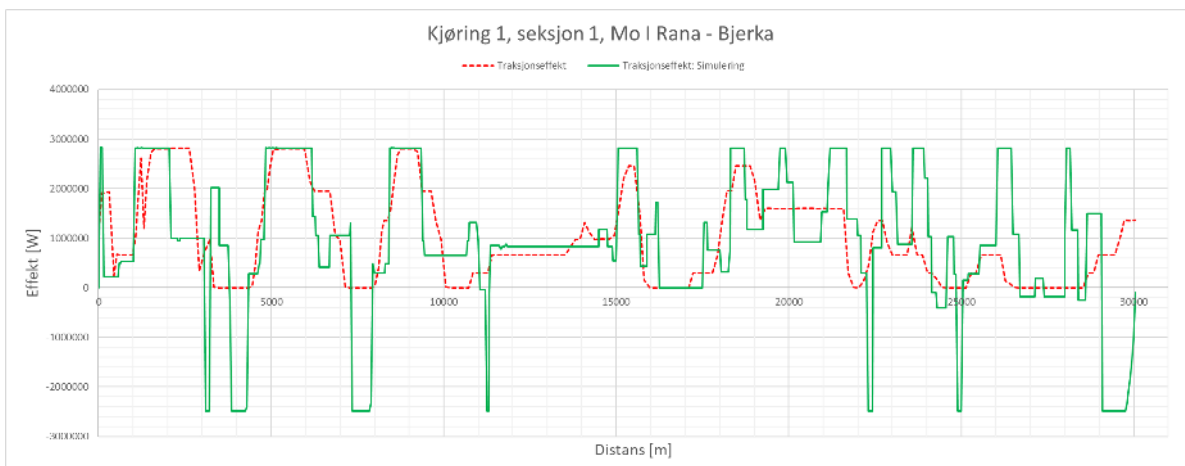
Figur 24: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk.



Figur 25: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Hastighet.



Figur 26: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Høydeprofil



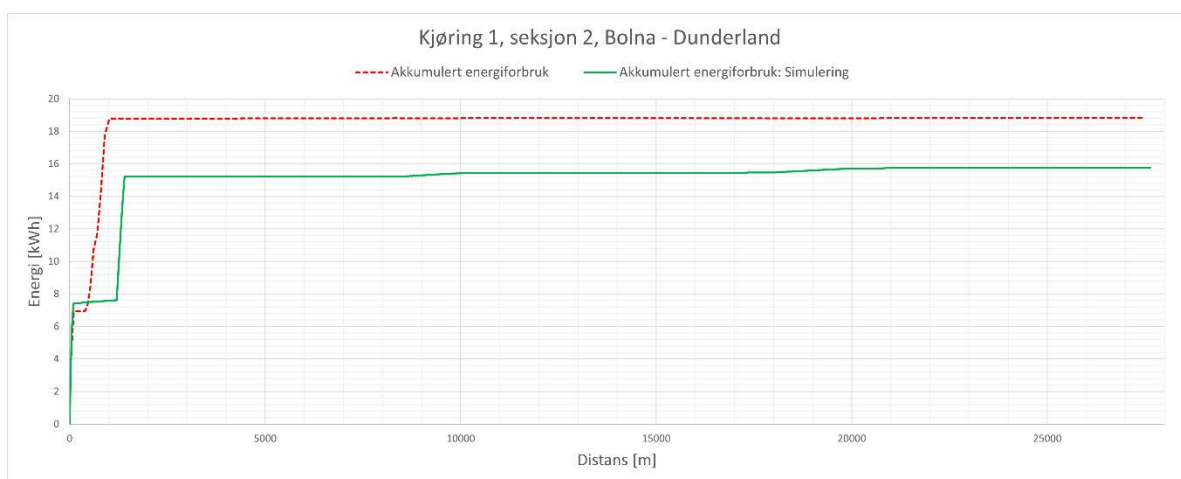
Figur 27: Validering - Kjøring 1, seksjon 1. Traksjonseffekt.

4.1.2 Seksjon 2, Bolna – Dunderland

På denne strekningen er det kjøring nedover fra Saltfjellet, noe som indikerer at traksjonsmotorene ikke vil bli brukt særlig mye, og hvor det totale energiforbruket i hovedsak påvirkes av «idling-losses», som er energitap i motorer og elektrisk utstyr selv om det ikke produseres noe trekkraft.

Det er vanlig å anta en tomvekt på 20 tonn for hver godsvogn, men med en slik antagelse vil denne kjøringen, med en totalvekt på 329 tonn og toglengthe på 257 meter, gi en negativ last med de beregningene som brukes for kjøremotstand. Ifølge systemet for rapportering av togvekt skal dette tog ha en totalvekt på 329 tonn. Dette er den siste innrapporterte vekten og er derfor gjeldende. Men det er også oppgitt vekt per vogn i systemet, og summen av vognenes vekt er 329 tonn. Dette medfører at vekten av toget ikke inkluderer lokomotivets vekt. Det er i det videre arbeidet med denne kjøringen valgt å legge til lokomotivets vekt slik at totalvekten blir 452 tonn. Det er også oppgitt at antall vogner er 7 stk., noe som derfor blir lagt til grunn for simuleringen (dette påvirker toglengthe, som er satt til 149 meter, og derfor også kjøremotstand). Den beregnede vekten per vogn er dermed rimelig i forhold til aksellast og totale togvekten.

Som vist i Figur 28 er det akkumulerte energiforbruket svært lavt. Avviket mellom resultatene fra simulering og energimåling er også lite i absolutte tall.

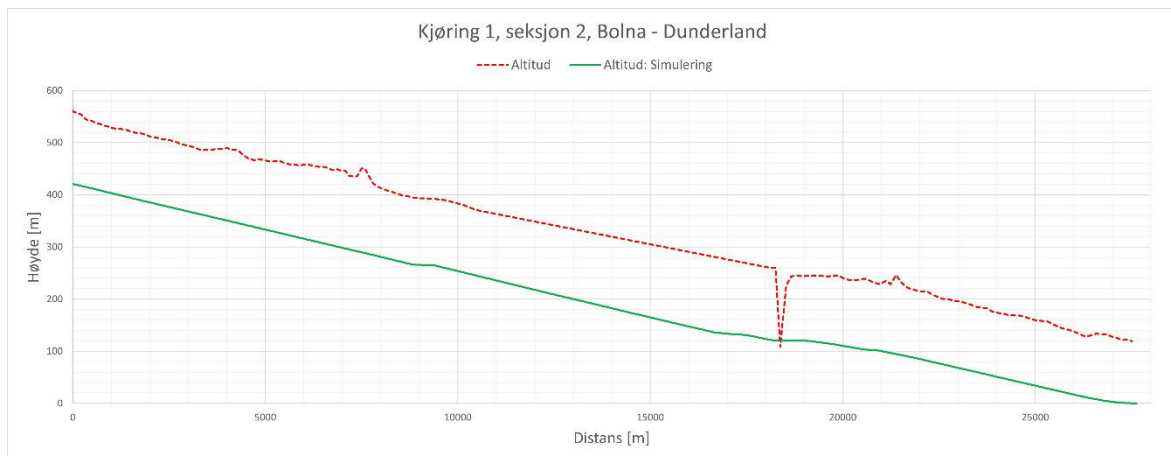


Figur 28: Validering - Kjøring 1, seksjon 2. Akkumulert energiforbruk.



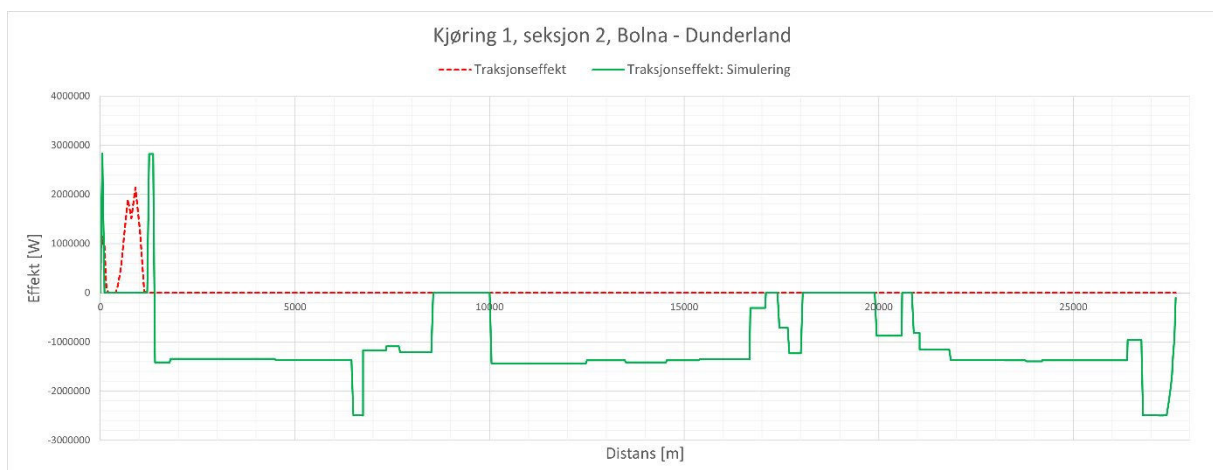
Figur 29: Validering - Kjøring 1, seksjon 2. Hastighet.

I Figur 30 vises høydeprofil. Her framkommer at det i målingene vises den absolutte høyden, mens det i simuleringene vises høyden relativt til laveste punkt i simuleringen.



Figur 30: Validering - Kjøring 1, seksjon 2. Høydeprofil.

Motorene kjøres i stor grad med elektrodynamisk brems i simuleringene. I energimålingene er ikke dette registrert, se Figur 31.

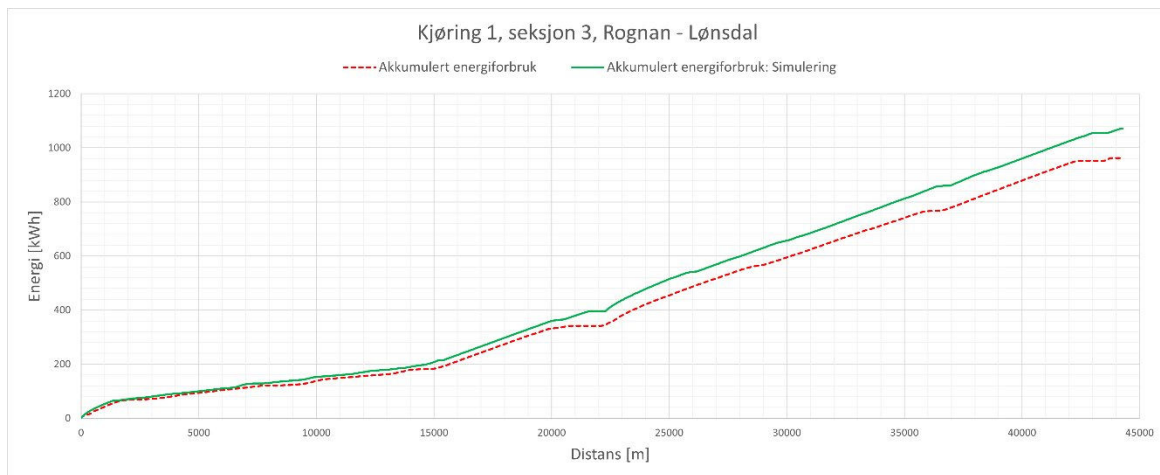


Figur 31: Validering - Kjøring 1, seksjon 2. Traksjonseffekt.

4.1.3 Seksjon 3, Rognan – Lønsdal

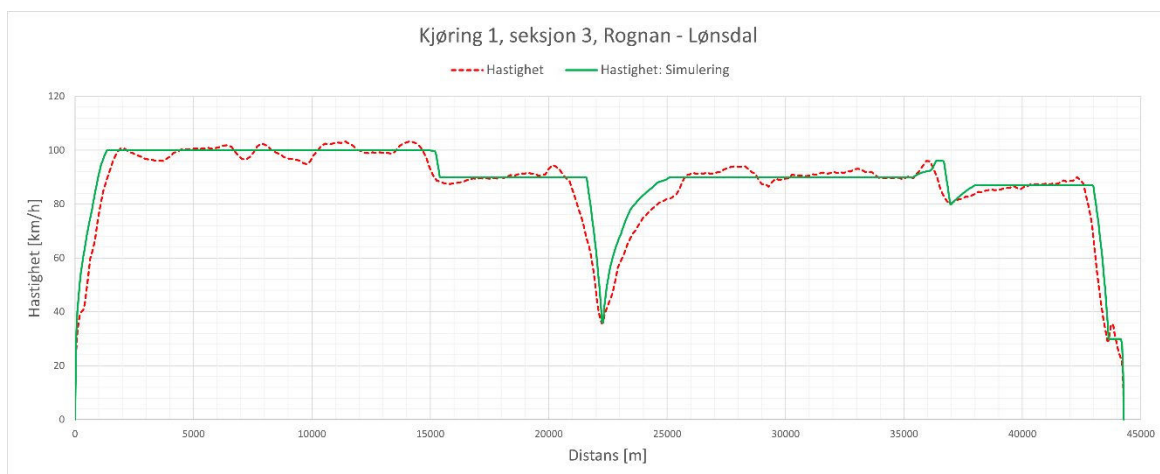
På denne seksjon er det brukt samme togvekt og lengde som for seksjon 2, da det er samme fysiske tog og samme avgang, men forskjellige strekninger på avgangen.

Figur 32 viser at det er godt samsvar mellom simuleringer og energimålinger i akkumulert energiforbruk. Grafene går mer eller mindre parallelt, og avviket som oppstår rundt 20-22km kan relateres til utfordringer med å gjenspeile hastighetsprofilen som fra kjøringen. Sluttverdiene har et avvik på cirka 10%.



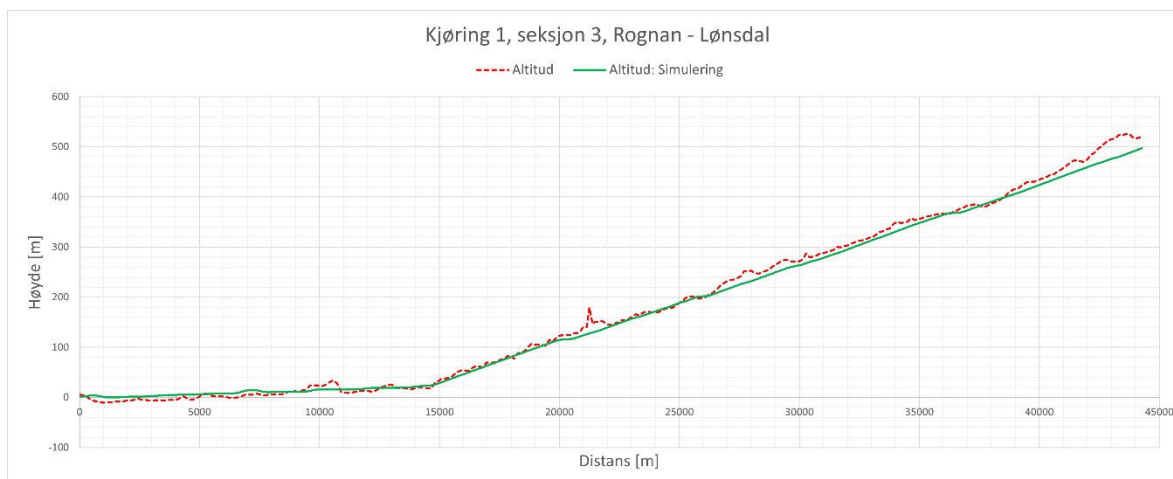
Figur 32: Validering - Kjøring 1, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk.

Utnyttelsen av hastighetsprofilet er gjenskapt med relativt god nøyaktighet, se Figur 33. Det ses også at kjørestilen er mere aggressiv i simuleringene enn i målingene rundt 21-25km, noe som bidrar til å skape et forventet avvik i akkumulert energiforbruk.



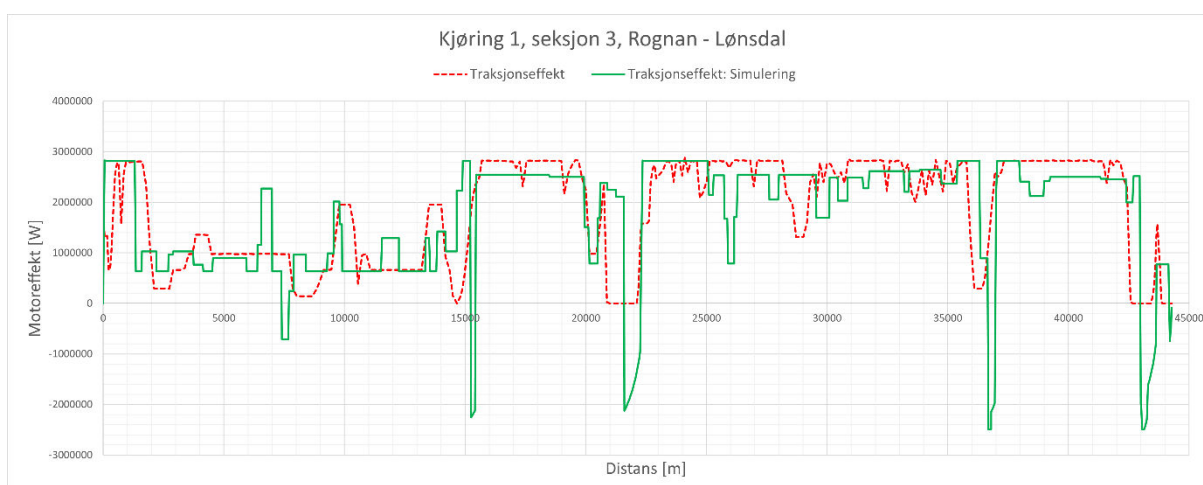
Figur 33: Validering - Kjøring 1, seksjon 3. Hastighet.

Gradienten har godt samsvar mellom målinger og simuleringverdier som vist i Figur 34.



Figur 34: Validering - Kjøring 1, seksjon 3. Høydeprofil

Motoreffektene i simuleringen har også relativt god samsvar med målt effekt som vist i Figur 35.



Figur 35: Validering - Kjøring 1, seksjon 3. Traksjonseffekt.

4.2 Kjøring 2

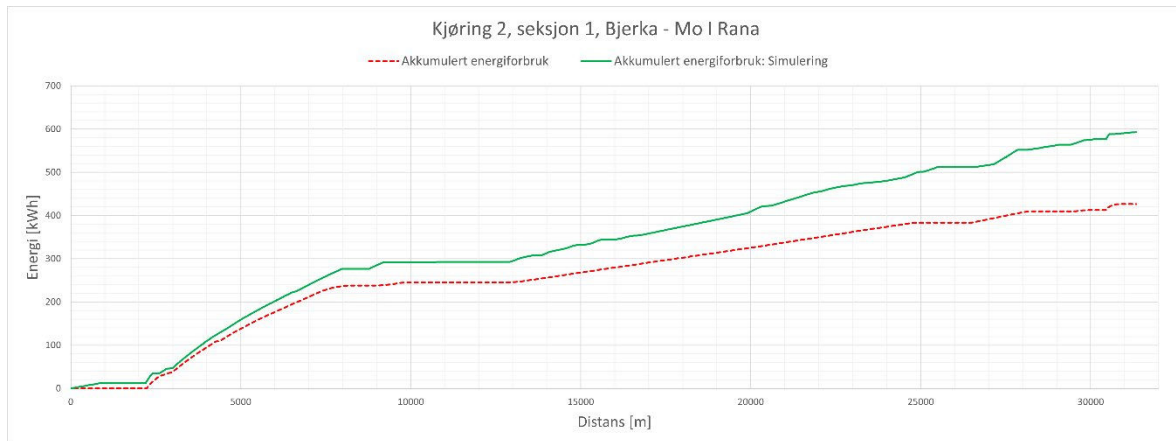
Kjøring: 2 (av 3)
 Dato: 2021-04-16
 Rute: Trondheim-Bodø
 Lokomotiv: Nr. 1

4.2.1 Seksjon 1, Bjerka - Mo I Rana

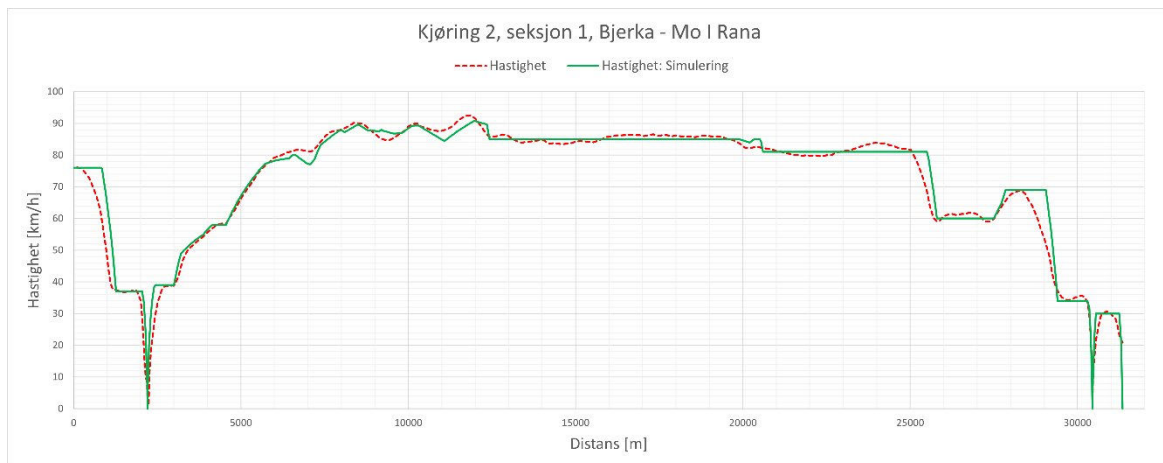
Togvekt 1135 tonn og lengde 502 meter

For denne kjøringen er det rapportert en togvekt på 1135 tonn og toglengde på 502 meter. Figur 36 viser et relativt stort avvik i akkumulert energiforbruk. I akselerasjonsforløpet fra 2 til 7 km kan det ses et høyere energiforbruk i simuleringene sammenlignet med målingene. Dette inntreffer til tross for at effektforbruket opp til 8km viser godt samsvar mellom simuleringer og målinger, se Figur 36. På en

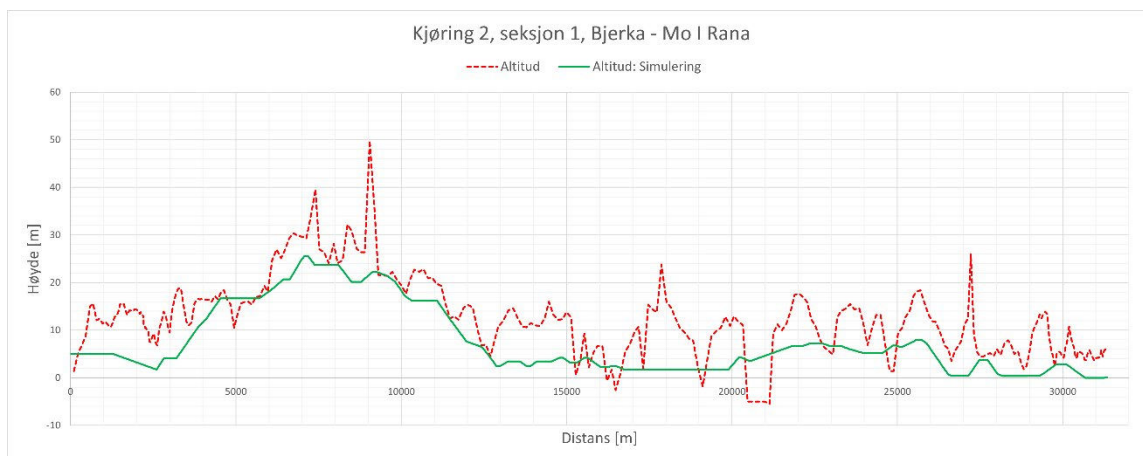
strekning med lavt energiforbruk fra motorene (9-13km) går energiforbruket parallelt, hvilket var forventet. Fra 13km øker avviket jevnt til slutt punktet. Utnyttelsen av hastighetsprofilen er imidlertid gjenskapt med relativt god nøyaktighet, se Figur 37. En mulig forklaring til avviket i energiforbruk kan være en kombinasjon av at føreren ser ut til å ha brukt et konstant effektpådrag mellom 13-24km og tillatt toget å variere noe i hastighet ut fra av topografien. Dette kan også påvirkes av at topografien i Banedata (Figur 38) ikke har et tilstrekkelig detaljeringsnivå (tilsvarende detaljeringsnivået i målingen), men det skal nevnes at GPS-signaler som er brukt i målingene har en usikkerhet. Variasjonen i den målte topografien fra GPS vil også resultere i en stigning som er urealistisk. Årsaken til at simuleringene bruker mer energi for å holde samme hastighet som i målingene kan skyldes usikkerhet tilknyttet togvekt og kjøremotstand (Figur 39).



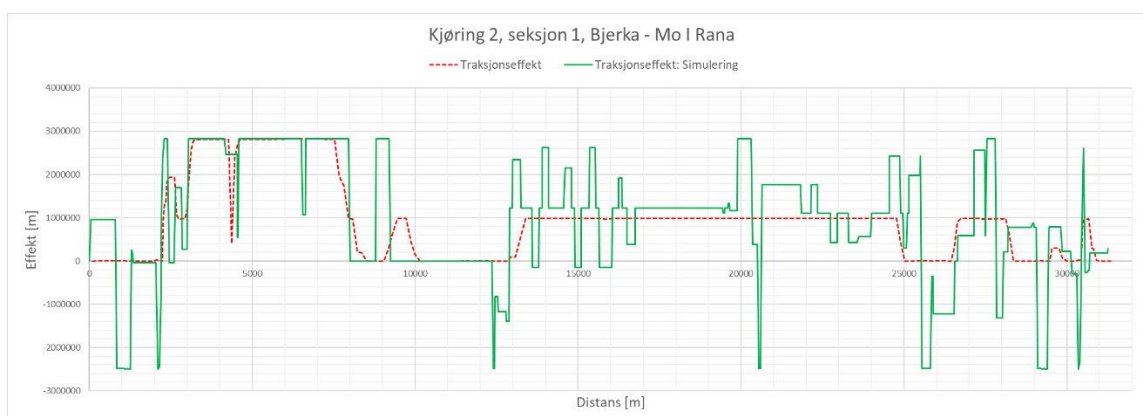
Figur 36: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk.



Figur 37: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Hastighet.



Figur 38: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Høydeprofil



Figur 39: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Traksjonseffekt.

4.2.2 Seksjon 1, Bjerka – Mo I Rana, togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5

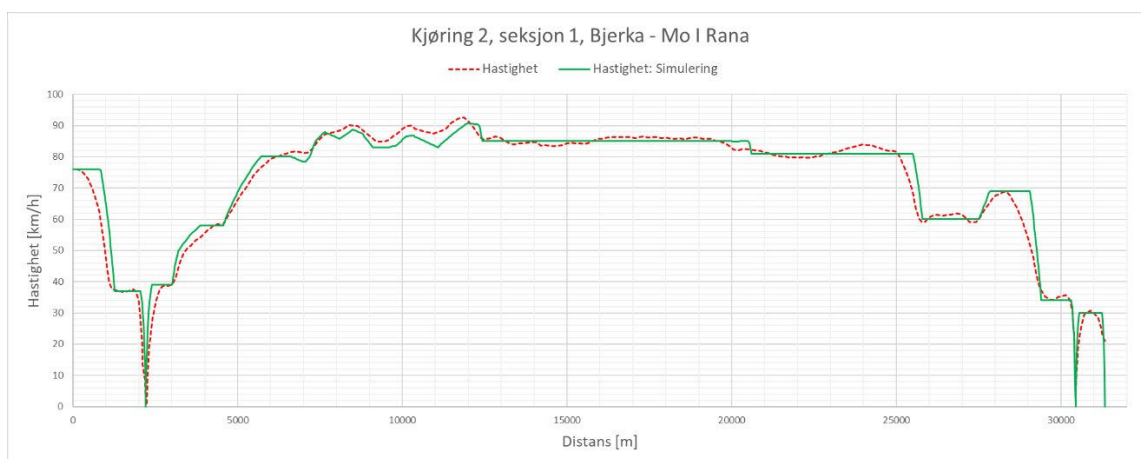
Det er også gjort forsøk på å simulere framføring av godstog med en lavere togvekt enn det som er innrapportert fra Bane NOR. Det er valgt å prøve med en vekt på 1012 tonn, da dette tilsvarer en endring av vekten tilsvarende et CD312 lokomotiv. Fordi avviket også øker ved økt hastighet benyttes en korreksjonsfaktor på C-koeffisienten i kjøremotstander, da dette vil tilsvare en bedre aerodynamisk utforming (f.eks. tett plassering av containere). For dette toget betyr det at C-koeffisienten minker fra omtrent 50 til omtrent 25. Med en hastighet på 85 km/t vil C-koeffisienten i kjøremotstanden minke fra 27 870 til 13 940. Dette tilsvarer en effekt på cirka 330 kW.

Som vist i Figur 40 blir samsvaret mellom simuleringene og målingene god etter justeringen av togvekten og korreksjonsfaktoren på C-verdien⁹. Avviket som oppstår mot slutten av simuleringen kan skyldes differansen i utnyttelse av hastighetsprofilen.

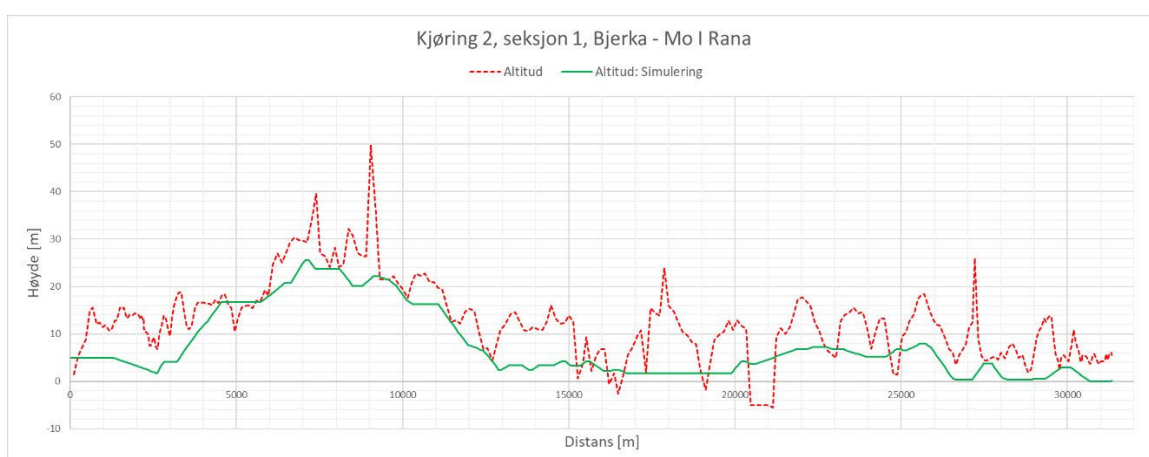
⁹ Det ble også forsøkt å kun endre togvekten. Dette resulterte i et gjensstående avvik som vokser med tiden, tilsvarende avviket som ble vist i forrige kapittel



Figur 40: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk. (Togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor på C med 0,5)



Figur 41: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Hastighet. (Togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor på C med 0,5)



Figur 42: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Høydeprofil (Togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor på C med 0,5)

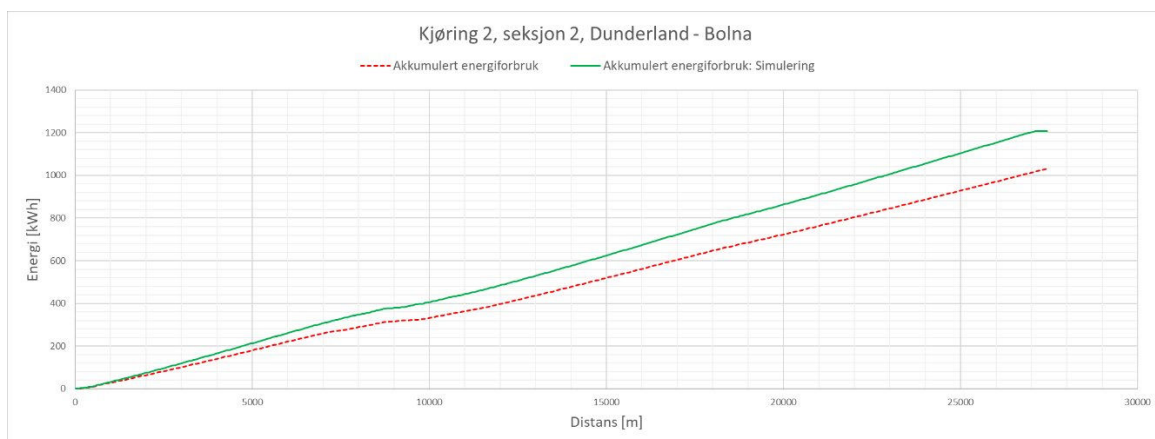


Figur 43: Validering - Kjøring 2, seksjon 1. Traksjonseffekt. (Togvekt 1012 tonn og korreksjonsfaktor på C med 0,5)

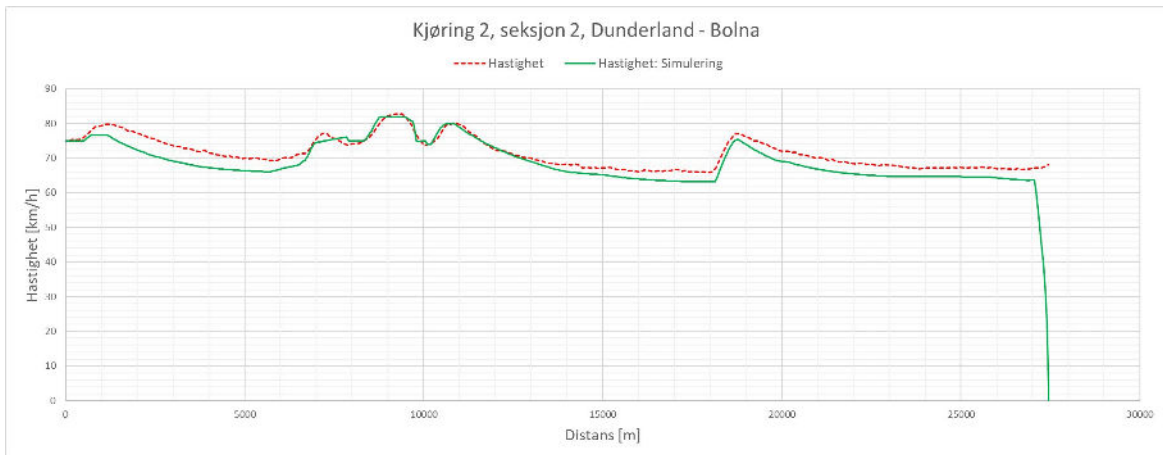
Hvorvidt denne korreksjonsfaktor burde brukes i alle simuleringer er vanskelig å konkludere med, da det er flere usikkerhetsfaktorer som virker inn på energiforbruket. I tillegg har det i andre kjøring vært godt samsvar uten å benytte korrigeringsfaktor (f.eks. kjøring 1 seksjon 3).

4.2.3 Seksjon 2, Dunderland – Bolna

I denne kjøringen er det i Bane NOR sitt system oppgitt en togvekt på 720 tonn og en tog lengde på 366 meter. Som vist i Figur 44 har simuleringene et høyere energiforbruk enn energimålingene. Dette inntreffer selv om framføringshastigheten i simuleringene faktisk er noe lavere enn i målingene, der hastigheten har stor innvirkning på energiforbruk. En mulig årsak til at hastigheten er lavere i simuleringene er at kjøretøyet bruker maksimal effekt og at en høyere hastighet ikke er mulig med den angitte stigningen, togvekten og motoreffekten. Det at energiforbruket blir høyere i simuleringen selv om hastigheten er lavere indikerer at forhold som f.eks. togvekten eller kjøremotstanden ikke er den samme i simulering og måling.

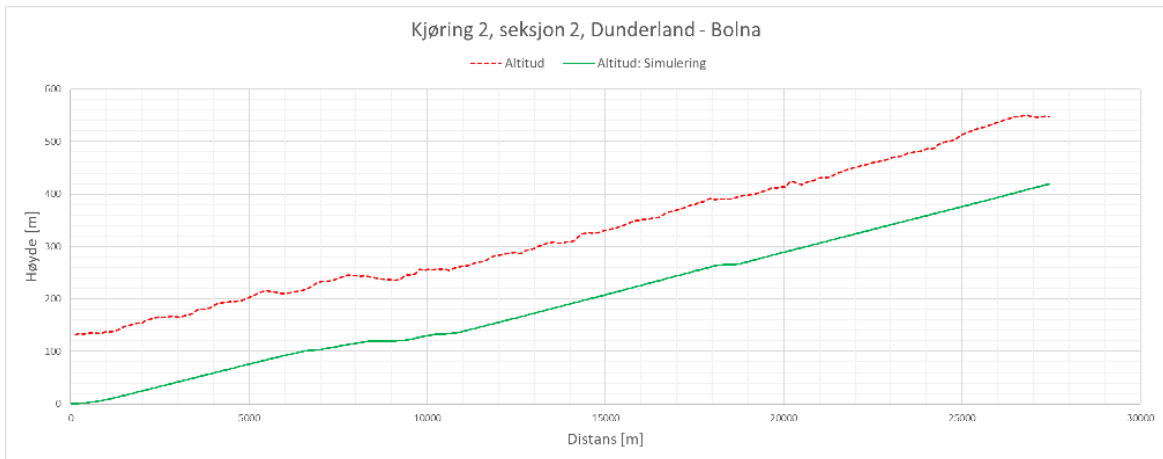


Figur 44: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Akkumulert energiforbruk.

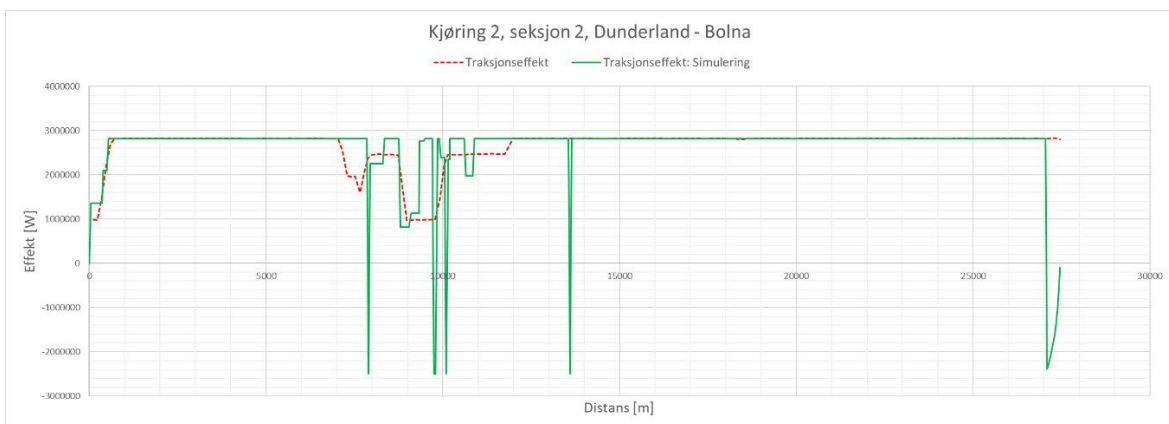


Figur 45: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Hastighet.

Merk at høydeprofilen fra målingene måler absolutt høyde, mens simuleringene måler høyde relativt til laveste punkt i simuleringen. (Figur 46). Det som er av betydning, er å kontrollere at grafene er tilnærmet parallelle.



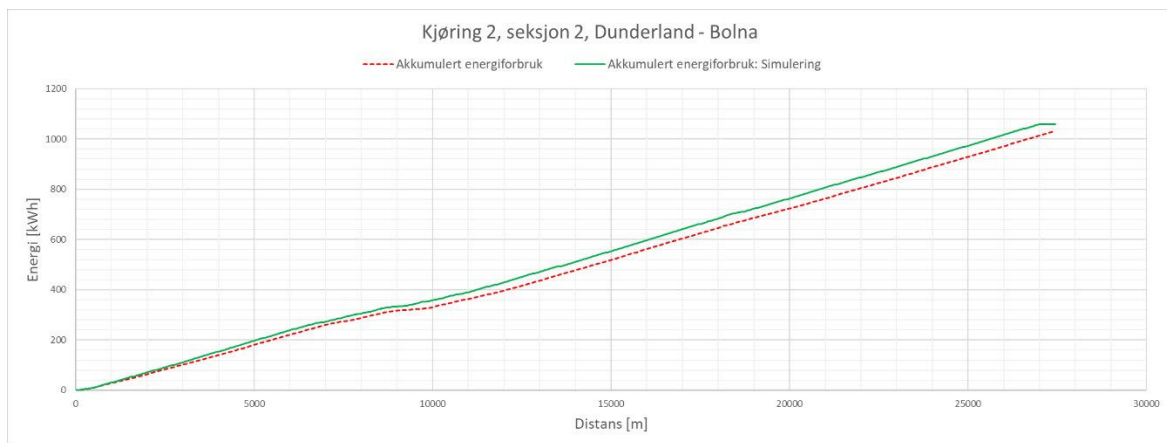
Figur 46: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Høydeprofil



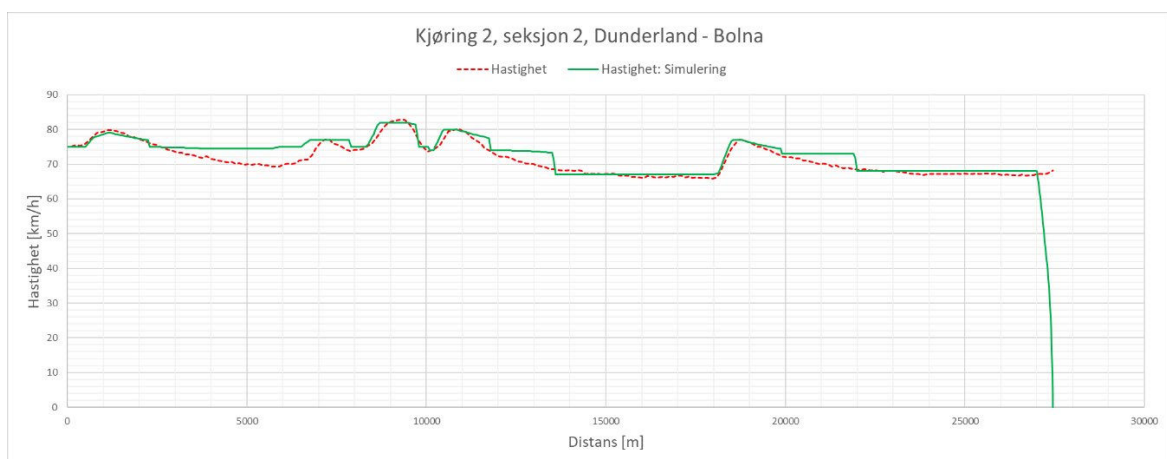
Figur 47: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Traksjonseffekt.

4.2.4 Seksjon 2, Dunderland – Bolna, togvekt 597 tonn

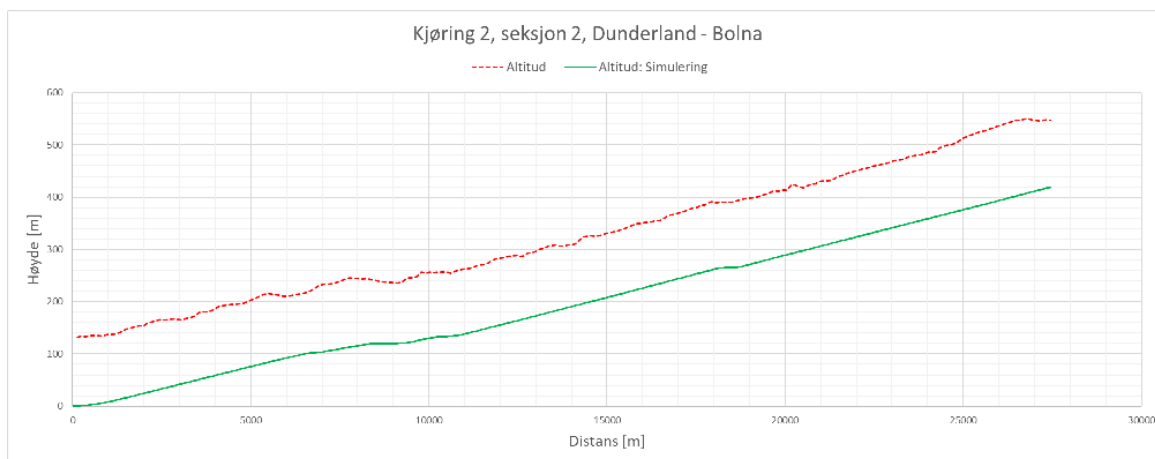
Det er også blitt utført en simulering med noe redusert togvekt for å undersøke hvordan dette vil påvirke samsvaret mellom simuleringer og energimålinger. Reduksjonen er fra 720 tonn til 597 tonn, og er valgt med utgangspunkt i en reduksjon av vekt tilsvarende lokomotivets vekt. Resultatene i Figur 48 viser at denne reduksjon av togvekt resulterer i godt samsvar mellom målinger og simulering. Samtidig har samsvaret i belastningen på traksjonsmotorene i form av effekt fra motorene minket noe, men ikke betydelig. Det kan også noteres at toget fra målingene hadde problemer med å holde høy hastighet i stigningen, noe som også gjenspeiles i simuleringen ved bruk av tog med vekt på 720 tonn. Med redusert togvekt viser simuleringene ingen problem med å holde hastigheten, noe som taler for at togvekten burde være høyere enn 597 tonn. Potensielt kan det være en kombinasjon av noe redusert togvekt, noe justert kjøremotstand og noe avvik i virkningsgrader ombord i kjøretøyet som kan forklare avviket mellom simuleringer og målinger.



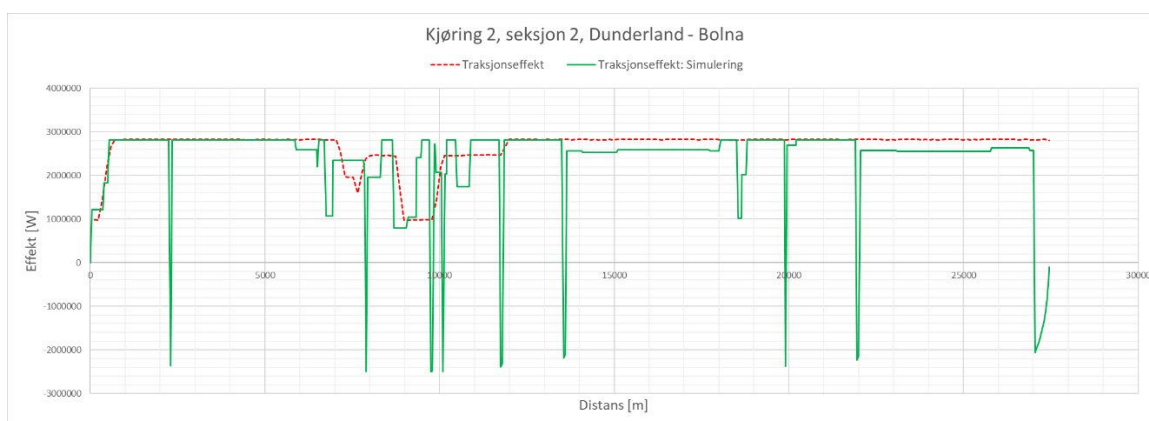
Figur 48: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Akkumulert energiforbruk.



Figur 49: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Hastighet.



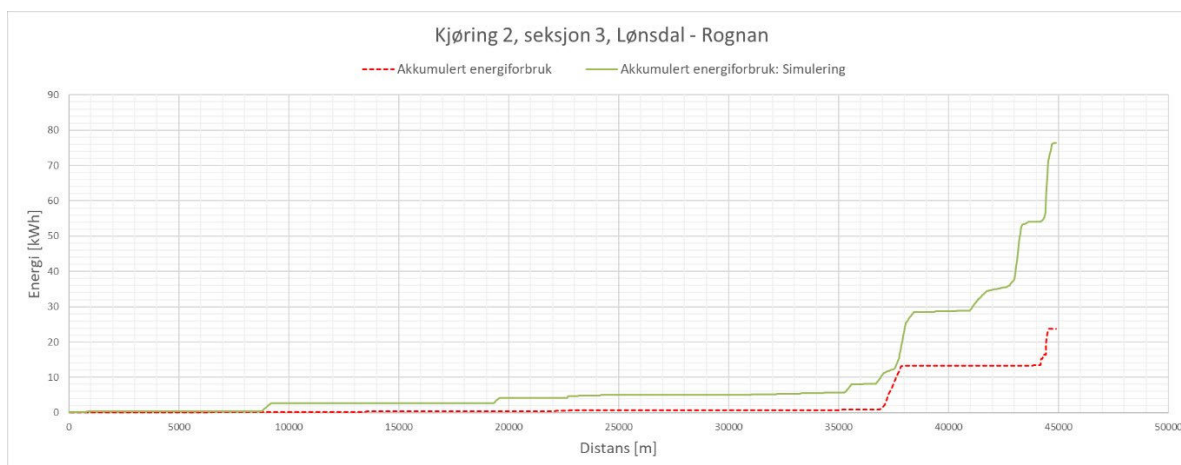
Figur 50: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Høydeprofil



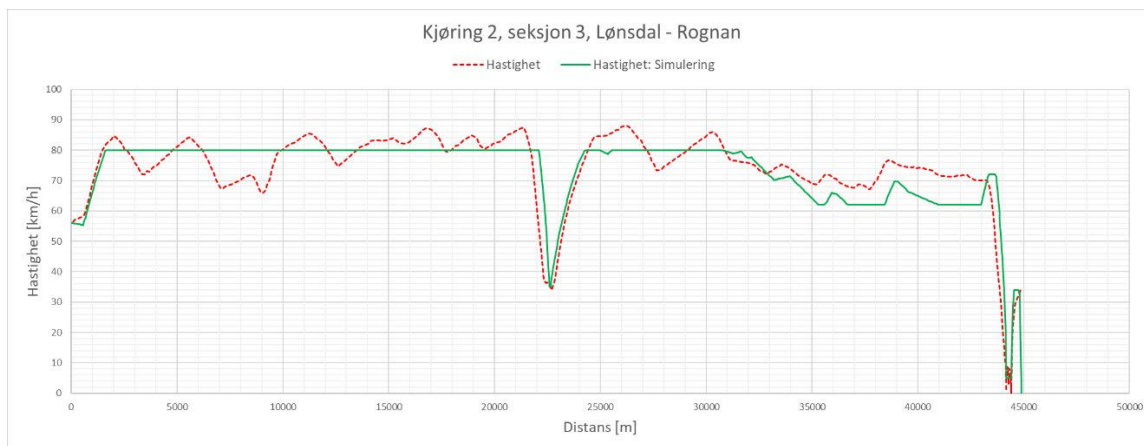
Figur 51: Validering - Kjøring 2, seksjon 2. Traksjonseffekt.

4.2.5 Seksjon 3, Lønsdal – Rognan

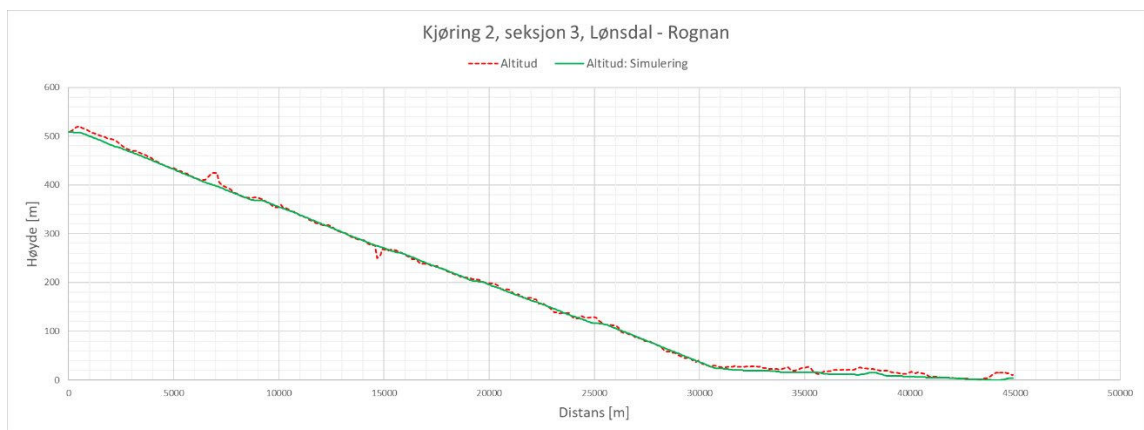
Denne kjøringen utføres med samme tog og vekt som i seksjon 2. Togets utnyttelse av hastighetsprofilen i målingene er vanskelig å gjenskape detaljert, se Figur 53. Etter 32km blir sporet mer flatt, som vist i Figur 54. Energiforbruket etter 35km indikerer at det er et avvik mellom målinger og simulering; når simuleringen har noe lavere hastighet blir energiforbruket samtidig høyere. Se Figur 52. Dette er det samme toget som brukes i seksjon 2, og også for den seksjonen ble det resultatene for lavere togvekt undersøkt.



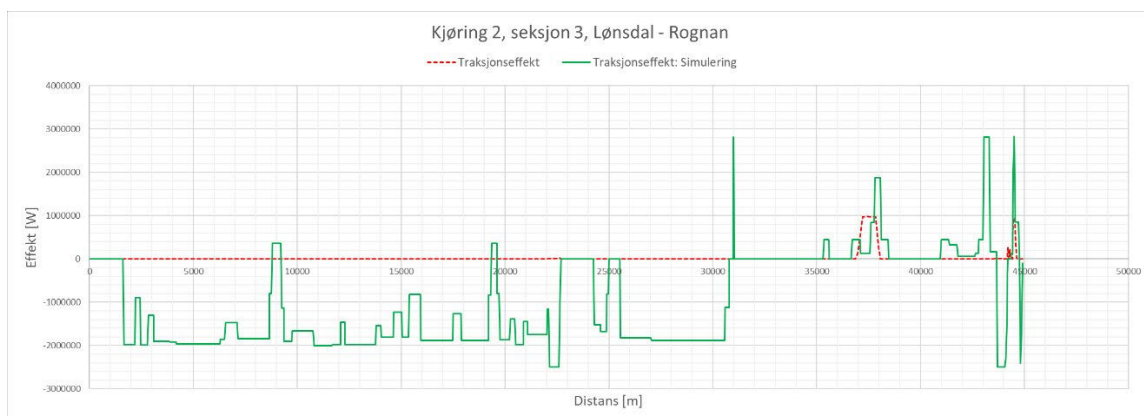
Figur 52: Validering - Kjøring 2, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk.



Figur 53: Validering - Kjøring 2, seksjon 3. Hastighet.



Figur 54: Validering - Kjøring 2, seksjon 3. Høydeprofil

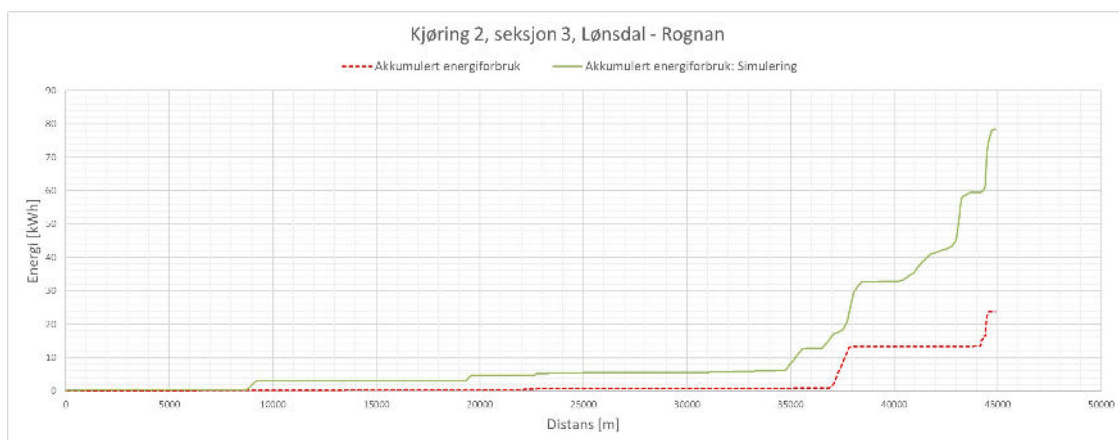


Figur 55: Validering - Kjøring 2, seksjon 3. Traksjonseffekt.

4.2.6 Seksjon 3, Lønsdal - Rognan, togvekt 597 tonn

Dette er det samme toget som brukes i seksjon 2, og også for den seksjonen ble det resultatene for lavere togvekt undersøkt. På grunn av dette og et noe høyere energiforbruk i simuleringen enn for energimålingen, gjengis resultatene for en togvekt på 597 tonn også for denne kjøringen.

Som vist i Figur 56 blir det simulerte energiforbruket høyere med lavere togvekt. Dette skyldes at et tog med lav vekt må bruke mer energi for å opprettholde hastigheten etter nedoverbakken enn et tog med høy vekt (høyere kinetisk energi i et tog med høyere vekt). Det betyr også at det er vanskelig å argumentere for eller mot en togvekt på 720 tonn basert på resultatene i denne kjøringen.



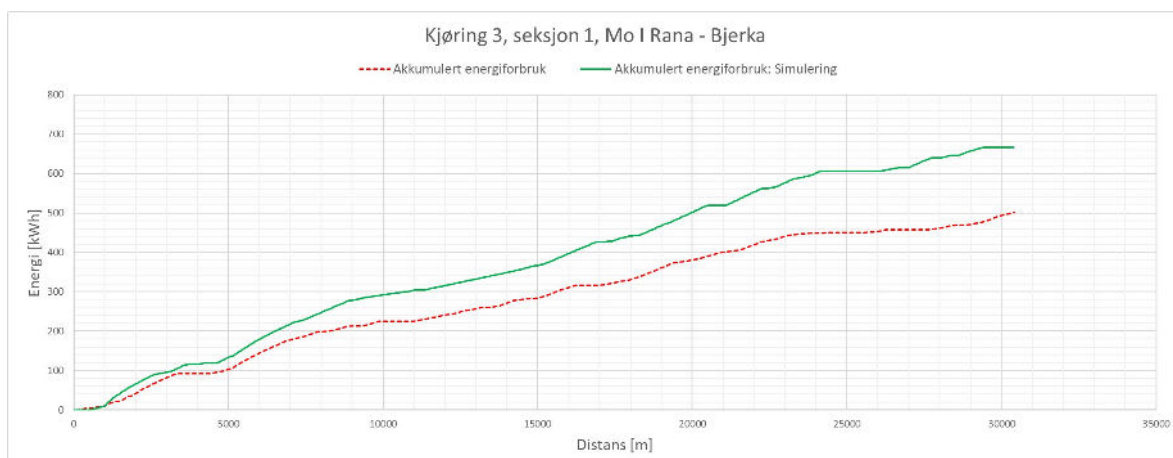
Figur 56: Validering - Kjøring 2, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk.

4.3 Kjøring 3

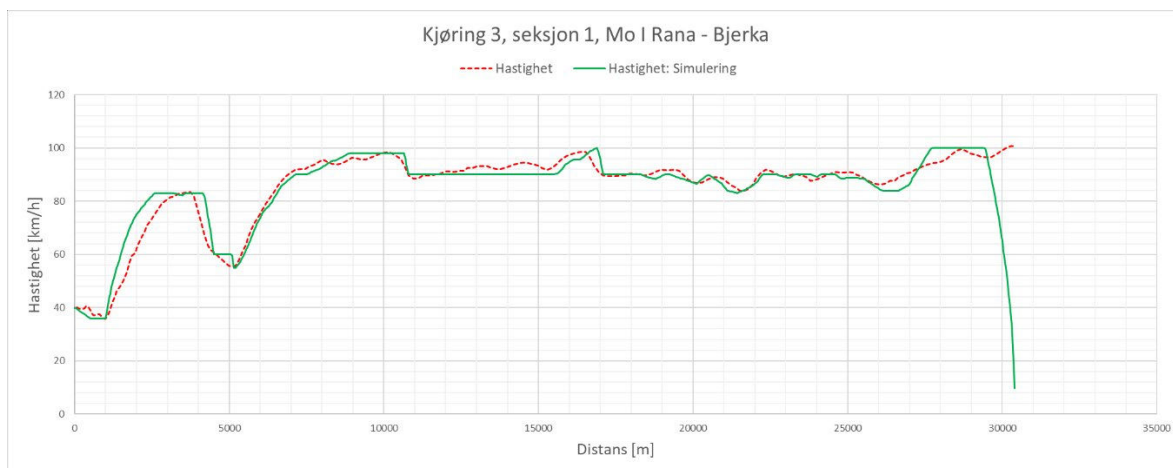
Kjøring: 3 (av 3)
 Dato: 2021-04-17
 Rute: Bodø-Trondheim
 Lokomotiv: Nr. 6

4.3.1 Seksjon 1, Mo I Rana - Bjerka

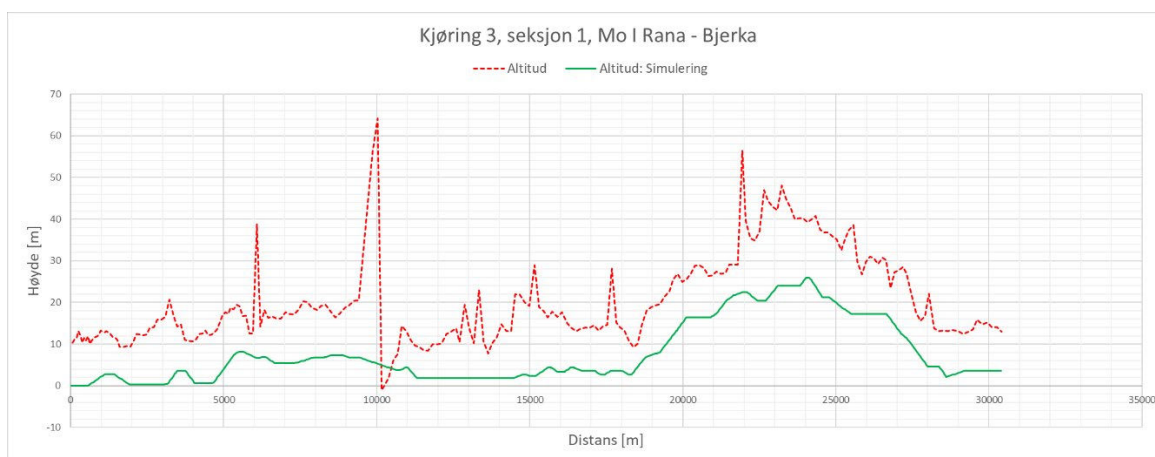
For denne kjøringen blir energiforbruket overestimert med nesten 40% i energisimuleringene relativt til energimålingene. Dette kan også ses i Figur 60 som viser motoreffekten, der simuleringene har generert høy motoreffekt en stor andel av tiden. Føreren har brukt et effektpådrag som er vanskelig å gjenskape gjennom togets utnyttelse av hastighetsprofilen.



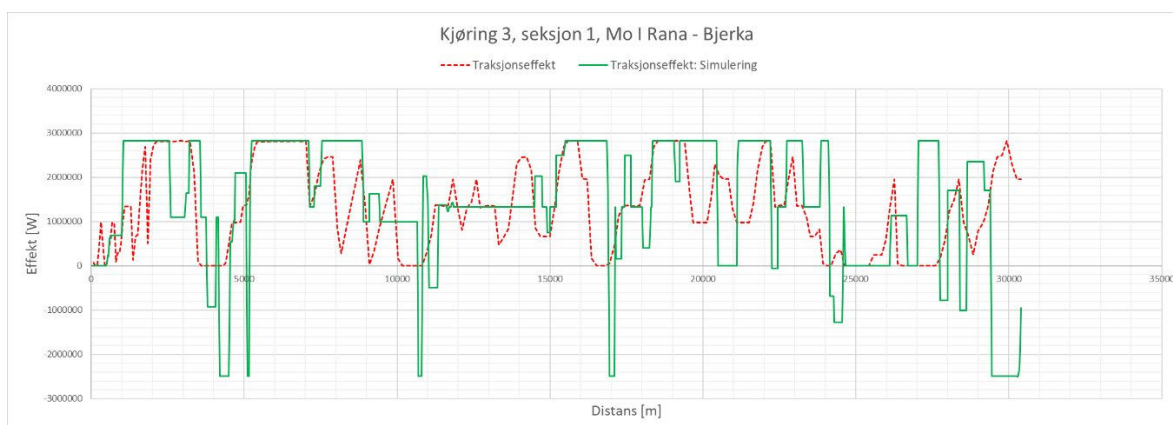
Figur 57: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk.



Figur 58: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Hastighet.



Figur 59: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Høydeprofil

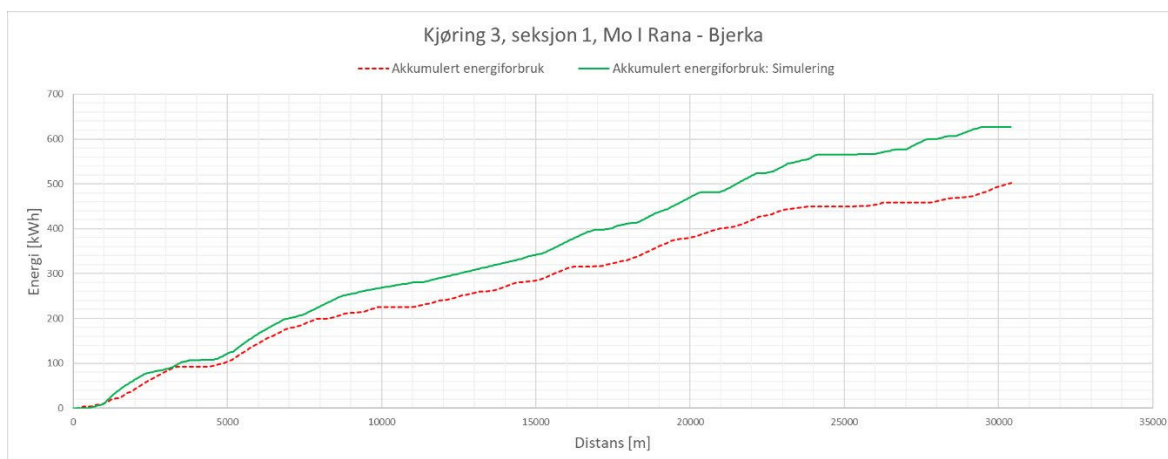


Figur 60: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Traksjonseffekt.

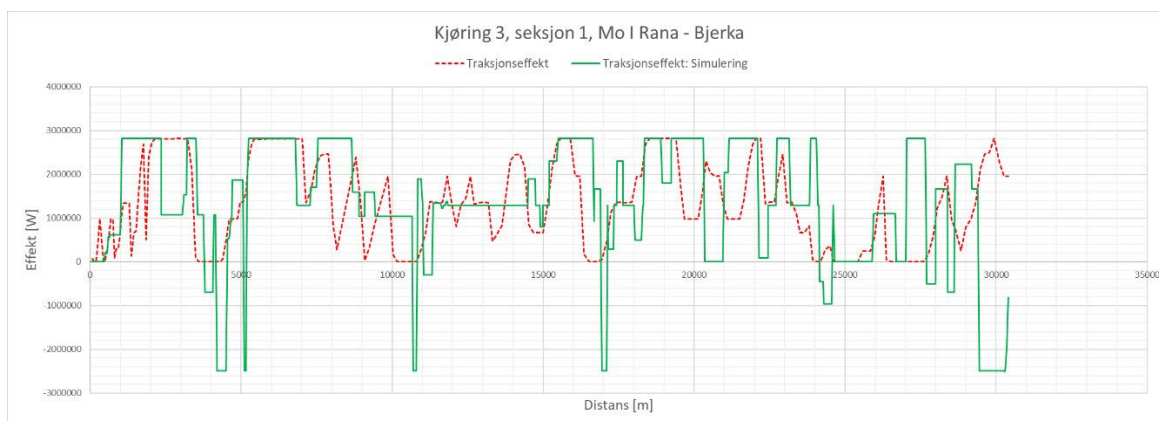
4.3.2 Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka, togvekt 770 tonn

Fordi det er et relativt stort avvik mellom simulert og målt energiforbruk, er det gjort to parametervariasjoner for å finne ut hva som kan være årsaken til dette avviket. Den første parametervariasjonen er togets vekt. Det er sett på en reduksjon av vekten med 123 tonn (tilsvarende et

CD312). Som vist i Figur 61 gir parametervariasjonen ingen stor endring i energiforbruk, og effektuttaket på motorene er fortsatt på et høyere nivå i simuleringene enn for målingene.



Figur 61: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk. (Togvekt 770 tonn)



Figur 62: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Traksjonseffekt. (Togvekt 770 tonn)

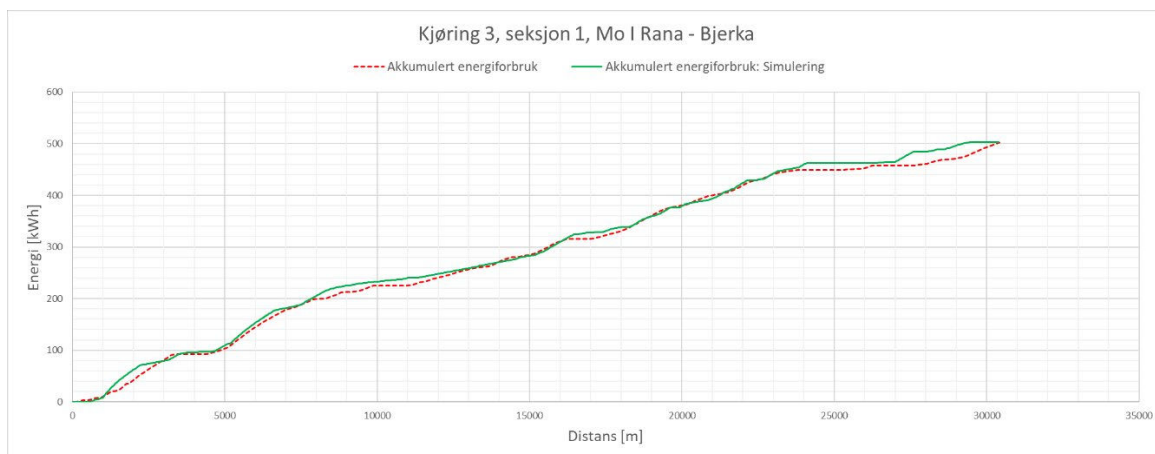
Hastigheten er mer eller mindre identisk, og topografien endres ikke. Grafer inkluderes derfor ikke.

4.3.3 Seksjon 1, Mo I Rana – Bjerka, togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5

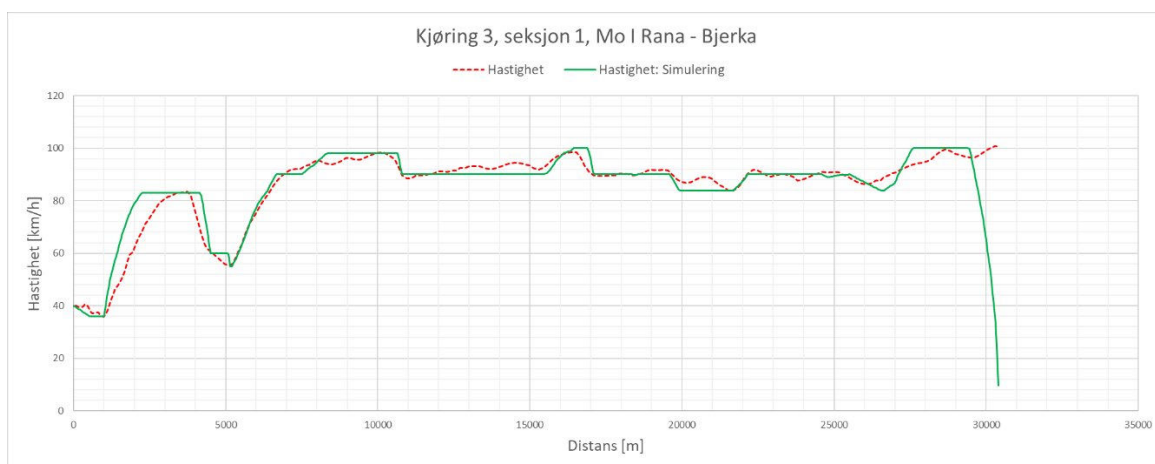
Den andre parametervariasjonen som er gjort er å påføre en korreksjonsfaktor 0,5 for C-koeffisienten i kjøremotstanden i tillegg til en reduksjon av togvekten. Hastigheten blir nærmest identisk som for energisimuleringen med opprinnelig verdi på C-koeffisienten, men det akkumulerte energiforbruket får en relativt stor endring. Som konsekvens av variasjonen følger det simulerte akkumulerte energiforbruket det målte, men med et avvik som er relativt konstant. Føreren har også her brukt et effektpådrag på motorene som er vanskelig å gjenskape. Fra dette kan det konstateres at C-koeffisienten¹⁰ har en usikkerhet, og at denne kan være en mulig forklaring på avviket mellom energimåling og simulering. I tillegg til dette kan det også være avvik i togvekt.

Samme kombinasjoner av korreksjonsfaktor og endring i togvekt blir også testet for de andre kjøringene med det samme toget.

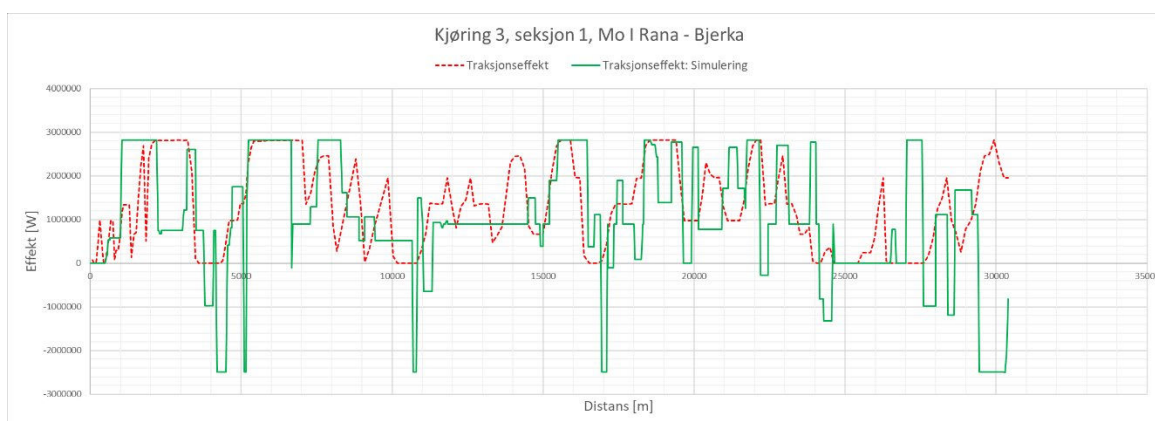
¹⁰ Gjenspeiler den aerodynamiske utformingen av toget og øker kvadratisk med hastighet



Figur 63: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Akkumulert energiforbruk. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)



Figur 64: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Hastighet. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)

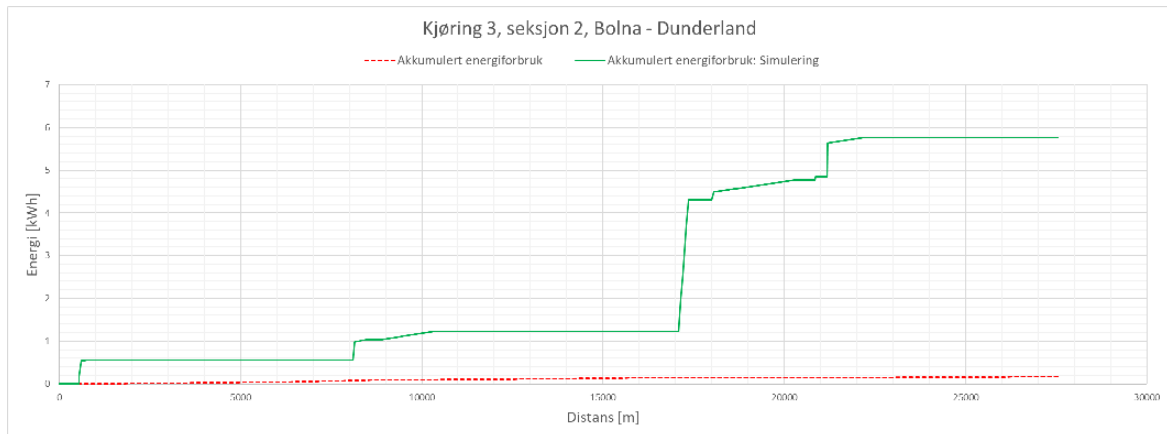


Figur 65: Validering - Kjøring 3, seksjon 1. Traksjonseffekt. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)

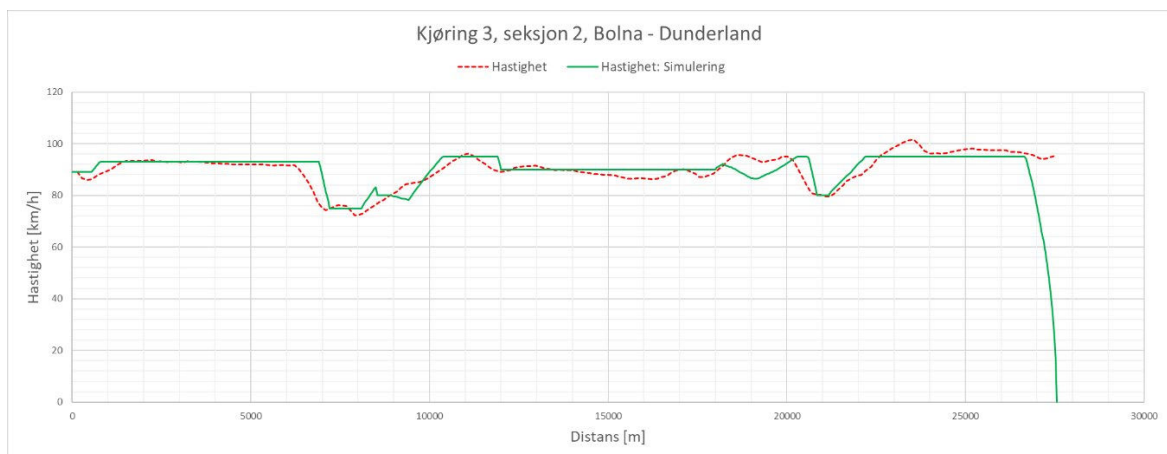
4.3.4 Seksjon 2, Bolna – Dunderland

På denne strekningen er det kjøring nedover fra Saltfjellet. Dette gjør at traksjonsmotorene ikke brukes særlig mye, se Figur 69. Selv om avviket mellom simulering og energimåling er relativt stort, så er den faktiske verdien lav (mindre enn 6 kWh, se Figur 66). Avviket mellom simulering og energimåling kan relateres til utfordringer med å modellere togets utnyttelse av hastighetsprofilen.

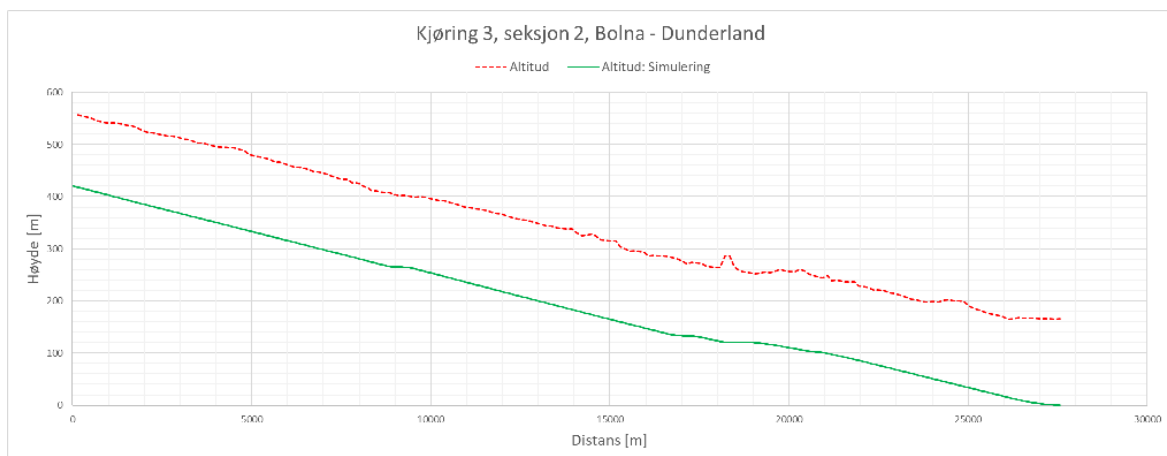
Som vist for seksjon 1 og 3 i denne kjøringen er det foreslått å analysere endring i togvekt og korreksjonsfaktor på C- koeffisienten i kjøremotstanden. Da det er nedoverbakke i seksjon 2 vil resultatene ikke endres nevneverdig, og en analyse av parametervariasjoner utføres derfor kun for seksjon 1 og 3.



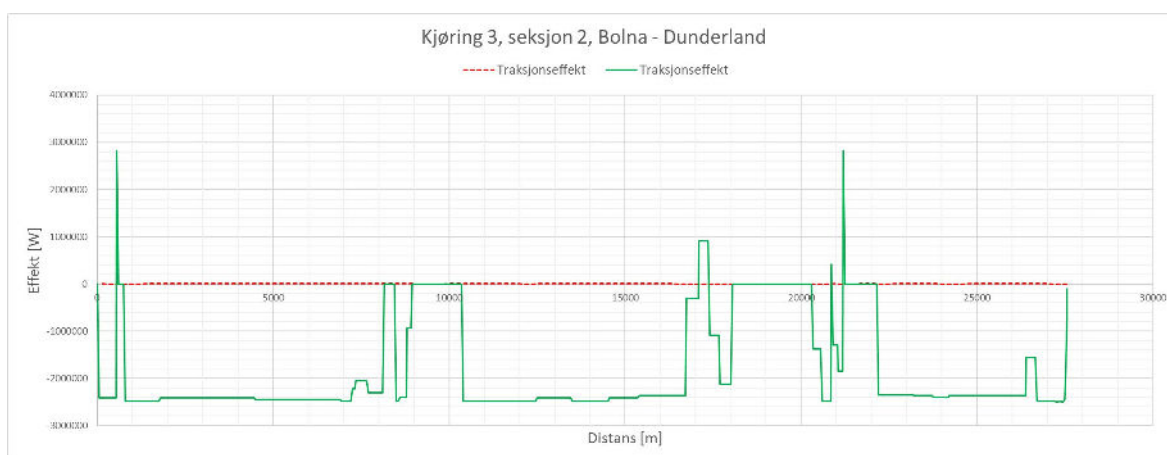
Figur 66: Validering - Kjøring 3, seksjon 2. Akkumulert energiforbruk.



Figur 67: Validering - Kjøring 3, seksjon 2. Hastighet.



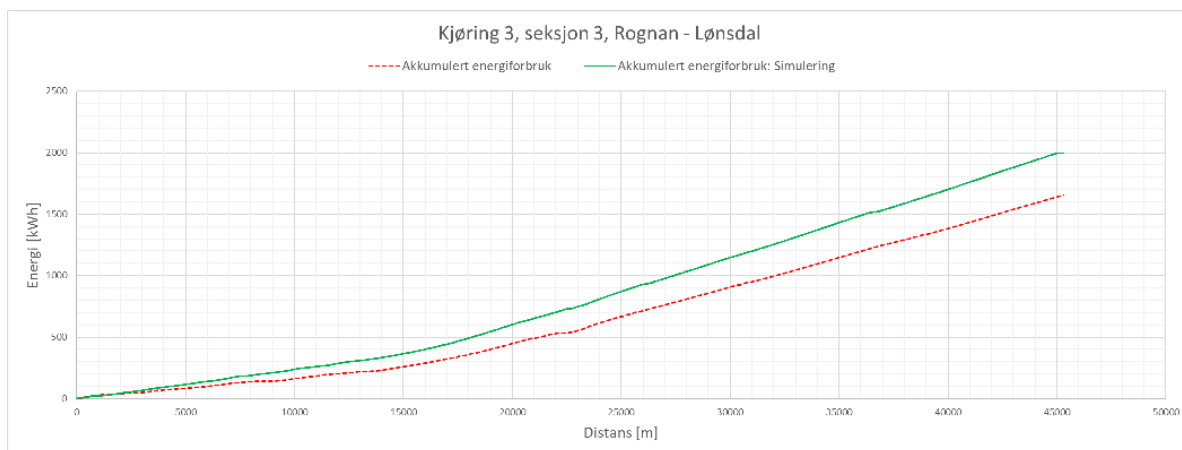
Figur 68: Validering - Kjøring 3, seksjon 2. Høydeprofil



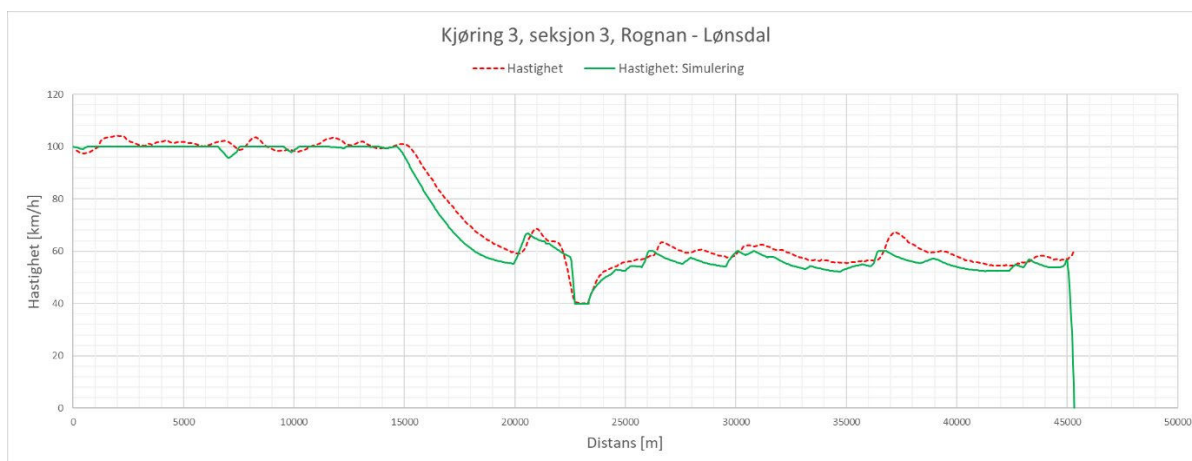
Figur 69: Validering - Kjøring 3, seksjon 2. Traksjonseffekt.

4.3.5 Seksjon 3, Rognan – Lønsdal

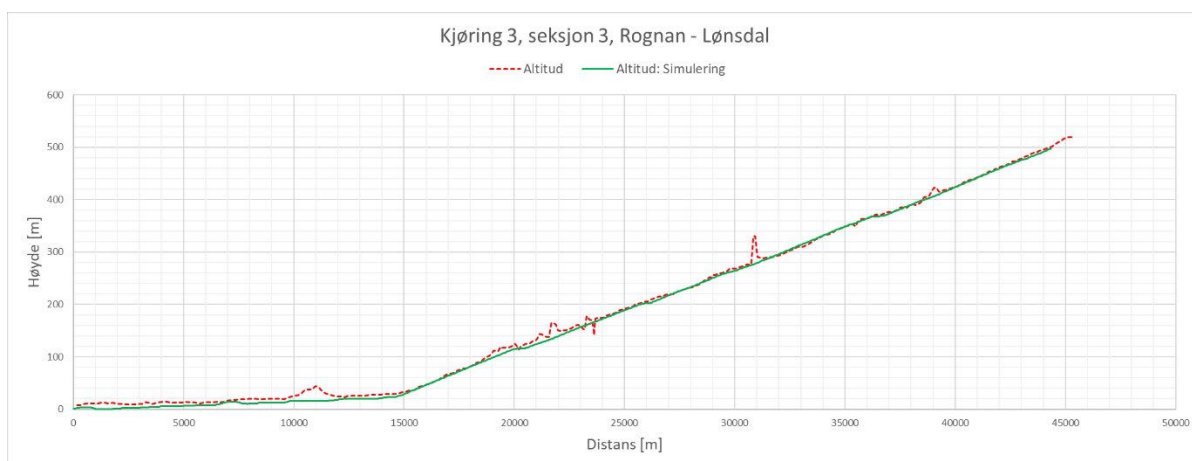
For denne kjøringen er togvekten 893 tonn og tog lengden 502 meter. Som vist i Figur 70 er det et avvik mellom simuleringer og målinger som øker over strekningen. Avviket fortsetter å øke i oppoverbakken selv om hastigheten avtar, noe som indikerer at togvekten i simuleringen ikke er helt riktig sammenlignet med togvekten i energimålingen. Dette vil bli testet i det etterfølgende kapittel.



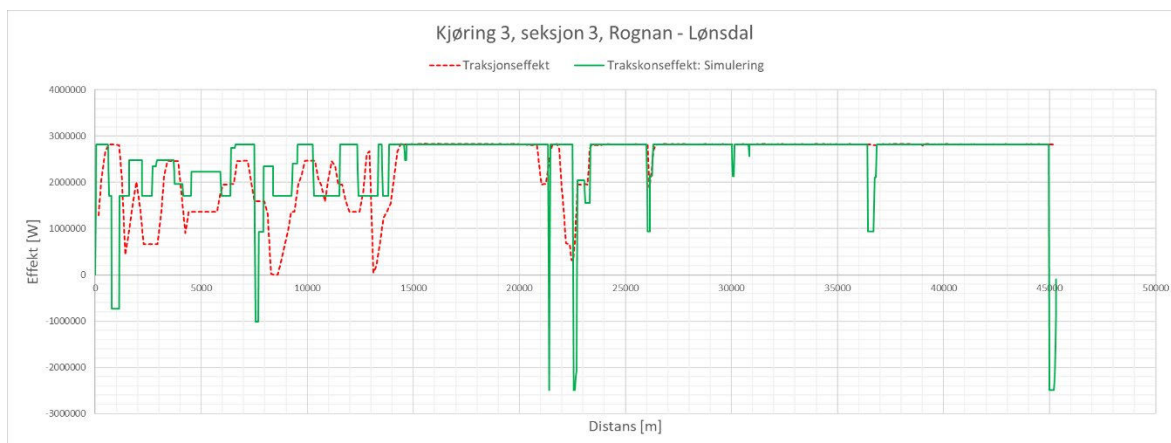
Figur 70: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk.



Figur 71: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Hastighet.



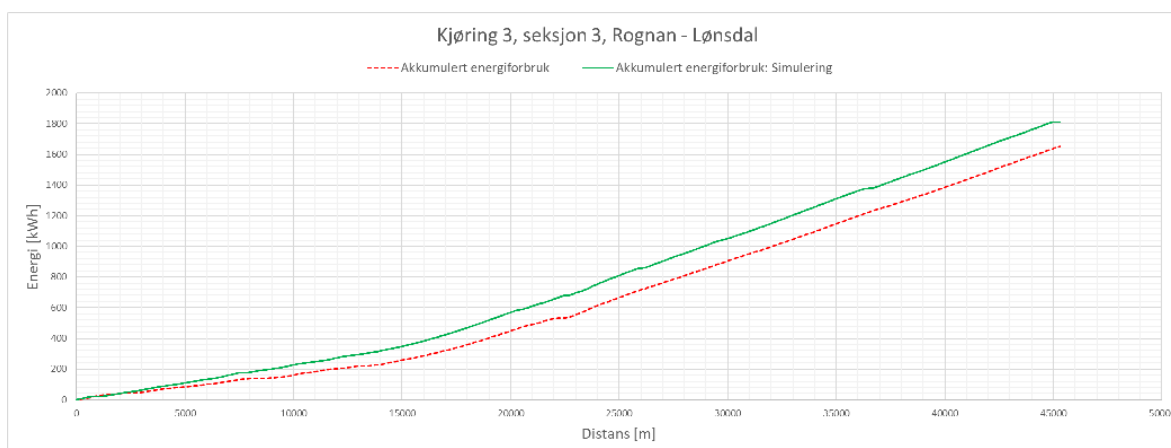
Figur 72: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Høydeprofil



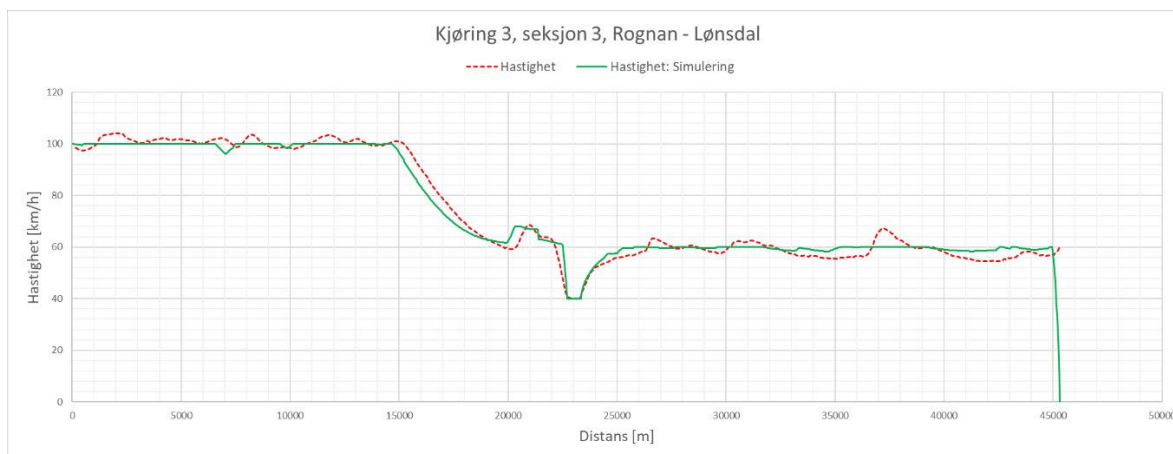
Figur 73: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Traksjonseffekt.

4.3.6 Seksjon 3, Rognan – Lønsdal, togvekt 770 tonn

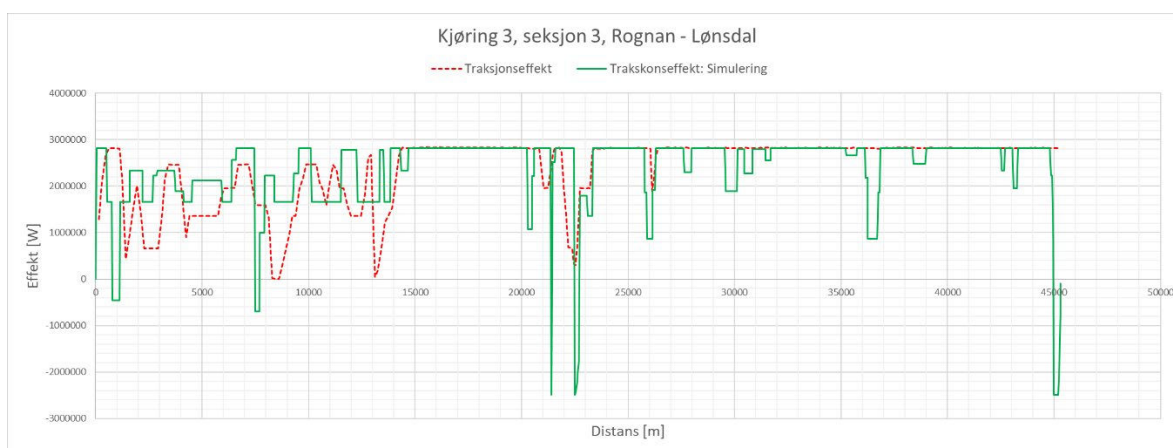
Fordi det er et relativt stort avvik mellom simulert og målt energiforbruk, er det gjort to parametervariasjoner for å finne ut hva som kan være årsaken til dette avvik. Den første parametervariasjonen er togets vekt. Det er sett på en reduksjon av vekten med 123 tonn (tilsvarende et CD312). Som vist i Figur 74 avtar avviket, og i oppoverbakken går grafene for den akkumulerte energien parallelt mellom simuleringer og målinger.



Figur 74: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk. (Togvekt 770 tonn)



Figur 75: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Hastighet. (Togvekt 770 tonn)



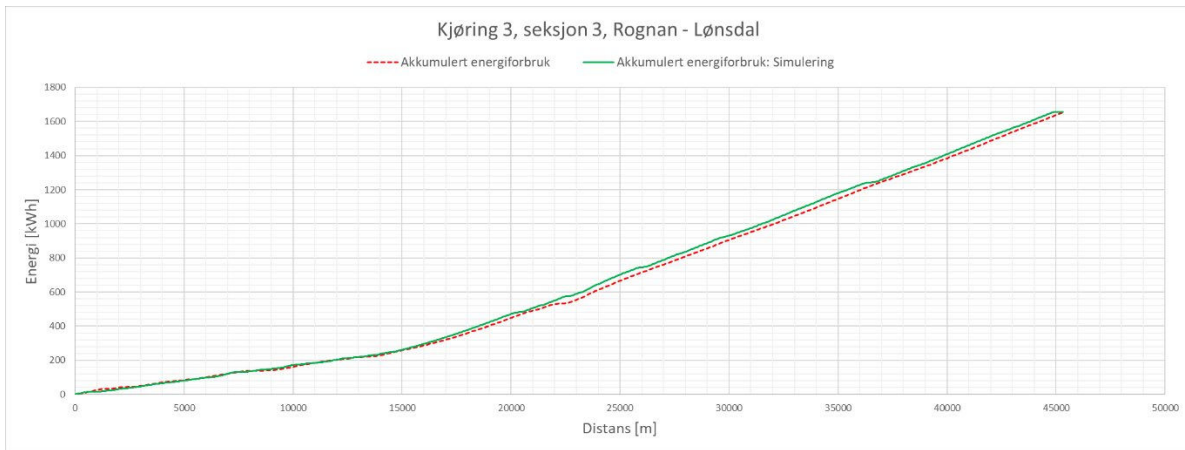
Figur 76: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Traksjonseffekt. (Togvekt 770 tonn)

4.3.7 Seksjon 3, Rognan – Lønsdal, togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5

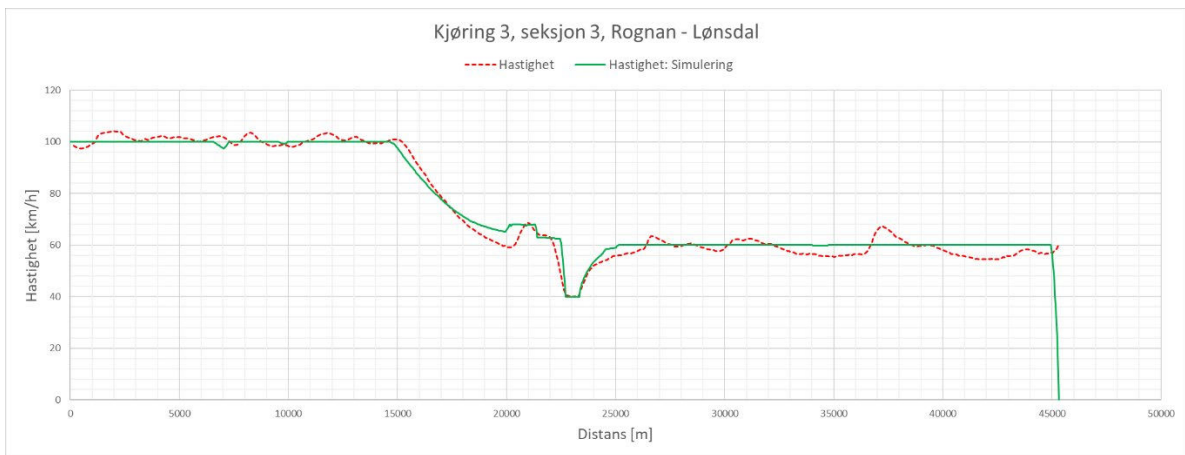
Med redusert togvekt på 123 tonn og korreksjonsfaktor 0,5 på C-koeffisienten i kjøremotstanden oppnås godt samsvar i det akkumulerte energiforbruket mellom simulering og måling. Det gis også godt samsvar mellom simuleringer og målinger av togets utnyttelse av hastighetsprofilen. Det er et noe lavere forbruk av effekt til traksjonsmotorene noen steder. Dette avviket er vanskelig å bestemme fordi effekten i simuleringene konstant tilpasses for å holde en gitt hastighet, mens kjøretøyet i virkeligheten tillates å variere noe i hastighet.

Potensielt kan det være en kombinasjon av en noe redusert togvekt, justert kjøremotstand og avvik i virkningsgrader ombord i kjøretøyet som kan forklare avviket mellom simuleringer og målinger, men det er vanskelig å konkludere med noe eksakt.

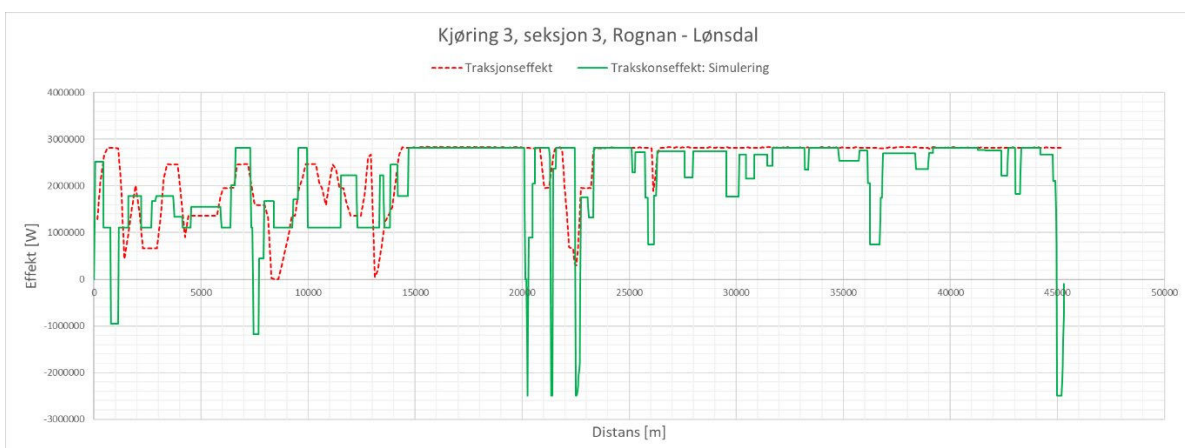
Det som styrker at endringer i togvekt og kjøremotstand er en korrigering som bedre speiler virkeligheten er at disse endringer ble gjort for alle tre kjøringene (del-strekninger) med det samme toget. I alle tilfeller ble det oppnådd forbedret samsvar med energimålingene. Samtidig er det et avvik i effekten til motorene som gjenstår å utbedre.



Figur 77: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Akkumulert energiforbruk. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)



Figur 78: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Hastighet. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)



Figur 79: Validering - Kjøring 3, seksjon 3. Traksjonseffekt. (Togvekt 770 tonn og korreksjonsfaktor C 0,5)

4.4 Konklusjon fra validering

Valideringen ble utført på 3 kjøring med 3 strekninger på hver kjøring. For to av disse strekningene (kjøring 1, seksjon 2 & 3) er det godt samsvar mellom simulerte og målte verdier uten behov for justeringer i kjøretøysparametrene. For øvrige strekninger er det behov for justering av togvekt og/eller C-koeffisienten i kjøremotstanden for å oppnå godt samsvar mellom simuleringer og målinger i det akkumulerte energiforbruket. Eksempelvis er det for kjøring 3 behov for samme justering av togvekt og C-koeffisient for seksjon 1 & 3, noe som styrker teorien om at det kan være et avvik i den rapporterte togvekten.

Avvikene er ikke systematiske på en måte som gjør at det kan konkluderes med at det forekommer systematiske feil i simuleringene. For å komme til bunns i årsaken til avvikene er det foreslått å sjekke usikkerhetsspennet på innrapportert togvekt til Bane NOR.

Uansett avviket mellom simulering og energimåling så viser simuleringresultatene at kjøretøyet blir modellert riktig i den forstand at det akkumulerte energiforbruket, hastigheten og motoreffekten generelt har riktig størrelsesorden og at mengdene forholder seg til hverandre på en korrekt måte.

5 Resultater fra energisimuleringer

Kapittel 5.2 – 5.7 presenterer energiforbruket fra simuleringer under normale driftsforhold. Alle energimengder er netto, dvs. inkludert elektrodynamisk bremsing og gjenmating til kontaktledning. Resultatet er inngangsdata til driftskostnadsberegninger og utslippsberegninger. Energien som presenteres er derfor mengden energi ved kilden, det vil si ved strømvaktar, som diesel eller hydrogen. Energitalp i komponenter presentert i Tabell 3 er inkludert.

5.1 Forslag til elektrifisering brukt for energisimulering

Tre konsepter er simulert med elektrifisering som ikke eksisterer i dag, hel-elektrifisering (konsept 4), hydrogen med del-elektrifisering (konsept 2b) og batteri (konsept 3). Seksjonene presentert i Tabell 13- Tabell 15 presenterer elektrifiseringen som brukes til simuleringer for hvert bane.

Tabell 13: Ny elektrifisering, konsept 4 – elektrifisering.

Bane	Fra (jernbane-km)	Til (jernbane-km)	Lengde (km)	Kommentar
Nordlandsbanen	552,9	34,7	33,32	Allerede elektrifisert ved prosjektstart
	34,7	728,7	693,80	Stjørdal-Bodø
Rørosbanen	126,5	501,2	383,50	Hamar-Støren
Solørbanen	100,3	194,6	94,30	Kongsvinger-Elverum
Raumabanen	343,0	457,2	114,20	Dombås-Åndalsnes

Tabell 14: Ny elektrifisering, konsept 2b – hydrogen med del-elektrifisering.

Bane	Fra (jernbane-km)	Til (jernbane-km)	Lengde (km)	Kommentar
Nordlandsbanen	552,9	34,7	33,32	Allerede elektrifisert ved prosjektstart
	543,0	549,9	6,9	
	553,1	563,2	10,1	
	563,8	575,9	12,1	
	596,1	608,4	12,3	
	629,3	633,8	4,5	
Rørosbanen	422,0	446,1	24,1	
	447,3	455,0	7,7	
Solørbanen	-	-	-	Ingen ny elektrifisering
Raumabanen	401,3	414,4	13,1	
	419,5	429,5	10,00	

Tabell 15: Ny elektrifisering, konsept 3 – batteri.

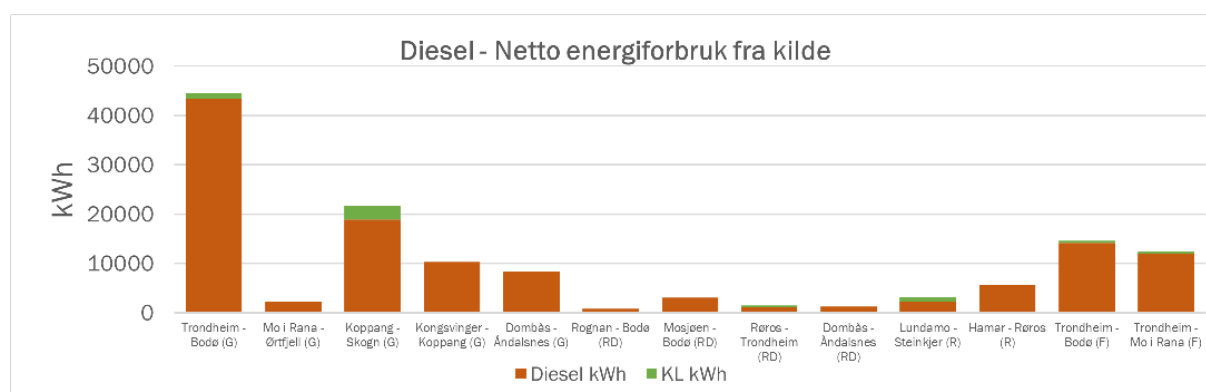
Bane	Fra (jernbane- km)	Til (jernbane- km)	Lengde (km)	Kommentar
Nordlandsbanen	552,9	34,7	33,32	Allerede elektrifisert ved prosjektstart
	119,0	138,0	19,0	
	138,3	180,2	41,9	
	253,8	277,9	24,1	
	279,6	340,8	61,2	
	379,3	385,7	6,4	
	391,4	411,1	19,7	
	497,8	509,6	11,8	
	523,6	531,5	7,9	
	538,2	549,9	11,7	
	553,1	563,2	10,1	
	600,3	608,4	8,1	
	617,0	624,0	7,0	
	629,3	649,3	20,0	
	727,5	728,8	1,3	Bodø stasjonsområde
Rørosbanen	126,3	192	65,3*	
	257,7	322,6	64,9	
	443,0	446,1	3,1	
	446,1	455	8,9	
Solørbanen	100,3	195	94,7	Hele banen
Raumabanen	401,3	414,4	13,1	
	452,5	457,3	4,8	Åndalsnes stasjonsområde

*Inkludert kedjebrudd

5.2 Energiforbruk Konsept 0 – Diesel

Tabell 16: Netto energiforbruk for dieseldrift for hver simulert linje. Energiforbruket som presenteres er gjennomsnittet for begge retninger. (1 liter diesel = 10,08 kWh)

Rute	Lengde på strekning	Linje	Elektrifisert	Kjøretøy	Energi fra Diesel, Gjennomsnitt	Energi fra KL, Gjennomsnitt
Trondheim - Bodø	727,1 km	GK25a	33,32 km (4,6%)	Godstog	44536 kWh (4349 liter)	1078 kWh
Mo i Rana - Ørtfjell	36,7 km	GSM25	0 km (0%)	Godstog	2241 kWh (222 liter)	0 kWh
Koppang - Skogn	389,5 km	GST18x	85,02 km (21,8%)	Godstog	18958 kWh (1881 liter)	2806 kWh
Kongsvinger - Koppang	182,2 km	GST13x	0 km (0%)	Godstog	10365 kWh (1028 liter)	0 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	GK23	0 km (0%)	Godstog	8393 kWh (833 liter)	0 kWh
Rognan - Bodø	81,0 km	R75	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	860 kWh (85 liter)	0 kWh
Mosjøen - Bodø	322,7 km	F7	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	3040 kWh (302 liter)	0 kWh
Røros - Trondheim	162,9 km	RD60	51,69 km (31,7%)	Regiontog i distrikt	1122 kWh (111 liter)	326 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	RD65	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	1257 kWh (125 liter)	0 kWh
Lundamo - Steinkjer	161,9 km	R70	71,41 km (44,1%)	Regiontog	2275 kWh (226 liter)	952 kWh
Hamar - Røros	272,2 km	RD60	0 km (0%)	Regiontog	5669 kWh (562 liter)	0 kWh
Trondheim - Bodø	727,1 km	F7	33,32 km (4,6%)	Fjerntog	14158 kWh (1405 liter)	473 kWh
Trondheim - Mo i Rana	496,3 km	F7	33,32 km (6,7%)	Fjerntog	11953 kWh (1186 liter)	470 kWh

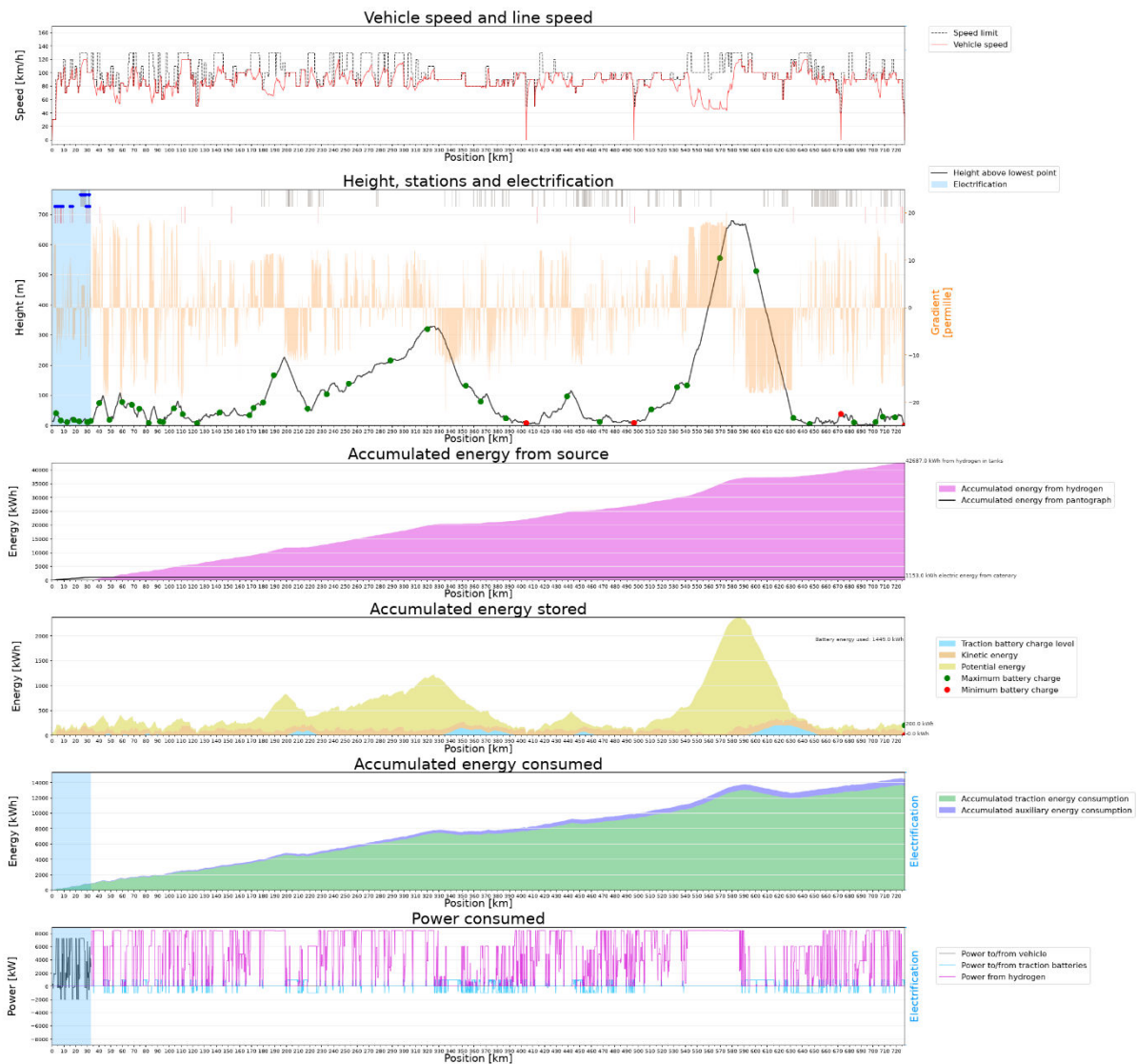


Figur 80: Konsept 0 – Diesel. Netto energiforbruk ved kilde (diesel og kontaktledning). G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

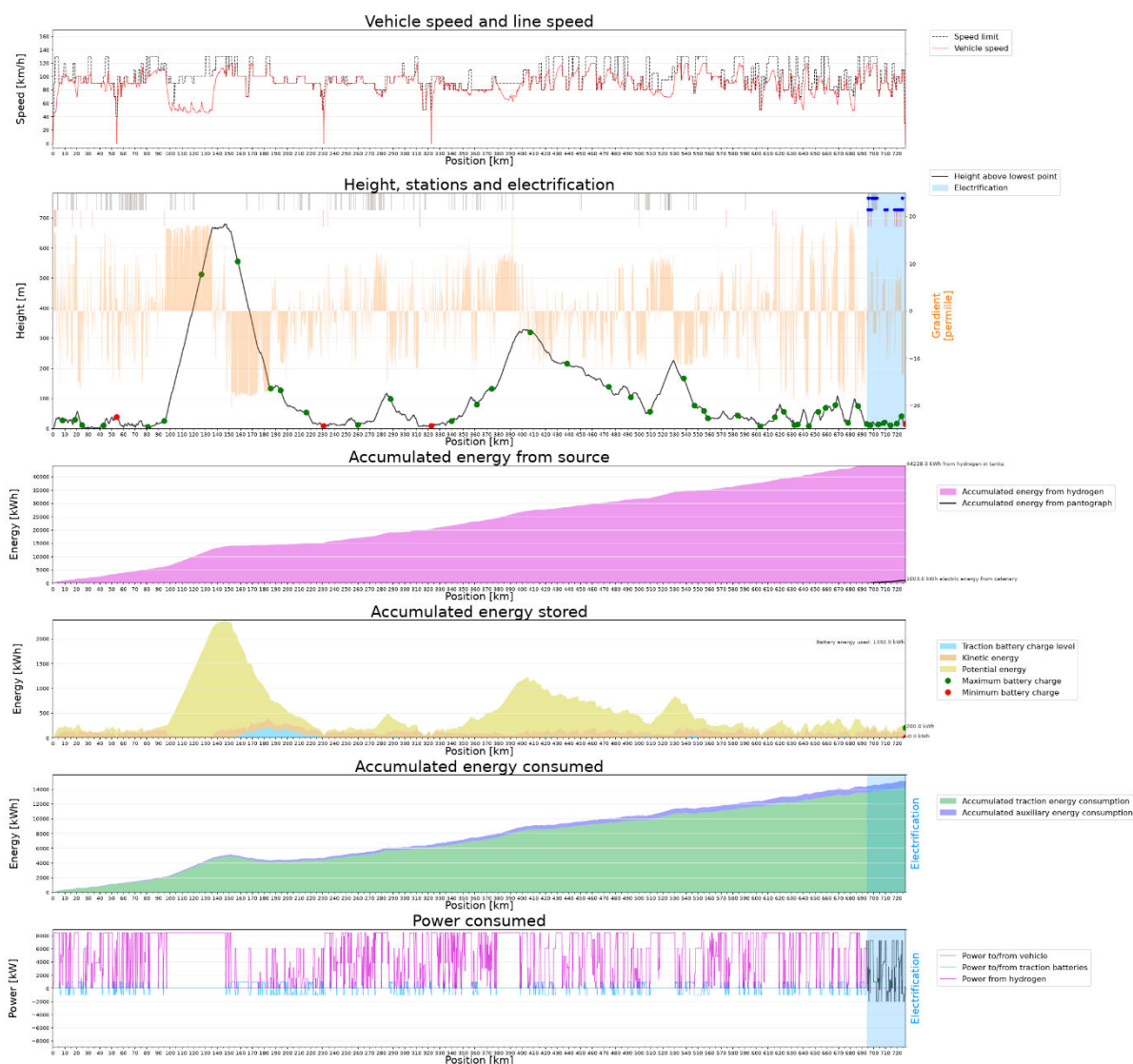
5.2.1 Utvalg av simuleringsresultat

I det følgende presenteres et utvalg av simuleringsresultat. For dette konseptet blir det kun presentert resultat fra godstogslinjen GK25a.

GK25a



Figur 81: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Trondheim – Bodø med konsept 0, diesel. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.



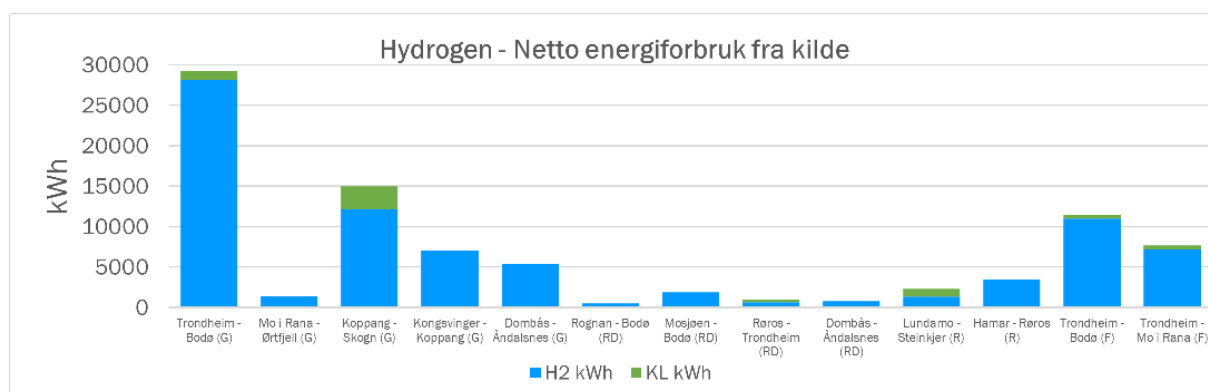
Figur 82: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Bodø–Trondheim med konsept 0, diesel. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen på elektrifisert strekning.

5.3 Energiforbruk Konsept 2a – Hydrogen

Tabell 17: Netto energiforbruk for hydrogendrift for hver simulert linje. Energiforbruket som presenteres er gjennomsnittet for begge retninger. (1 kg hydrogen = 33 kWh)

Rute	Lengde på strekning	Linje	Elektrifisert	Kjøretøy	Energi fra Hydrogen, Gjennomsnitt	Energi fra KL, Gjennomsnitt
Trondheim - Bodø	727,1 km	GK25a	33,32 km (4,6%)	Godstog	28194 kWh (858 kg)	1078 kWh
Mo I Rana - Ørtfjell	36,7 km	GSM25	0 km (0%)	Godstog	1379 kWh (42 kg)	0 kWh
Koppang - Skogn	389,5 km	GST18x	85,02 km (21,8%)	Godstog	12171 kWh (369 kg)	2806 kWh
Kongsvinger - Koppang	182,2 km	GST13x	0 km (0%)	Godstog	7078 kWh (214 kg)	0 kWh

Dombås - Åndalsnes	114,2 km	GK23	0 km (0%)	Godstog	5387 kWh (163 kg)	0 kWh
Rognan - Bodø	81,0 km	R75	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	535 kWh (16 kg)	0 kWh
Mosjøen - Bodø	322,7 km	F7	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	1870 kWh (57 kg)	0 kWh
Røros - Trondheim	162,9 km	RD60	51,69 km (31,7%)	Regiontog i distrikt	666 kWh (20 kg)	326 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	RD65	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	758 kWh (23 kg)	0 kWh
Lundamo-Steinkjer	161,9 km	R70	71,41 km (44,1%)	Regiontog	1337 kWh (41 kg)	952 kWh
Hamar - Røros	272,2 km	RD60	0 km (0%)	Regiontog	3497 kWh (106 kg)	0 kWh
Trondheim-Bodø	727,1 km	F7	33,32 km (4,6%)	Fjerntog	10981 kWh (333 kg)	473 kWh
Trondheim-Mo I Rana	496,3 km	F7	33,32 km (6,7%)	Fjerntog	7232 kWh (219 kg)	470 kWh

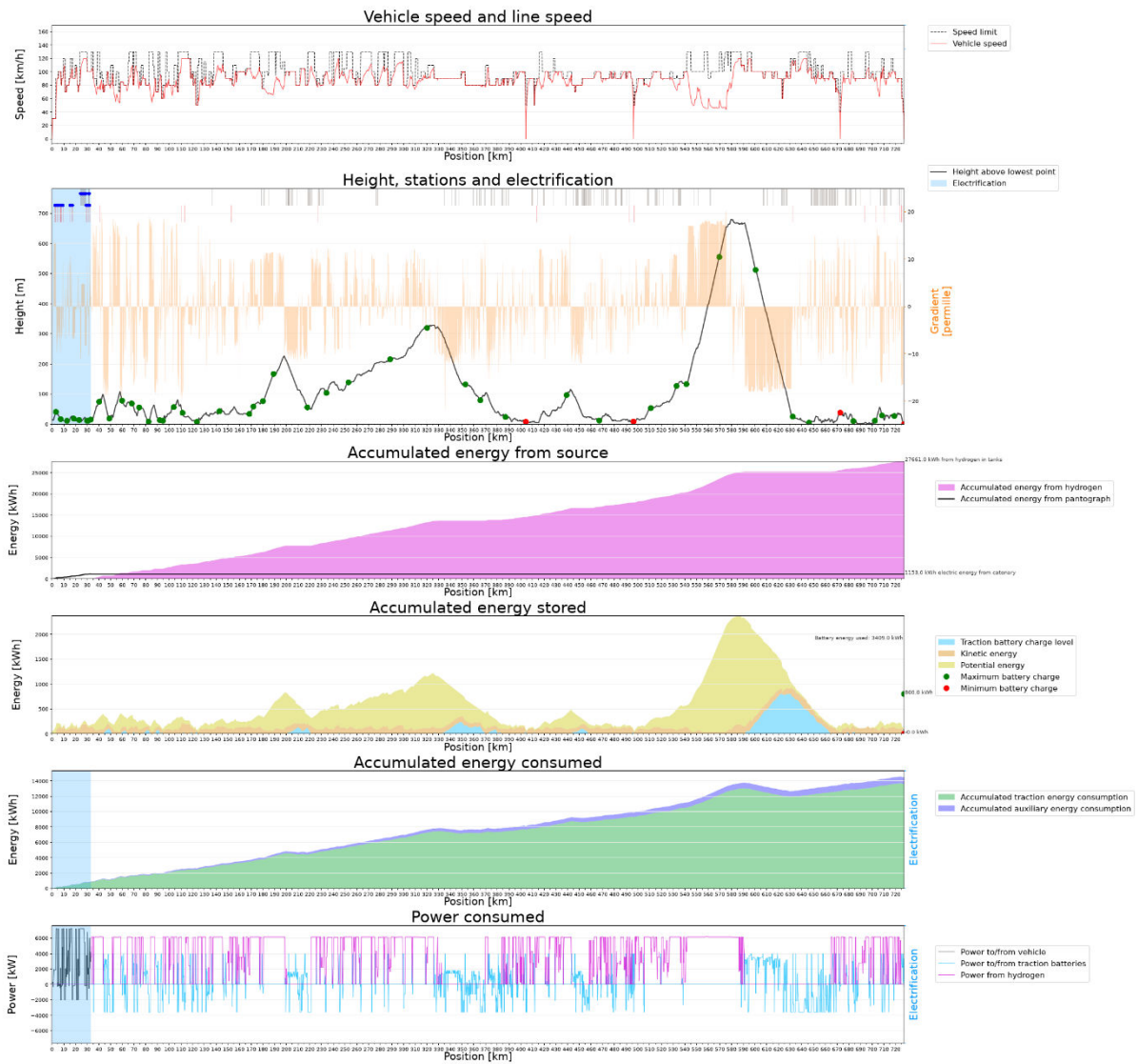


Figur 83: Konsept 2a – Hydrogen. Netto energiforbruk ved kilde (hydrogen og kontaktledning). G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

5.3.1 Utvalg av simuleringsresultat

I det følgende presenteres et utvalg av simuleringsresultat. For dette konseptet blir det kun presentert resultat fra godstogslinjen GK25a.

GK25a



Figur 84: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Trondheim – Bodø med konsept 2a, hydrogen. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.



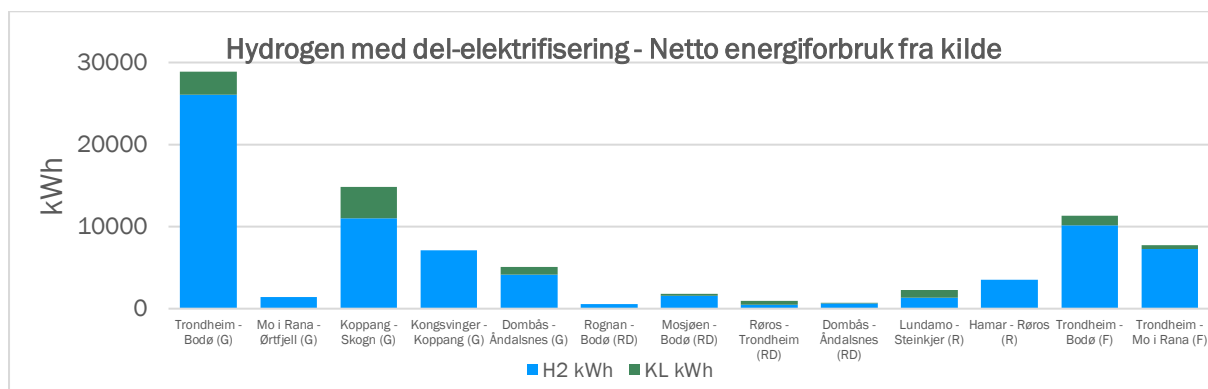
Figur 85: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Bodø–Trondheim med konsept 2a, hydrogen. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

5.4 Energiforbruk Konsept 2b – Hydrogen med del-elektrifisering

Tabell 18: Netto energiforbruk for hydrogendrift med ny elektrifisering for hver simulert linje. Energiforbruket som presenteres er gjennomsnittet for begge retninger. (1 kg hydrogen = 33 kWh)

Rute	Lengde på strekning	Linje	Elektrifisert	Kjøretøy	Energi fra Hydrogen, Gjennomsnitt	Energi fra KL, Gjennomsnitt
Trondheim - Bodø	727,1 km	GK25a	77,80 km (10,7%)	Godstog	26093 kWh (791 kg)	2797 kWh
Mo I Rana - Ørtfjell	36,7 km	GSM25	0 km (0%)	Godstog	1379 kWh (42 kg)	0 kWh
Koppang - Skogn	389,5 km	GST18x	115,88 km (29,7%)	Godstog	11029 kWh (334 kg)	3799 kWh

Kongsvinger - Koppang	182,2 km	GST13x	0 km (0%)	Godstog	7078 kWh (214 kg)	0 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	GK23	22,50 km (19,7%)	Godstog	4115 kWh (125 kg)	993 kWh
Rognan - Bodø	81,0 km	R75	0 km (0%)	Regiontog i distrikt	535 kWh (16 kg)	0 kWh
Mosjøen - Bodø	322,7 km	F7	44,48 km (13,8%)	Regiontog i distrikt	1565 kWh (47 kg)	265 kWh
Røros - Trondheim	162,9 km	RD60	82,55 km (50,7%)	Regiontog i distrikt	489 kWh (15 kg)	475 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	RD65	22,5 km (19,7%)	Regiontog i distrikt	605 kWh (18 kg)	128 kWh
Lundamo - Steinkjer	161,9 km	R70	71,41 km (44,1%)	Regiontog	1337 kWh (41 kg)	952 kWh
Hamar - Røros	272,2 km	RD60	0 km (0%)	Regiontog	3497 kWh (106 kg)	0 kWh
Trondheim - Bodø	727,1 km	F7	77,80 km (10,7%)	Fjerntog	10171 kWh (308 kg)	1179 kWh
Trondheim - Mo i Rana	496,3 km	F7	33,32 km (6,7%)	Fjerntog	7232 kWh (219 kg)	470 kWh



Figur 86: Konsept 2b – Hydrogen med del-elektrifisering. Netto energiforbruk ved kilde (hydrogen og kontaktledning). G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

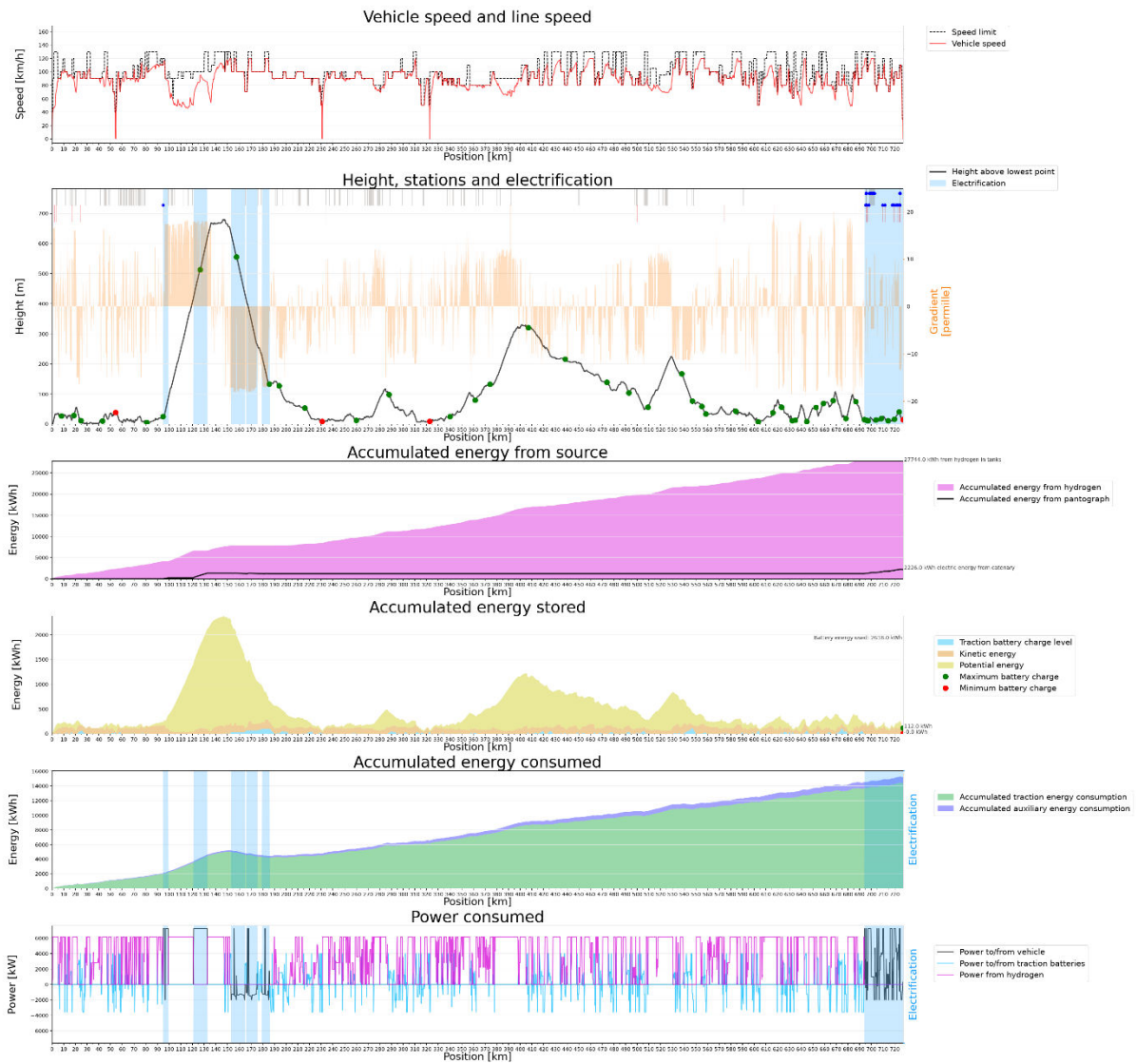
5.4.1 Utvalg av simuleringsresultat

I det følgende presenteres et utvalg av simuleringsresultat. For dette konseptet blir det kun presentert resultat fra godstogslinjene GK25a, GST18x og GK23, fordi disse har del-elektrifisering.

GK25a



Figur 87: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Trondheim – Bodø med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

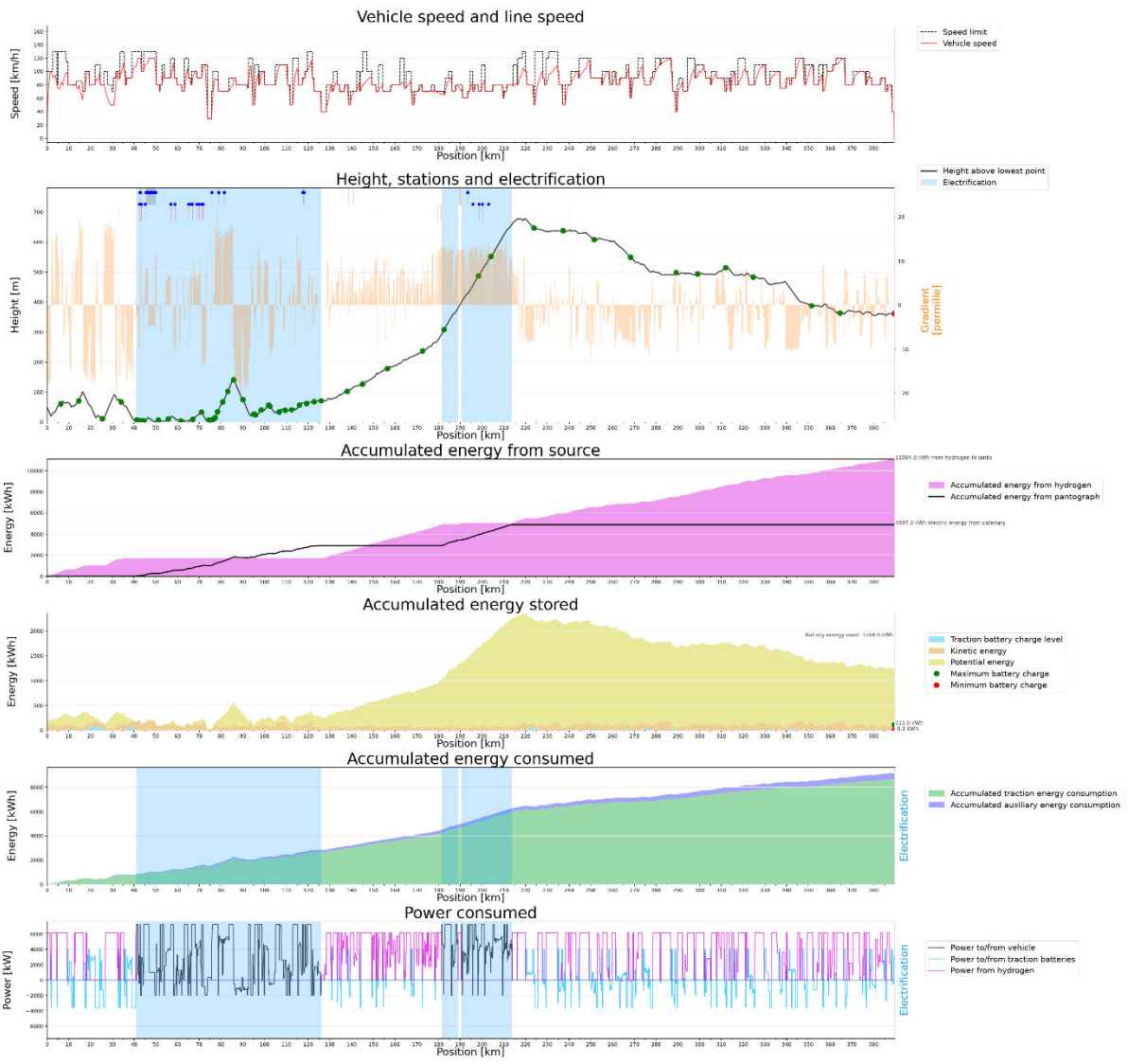


Figur 88: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Bodø - Trondheim med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

GST18x

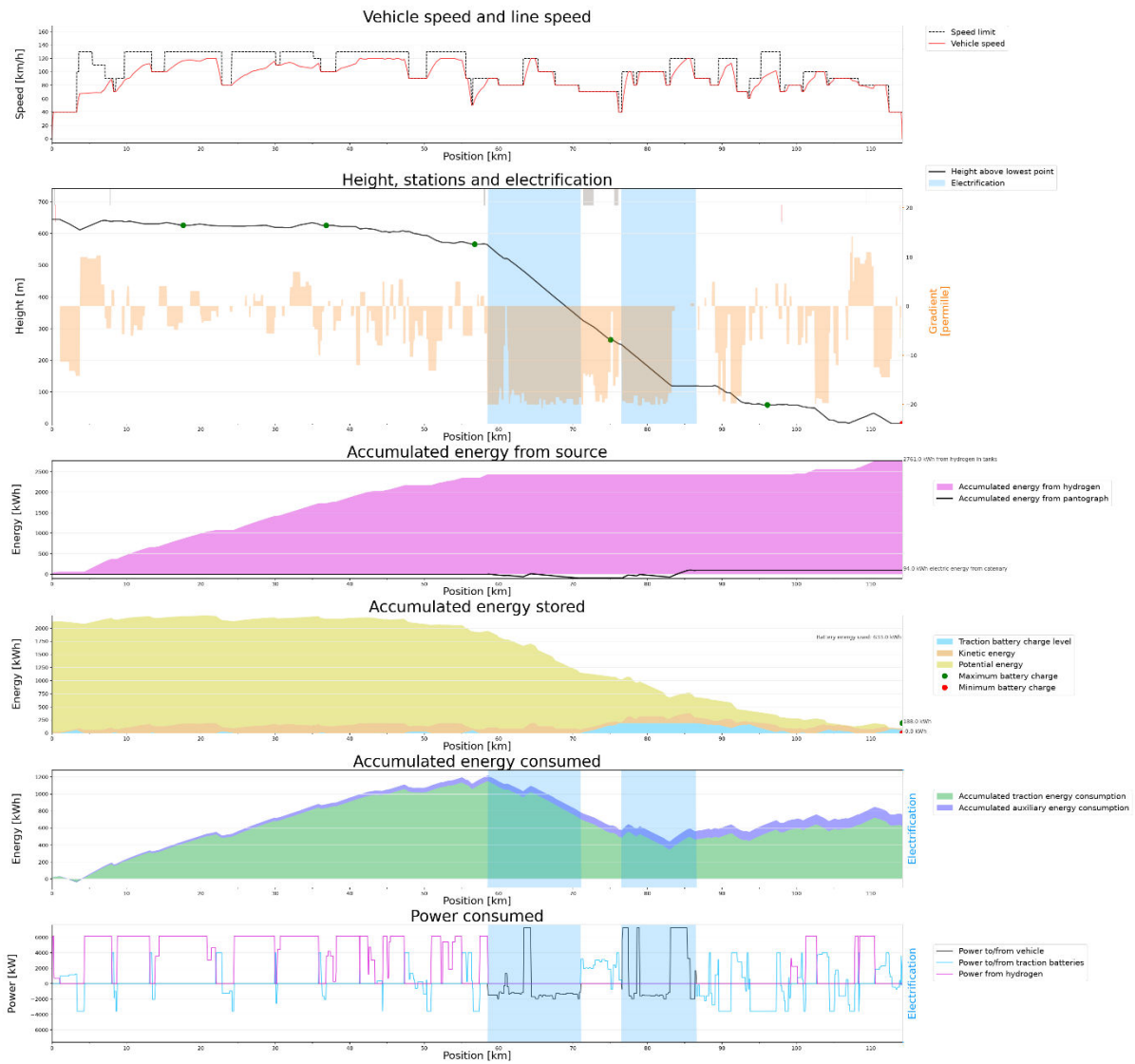


Figur 89: Simuleringsresultat for godstog GST18x, Koppang-Skogn med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

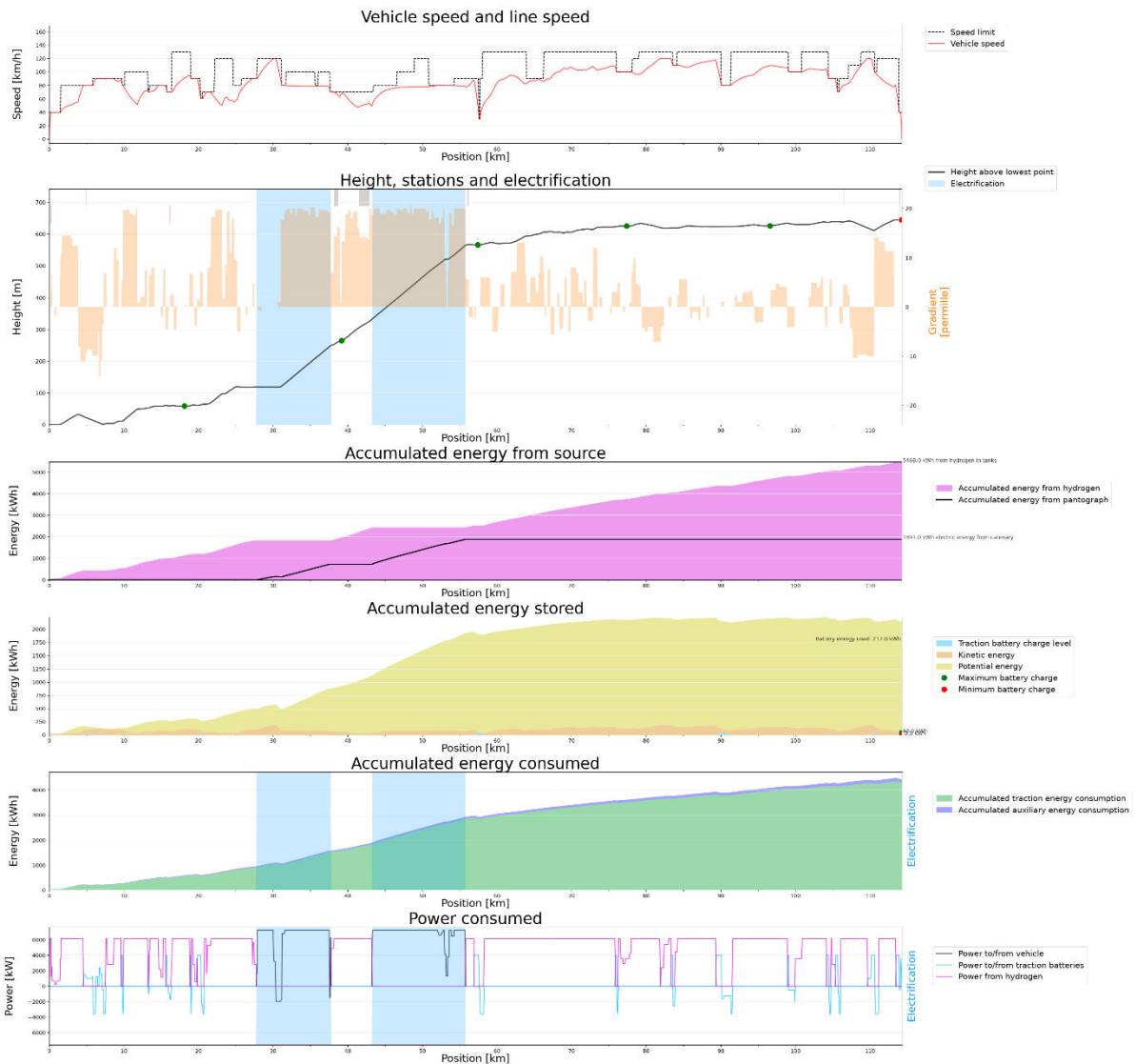


Figur 90: Simuleringsresultat for godstog GST18x, Skogn-Koppang med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

GK23



Figur 91: Simuleringsresultat for godstog GK23, Dombås-Åndalsnes med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.



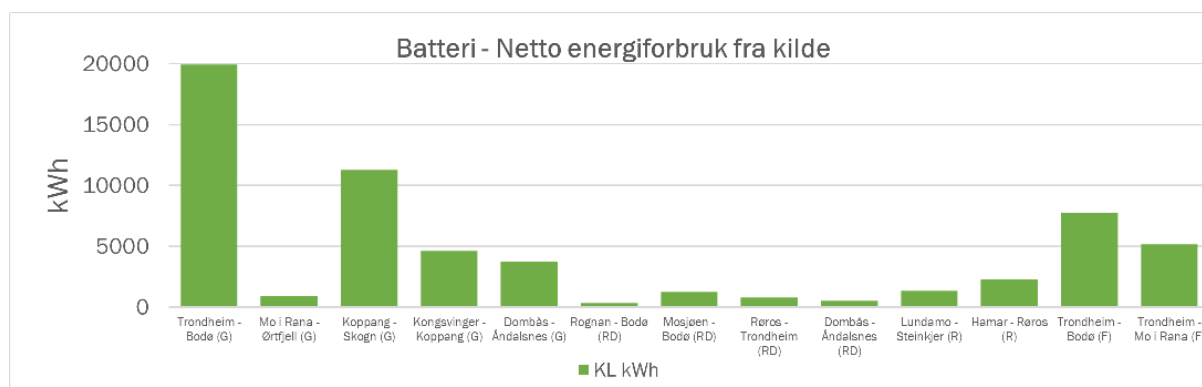
Figur 92: Simuleringsresultat for godstog GK23, Åndalsnes - Dombås med konsept 2b, hydrogen med del-elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

5.5 Energiforbruk Konsept 3 - Batteri

Tabell 19 Netto energiforbruk for batteridrift for hver simulert linje. Energiforbruket som presenteres er gjennomsnittet for begge retninger.

Rute	Lengde på strekning	Linje	Elektrifisert	Kjøretøy	Energi fra KL, Gjennomsnitt
Trondheim - Bodø	727,1 km	GK25a	272,72 km (37,5%)	Godstog	19930 kWh
Mo I Rana - Ørtfjell	36,7 km	GSM25	18,20 km (49,6%)	Godstog	914 kWh
Koppang - Skogn	389,5 km	GST18x	207,45 km (53,3%)	Godstog	11260 kWh

Kongsvinger - Koppang	182,2 km	GST13x	127,5 km (70%)	Godstog	4613 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	GK23	50,09 km (43,8%)	Godstog	3747 kWh
Rognan - Bodø	81,0 km	R75	1,24 km (1,5%)	Regiontog i distrikt	321 kWh
Mosjøen - Bodø	322,7 km	F7	77,46 km (24,0%)	Regiontog i distrikt	1238 kWh
Røros - Trondheim	162,9 km	RD60	106,08 km (65,1%)	Regiontog i distrikt	793 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	RD65	50,09 km (43,8%)	Regiontog i distrikt	516 kWh
Lundamo - Steinkjer	161,9 km	R70	77,85 km (48,1%)	Regiontog	1332 kWh
Hamar - Røros	272,2 km	RD60	132,42 km (48,6%)	Regiontog	2302 kWh
Trondheim - Bodø	727,1 km	F7	272,72 km (37,5%)	Fjerntog	7779 kWh
Trondheim - Mo i Rana	496,3 km	F7	200,12 km (40,3%)	Fjerntog	5177 kWh



Figur 93: Konsept 3 – Batteri. Netto energiforbruk ved kilde (kontaktledning). G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

5.5.1 Utvalg av simuleringresultat

I det følgende presenteres et utvalg av simuleringresultat. For dette konseptet blir det presentert resultat fra hver bane, og årsaken til dette er for ått batterikonseptet er sterkt avhengig av hvis toget kommer frem med energin i batteriene. En annen årsak er for å illustrere hvordan elektrifiseringen er plassert på banene. Det er valgt å presentere godstogslinjene unntatt malmtogen.

GK25a



Figur 94: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Trondheim – Bodø med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

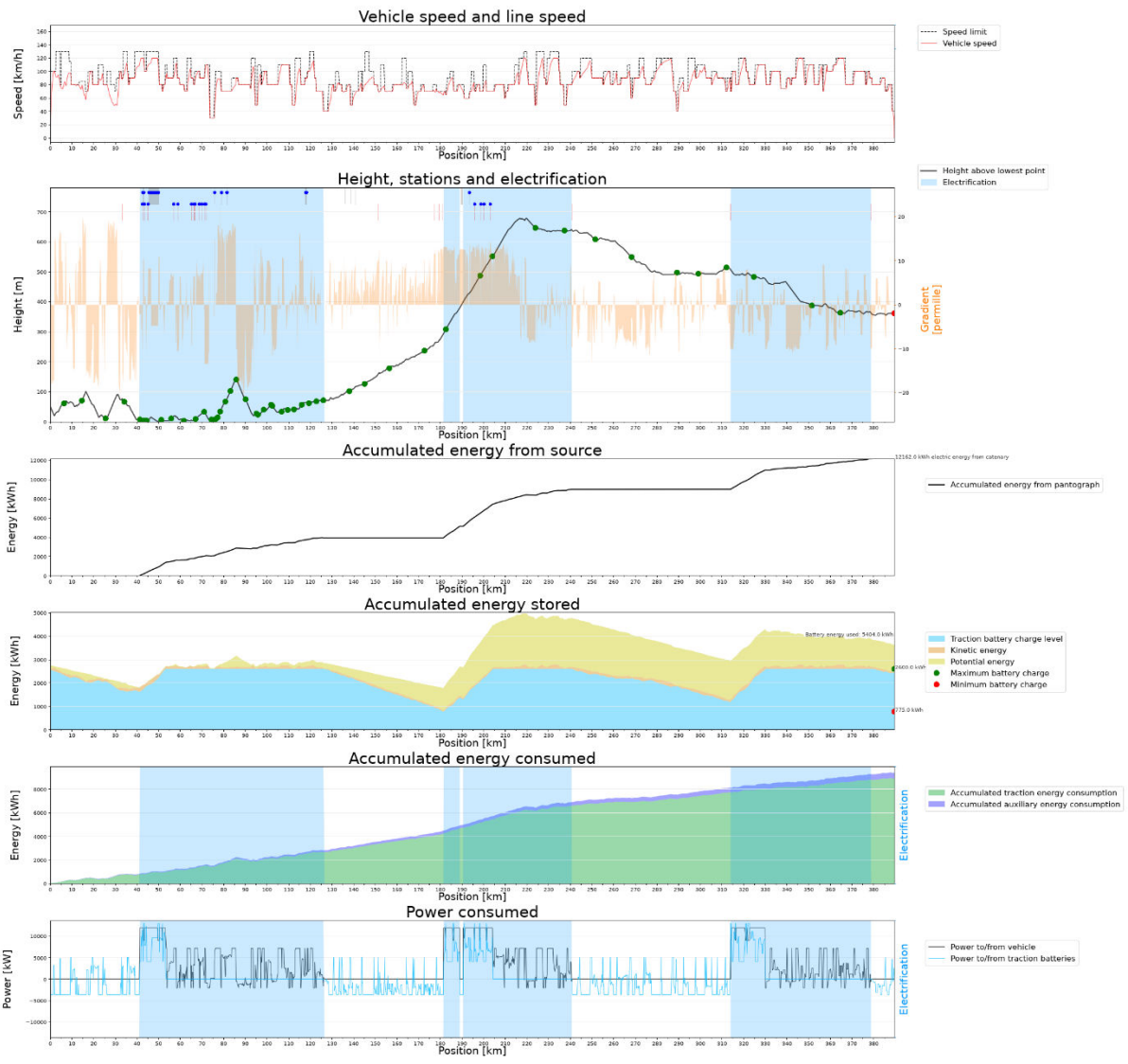


Figur 95: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Bodø - Trondheim med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

GST18x

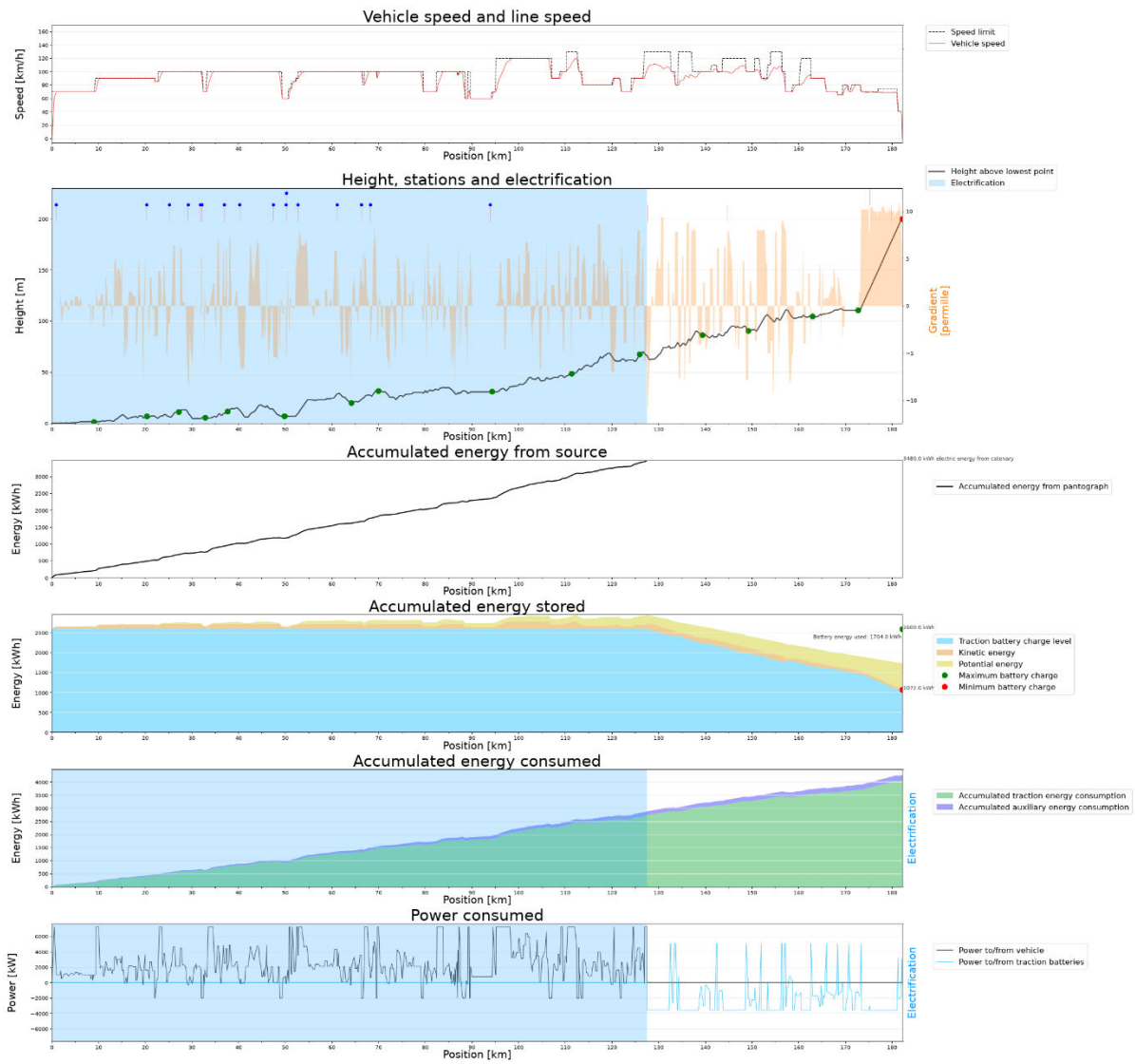


Figur 96: Simuleringsresultat for godstog GST18x, Koppang-Skogn med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

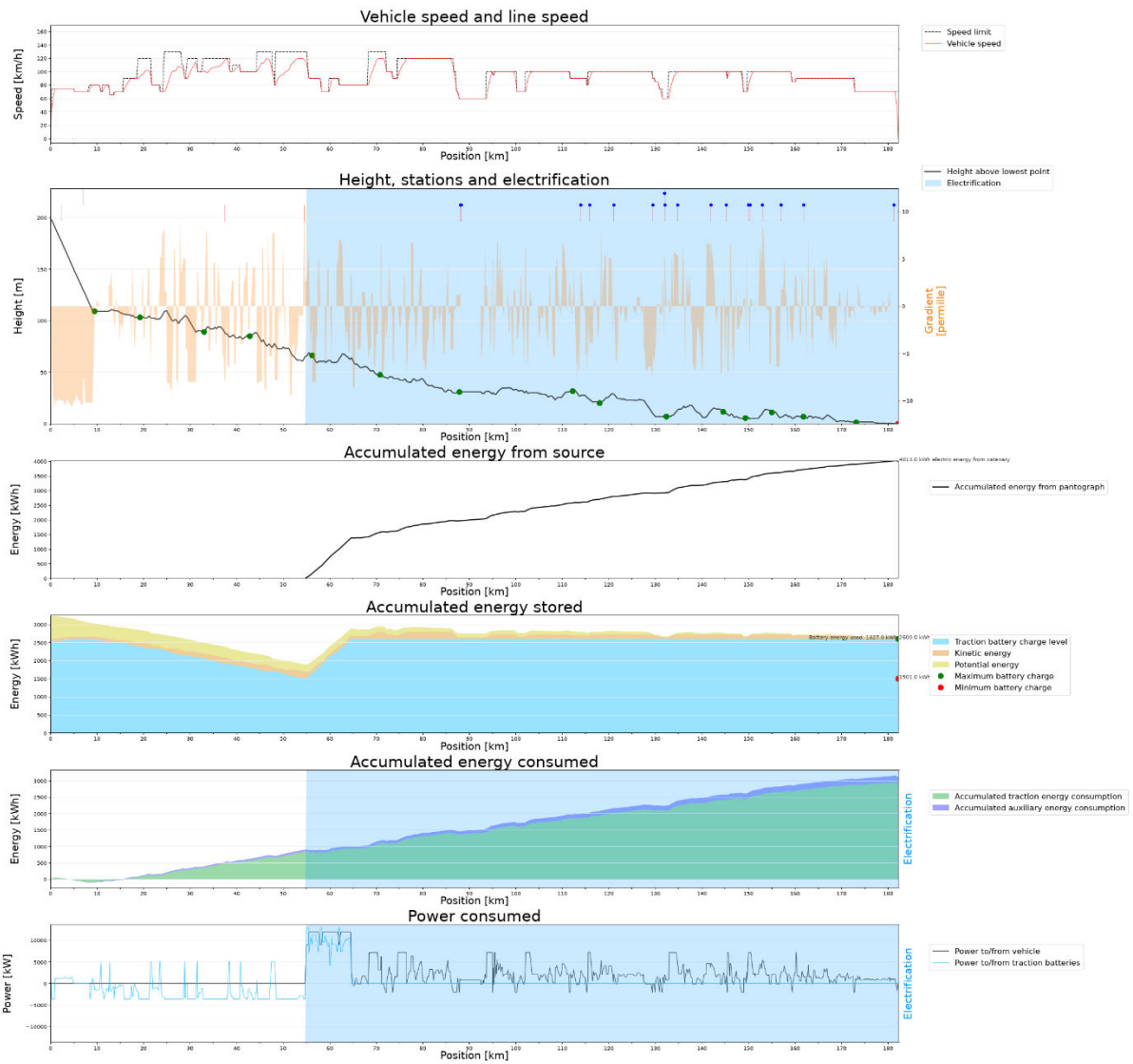


Figur 97: Simuleringsresultat for godstog GST18x, Skogn-Koppang med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

GST13x

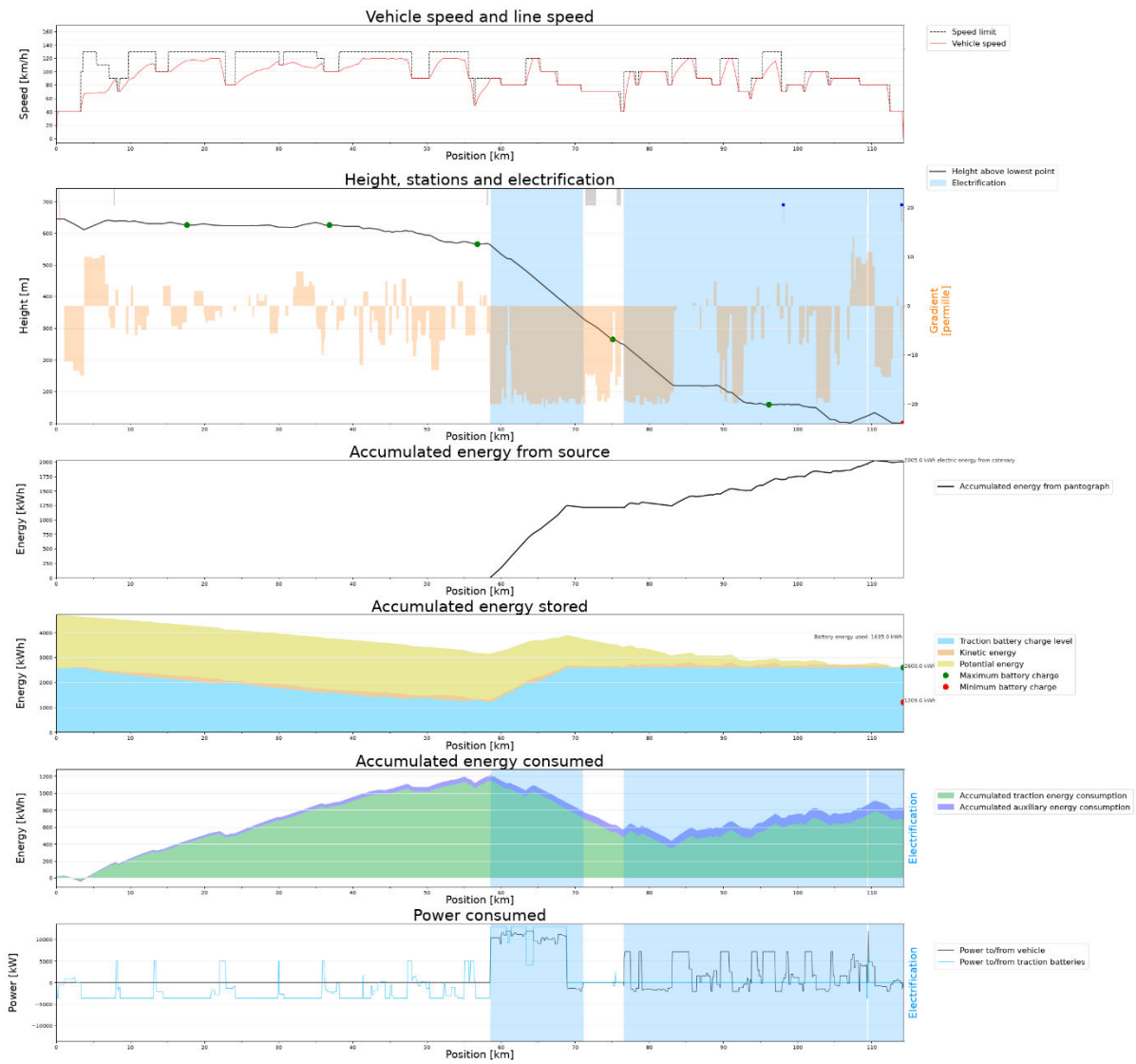


Figur 98: Simuleringsresultat for godstog GST13x, Kongsvinger-Koppang med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

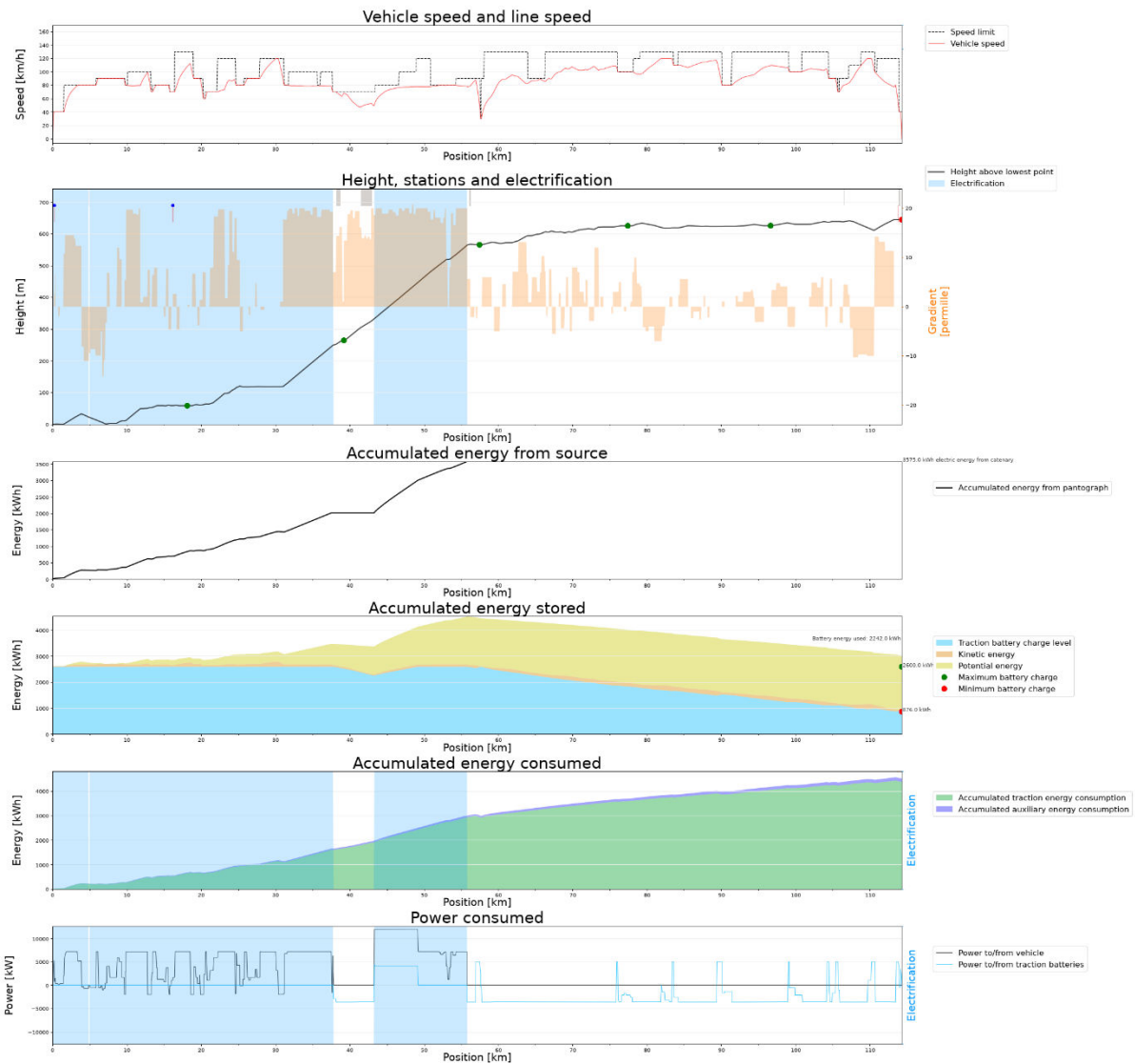


Figur 99: Simuleringsresultat for godstog GST13x, Koppang-Kongsvinger med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

GK23



Figur 100: Simuleringsresultat for godstog GK23, Dombås-Åndalsnes med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.



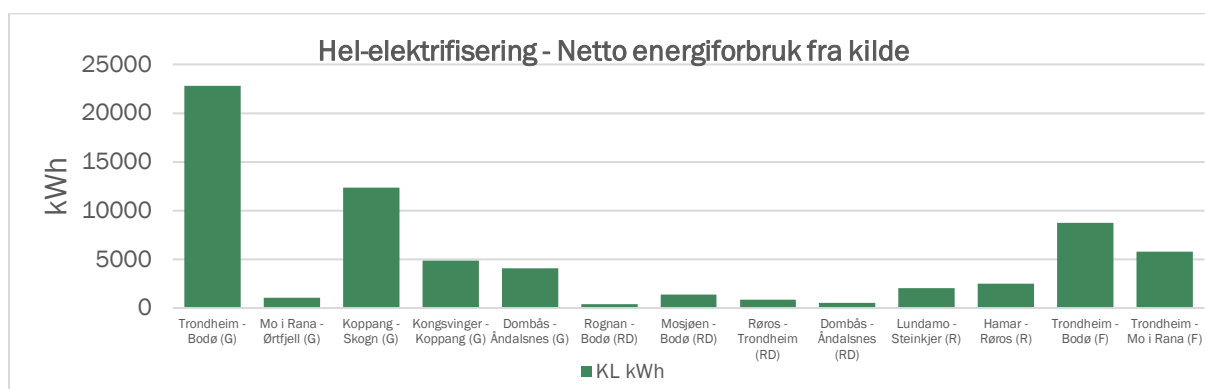
Figur 101: Simuleringsresultat for godstog GK23, Åndalsnes-Dombås med konsept 3, batteri. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruer. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

5.6 Energiforbruk Konsept 4 – Elektrifisering

Tabell 20 Netto energiforbruk for elektrisk drift for hver simulert linje. Energiforbruket som presenteres er gjennomsnittet for begge retninger.

Rute	Lengde på strekning	Linje	Elektrifisert	Kjøretøy	Energi fra KL, Gjennomsnitt
Tronsheim - Bodø	727,1 km	GK25a	727,1 km (100%)	Godstog	22783 kWh
Mo I Rana - Ørtfjell	36,7 km	GSM25	36,7 km (100%)	Godstog	1025 kWh
Koppang - Skogn	389,5 km	GST18x	389,5 km (100%)	Godstog	12384 kWh

Kongsvinger - Koppang	182,2 km	GST13x	182,2 km (100%)	Godstog	4837 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	GK23	114,2 km (100%)	Godstog	4089 kWh
Rognan - Bodø	81,0 km	R75	81,0 km (100%)	Regiontog i distrikt	391 kWh
Mosjøen - Bodø	322,7 km	F7	322,7 km (100%)	Regiontog i distrikt	1385 kWh
Røros - Trondheim	162,9 km	RD60	162,9 km (100%)	Regiontog i distrikt	840 kWh
Dombås - Åndalsnes	114,2 km	RD65	114,2 km (100%)	Regiontog i distrikt	558 kWh
Lundamo - Steinkjer	161,9 km	R70	161,9 km (100%)	Regiontog	2026 kWh
Hamar - Røros	272,2 km	RD60	272,2 km (100%)	Regiontog	2493 kWh
Trondheim - Bodø	727,1 km	F7	727,1 km (100%)	Fjerntog	8714 kWh
Trondheim - Mo i Rana	496,3 km	F7	496,3 km (100%)	Fjerntog	5789 kWh

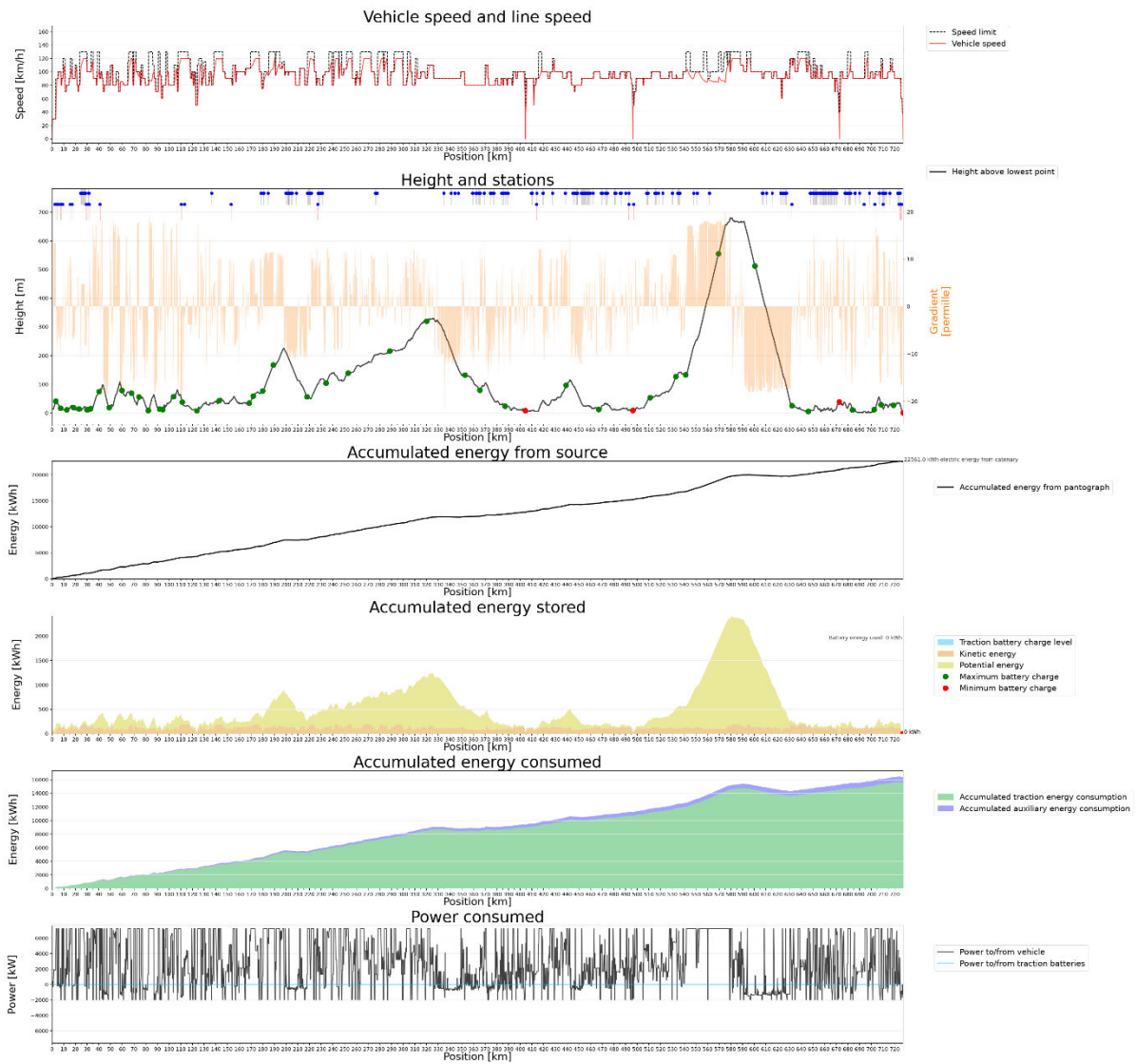


Figur 102 Konsept 4 - Elektrifisering. Netto energiforbruk ved kilde (kontaktledning). G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

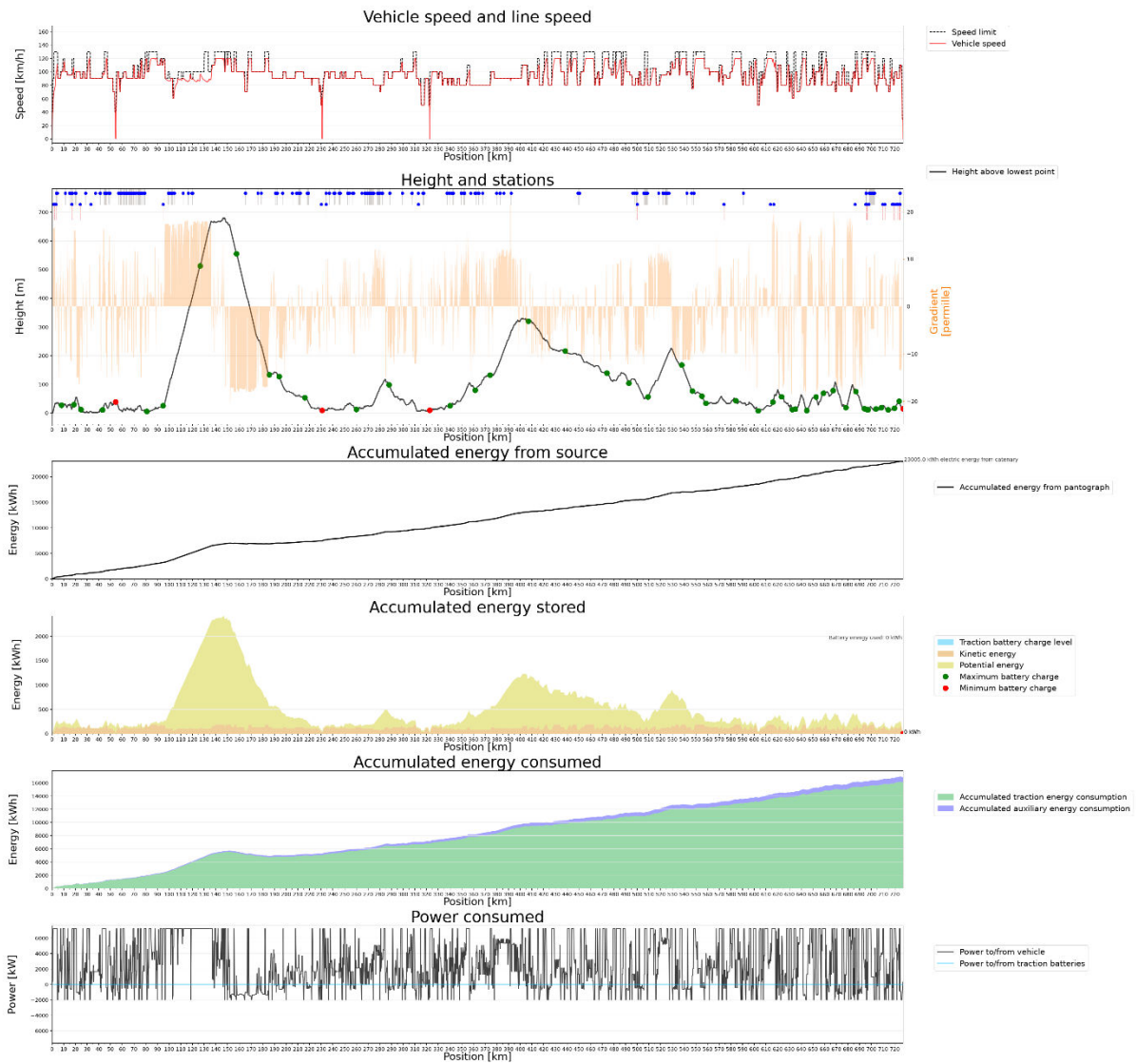
5.6.1 Utvalg av simuleringsresultat

I det følgende presenteres et utvalg av simuleringsresultat. For dette konseptet blir det kun presentert resultat fra godstogslinjen GK25a.

GK25a

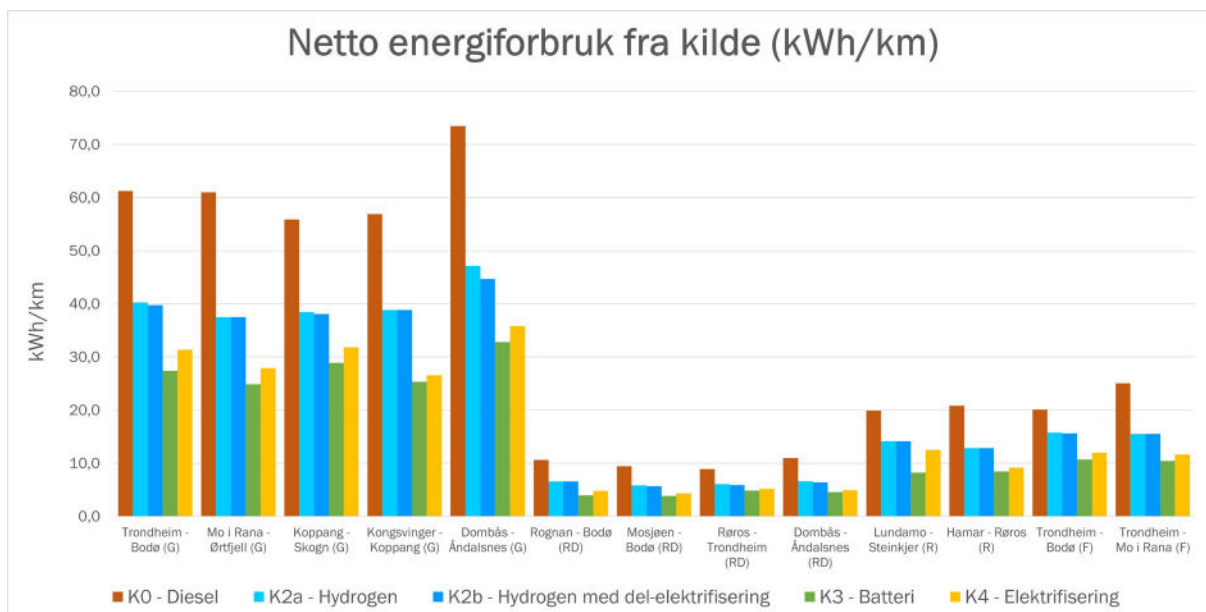


Figur 103: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Trondheim – Bodø med konsept 4, elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.



Figur 104: Simuleringsresultat for godstog GK25a, Bodø-Trondheim med konsept 4, elektrifisering. Grå ruter i graf nr 2 viser tunneler, og røde strek viser overgangsbruere. Blå prikk betyr at tunnelen eller overgangsbroen er på elektrifisert strekning.

5.7 Sammenligning



Figur 105: Netto energiforbruk (kWh/km) vid energikilde, gjennomsnitt begge retninger. Dette inkluderer alt energitap om bord i kjøretøyet. G=Godstog, RD=Regiontog i distrikt, R=Regiontog, F=Fjerntog.

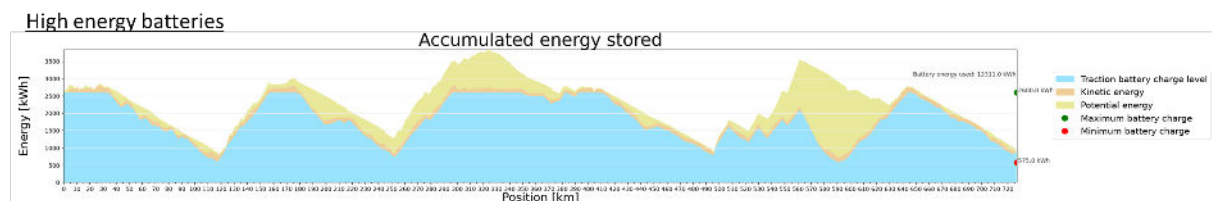
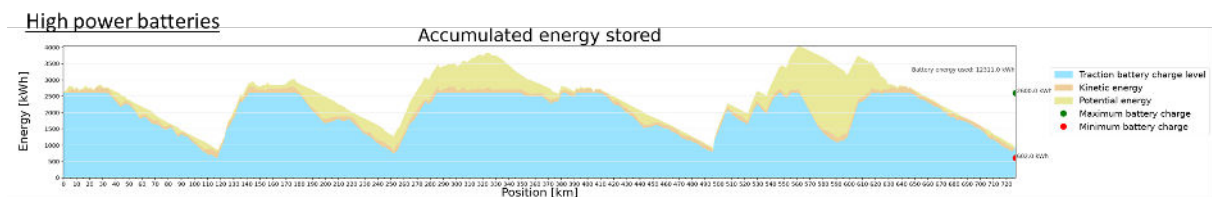
5.8 Høyeffekt- vs høyenergibatterier

I de tidligere presentert resultatene er det brukt en (ut)ladehastighet på batteripakken som tilsvarer høyeffektbatterier. Det er av interesse å se hvordan en (ut)ladehastighet som tilsvarer høyenergibatterier endrer på resultatene sammenlignet med høyeffektbatterier.

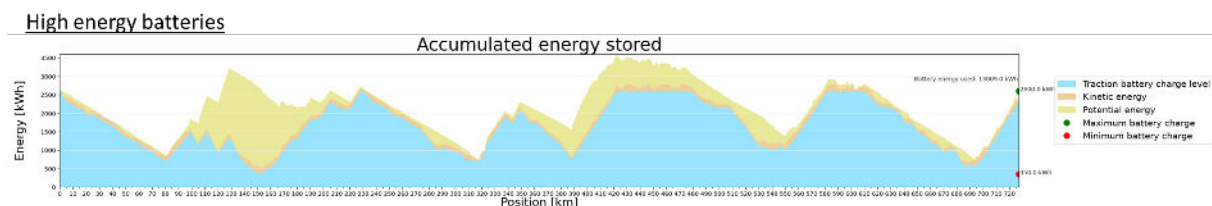
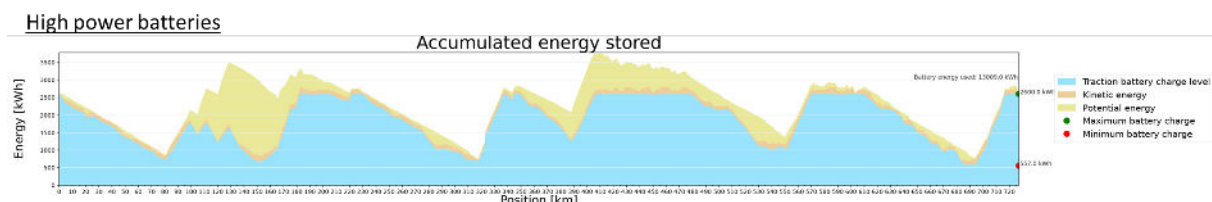
For dette formål er det simulert 1200 tonn godstog tur-retur på Nordlandsbanen, og det er brukt en ladehastighet og utladehastighet på 2, i stedet for tidligere brukt 5. Den tydeligste forskjellen i simuleringene er at batteriene vil lade opp raskere på ladestrekningen, noe som gjør at batteriene har større mulighet for å lade opp helt innenfor en gitt tid. Dette kan ha betydning hvis ladestrekningen er kort. Resultatene (i form av SoC for batteriene) presenteres i Figur 106 og Figur 107.

Resultatene er veldig like i begge retninger. I retning fra Trondheim til Bodø så blir den laveste SoC 23% for høyeffektbatterier og 22% for høyenergibatterier. Det som blir det laveste punktet i SoC endres til å være rundt Saltfjellet for høyenergibatterier, og det forklares med at den lavere ladehastigheten gjør at batteriene ikke rekker å lades fullt i den del-elektrifiserte oppoverbakken på Saltfjellet.

I den andre retningen, fra Bodø til Trondheim, så blir tilsvarende SoC 21% for høyeffektbatterier og 13% for høyenergibatterier. Også i denne retningen er det del-elektrifiseringen rundt Saltfjellet som gjør at batteriene ikke kan lades fullt. Det kan argumenteres for at del-elektrifiseringen burde være noen kilometer lengre på Saltfjellet for å unngå at høyenergibatteriene går under 20% SoC.



Figur 106: Batteri SoC for simulering med høyeffektbatterier (øvre) og høyenergibatterier (nedre) for godstogslinje GK25a Trondheim-Bodø.



Figur 107: Batteri SoC for simulering med høyeffektbatterier (øvre) og høyenergibatterier (nedre) for godstogslinje GK25a Bodø-Trondheim.

Det totale energiforbruket blir omtrent 2-3% lavere for høyenergibatterier enn for høyeffektbatterier. Forskjellen er veldig liten, noe som også skyldes at effekten i traksjonsutstyret er satt til 3 MW på ikke elektrifisert strekning, og at et D-verdi på 2 gir en uteffekt på 5200 kW for et 2600 kWh batteri. Det er altså ikke batteriet som begrenser effekten til motorene. Forskjellen kan f.eks. forklares med at for høyeffektbatterier så lader batteriene opp hurtigere, noe som gjør at det ikke finnes mulighetsrom for å lagre bremseenergi ombord kjøretøyet i like stor utstrekning. For høyenergibatterier, som trenger mer tid for å lade fullt, så er sannsynligheten høyere at det finnes tilgjengelig ladekapasitet for å ta tilvare på bremseenergi fordi batteriene ikke er ladet fullt.

I punktene under summeres funnen fra denne analysen.

- Endring fra høyeffekt- til høyenergibatterier påvirker energiforbruket marginalt og påvirker derfor heller ikke rekkevidden.
- Behov for lengde på ikke-elektrifisert strekninger påvirkes ikke i noen større utstrekning
- Kan påvirke utnyttelse av infrastrukturen, fordi batteriene lader hurtigere
- Ikke store endringer i infrastruktur

5.9 Økt energiforbruk for hjelpeutstyr og kjøremotstand

Det er i dette arbeid regnet på et antatt gjennomsnittlig energiforbruk knyttet til hjelpekraftforbruk og kjøremotstand. Det er av interesse å se hvordan energiforbruket, og spesifikt SoC i batteriene, vil se ut i et

mer ekstremt scenario. Dette kan tilsvare situasjonen vintertid, med sterk kulde og mye snø som toget må brøyte bort.

Det er derfor simulert med 100% økt hjelpekraftforbruk (fra 200 kW til 400 kW), og 40% økt kjøremotstand (faktor 1,4). Valget av en økt hjelpekraftforbruk er basert på hva som er rimelig å anta for ekstremtilfeller og hva som disse systemene typisk er dimensjonert for. For økt kjøremotstand er verdien basert på erfaringer fra drift i snø fra Norske tog. Faktor 1,4 multipliseres med alle tre komponenter av kjøremotstanden (A-, B-, og C-koeffisient), noe som er en konservativ tilnærming siden det aerodynamiske kjøremotstanden (f.eks. C og deler av B) ikke burde påvirkes nevneverdig av snø.

Denne parametervariasjon er kun gjort for fjerntoget Trondheim-Bodø, fordi det er for persontogene som hjelpekraftforbruket vil være høyest. Kjøremotstand knyttet til snøbrøyting vil også ha størst prosentuell økning for fjerntogene, fordi godstogene allerede har relativt høy kjøremotstand.

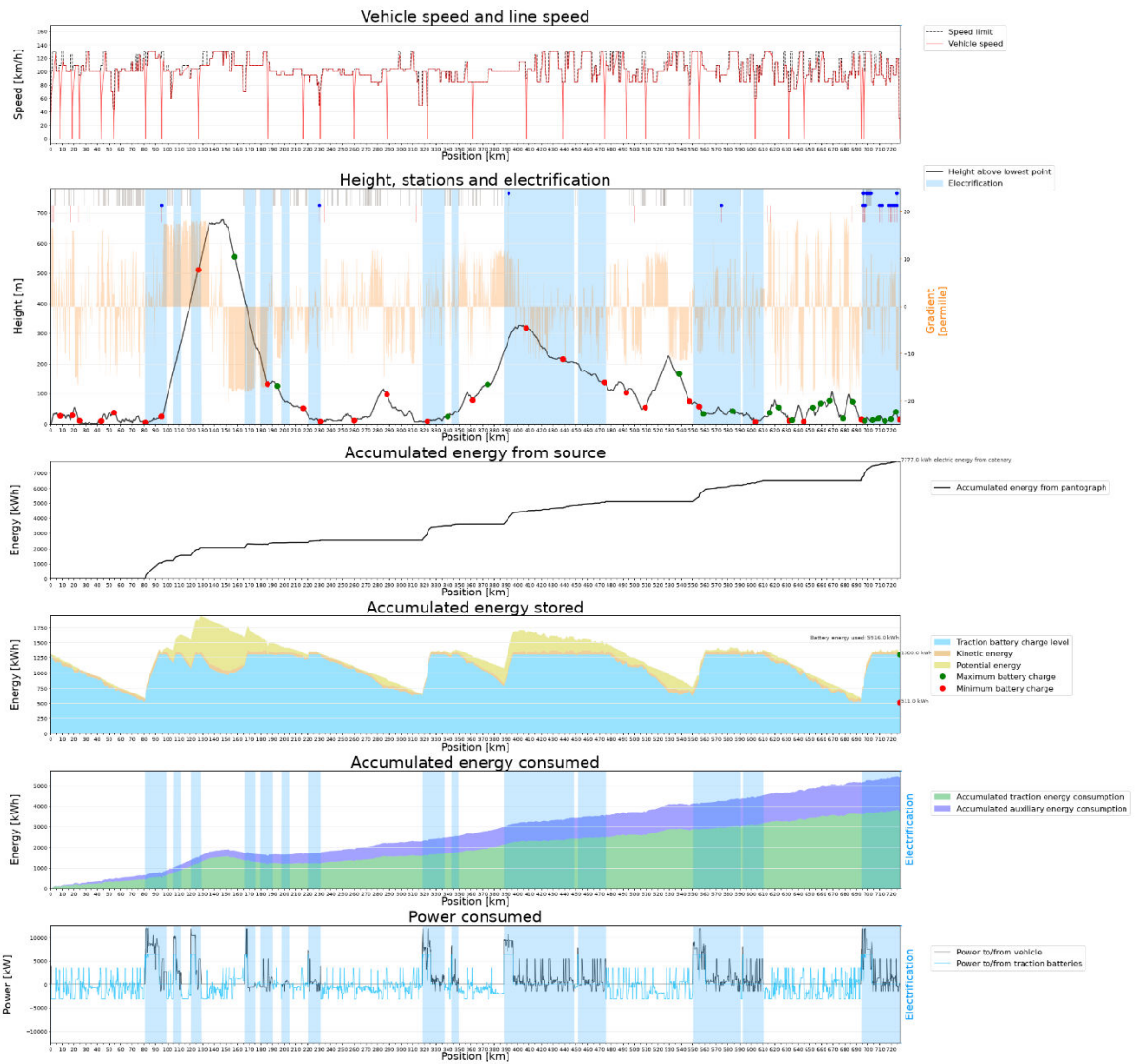
I Figur 108 og Figur 109 presenteres simuleringresultatene for fjerntog Trondheim-Bodø med normalt energiforbruk. I Figur 110 og Figur 111 vises resultatene for økt energiforbruk.

Fra resultatene kan det ses at det økte energiforbruket gjør at for Trondheim-Bodø går laveste SoC fra 472 kWh (36%) til 168 kWh (13%). For den andre retningen, Bodø-Trondheim, går laveste SoC fra 511 kWh (39%) til 211 kWh (16%). Det kan argumenteres for at med høyeffektbatterier så vil batteriene klare slik lav SoC. Hvis det brukes høyenergibatterier så vil det kreves energiforbruksreducerende tiltak, fremst reduisering av hastighet. Det skal nevnes at det er lagt til grunn en «aggressiv» kjørestil med relativt høy hastighet, noe som betyr at det vil være mulighetsrom for hastighetsoptimerende tiltak som gjør at slike ekstremtilfeller ikke vil være et problem med den energimengde som er lagt til grunn.

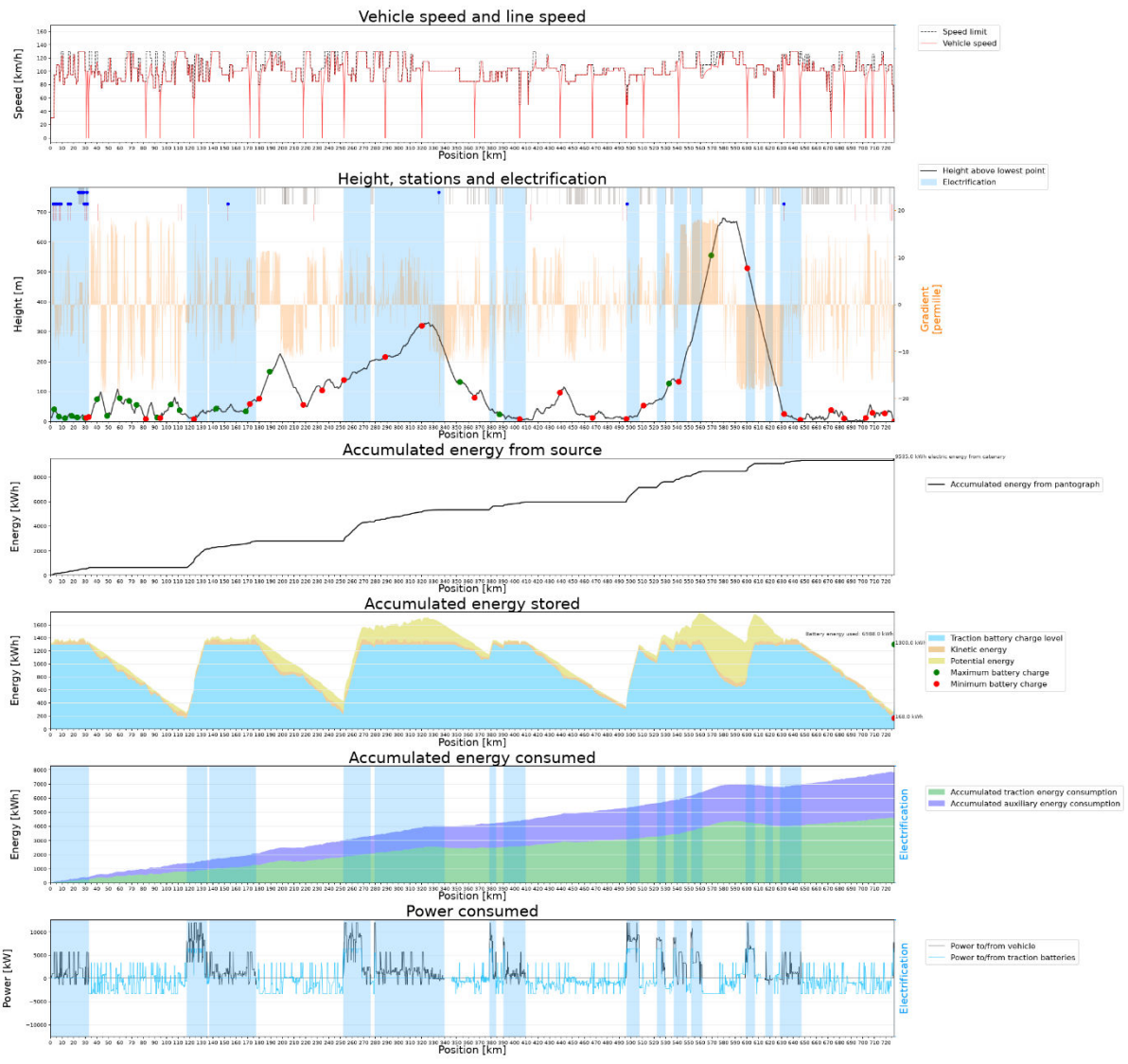
Denne parametervariasjon er ikke representativ for energiforbruket, og det er derfor ikke sammenstilt hvordan dette endrer det totale energiforbruket for linjen.



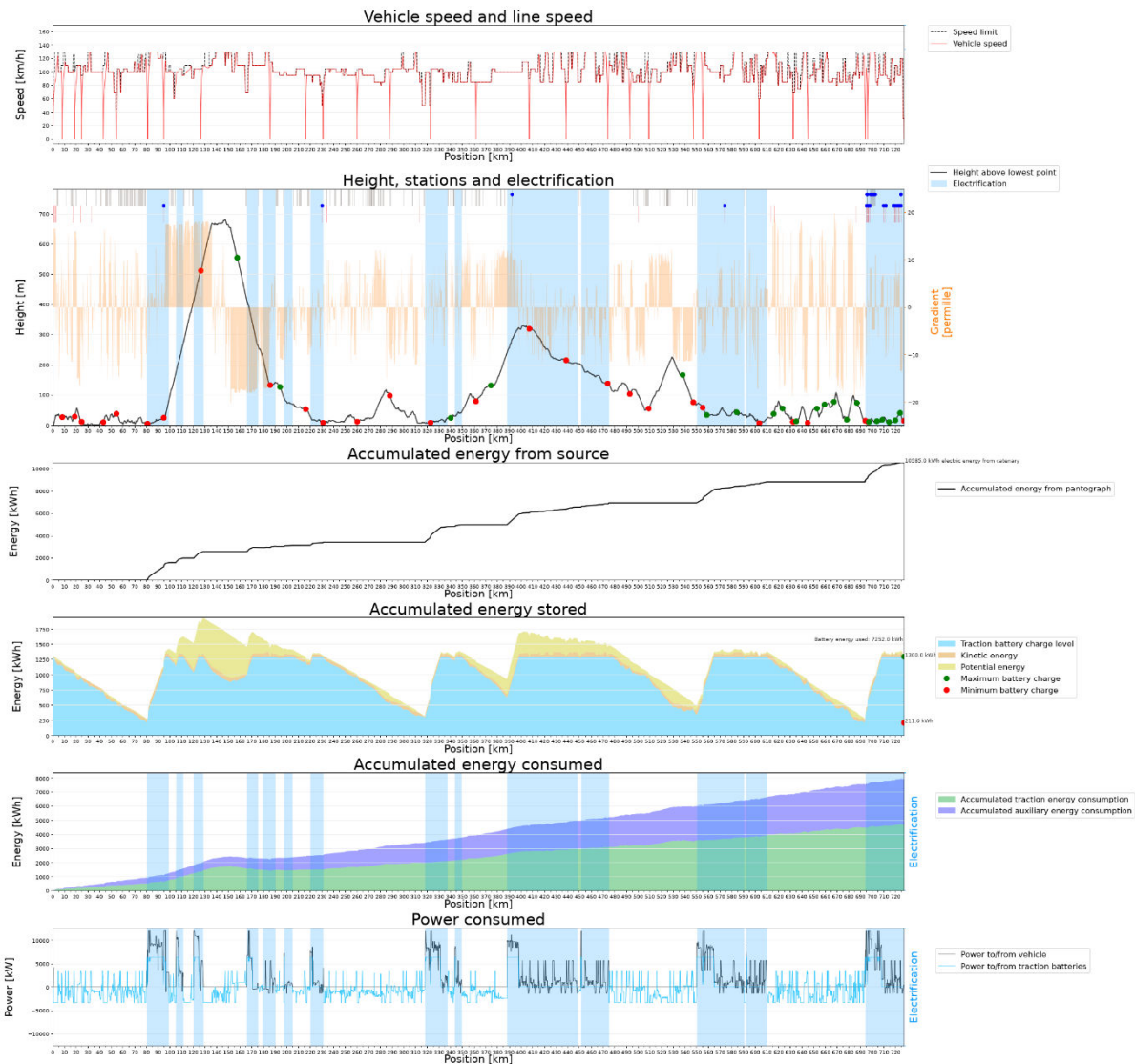
Figur 108: Simuleringsresultat for fjerntogslinje F7, Trondheim-Bodø. Normalt hjelpekraftforbruk (200 kW) og normal kjøremotstand.



Figur 109: Simuleringsresultat for fjerntogslinje F7, Bodø-Trondheim. Normalt hjelpekraftforbruk (200 kW) og normal kjøremotstand.



Figur 110: Simuleringsresultat for fjerntogslinje F7, Trondheim-Bodø. Økt hjelpekraftforbruk (400 kW) og økt kjøremotstand med faktor 1,4.



Figur 111: Simuleringsresultat for fjerntogslinje F7, Bodø-Trondheim. Økt hjelpekraftforbruk (400 kW) og økt kjøremotstand med faktor 1,4.

5.10 Endret effektgrens fra 12 MW til 9 MW

Som beskrevet i kapittel 1.3.3 så er det lagt til grunn en mulig effekt på 12 MW til kjøretøyet fra kontaktledningen. Denne problemstilling er kun aktuell for batterikonseptet fordi det for de andre konseptene ikke vil bruke mer enn omtrent 7 MW, grunnet at det er 6 MW installert effekt ved hjulet. Det er lading av batteriene som vil kunne gjøre at det trekkes opptil 12 MW.

12 MW er en høy effekt, og det er noe usikkerheter kring hvorvidt noen leverandører vil levere et slikt system (se kapittel 8.5 i hovedrapport Alternativanalyse) og det er av interesse å se hvordan en minkning av effekten til 9 MW vil påvirke resultatene, både når det gjelder batterienes SoC og det totale energiforbruket.

I Figur 112 og Figur 113 presenteres resultatene for simuleringene av godstog på Nordlandsbanen. Sammenlignet med resultatene i Figur 94 og Figur 95 så kan det ses at laveste SoC går fra 602 kWh (23%) til 269 kWh (10%) for retning Trondheim-Bodø, og fra 557 (21%) kWh til -249 kWh i retning Bodø-Trondheim. Det betyr at for retningen mot Bodø vil reduksjonen fungere hvis det legges til grunn høyeffektbatterier. For retningen mot Trondheim vil det ikke fungere å redusere effekten, fordi da blir SoC negativt. Problemet er i oppoverbakke ved Saltfjellet. Det er vurdert at dersom det ikke er mulig å anskaffe

kjøretøy som klarer å trekke 12 MW, så vil det være behov for en forlenging av elektrifiseringen på Saltfjellet, noe som vil være mulig uten å påvirke noen tunneler eller bruer. Det er vurdert at forlengingen vil være i størrelsesorden 15km. Liknende tiltak kan være nødvendig for de andre banene også.



Figur 112: Simuleringsresultat for godstogslinje GK25a, Trondheim-Bodø. Redusert strømgrens til kjøretøyet fra 800 A til 600 A, som tilsvarer en reduksjon fra 12 MW til 9 MW.



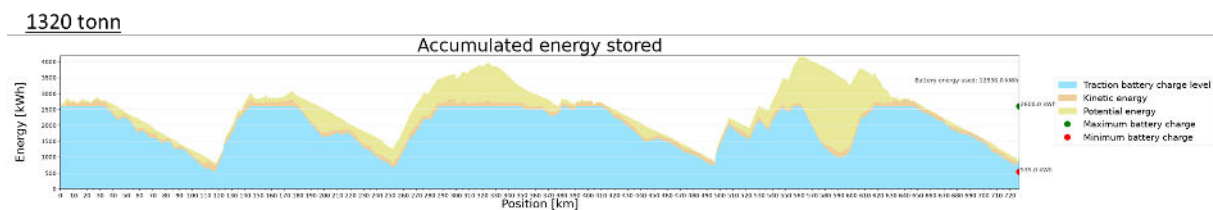
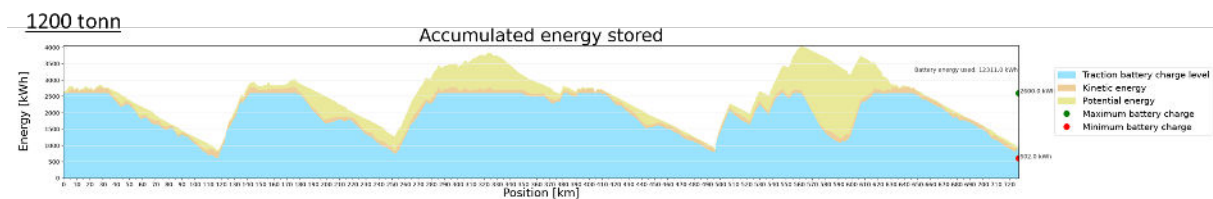
Figur 113: Simuleringsresultat for godstogslinje GK25a, Bodø-Trondheim. Redusert strømgrens til kjøretøyet fra 800 A til 600 A, som tilsvarer en reduksjon fra 12 MW til 9 MW.

Det totale energiforbruket reduseres i retning Trondheim-Bodø fra 18060 kWh til 17612 kWh, en reduksjon med 2,5%. For retning Bodø-Trondheim blir reduksjonen fra 20125 kWh til 19800 kWh, en reduksjon med 1,6%. Det totale energiforbruket påvirkes altså veldig lite av endret tillatt effekt fra kontaktledning.

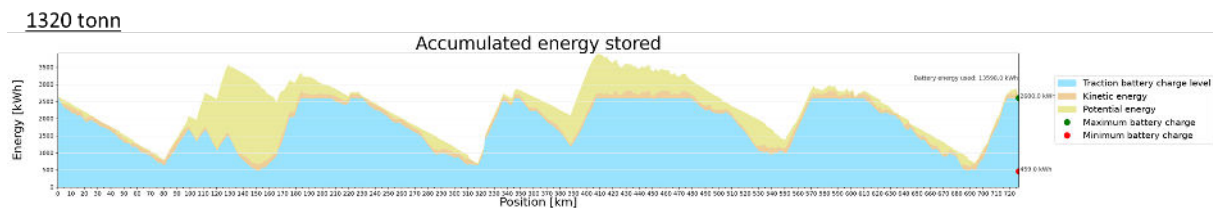
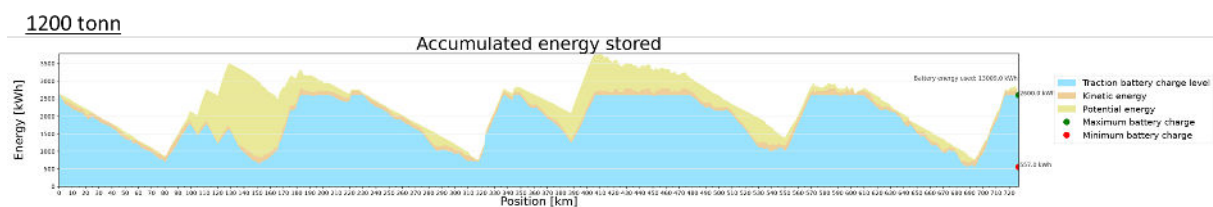
5.11 Endret togvekt for energibærere

I energisimuleringene er det brukt en forenklet tilnærming hvor det er antatt den samme togvekt for godstogene uansett energibærere. Det er en interesse å se hvordan en endret togvekt vil innvirke på resultatene, og for dette er det simulert en 10% (120 tonn) økt togvekt for godstoget Trondheim-Bodø. Denne vekt tar utgangspunkt i at en energivogn kan være en seksakselig vogn, med omtrent 20 tonn per aksel. Det er kun simulert for batterikonseptet, og motiveringen til dette er å redusere antall simuleringer samtidig som vi ikke mister viktig informasjon. For batterikonseptet er det viktig å finne ut hvis endringen har stor betydning for batteriet, og spesifikt for dets SoC. Forøvrig vil konseptene ikke skille seg stort fra hverandre, fordi de har samme effekt på ikke-elektrifisert strekning. Resultatene (i form av SoC for batteriene) presenteres i Figur 114 og Figur 115.

I retning fra Trondheim til Bodø så blir den laveste SoC 23% for 1200 tonn og straks under 21% for 1320 tonn. Fra Bodø til Trondheim blir laveste SoC 21% for 1200 tonn og straks under 18% for 1320 tonn.



Figur 114: Batteri SoC for simulering med 1200 tonn (øvre) 1320 tonn (nedre) for godstogslinje GK25a Trondheim-Bodø.



Figur 115: Batteri SoC for simulering med 1200 tonn (øvre) og 1320 tonn (nedre) for godstogslinje GK25a Bodø-Trondheim.

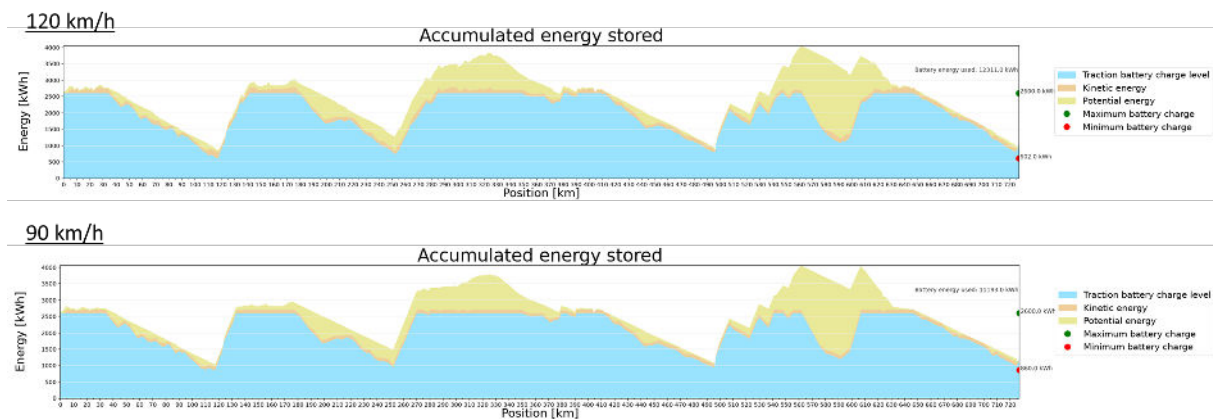
Endringen i laveste SoC er liten relativt til den installerte energimengden. Hvis det sammenlignes det totale energiforbruket mellom disse simuleringer så kan det konstateres at den brukte energien øker med omtrent 4%.

5.12 Makshastighet 90 km/t for godstog

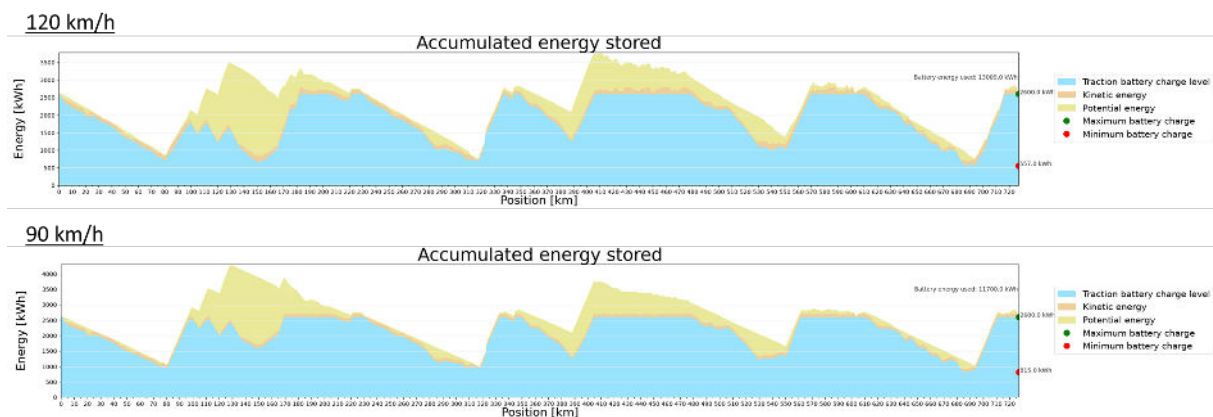
Som beskrevet i kapittel 2.2.1 så er det brukt en maksimal tillatt hastighet på 120km/t for godstogene. Det er av interesse å se hvordan en begrensning til 90 km/t vil påvirke resultatene.

Denne parametervariasjon er kun simulert for batterikonseptet, og motiveringen til dette er å redusere antall simuleringer samtidig som vi ikke mister viktig informasjon. For batterikonseptet er det viktig å finne ut hvis endringen har stor betydning for batteriet, og spesifikt for dess SoC. Resultatene (i form av SoC for batteriene) presenteres i Figur 116 og Figur 117.

I retning fra Trondheim til Bodø så blir den laveste SoC 23% for 120 km/t og 33% for 90 km/t. Fra Bodø til Trondheim blir laveste SoC 21% for 90 km/t og 31% for 120 km/t.



Figur 116: Batteri SoC for simulering med maksimal tillatt hastighet 120 km/t (øvre) 90 km/t (nedre) for godstogslinje GK25a Trondheim-Bodø.



Figur 117: Batteri SoC for simulering med maksimal tillatt hastighet 120 km/t (øvre) og 90 km/t (nedre) for godstogslinje GK25a Bodø-Trondheim.

Endringen i laveste SoC er ikke ubetydelig i forhold til den installerte energimengden, hvor det tilsvarer omtrent 10% av den installerte energimengden. Endringen gir at batteriene bruker omtrent 69% av den installerte kapasiteten hved reduksjon til maksimalt 90 km/t, sammenlignet med 79% for 120 km/t. Dette betyr at en lavere hastighet vil gi bedre batterilevetid og/eller mulighet for noe mindre batterier.

Hvis det sammenlignes det totale energiforbruket mellom disse simuleringer så kan det konstateres at den brukte energien reduseres med omtrent 16%. For hydrogen- og dieselkonsepten, som bruker mindre elektrifisering, vil reduksjonen i energiforbruk være noe lavere fordi den gjennomsnittlige effekten (tilgjengelig for kjøretøyet) er lavere (som følge av mindre elektrifisering) og vil allerede begrense muligheten for å holde høy hastighet.

5.13 Kjøretidsgevinst til samfunnsøkonomisk analyse

I den samfunnsøkonomiske analysen så er det behov for å vurdere hvor stor en eventuell kjøretidsgevinst vil være ved bytte av energibærere fra dieseldrift. Dette blir analysert i dette arbeid gjennom å trekke ut tidsforbruket for hver simulert linje fra simuleringresultatene.

Resultatene ble overlevert til ansvarlig for samfunnsøkonomisk analyse ved notat med navn «Kjøretidsgevinst ved elektrifisering», dato 23.3.2023. Hovedresultatene presenteres også i bildene med tabeller under, hvor kjøretidsgevinsten er beregnet relativt dieselkonseptet (konsept 0).

For diesel-konseptet og hydrogen-konseptet er det antatt at det er bimodale kjøretøy som benytter eksisterende elektrifisering. Fordi elektrifiseringen er den samme for disse to konseptene, og det er antatt

samme effekt på ikke-elektrifisert strekning, er det ingen kjøretidsgevinst for hydrogen, og det konseptet er derfor ikke presentert i tabellene under.

		Antall avganger per år	Kjøretid (minutter)		Tidsgevinst (minutter og prosent)			
			Diesel		Hel-elektrifisert			
			Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Prosent	Descending Prosent
Godstog	GK25 Trondheim-Bodø	1127	531	527	-51	-50	-10%	-9%
	Malmtog Mo I Rana-Ørtfjell	2190	27	26	-1	0	-4%	-1%
	GST 18 Koppang-Skogn (Nord+Rør)	254	298	295	-11	-14	-4%	-5%
	GST13 Kongsvinger-Koppang	2190	128	125	-4	-3	-3%	-2%
	GK 23 (Alnabru) Dombås- Åndalsnes	254	81	97	-3	-19	-4%	-20%
Persontog	NO Rognan-Bodø hver retning (R75)	2555	59	59	-2	-2	-3%	-4%
	NO Mosjøen-Bodø hver retning (F7)	730	219	221	-6	-6	-3%	-3%
	RØ Røros-Trondheim hver retning (RD60)	1095	147	148	-1	-2	-1%	-2%
	RA Dombås-Åndalsnes hver retning (RD65)	1460	78	77	-2	-3	-2%	-4%
	NO Lundamo-Steinkjer hver retning (R70)	7443	147	145	-4	0	-3%	0%
	RØ Hamar-Røros hver retning (RD60)	2190	201	196	-4	-4	-2%	-2%
	NO Trondheim-Bodø hver retning (F7)	730	491	490	-8	-7	-2%	-1%
	NO Trondheim-Mo I Rana hver retning (F7)	365	335	331	-5	-4	-1%	-1%

		Antall avganger per år	Kjøretid (minutter)		Tidsgevinst (minutter og prosent)			
			Diesel		Batteri			
			Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Prosent	Descending Prosent
Godstog	GK25 Trondheim-Bodø	1127	531	527	-25	-22	-5%	-4%
	Malmtog Mo I Rana-Ørtfjell	2190	27	26	-1	0	-3%	0%
	GST 18 Koppang-Skogn (Nord+Rør)	254	298	295	-3	-6	-1%	-2%
	GST13 Kongsvinger-Koppang	2190	128	125	-3	-2	-2%	-1%
	GK 23 (Alnabru) Dombås- Åndalsnes	254	81	97	0	-11	0%	-12%
Persontog	NO Rognan-Bodø hver retning (R75)	2555	59	59	0	0	0%	0%
	NO Mosjøen-Bodø hver retning (F7)	730	219	221	-2	-2	-1%	-1%
	RØ Røros-Trondheim hver retning (RD60)	1095	147	148	-1	-1	0%	-1%
	RA Dombås-Åndalsnes hver retning (RD65)	1460	78	77	0	-1	0%	-1%
	NO Lundamo-Steinkjer hver retning (R70)	7443	147	145	0	0	0%	0%
	RØ Hamar-Røros hver retning (RD60)	2190	201	196	-2	-2	-1%	-1%
	NO Trondheim-Bodø hver retning (F7)	730	491	490	-3	-3	-1%	-1%
	NO Trondheim-Mo I Rana hver retning (F7)	365	335	331	-2	-1	-1%	0%

		Antall avganger per år	Kjøretid (minutter)		Tidsgevinst (minutter og prosent)			
			Diesel		Hydrogen med del-elektrifisering			
			Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Minutter	Descending Minutter	Ascending Prosent	Descending Prosent
Godstog	GK25 Trondheim-Bodø	1127	531	527	-25	-14	-5%	-3%
	Malmtog Mo I Rana-Ørtfjell	2190	27	26	0	0	0%	0%
	GST 18 Koppang-Skogn (Nord+Rør)	254	298	295	0	-5	0%	-2%
	GST13 Kongsvinger-Koppang	2190	128	125	0	0	0%	0%
	GK 23 (Alnabru) Dombås- Åndalsnes	254	81	97	0	-11	0%	-12%
Persontog	NO Rognan-Bodø hver retning (R75)	2555	59	59	0	0	0%	0%
	NO Mosjøen-Bodø hver retning (F7)	730	219	221	-3	-2	-1%	-1%
	RØ Røros-Trondheim hver retning (RD60)	1095	147	148	0	-1	0%	-1%
	RA Dombås-Åndalsnes hver retning (RD65)	1460	78	77	0	-1	0%	-1%
	NO Lundamo-Steinkjer hver retning (R70)	7443	147	145	0	0	0%	0%
	RØ Hamar-Røros hver retning (RD60)	2190	201	196	0	0	0%	0%
	NO Trondheim-Bodø hver retning (F7)	730	491	490	-2	-1	0%	0%
	NO Trondheim-Mo I Rana hver retning (F7)	365	335	331	0	0	0%	0%

6 Sammenligning av resultat mellom to simuleringsverktøy

Simuleringsverktøy som brukes i denne typen analyser er relativt komplekse, og det benyttes forskjellige numeriske metoder for å løse denne type simuleringsoppgave. Resultatene kan derfor variere noe mellom ulike verktøy, selv om de modellerer samme fysiske fenomen. For å kvalitetssikre simuleringsresultatene er det gjort uavhengige simuleringer av SINTEF med bruk av simuleringsverktøyet RaJA.

Arbeidet er begrenset til en sammenligning av simuleringsresultatet på Nordlandsbanen, og det er valgt å sammenligne framføring av godstog i begge retninger.

6.1 Beskrivelse av RaJA

6.1.1 Simuleringsverktøyet

Simuleringsverktøyet ("RaJA", eller Rail Journey Analysis) er et program skrevet på Python-språket og har siden 2015 blitt utviklet ved SINTEF og anvendt på norsk, amerikansk og tsjekkisk jernbane. Verktøyet ble først utviklet for en studie av alternative elektrifiseringsmetoder på vegne av Jernbaneverket, som inkluderte simuleringer av Nordlandsbanen, Raumabanen, Rørosbanen, Solørbanen og Dovrebanen. Denne studien ble oppdatert i 2019 som en del av Jernbanedirektoratets NULLFIB-prosjekt. Verktøyet ble også brukt på USAs 3000 km lange Southern Transcon, en av USAs viktigste godstransportlinjer, fra Kansas City til Los Angeles, i en studie sammen med universitetene i Michigan og California, som ble tildelt Agnew-Goodall-prisen fra Institution of Mechanical Engineers for 2021. Verktøyet har nylig blitt brukt til å analysere regionale tsjekkiske jernbaner i samarbeid med flere tsjekkiske forskningsinstitusjoner.

Hovedformålet med verktøyet er å beregne energiforbruket til et tog langs en strekning. Ut fra dette kan man trekke ut en rekke parametere som hastighet, tid, trekkraft, effekt, batteriets ladetilstand, osv. Noen av disse størrelsene beregnes i simuleringens hovedløkke (f.eks. hastighet, energi), mens andre beregnes etter at hovedløkken er avsluttet (f.eks. batteriets ladetilstand).

Hovedforutsetningene er at all togets masse er konsentrert i ett punkt, og at togene akselererer så fort de kan til maksimal mulig hastighet (gitt av trekkraftkurven og en fastsatt maksimal akselerasjon). Verktøyet kan ikke eksplisitt håndtere stopp ved nøyaktig 0 km/t, men disse kan emuleres ved å sette f.eks. en virtuell hastighetsgrense på 0,01 m/s for et 1 m langt segment; alternativt kan to separate kjøring utføres og slås sammen. Hvis det planlegges lengre stopp og det kan bli et betydelig forbruk av ekstrautstyr, er det enkelt å sette fartsgrensen til det inverse av stopptiden, f.eks. $1 \text{ m}/600 \text{ s} = 0,00167 \text{ m/s}$ for et stopp på 10 minutter.

Simuleringen krever inndata om linjen og toget. Linjen spesifiseres som en rekke segmenter i , som hver er karakterisert ved:

- en lengde Δx_i , ikke nødvendigvis uniform,
- en stigning α_i , vanligvis oppgitt i promille, og
- en fartsgrense v_i .

Toget må beskrives ut fra totalmasse, rotasjonsmassefaktor (standard 1,06), A-, B- og C-parametere for Lomonosoffs ligning for å beskrive rulle- og luftmotstand, regenerativ virkningsgrad (standard 41 % for batterier, men kan settes til en hvilken som helst verdi, f.eks. 0 % for diesel) og trekkraftkurve, gitt som en funksjon på formen $F=f(v)$.

Eventuelt kan simulatoren legge til en maksimal hastighet for toget (i tillegg til banens egne fartsgrenser), maksimal akselerasjon og retardasjon og maksimal segmentlengde.

Det er ofte etterspurt å ha et maksimalt diskretiserings-steg, f.eks. for å få mer nøyaktige akselerasjonsprofiler opererer SINTEF med en standard steglengde på 10 meter (100 meter for foreløpige beregninger). Hvis en slik maksimal segmentlengde oppgis, slås inndataprofilen for stigning og fartsgrenser sammen og forfines for å inkludere de nye segmentene og de opprinnelige x-verdiene i inndataserien beholdes.

Hovedproduktet fra simulatoren er en energiforbruksprofil som tilsvarende togets reise, med verdier for hvert segment i den opprinnelige diskretiseringen. Tilsvarende rekker for hastighet, tid, trekkraft og effekt leveres også.

6.1.2 Simuleringsmodellen

Modellen opererer med avstandstrinn som er gitt i begynnelsen av simuleringen, men som ikke nødvendigvis er like lange. Disse er minimum tilsvarende de som er gitt av inngangsspordataene, pluss det som kreves for å øke oppløsningen. Integrasjonen skjer ved hjelp av en endelig differansemetode som løses med Euler-metoden, med ekstra stabilitetskontroller.

Toget antas å ha en punktmassemodell og å befinne seg på et representativt segment i tid. Togets dynamikk beregnes ut fra Lomonosoff-ligningen

$$m\rho a = F(v) - (A + Bv + Cv^2) - mg \sin(\alpha),$$

der m er togets totale masse, ρ er rotasjonsmassefaktoren, a er togets akselerasjon, F er kraften som utøves av lokomotivet, v er togets hastighet, A , B og C er parametere som beskriver togets rulle- og luftmotstand, g er tyngdeakselerasjonen ($9,81 \text{ m/s}^2$) og α er stigningsvinkelen (merk at stigningen ofte oppgis direkte som $\sin \alpha$, i %-enheter).

Trekkraftforholdet er hentet fra RailML-data levert av Bane NOR for tilgjengelige lokomotiver; det kan også tilnærmes for andre lokomotiver hvis starttrekkraft, maksimal effekt og maksimal hastighet er oppgitt.

Ettersom data for kurveradier ikke er tilgjengelig i RailML-filene, og kurvemotstand vanligvis er en mindre faktor uansett, er de eneste motstandene mot bevegelse togets egen treghet, rullemotstand, luftmotstand og stigning.

Simulatoren tar ikke hensyn til energistyring om bord, for eksempel flyt mellom batterier, brenselceller eller kontaktledning: Målet er å finne den nødvendige energien som leveres ved hjulet (eventuelt fratrukket regenerert bremseenergi), og ut fra dette kan slike interne energistrømmer beregnes i etterbehandlingen. Effektiviteten til disse energioverførings- eller lagringssystemene er dermed ikke involvert i simuleringen. Vanligvis er de eneste forskjellene mellom ulike teknologier på simuleringstidspunktet:

- Tilstedeværelse av regenerering, som er 0% med forbrenningsmotorer og 41% (eller annen spesifisert verdi) med elektriske tog (ikke bare batteritog, men også kontaktledning og hydrogen);
- Vekt, da f.eks. batteritog kan være noe tyngre og ha noe større rullemotstand og dermed høyere energibehov.

Det første trinnet i simuleringen er beregning av togets utnyttelse av hastighetsprofilen. Med utgangspunkt i fartsgrenseprofilen som øvre grense, vil programmet:

1. Redusere hastighetsprofilen til togets maksimale hastighet (hvis oppgitt) når den overskrides.
2. Beregne en maksimal hastighet på hvert segment slik at alle reduksjoner i hastighetsgrensen kan respekteres uten å overskride retardasjonsgrensen (hvis oppgitt).
3. Starte med null hastighet på det første segmentet, og beregner neste hastighetsverdi for hvert segment i sekvensen basert på Lomonosoffs ligning. Toget antas å levere maksimal effekt ved den aktuelle hastigheten: hvis den resulterende hastigheten er høyere enn hastighetsgrensen, brukes hastighetsgrensen som neste verdi.
 - a. Dette trinnet er det mest beregningstunge, siden det består av en lang rekke ikke-parallelliserbare beregninger (hvert trinn avhenger av resultatet av det forrige). Trekkraften er generelt en ikke-lineær funksjon som kan være diskontinuerlig.
 - b. Det er i prinsippet mulig at et tog ikke kan kjøre videre hvis stigningen er for bratt. Beregningen mislykkes i så fall; dette har skjedd ved beregning av godstog som klatrer opp Raumabanen nær Verma stasjon.

Når hastighetsprofilen er bestemt, er det relativt enkelt å beregne tidsprofilen og de ulike motstandskomponentene. Til slutt beregnes energiprofilen ved å trekke fra alle segmenter der lokomotivets energiproduksjon for segmentet ΔE er negativ: Dette representerer en gjenvinning av energi, som må

multipliseres med regenereringseffektiviteten (f.eks. 41 % eller 0 %) før alle ΔE -verdiene summeres for å få den totale energiprofilen E .

Regenerasjonsdata brukes også til å beregne hvor mye energi som er lagret i eventuelle batterier om bord, slik at minimumsstørrelsen på batteriene kan estimeres. Det antas at regenerert energi er den første som gjenbrukes for å gjøre plass til senere regenerert energi og for å minimere størrelsen på energilageret om bord. Legg merke til at behovet for regenerering om bord vanligvis er langt mindre enn kapasiteten til batteridrevne kjøretøy, så denne opplysningen er mest interessant for f.eks. hydrogendrevne kjøretøy, som vanligvis har mindre batterier for hybridisering.

Modellen tar ikke hensyn til hjelpekraft, men dette legges til i etterbehandlingen som et ekstra effektbehov som er proporsjonalt med tiden.

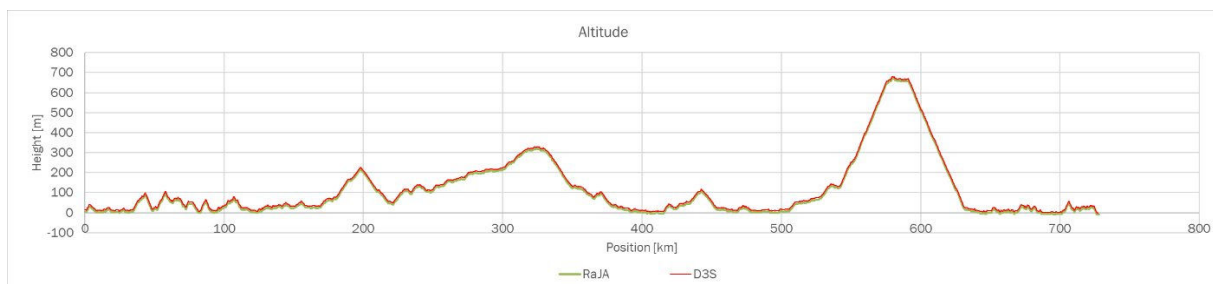
6.2 Arbeidsprosessen

Etter at det ble gjennomført simuleringer med D3S ble det valgt et antall av disse for simulering med RaJA. Simuleringene som er foretatt med RaJA er utført for et 1200 tonn godstog mellom Trondheim og Bodø i hver retning og for alle energibærere i analysen (diesel, hydrogen, batteri med del-elektrifisering og elektrifisering). Disse resultatene er deretter sammenlignet med resultatene fra D3S, og utdypes i de følgende kapitler.

6.3 Sammenligning av resultat

6.3.1 Banedata

Det er utført en sjekk av at samme banedata blir benyttet i de to simuleringverktøyene. Dette er vist i Figur 118. Den vertikale parallellforskyvningen forklares av at det i D3S blir satt laveste punkt som «null», mens det i RaJA er startpunktet satt til 5,1 m.o.h., en verdi oppgitt av Bane NOR for Trondheim S.



Figur 118: Banedata (gradienter) i D3S og RaJA.

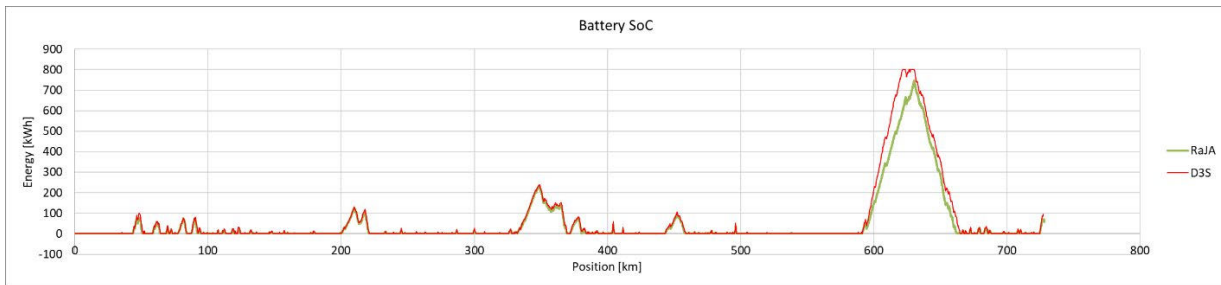
6.3.2 Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a)

For godstog med hydrogen i nordgående retning blir totalforbruket veldig likt i simuleringene. Avviket kan forklares med at forbruket fra kontaktledning og hydrogen i D3S ikke legges sammen, mens det i RaJA blir vist summen av disse.

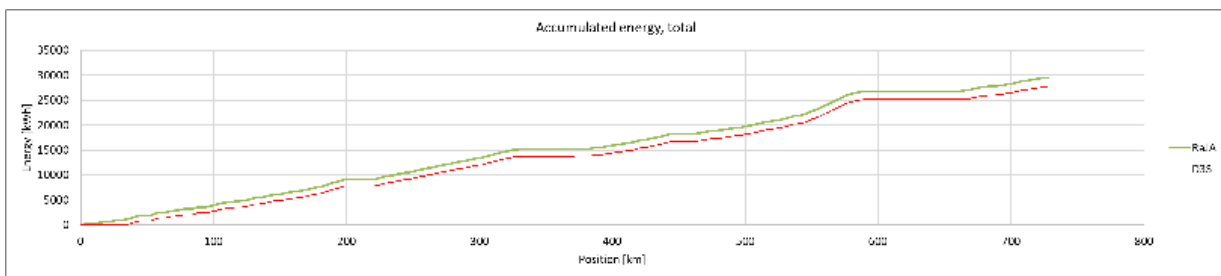
For energimengden i batteriene er det et avvik rundt Saltfjellet. I D3S blir ladeeffekten til batteriene opptil 4 MW (6 MW installert motoreffekt som resulterer i en teoretisk ladeeffekt på over 5 MW, men hvor ladeeffekten blir begrenset på grunn av ladehastighet på $C=5$ og batteristørrelse på 800 MWh). I RaJA er det blitt antatt at motoreffektgrensen ved 3 MW som gjelder uten KL er symmetrisk, og sammen med virkningsgradene mellom motor og batteri danner dette en grense ved ca. 2,5 MW.



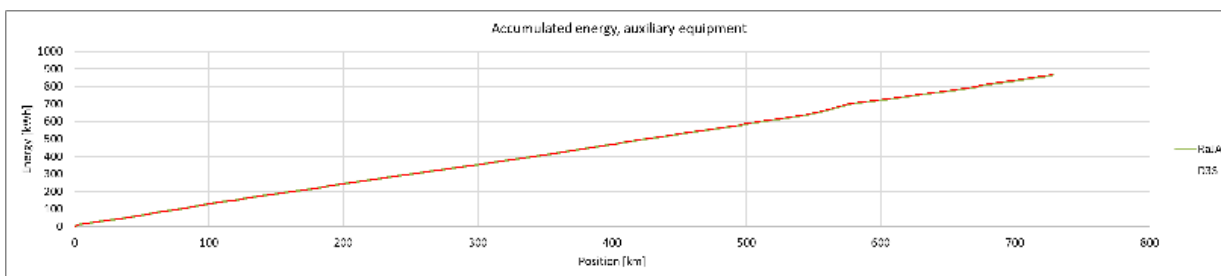
Figur 119: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Hastighet.



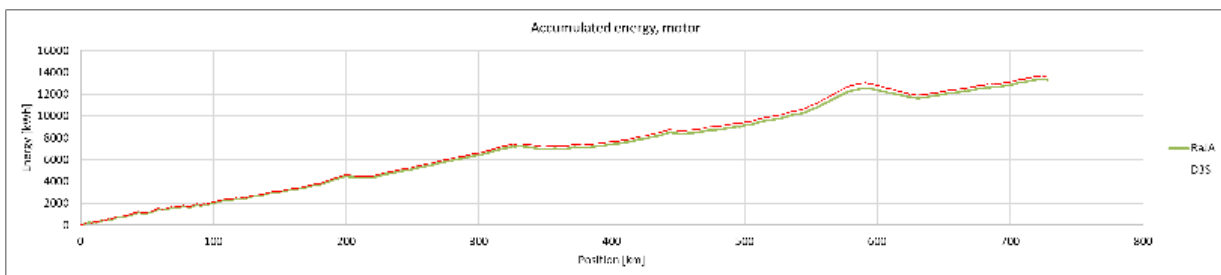
Figur 120: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Batteristatus (energi i batteriet).



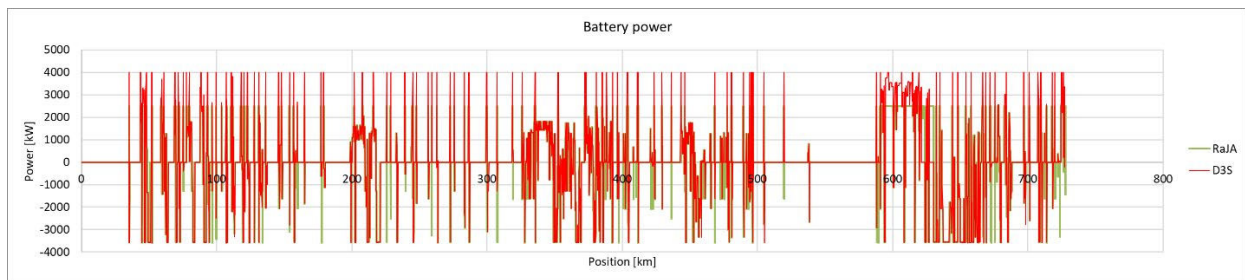
Figur 121: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert totalt energiforbruk.



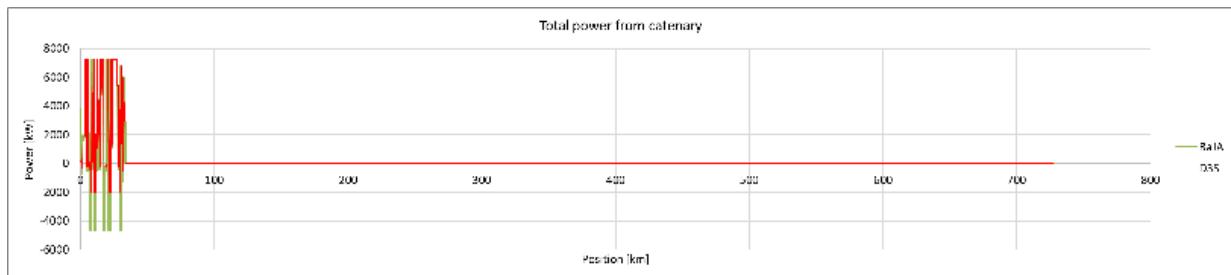
Figur 122: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



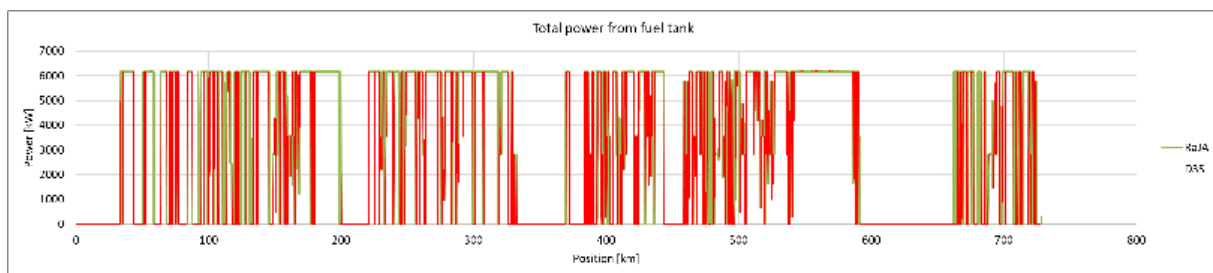
Figur 123: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



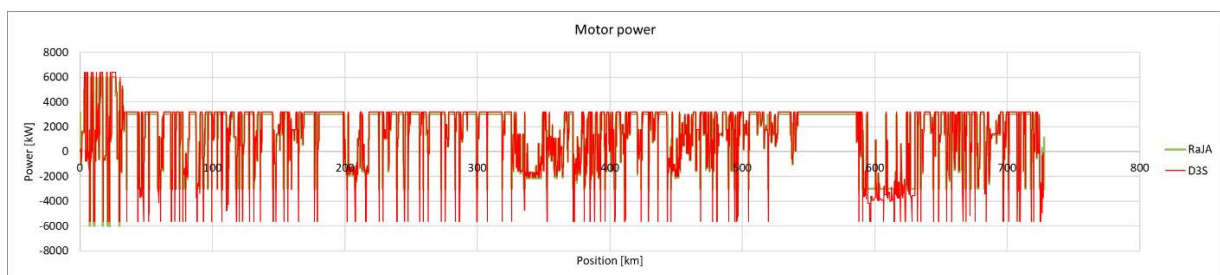
Figur 124: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Batterieffekt.



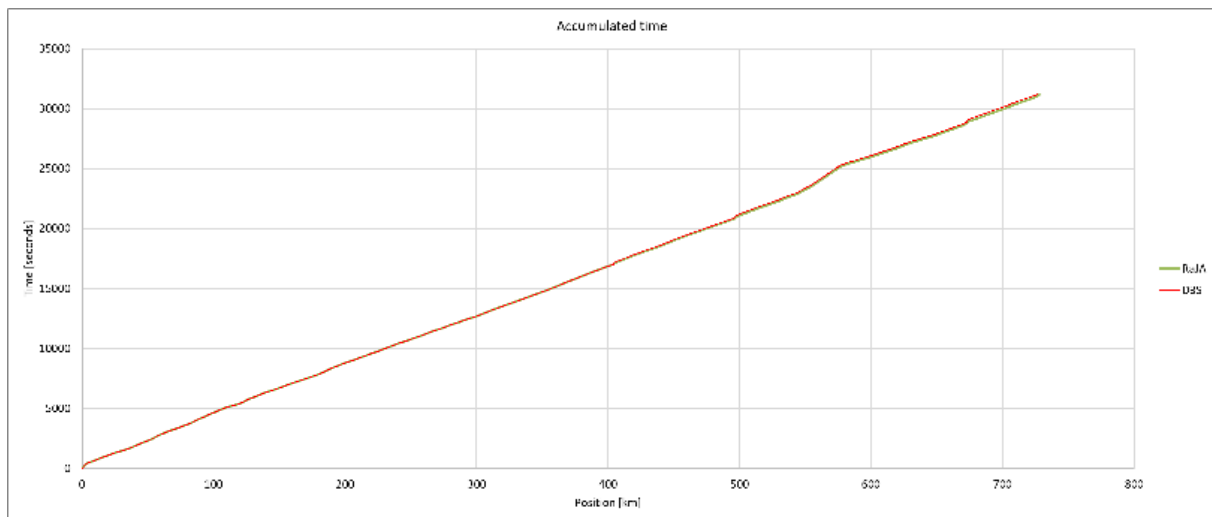
Figur 125: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Effekt fra kontaktledning.



Figur 126: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Effektforbruk målt på energitank.



Figur 127: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, hydrogen (konsept 2a). Effektforbruk til motorer.



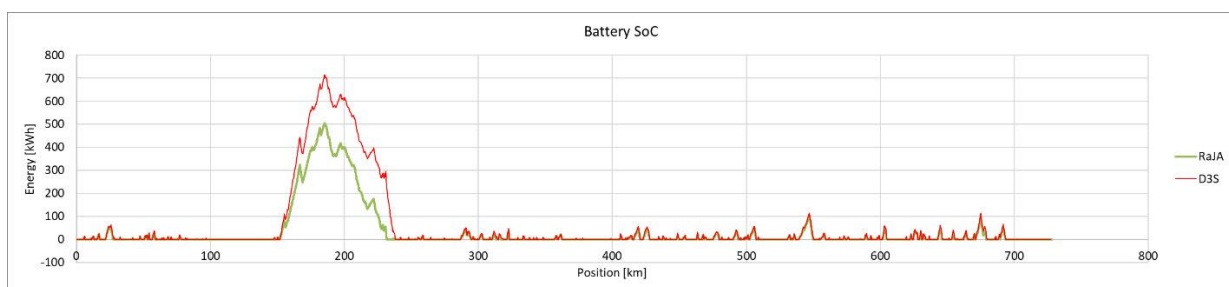
Figur 128: Akkumulert kjøretid.

6.3.3 Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a)

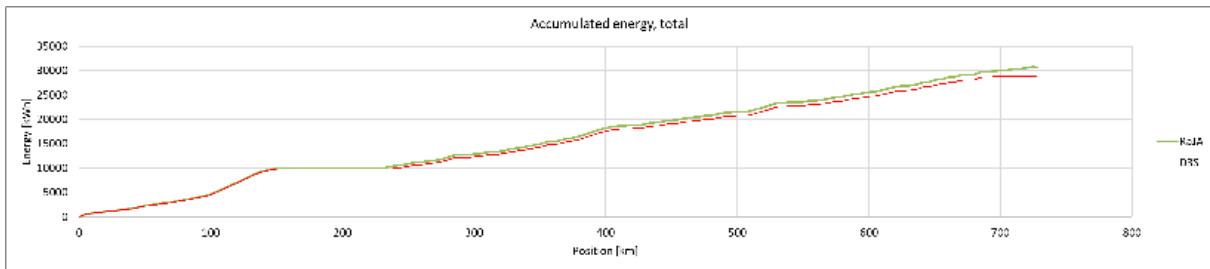
I sørgående retning er konklusjonene de samme som for nordgående retning. Det akkumulerte energiforbruket har godt samsvar mellom simuleringsverktøyene. Det er et avvik i batterienes SoC på Saltfjellet, som forklares i kapittel 6.3.2.



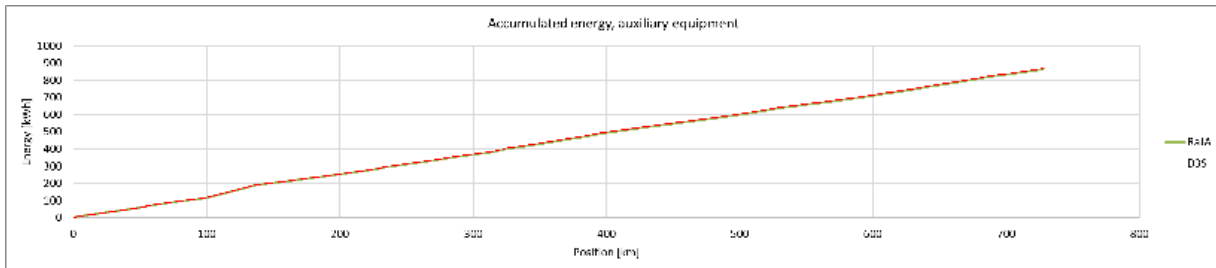
Figur 129: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Hastighet.



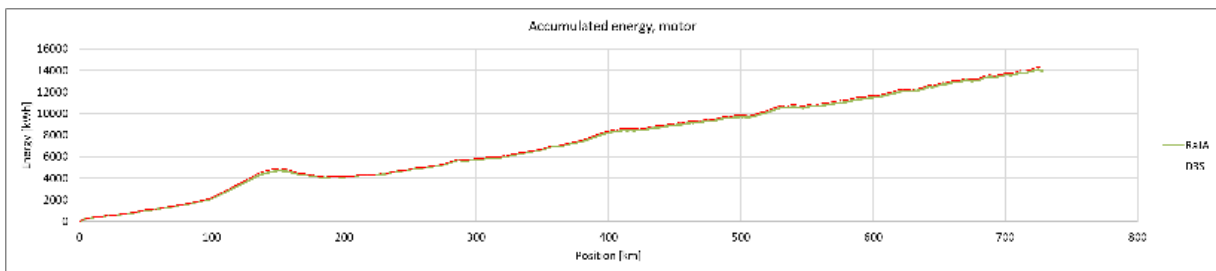
Figur 130: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Batteristatus (energi i batteriet).



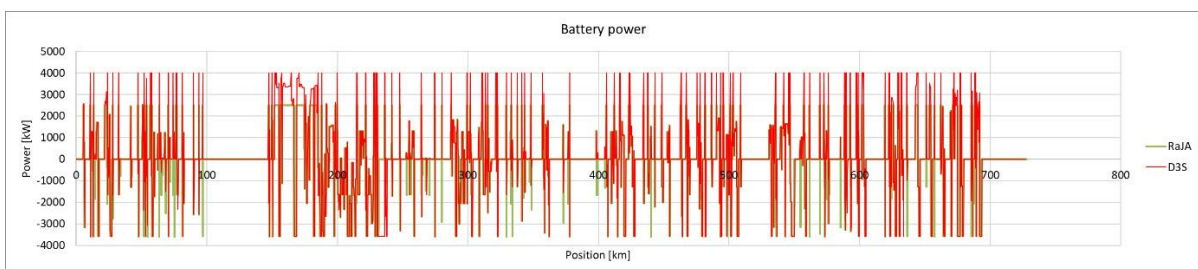
Figur 131: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert totalt energiforbruk.



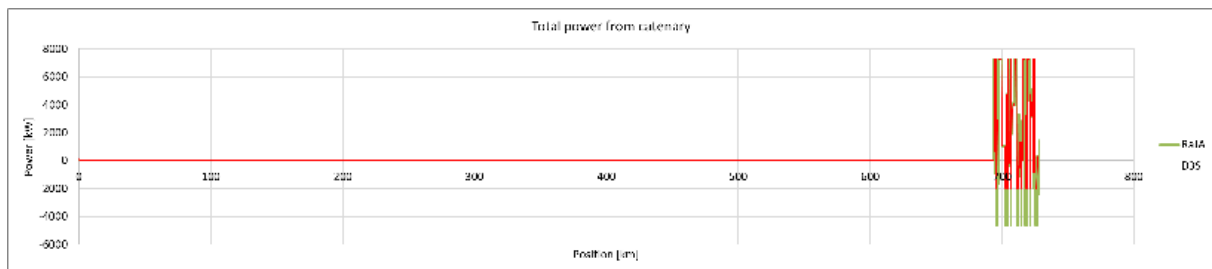
Figur 132: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



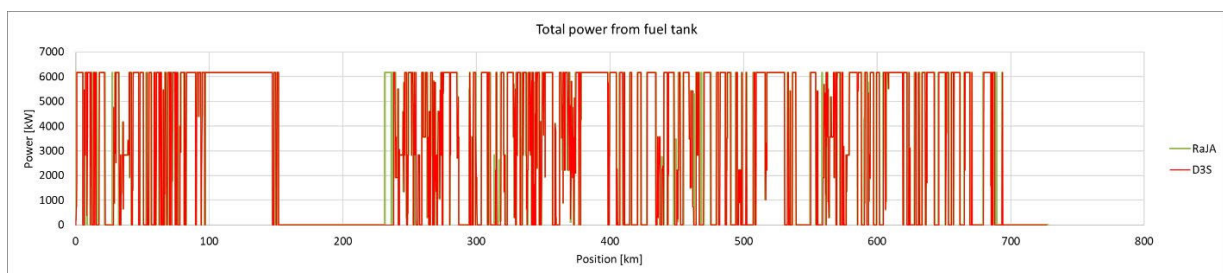
Figur 133: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



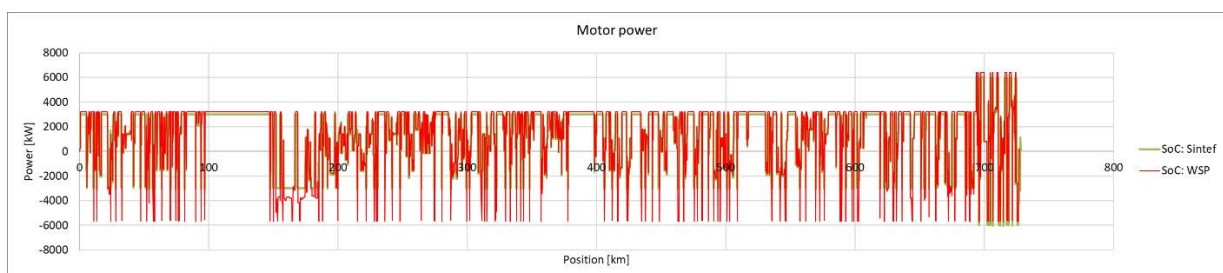
Figur 134: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Batterieffekt.



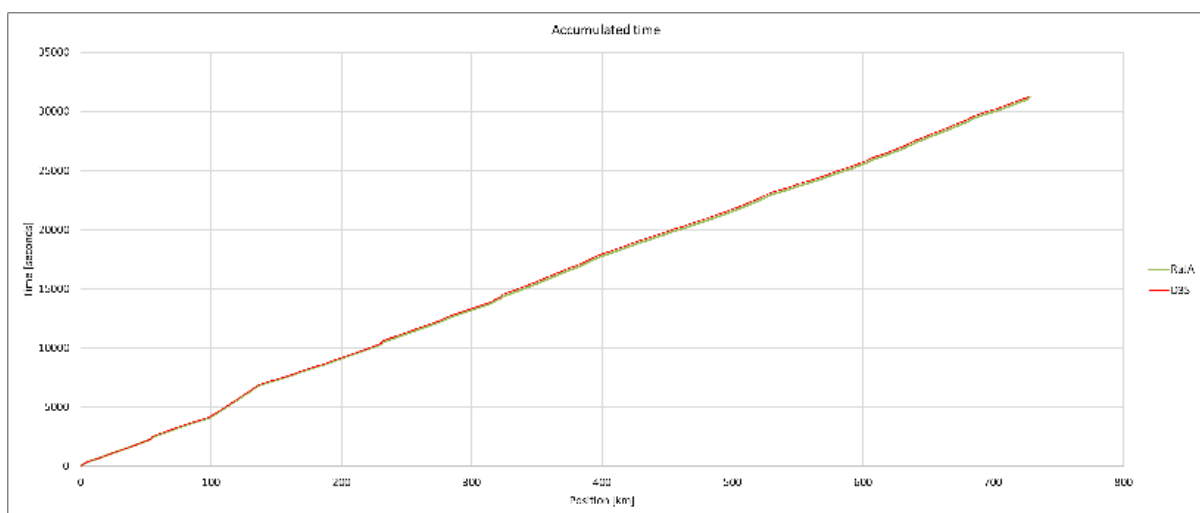
Figur 135: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Effekt fra kontaktledning.



Figur 136: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Effektforbruk målt på energitank.



Figur 137: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Effektforbruk fra motorer.



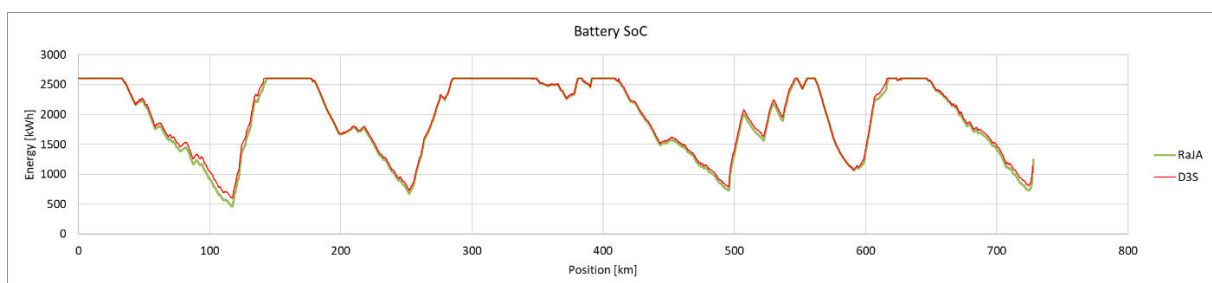
Figur 138: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, hydrogen (konsept 2a). Akkumulert kjøretid.

6.3.4 Godstog, nordgående, batteri (konsept 3)

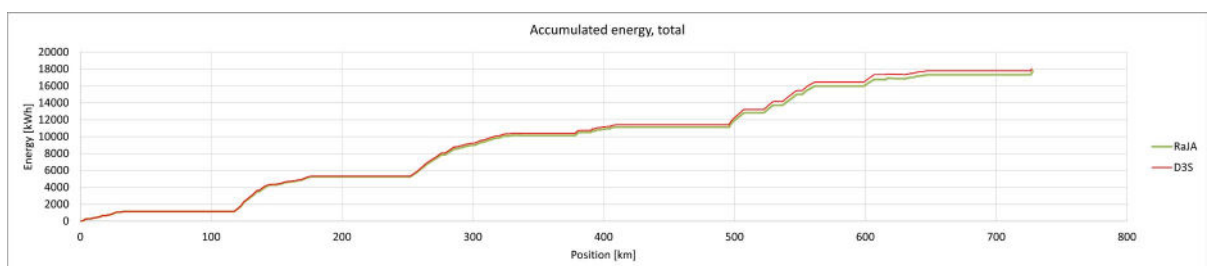
For godstog med del-elektrifisering og batteri i nordgående retning blir totalforbruket veldig likt i begge simuleringene. Utover dette blir det også likt for SoC i batteriene over hele strekningen, med et lite avvik på noen steder. Den akkumulerte energien til motorene har et lite avvik, som forklares i kapittel 6.3.2. Kjøretiden har godt samsvar mellom D3S og RaJA.



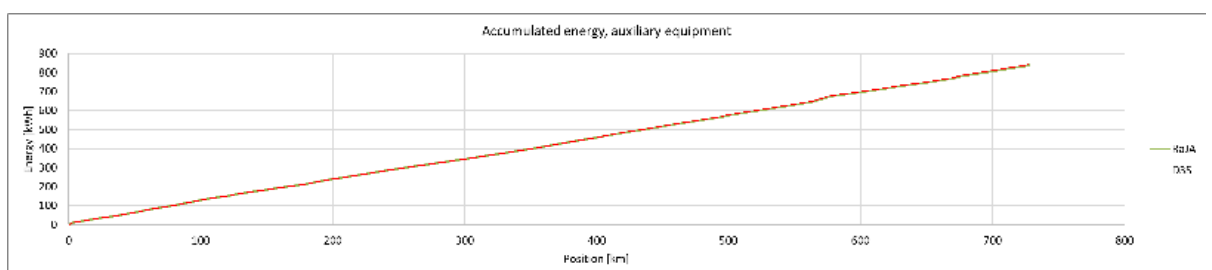
Figur 139: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Hastighet.



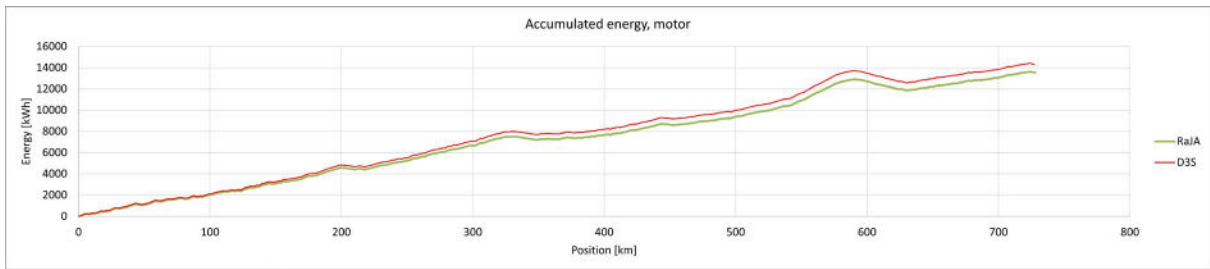
Figur 140: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Batteristatus (energi i batteriet).



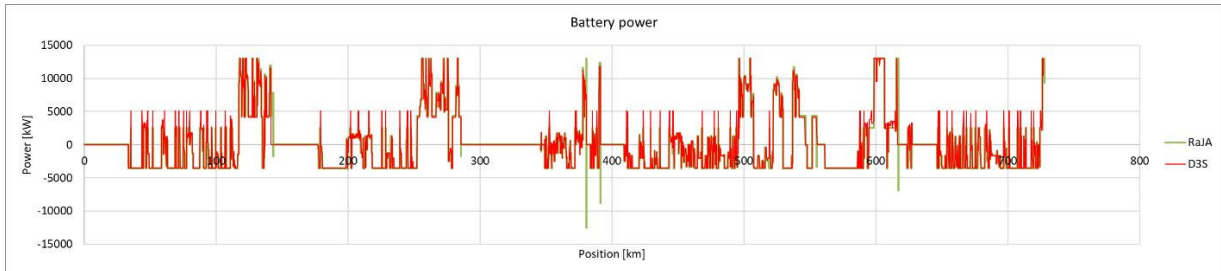
Figur 141: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Akkumulert totalt energiforbruk.



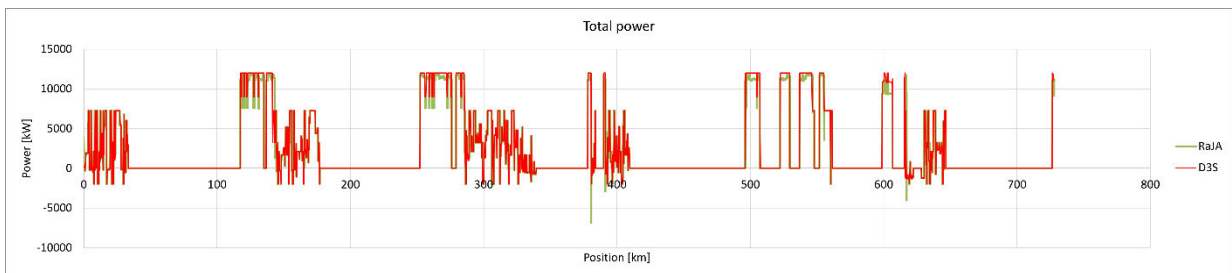
Figur 142: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



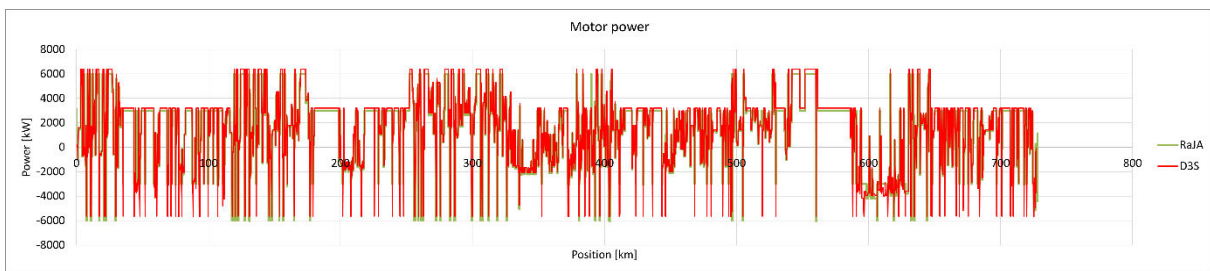
Figur 143: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



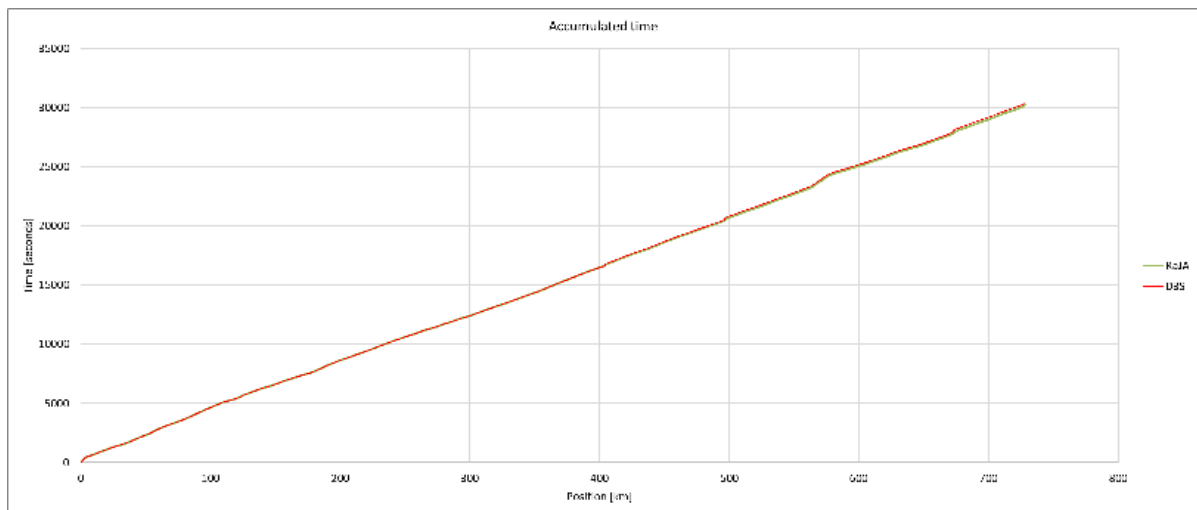
Figur 144: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Batterieffekt.



Figur 145: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Effekt fra kontaktledning.



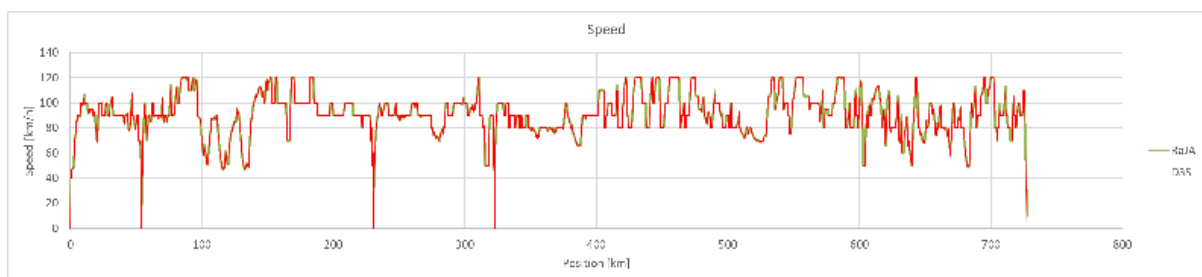
Figur 146: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Effektforkbruk fra motorer.



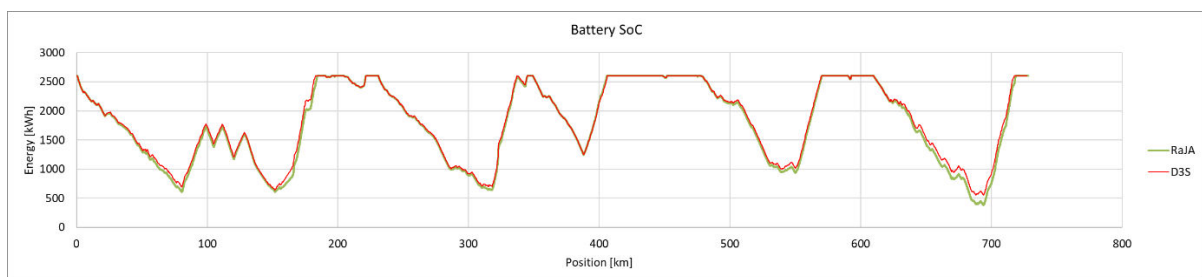
Figur 147: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, batteri (konsept 3). Akkumulert kjøretid.

6.3.5 Godstog, sørgående, batteri (konsept 3)

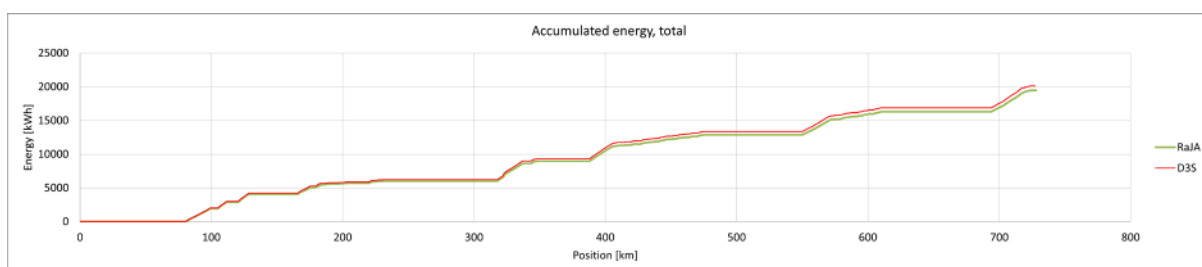
Konklusjoner gitt for nordgående retning gjelder også for sørgående retning.



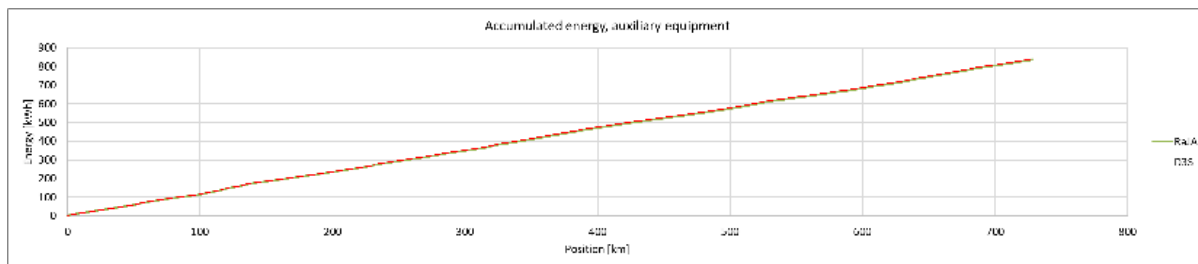
Figur 148: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Hastighet.



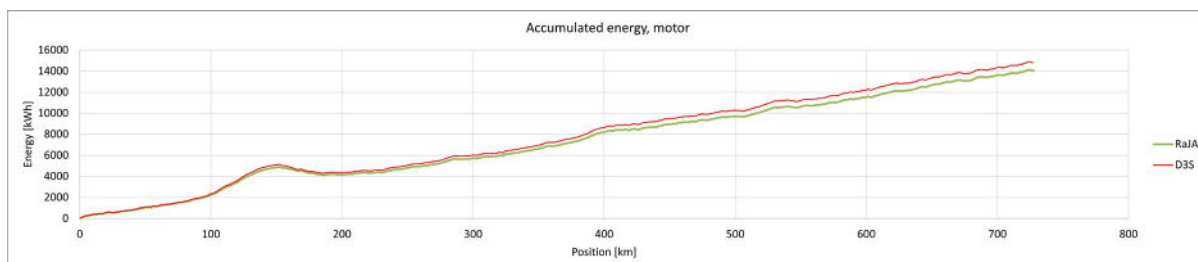
Figur 149: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Batteristatus (energi i batteriet).



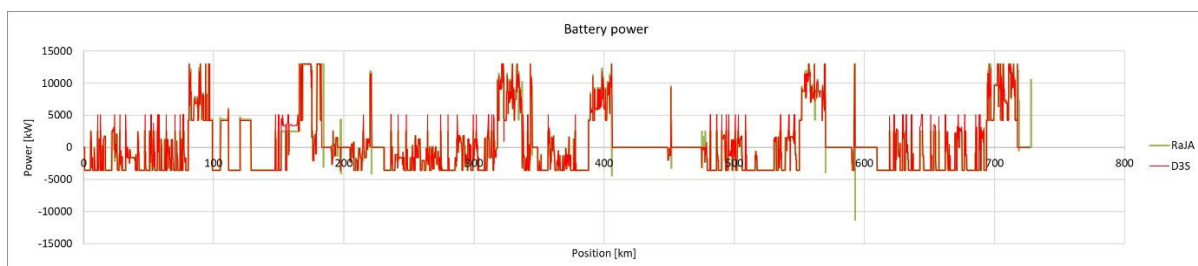
Figur 150: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Akkumulert totalt energiforbruk.



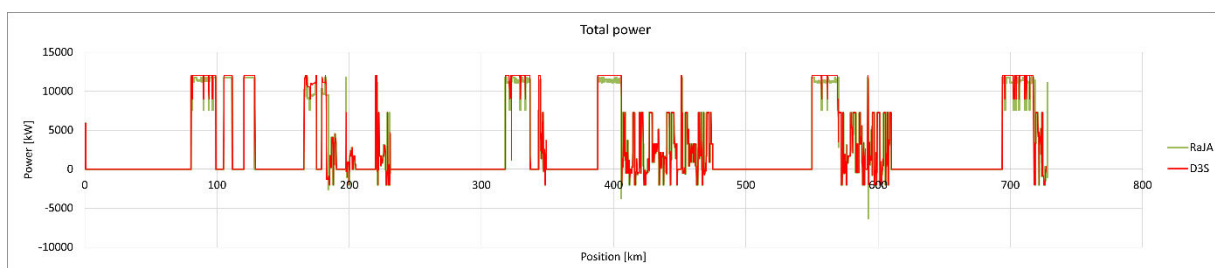
Figur 151: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



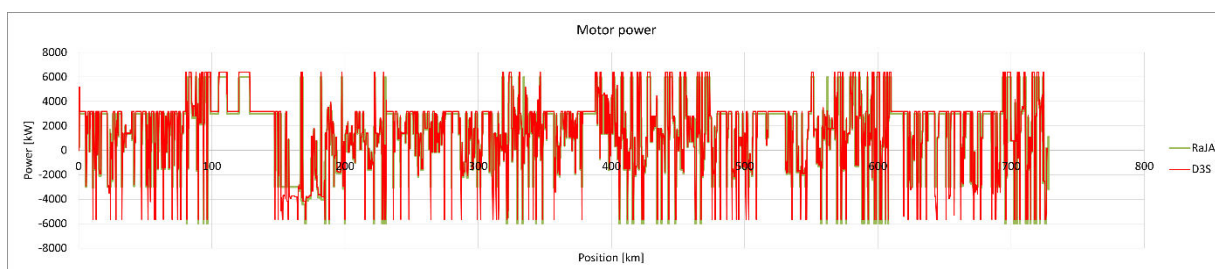
Figur 152: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



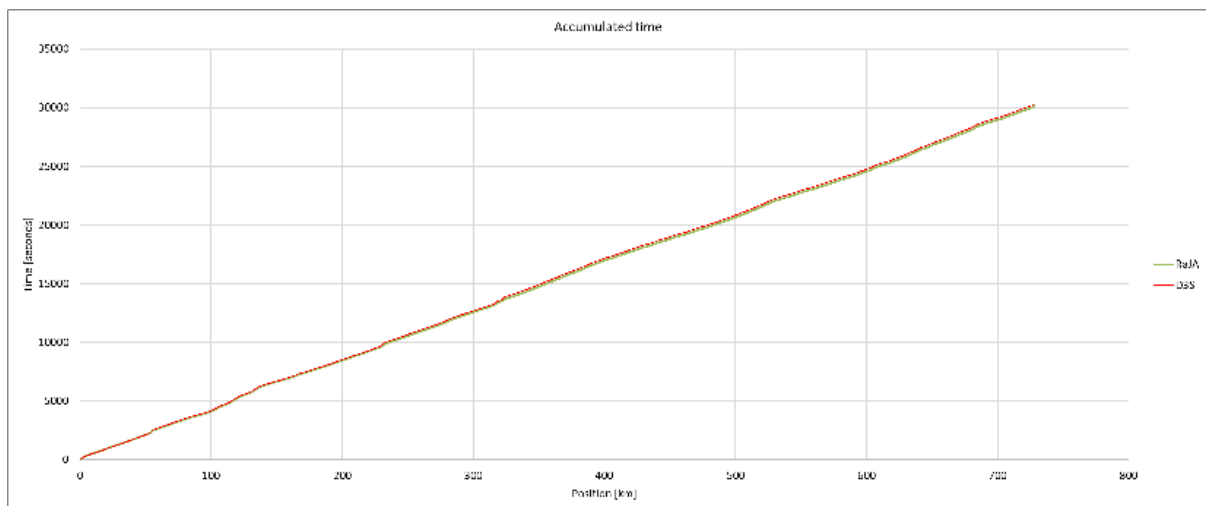
Figur 153: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Batterieffekt.



Figur 154: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Effekt fra kontaktledning.



Figur 155: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Effektforbruk fra motorer.



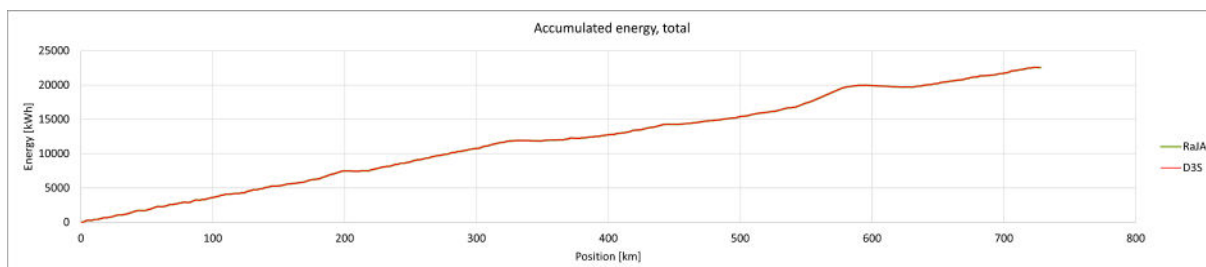
Figur 156: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, batteri (konsept 3). Akkumulert kjøretid.

6.3.6 Godstog, nordgående, elektrifisert (konsept 4)

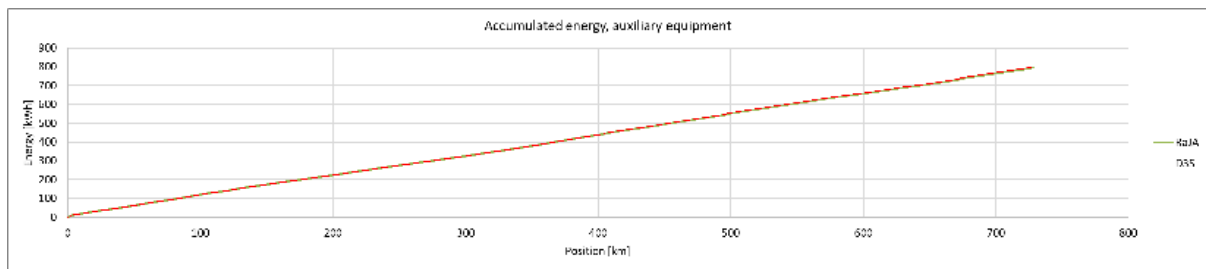
For elektrifiseringskonseptet (konsept 4) er det ikke avvik i totalt energiforbruk. I den akkumulerte energien til motorene er det et lite avvik mellom simuleringene. Dette forklares i kapittel 6.3.2. Det er godt samsvar i parameterverdiene for hastighet, motoreffekt og kjøretid i de to simuleringsverktøyene.



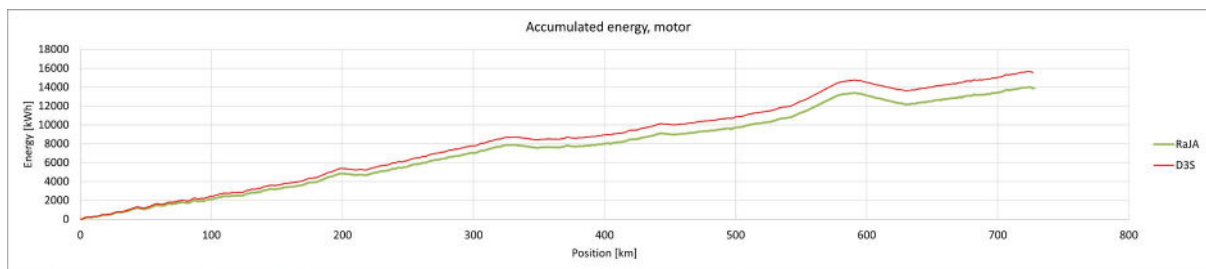
Figur 157: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Hastighet.



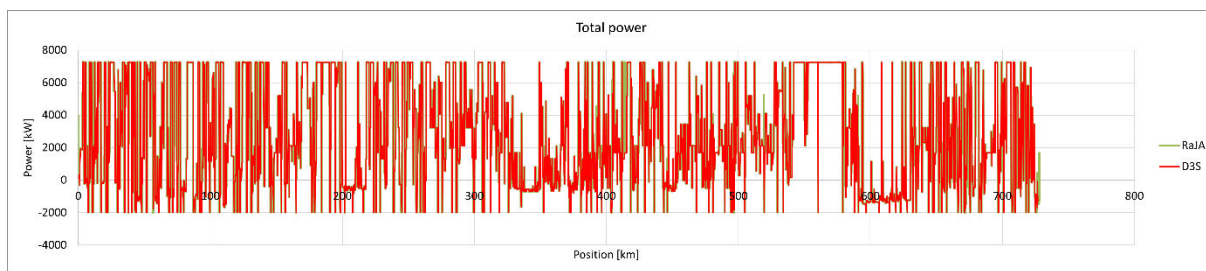
Figur 158: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert totalt energiforbruk.



Figur 159: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



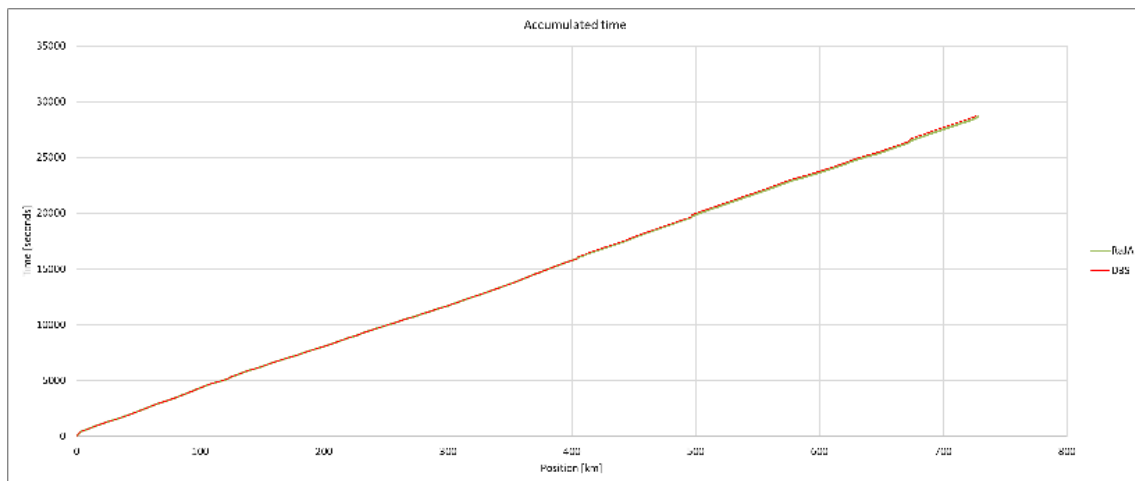
Figur 160: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



Figur 161: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Effekt fra kontaktledning.



Figur 162: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Effektforbruk fra motorer.



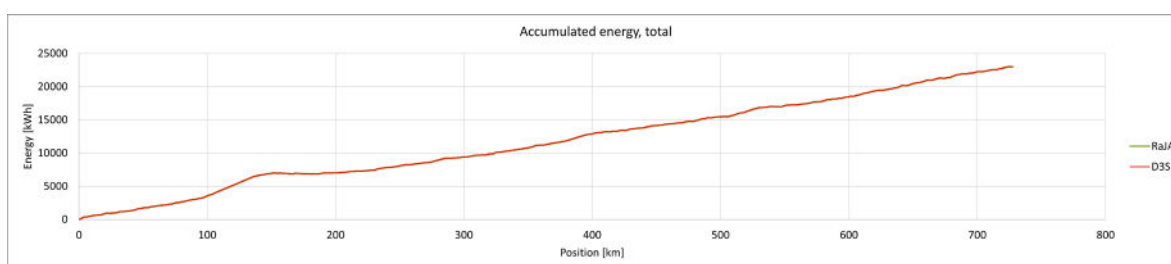
Figur 163: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, nordgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert kjøretid.

6.3.7 Godstog, sørgående, elektrifisert (konsept 4)

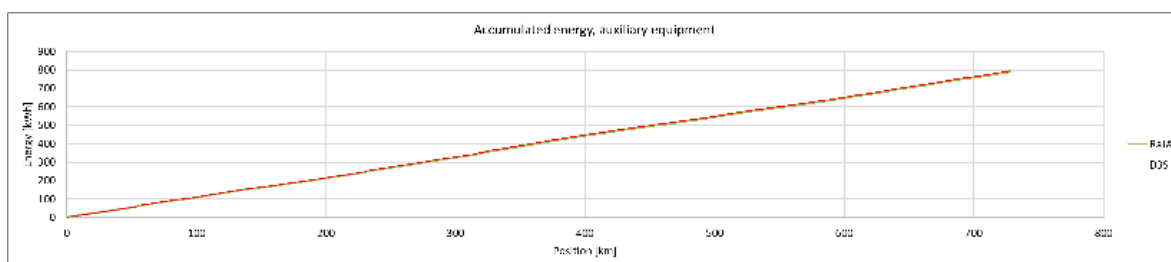
Samme konklusjoner for nordgående retning gjelder også for sørgående retning.



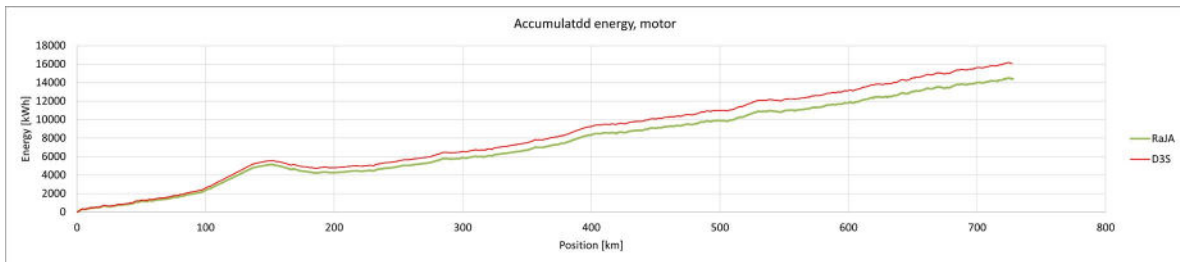
Figur 164: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Hastighet.



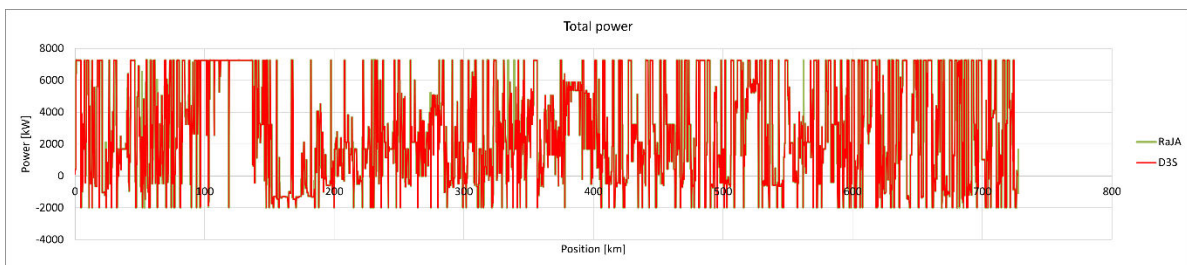
Figur 165: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert totalt energiforbruk.



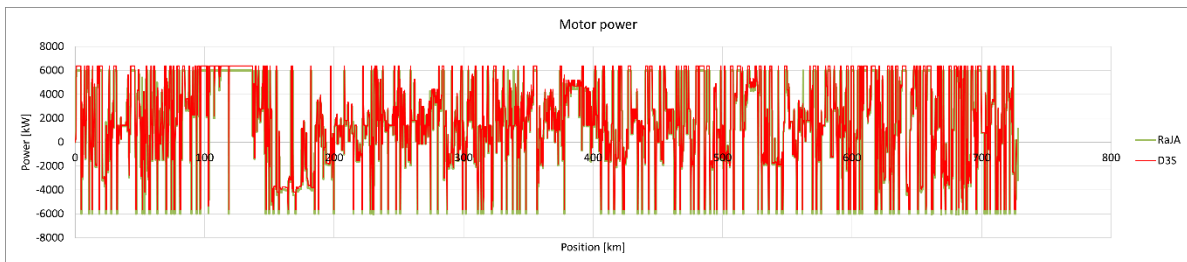
Figur 166: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert energiforbruk fra hjelpeutstyr.



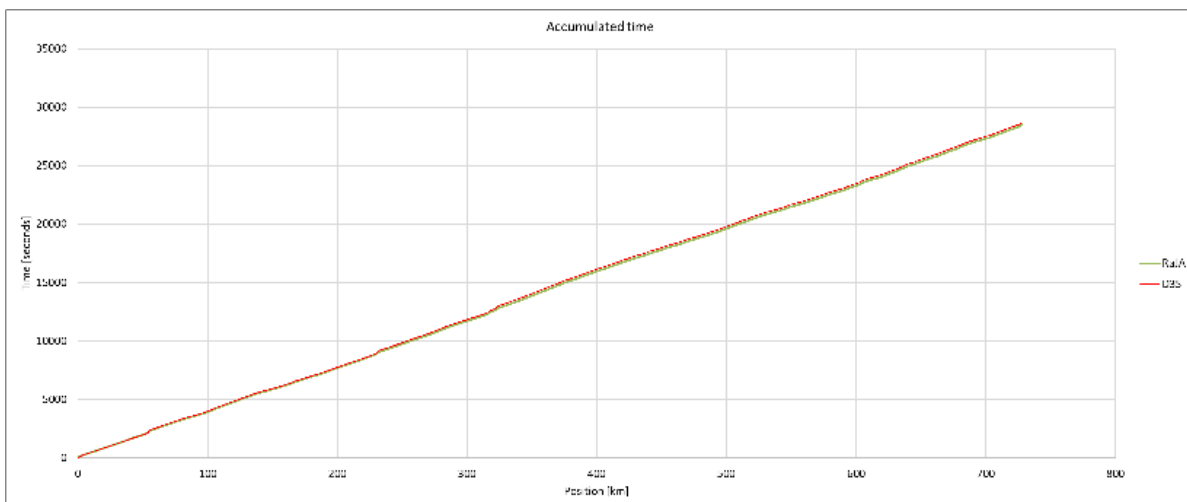
Figur 167: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert energiforbruk fra motorer.



Figur 168: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Effekt fra kontaktledning.



Figur 169: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Effektforbruk fra motorer.



Figur 170: Sammenligning av simuleringsresultat. Godstog, sørgående, elektrifisering (konsept 4). Akkumulert kjøretid.

6.4 Konklusjon

Kapittel 6 viser at det er godt samsvar mellom simuleringsverktøyet hvis beregninger ligger til grunn for energikostnader (D3S) og simuleringsverktøyet som er brukt til kvalitetssikring (RaJA). De avvik som oppstår er identifisert og kan forklares ut fra kjøretøyet er modellert, samt antagelser knyttet til energiflyten ombord i kjøretøyet.

7 Konklusjon

I denne rapporten er det gjennomført energiberegninger som grunnlag til beregning av investeringskostnader og driftskostnader, samt inngangsdata for samfunnsøkonomisk analyse i KVVU GREEN. For å utføre energiberegningen er det benyttet en validert simuleringsmodell med gjeldende bane- og kjøretøysdata. Det er beregnet energiforbruk for de analyserte konseptene Diesel (Alternativ 0), Hydrogen (Alternativ 2a), Hydrogen med del-elektrifisering (Alternativ 2b), Batteri (med del-elektrifisering, Alternativ 3) og elektrifisering (Alternativ 4) i KVVU GREEN.

Gjennom en validering av simuleringsresultatene kommer det fram at kjøretøyet er modellert riktig i den opprinnelige simuleringen. Dette ses ved at det akkumulerte energiforbruket, hastigheten og motoreffekten i begge utførte simuleringer har samme størrelsesorden og at mengdene forholder seg til hverandre på en korrekt måte.

For Diesel og Hydrogen (og Hydrogen med del-elektrifisering) brukes eksisterende (og planlagt) elektrifisering for å kjøre bimodalt. For Batteri blir det også brukt eksisterende elektrifisering, og utover det er det foreslått en elektrifisering tilpasset hver bane for å sikre en fungerende bruk av person- og godstogene.

Ved en nærmere analyse av energiforbruket i det hel-elektrifisert konseptet (alternativ 4), kan det ses at godstogene står for hele 67% av det totale energiforbruket for gods- og persontrafikken på Nordlandsbanen, og at kombigodsrelasjonen Trondheim-Bodø står for 34%. Fjerntogene står for 65% av persontogenes energiforbruk på strekningen.

Kvalitetssikringen av simuleringsverktøyet viser god samsvar mellom brukt simuleringsverktøy og simuleringer fra ekstern part, og bekrefter at modelleringen av kjøretøyene er riktig.

8 Vedlegg A: Togvekt og toglengthe fra Bane NOR

Tognr 5792, 09.04.2021:

Tabeller > Vognopptak

Tognummer: ... Loktype: Løpnummer/Vogn Id: Dato: ... Versjon:

Vis fullstendig kjøremønster Vis alle vognopptaksversjoner Eksporter til Excel...

Hent data

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Totallengthe (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5792	09.04.2021	Bodø	Trondheim	CD312-1		Bodø	Mo i Rana	100	CD312	462		257	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
1	5792		1	Bodø		Mo i Rana	339		2	0				

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Totallengthe (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5792	09.04.2021	Bodø	Trondheim	312001	Forspenn	Bodø	Trondheim	100	312	329		257	38	77	100

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
2	5792		1	437443803600	Bodø	Drammen	Trondheim	38	P	4	100			
2	5792		2	437443803485	Bodø	Drammen	Trondheim	38	P	4	100			
2	5792		3	337649551229	Bodø	Trondheim	Trondheim	49	P	6	100			
2	5792		4	337649554033	Bodø	Trondheim	Trondheim	35	P	6	100			
2	5792		5	337649554116	Bodø	Trondheim	Trondheim	35	P	6	100			
2	5792		6	337649550270	Bodø	Trondheim	Trondheim	70	P	6	100			
2	5792		7	337649551328	Bodø	Trondheim	Trondheim	64	P	6	100			

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Totallengthe (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5792	09.04.2021	Bodø	Trondheim	CD312-1		Mo i Rana	Mosjøen	100	CD312	675		359	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
3	5792		1	Mo i Rana		Mosjøen	552		2	0				

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Totallengthe (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5792	09.04.2021	Bodø	Trondheim	CD312-1		Mosjøen	Trondheim	100	CD312	833		462	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
4	5792		1	Mosjøen		Trondheim	710		2	0				

Kjøremønster:

Kilometer	Stasjon	Distanse	Akkumulert distanse	Planlagt ank.	Planlagt avg.	Faktisk ank.	Faktisk avg.
728,75	Bodø	0	0		14:17		14:15
497,83	Mo i Rana	230,92	230,92	20:04	21:16	20:04	21:17
406,01	Mosjøen	91,82	322,74	22:35	23:15	22:38	23:07
0	Trondheim	404,38	727,12	05:55		05:45	

Brutto tonnkilometer ikke beregnet pga. flere vognopptak.

Tognr 5795, 16.04.2021

Tabeller > Vognopptak

Tognummer: ... Loktype: Løpnummer/Vogn Id: Dato: ... Versjon:

Vis fullstendig kjøremønster Vis alle vognopptaksversjoner Eksporter til Excel...

Hent data

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Total lengde (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5795	16.04.2021	Trondheim	Bodo	CD312-1		Trondheim	Mo i Rana	100	CD312	1135		502	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
1	5795	1	1	Trondheim	Mo i Rana		1012		2	0,9999				

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Total lengde (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5795	16.04.2021	Trondheim	Bodo	CD312-1		Mo i Rana	Fauske	100	CD312	720		366	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
2	5795	1	1	Mo i Rana	Fauske		597		2	0,9999				

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Total lengde (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5795	16.04.2021	Trondheim	Bodo	CD312-1		Fauske	Bodo	100	CD312	298		143	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
3	5795	1	1	Fauske		Bodo	175		2	0				

Kjøremønster:

Kilometer	Stasjon	Distanse	Akkumulert distanse	Planlagt ank.	Planlagt avg.	Faktisk ank.	Faktisk avg.
0	Trondheim	0	0		08.03		08.04
497.83	Mo i Rana	496.2	496.2	15.20	16.22	15.21	15.58
674.23	Fauske	176.4	672.6	19.05	19.21	19.05	19.11
728.75	Bodo	54.52	727.12	20.04		19.51	19.51

Brutto tonnkilometer ikke beregnet pga. flere vognopptak.

Tognr 5798, 17.04.2021

Tabeller > Vognopptak

Tognummer: ... Loktype: Løpnummer/Vogn Id: Dato: ... Versjon:

Vis fullstendig kjøremønster Vis alle vognopptaksversjoner Eksporter til Excel...

Hent data

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Total lengde (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5798	17.04.2021	Bodo	Trondheim	CD312-1		Bodo	Fauske	100	CD312	415		229	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
1	5798	1	1	Bodo	Fauske		292		2	0				

Lokomotiv og togkonfigurasjon:

Tognr.	Utgd.	Utg.st.	Endest.	Loknr.	Opg.	Innsett.st.	Utsett.st.	Trkkr. (%)	Lok.ty.	Totalvekt (tonn)	Tomvekt (tonn)	Total lengde (m)	Ant. aks.	Brm.pr. (%)	STH (Km/t)
5798	17.04.2021	Bodo	Trondheim	CD312-1		Fauske	Trondheim	100	CD312	893		502	9999	0	90

Vogner og gods:

Versjon	Tognr.	Vognnr.	Vogn id.	Sendest.	Best.st.	Utsett.st.	Vekt (tonn)	Brm.gr.	Ant.aks.	STH (km/t)	UN	F.kl.	F.kl.beskr.	Merknad
2	5798	1	1	Fauske		Trondheim	770		2	0				

Kjøremønster:

Kilometer	Stasjon	Distanse	Akkumulert distanse	Planlagt ank.	Planlagt avg.	Faktisk ank.	Faktisk avg.
728.75	Bodo	0	0		18:00		17:51
674.23	Fauske	54.52	54.52	18.44	19.24	18.29	19.12
0	Trondheim	672.6	727.12	05.42		04.00	

Brutto tonnkilometer ikke beregnet pga. flere vognopptak.