

Simuleringsrapport
Hovedplan banestrømforsyning Ofotbanen -
Revisjon
Undersøkelse av alternativer for banestrømforsyningen



SIMULERINGSRAPPORT

Revisjon av hovedplan for Banestrømforsyningen på Ofotbanen

Det er utført simuleringer for tre alternativer for ny banestrømforsyning for Ofotbanen med økte lastvekter og en sterk økning av trafikkapasiteten. I den dimensjonerende ruteplanen er det forutsatt at de vestgående malmtogene skal ha en lastvekt på 8160 tonn. Videre skal det en gang i døgnet gå et østgående tog med olivin med en lastvekt 4240 tonn. Det er også tatt høyde for godstog i den nye NEW trafikkorridoren som er under planlegging og her forutsettes det lastvekt på 1500 tonn. De tre alternativene for banestrømforsyningen er:

- Alternativ 1: Kontaktledning med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen, men mateledningen utkoblet i normal drift.
- Alternativ 2: Fjernledningssystem med 66 kV systemspenning med innmating i Narvik, Rombak og Bjørnfjell.
- Alternativ 3: Fjernledningssystem med autotransformatorer der dagens høyspentledning benyttes for negativ- og positivleder og +15/-15 kV som systemspenning. Transformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak, Katterat og Bjørnfjell.

Det er gjort evalueringer av simuleringresultatene etter nytt teknisk regelverk for prosjektering, JD 546. Resultater for normal infrastruktur og normal trafikk viser at alle alternativene er tilfredsstillende. Imidlertid viser simuleringene med avvikende trafikksituasjon og tilfellene med utfall av komponenter forskjell mellom alternativene. Da ser en at alternativ 1 har problemer med å tilfredsstille regelverkskravet til minimumspenning og forsinkelser for togene oppstår. For alternativ 1 er det også flere tilfeller som gir overbelastning av lederne. I alternativ 2 er det nødvendig med forsterkningsledning for å unngå overbelastning, noe som opprinnelig ikke var tiltenkt da dette gjør kostnadene store. Også for alternativ 3 er det belastningsverdier som kommer helt opp mot det akseptable, men flere uheldige omstendigheter må virke sammen for at dette skal bli problematisk. Når det gjelder redundans og forsyningsikkerhet kommer alternativ 2 dårligst ut fordi havari av transformatorene vil få stor betydning for trafikkhåndteringen, og reparasjonstiden kan bli svært lang. Alternativ 3 med autotransformatorer peker seg ut som det beste når alle forholdene som er undersøkt her sammenholdes, og dette alternativet anbefales ut fra tekniske forhold. Dette er også det eneste alternativet som ikke krever forsterkningsleder langs banen og gjennom trange tunneler.

000	Endelig utgave	14.09.07	FM	COWI (FJ)	FJ
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av
Ofotbanen Banestrømforsyning Simuleringsrapport - forskjellige aktuelle systemer for banestrømforsyningen Revisjon av hovedplan		Ant. sider	Fritekst 1d		
		152	Fritekst 2d		
			Fritekst 3d		
			Produsent	Frank Martinsen (FM)	
		Prod. dok. nr.			
Erstatning for					
Erstattet av					
 Jernbaneverket	Dokument nr.			Rev.	
	EB. 100656-000			000	

1	INNLEDNING	6
1.1	BAKGRUNN	6
1.2	MÅLSETNING	6
1.3	FORUTSETNINGER	7
2	KRAV TIL BANESTRØMFORSYNINGEN	8
2.1	ABSOLUTTE KRAV TIL SPENNING	8
2.2	KRAV TIL DIMENSJONERING AV BANESTRØMFORSYNING	8
	GENERELLE KRAV TIL ENERGIFORSYNINGEN	9
	OVERORDNET KRAV	9
	SPENNINGSKRAV	9
	KRAV TIL BEHANDLING AV DRIFTSITUASJONER (REDUNDANSKRAV):	10
	TILGJENGELIGHETSKRAV	11
	BELASTNINGSKRAV (STRØM-/EFFEKTKRAV).....	12
2.3	SIMULERINGER OG DIMENSJONERING AV SYSTEM OG KOMPONENTER	12
2.3.1	<i>Simulering av normalsituasjon.....</i>	<i>12</i>
2.3.2	<i>Simulering av avvikssituasjoner og unormale driftssituasjoner.....</i>	<i>13</i>
2.3.3	<i>Belastning av omformere</i>	<i>14</i>
2.3.4	<i>Kontaktledningens stromføringsevne</i>	<i>15</i>
2.3.5	<i>Belastningsevne for lederne på høyspentlinjen.....</i>	<i>16</i>
2.3.6	<i>Belastning av autotransformatorer</i>	<i>17</i>
2.3.7	<i>Beregning av tap og energiforbruk.....</i>	<i>17</i>
3	SIMULERINGSMODELLENE.....	18
3.1	AVGRENSING AV SIMULERINGSOMRÅDE	18
3.2	BANESTRØMFORSYNING	18
3.2.1	<i>Matende trefasenett.....</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Omformerstasjoner.....</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Spenningsregulering for omformerstasjonene</i>	<i>18</i>
3.3	KONTAKTLEDNINGSANLEGG OG OVERFØRING	19
3.3.1	<i>Konvensjonelt kontaktledningsanlegg.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Fjernledningssystem.....</i>	<i>19</i>
3.3.3	<i>Fjernledningssystem med autotransformatorer.....</i>	<i>19</i>
3.3.4	<i>Bakgrunnslast.....</i>	<i>19</i>
3.4	BANEDATA	20
3.4.1	<i>Gradienter og kurver (vertikal og horisontalkurvatur).....</i>	<i>20</i>
3.4.2	<i>Adhesjonskoeffisient.....</i>	<i>20</i>
3.4.3	<i>Tunneler</i>	<i>20</i>
3.4.4	<i>Hastighetsprofil.....</i>	<i>20</i>
3.5	LOKOMOTIVER OG VOGNMATERIELL	21
3.5.1	<i>Malmtoget.....</i>	<i>21</i>
3.5.2	<i>Godstog.....</i>	<i>21</i>
3.5.3	<i>Persontog.....</i>	<i>21</i>
3.5.4	<i>Akselerasjon.....</i>	<i>22</i>
3.5.5	<i>Trekraft som funksjon av spenning.....</i>	<i>22</i>
3.5.6	<i>Spenningsavhengig utstyr i togene.....</i>	<i>23</i>
3.6	RUTEPLAN	23
4	SIMULERINGSRESULTATER.....	24
4.1	SIMULERING I – DAGENS BANESTRØMFORSYNING MED MATELEDNINGEN UTKOBLET	24
4.1.1	<i>Kjørt distanse og oppsatt rute</i>	<i>25</i>
4.1.2	<i>Kjørt distanse og korrigert rute.....</i>	<i>27</i>
4.1.3	<i>Belastning av omformere</i>	<i>29</i>
4.1.4	<i>Levert effekt og energi fra trefasenettet og elektriske energitap.....</i>	<i>29</i>

4.1.5	Belastning av kontaktledningen.....	31
4.1.6	Spenningen for togene.....	31
4.2	SIMULERING 1B – UTFALL AV ROMBAK OMFORMERSTASJON.....	35
4.2.1	Belastning av omformere	35
4.2.2	Belastning av kontaktledningen.....	36
4.2.3	Spenningen for togene.....	36
4.3	SIMULERING 1BB - ENSIDIG MATING FRA ROMBAK OMFORMERSTASJON TIL TORNEHAMN	37
4.3.1	Belastning av omformere	38
4.3.2	Belastning av kontaktledningen.....	38
4.3.3	Spenningen for togene.....	38
4.4	SIMULERING 1AA – TRAFIKKENDRING SLIK AT TOG KJØRER I ”BLOKKPOSTAVSTAND”	41
4.4.1	Kjørt distanse	41
4.4.2	Belastning av omformere	42
4.4.3	Belastning av kontaktledningen.....	43
4.4.4	Spenningen for togene.....	44
4.5	SIMULERING 1AAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT 6 TOG KJØRER I ”BLOKKPOSTAVSTAND” FRA NARVIK OG 2 TOG KOMMER IMOT.....	45
4.5.1	Kjørt distanse	45
4.5.2	Belastning av omformere	46
4.5.3	Belastning av kontaktledningen.....	47
4.5.4	Spenningen for togene.....	47
4.6	SIMULERING 1AAAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT TOG KJØRER I ”BLOKKPOSTAVSTAND”	48
4.6.1	Kjørt distanse	48
4.6.2	Belastning av omformere	49
4.6.3	Strøm og effekt fra togene	50
4.6.4	Belastning av kontaktledningen.....	51
4.7	SIMULERING 2 – BANESTRØMFORSYNING MED FJERNLEDNING PÅ 66 KV.....	53
4.7.1	Belastning av omformere	53
4.7.2	Belastning av transformatorer	54
4.7.3	Belastning av fjernledning	54
4.7.4	Levert effekt og energi fra trefasenettet.....	55
4.7.5	Belastning av kontaktledningen.....	55
4.7.6	Spenningen for togene.....	55
4.8	SIMULERING 2AAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT 6 TOG KJØRER I ”BLOKKPOSTAVSTAND” FRA NARVIK OG 2 TOG KOMMER IMOT.....	59
4.8.1	Belastning av omformere	59
4.8.2	Belastning av transformatorer	59
4.8.3	Belastning av fjernledning	60
4.8.4	Belastning av kontaktledningen.....	60
4.8.5	Spenningen for togene.....	60
4.9	SIMULERING 3 – FJERNLEDNINGSSYSTEM MED AUTOTRANSFORMATORER MED NEGATIV- OG POSITIVLEDER PÅ HØYSPENTLINJEN	61
4.9.1	Undersøkelse av modell for fjernledning og autotransformatorer.....	62
4.9.2	Belastning av omformere	63
4.9.3	Belastning av autotransformatorer	63
4.9.4	Belastning av negativ- og positivleder på høyspentlinjen.....	64
4.9.5	Levert effekt og energi fra trefasenettet.....	64
4.9.6	Belastning av kontaktledningen.....	65
4.9.7	Spenningen for togene.....	67
4.10	SIMULERING 3B UTFALL AV ROMBAK OMFORMERSTASJON	70
4.10.1	Belastning av omformere.....	70
4.10.2	Belastning av autotransformatorer	70
4.10.3	Belastning av negativ- og positivleder	71
4.10.4	Belastning av kontaktledningen.....	71
4.10.5	Spenningen for togene	72
4.10.6	Kjørt distanse	74
4.11	SIMULERING 3BB ENSIDIG MATING FRA ROMBAK OMFORMERSTASJON TIL TORNEHAMN	76
4.11.1	Belastning av omformere.....	76
4.11.2	Belastning av autotransformatorer	76
4.11.3	Belastning av negativ- og positivleder	76

4.11.4	Belastning av kontaktledningen.....	77
4.11.5	Spenningen for togene.....	78
4.11.6	Kjørt distanse.....	80
4.12	SIMULERING 3BBB UTFALL AV AUTOTRANSFORMATOR VED NARVIK.....	81
4.12.1	Belastning av autotransformator ved Straumsnes.....	81
4.12.2	Belastning av negativ- og positivleder.....	82
4.12.3	Belastning av kontaktledningen.....	83
4.13	SIMULERING 3AA – TRAFIKKENDRING SLIK AT TOG KJØRER I "BLOKKPOSTAVSTAND".....	84
4.13.1	Kjørt distanse.....	84
4.13.2	Belastning av omformere.....	84
4.13.3	Belastning av kontaktledningen.....	85
4.13.4	Spenning for togene.....	86
4.14	SIMULERING 3AAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT 6 TOG KJØRER I "BLOKKPOSTAVSTAND" FRA NARVIK OG 2 TOG KOMMER IMOT.....	87
4.14.1	Belastning av omformere.....	87
4.14.2	Belastning av kontaktledningen.....	87
4.14.3	Spenningen for togene.....	88
4.15	SIMULERING 3AAAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT MALMTOG SOM BREMSER REGENERATIVT MOT NARVIK KJØRER MED KORT AVSTAND MELLOM SEG.....	88
4.15.1	Belastning av omformere.....	89
4.15.2	Belastning av kontaktledningen.....	89
4.16	SIMULERING 3AAAAA – TRAFIKKENDRING SLIK AT MALMTOG SOM BREMSER REGENERATIVT MOT NARVIK KJØRER MED KORT AVSTAND MELLOM SEG MEN BREMSEKRAFTEN REDUSERT TIL 500 kN ...	91
4.16.1	Belastning av omformere.....	92
4.16.2	Belastning av kontaktledningen.....	92
4.17	SIMULERING 3C UTEN TORNEHAMN OMFORMERSTASJON.....	94
4.17.1	Belastning av omformere.....	94
4.17.2	Levert effekt fra trefasenettet.....	95
4.17.3	Belastning av autotransformatorer.....	95
4.17.4	Belastning av negativ- og positivleder på høyspentlinjen.....	96
4.17.5	Belastning av kontaktledningen.....	96
4.17.6	Spenning for togene.....	97
4.18	SIMULERING 3CB ENSIDIG MATING FRA ROMBAK OMFORMERSTASJON TIL STENBACKEN.....	100
4.18.1	Belastning av omformere.....	100
4.18.2	Belastning av autotransformatorer.....	101
4.18.3	Belastning av negativ- og positivleder.....	101
4.18.4	Belastning av kontaktledningen.....	102
4.18.5	Spenningen for togene.....	102
4.18.6	Kjørt distanse.....	104
4.19	SIMULERING CBB ENSIDIG MATING FRA ROMBAK OMFORMERSTASJON MOT TORNEHAMN MED KONVENJONELT KONTAKTLEDNINGSANLEGG PÅ MALMBANAN.....	106
4.19.1	Belastning av omformere.....	106
4.19.2	Belastning av autotransformatorer.....	106
4.19.3	Belastning av negativ- og positivleder.....	106
4.19.4	Belastning av kontaktledningen.....	107
4.19.5	Spenningen for togene.....	107
4.19.6	Kjørt distanse.....	109
5	OPPSUMMERING OG DISKUSJON.....	111
5.1	RESULTATER FRA SIMULERINGENE.....	111
5.2	VURDERINGER AV FORHOLDENE RUNDT DE TRE ALTERNATIVENE.....	114
5.2.1	Generelle vurderinger som ikke er lett kvantifiserbare.....	114
5.2.2	Vurderinger av unormale driftssituasjoner.....	117
5.2.3	Dimensjonerende ruteplan og endring av ruteopplegget.....	120
5.2.4	Belasting av omformerne og antall aggregater i drift.....	121
5.2.5	Antall transformatorer og størrelsen av disse.....	121
5.2.6	Marginer for dimensjonering av komponentene.....	122
5.2.7	Belastingssituasjonen om Tornehamn omformerstasjon legges ned og Stenbacken beholdes....	123
5.2.8	Begrensinger for det tunge Olivintoget.....	124
5.2.9	Regenerativ bremsing på fremtidige tog.....	124

5.2.10	<i>Energi og effektutveksling grunnet spenningsvinkler i overliggende nett</i>	<i>125</i>
5.2.11	<i>Tilgjengelighetskrav og konsekvens ved unormale driftsituasjoner</i>	<i>125</i>
5.2.12	<i>Mulighet for forsterkning ved eventuell trafikkøkning.....</i>	<i>128</i>
5.2.13	<i>Oppsummering av fordeler og ulemper med alternativene</i>	<i>129</i>
6	KONKLUSJON	131
6.1	ANBEFALT ALTERNATIV	131
6.2	STORRELSE OG ANTALL OMFORMERE OG AUTOTRANSFORMATORER	131
6.3	SITUASJONER SOM KREVER BEGRENSINGER I TRAFIKKEN	132
6.4	SPESIELLE FORHOLD SOM MÅ PÅSEES VED PROSJEKTERING OG DRIFT	132
7	APPENDIKS A – BAKGRUNN FOR BEREGNINGER AV PÅLITELIGHET FOR ALTERNATIVENE	133
8	APPENDIKS B - EFFEKT OG ANDRE PARAMETERE FOR UTVALGTE TOG	135
9	APPENDIKS C – SIMULERINGER DER FORSKJELLIGE PARAMETERE FOR TOG OG BANE ENDRES.....	142
9.1	SIMULERING MED SPEEDM = 5 KM/T	142
9.2	SIMULERING DER TC ENDRES FRA 0,5 TIL 1 OG TIL 4 SEKUNDER	142
9.3	SIMULERING DER ADHESJONSKOEFFISIENTEN ENDRES FOR BANEN	144
9.4	SIMULERING UTEN HORIZONTALKURVATUR	148
10	REFERANSER.....	151
11	VEDLEGG 1	152

Forsidefoto: Roar G. Nilsson. Malmtog med IORE lokomotiv snor seg nedover mot Narvik. I bakgrunnen Rombaksbotn.

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Tidligere "Hovedplan banestrømforsyning Ofofbanen" [1] fra 1999 med tilhørende simuleringer ble laget for å forsterke banestrømforsyningen for å kunne takle 30 tonn aksellast, en større trafikkbelastning enn tidligere og de nye IORE lokomotivene. Malmtogene som da ble forutsatt i simuleringen skulle ha en lastvekt på 8160 tonn og lengde 760 meter. Togene som kjører nå har fremdeles en lastvekt på 5240 tonn og en lengde 490 meter.

Siden den gangen er trafikkbehovet økt ytterligere og LKAB ønsker å kjøre noen flere malmtog pr døgn, men med samme lastvekt som i den opprinnelige planen for 30-tonnsprosjektet. Videre ønsker LKAB å få muligheten til å kjøre en stor last med olivin fra Narvik til Kiruna i noen av de returnerende tomme malmtogene. Helst ønsker en å få transportert olivin i kun et tog pr døgn med lastvekten 4240 tonn. Om dette ikke går kan en se på mulighetene av å dele lasten over to tog pr døgn.

I tillegg til LKAB sine ønsker er det krefter som arbeider for å få etablert en trafikkorridor fra Kina til Narvik over den Transsibirske jernbane. Dette skal være et trafikkopplegg med containertransport. For fremtidens mål [2] for grenseoverskridende transport er det for Østfoldbanen og Kongsvingerbanen forutsatt 1500 tonn som fremtidig mål for lastvekt og da er det i dette arbeidet forutsatt at tog med denne lastvekten vil gå fra Alnabru og fra Narvik. Alle godstogene forutsettes å ha denne vekten og dette gir dessuten en tog lengde som maksimalt er like lang som malmtogene. Dette gjelder med en tyngde pr meter tog som er vanlig ellers.

Et problem med Ofofbanen er hyppige driftsproblemer på mange forskjellige elektriske hjelpesystemer. Dette tillegges å skyldes overspenninger og returstrømmer fra skinnen som går ut i jordsmonnet. Banestrømforsyningen for Ofofbanen er høyst spesiell med en mateledning som går på en eldre høyspentlinje langs jernbanetraseen og som mater inn på seksjoner av kontaktledningen, uten at det er en annen definert tilbakevei for returstrømmen enn skinnene. Dette bevirker til at returstrømmen driver ut av skinnene og følger jordsmonnet og berggrunnen under høyspentlinjen. At dette ikke gir indusert spenning og forstyrrelser for andre offentlige installasjoner kan bare skyldes at banen går på steder med liten bebyggelse. I forbindelse med dette arbeidet skal en se på alternativer som skal forbedre disse forholdene og få et anlegg mer harmonisert i forhold til Jernbaneverkets tekniske regelverk.

1.2 Målsetning

Simuleringene skal undersøke forholdene for tre alternativer for banestrømforsyningen:

- Alternativ 1 – konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og dagens mateledning (opprinnelig høyspentlinje) normalt utkoblet.
- Alternativ 2 – Fjernledningssystem der den opprinnelige høyspentlinjen benyttes for en spenning på 66 kV og transformatorer plasseres på Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Forsterkningsledning for kontaktledningen er ikke inkludert her.

- Alternativ 3 – Fjernledningssystem med autotransformatorer for innmating til kontaktledningsanlegget der den opprinnelige høyspentledningen fører negativ- og positivleder med spenning -15/15 kV. (Systemet minner til forveksling om et AT-system med negativ og positivleder, men her skal disse lederne ikke følge kontaktledningsanlegget og dermed kan det ikke kalles for et AT-system. Det er kun autotransformatorer som benyttes istedenfor toviklingstransformatorer.) Autotransformatorer forutsettes å plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak, Katterat og Bjørnfjell.

I henhold til teknisk regelverk skal anlegg som i alternativ 1 og 2 bygges med både sugetransformatorer og returledning. Men på grunn av mange trange tunneler og snøoverbygg, samt intensivt vedlikehold, ansees ekstra ledere som et problem ved at de lett kan rives ned og ødelegges. Derfor kommer returledning ikke i betraktning her, og bare for alternativ 1 (og muligens 2) forutsettes forsterkningsleder. Dette gjør imidlertid at alternativ 1 ikke er særlig attraktivt. Om det innføres sugetransformatorer med tilknytning til kontaktledning og skinne (men ikke returledere) i alternativ 1 eller eventuelt 2, får dette liten innvirkning for simuleringene her, da bidraget dette får for impedansen ikke er særlig stor.

Simuleringene gjøres for normale og unormale driftssituasjoner for å kunne tilfredsstille kravene for banestrømforsyningen i henhold til teknisk regelverket for prosjektering av banestrømforsyning JD 546.

1.3 Forutsetninger

Forskjellige stoppmønstre fra en ruteplan til en annen, friksjon for skinnene avhengig av været, forsinkelser, personlig kjørstil for lokomotivfører, samt en rekke andre faktorer som forandrer seg med årstiden og endog fra dag til dag, kan få innvirkning på spenningen og effektuttaket til et tog. Disse forholdene er ikke undersøkt i dette arbeidet, men det forutsettes at de fleste av disse parametrene holder seg til den øvre delen av de normalt forekommende verdier. Det forutsettes med andre ord at en regner konservativt og banestrømforsyningen vil bli dimensjonert enten med gode marginer, eller med muligheter for fremtidige utvidelser.

Ved undersøkelse av spenninger, strømmer og effekter er det ofte størrelsens påvirkning over tid som er interessant for dimensjonering av komponenter eller for vurdering av en lav spennings innvirkning på togfremføringen. Det er blitt praksis å vurdere effekter (aktiv-, reaktiv- eller syneffekt) ved å etterbehandle den simulerte verden av for eksempel omformereffekt ved å beregne MEAN-verdier for forskjellige tidsperioder:

$$S_{MEAN} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} S dt$$

For strømmer og spenninger blir tidsverdier undersøkt med RMS- (Root Mean Square) verdier:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} I^2 dt}$$

2 KRAV TIL BANESTRØMFORSYNINGEN

Simuleringene skal påvise at visse kvalitetskriterier overholdes. For eksisterende og nye anlegg er det forskjellige kriterier med hensyn på laveste spenning, se avsnittet nedenfor. I tillegg må ikke matestasjoner, kontaktledning, sugetransformatorer, filterimpedanser, etc. overbelastes.

2.1 Absolutte krav til spenning

For at banestrømforsyningen ikke skal være til hinder for fremføringen av en gitt togtrafikk stilles det krav til spenningen. Det er flere forskjellige normer som gjelder og her gjengies normen EN 50163 som omtaler krav til spenning på togets strømvaktaker. EN 50163 stiller følgende krav:

- Varigheten av spenning mellom $U_{\min1}$ og $U_{\min2}$ skal ikke overstige 2 minutter.
- Varigheten av spenning mellom $U_{\max1}$ og $U_{\max2}$ skal ikke overstige 5 minutter.
- Spenningen på matestasjonens samleskinne skal være mindre eller lik $U_{\max1}$.
- I normal drift skal spenningen ligge mellom $U_{\min1}$ og $U_{\max1}$.
- Under unormal drift skal ikke spenning mellom $U_{\min1}$ og $U_{\min2}$ forårsake skader eller feil.
- Dersom spenningen kommer opp mellom $U_{\max1}$ og $U_{\max2}$, skal den være mindre enn eller lik $U_{\max1}$ for et uspesifisert tidsrom. Spenning mellom $U_{\max1}$ og $U_{\max2}$, skal bare forekomme under midlertidige betingelser som ved regenerativ bremsing eller speningsregulering som for eksempel ved trinkopling på transformatorer.
- Under unormal drift er $U_{\min2}$ den laveste spenning som rullende materiell er bygd for å operere under.

De ulike spenningsnivåene er gitt i tabell 2-1. Normal drift er definert som trafikk med rutetabell, togsammensetning/-vekt og trekkraftmateriell som er lagt til grunn for dimensjonering av banestrømforsyningen og at banestrømforsyningens komponenter belastes i henhold til respektive standarder for belastning.

Tabell 2-1: Spenningsnivåer i normer

Betegnelse	Spenning	Beskrivelse
$U_{\min2}$	11 000 V	Minimal midlertidig spenning
$U_{\min1}$	12 000 V	Minimal permanent spenning
U_n	15 000 V	Nominell spenning
$U_{\max1}$	17 250 V	Maksimal permanent spenning
$U_{\max2}$	18 000 V	Maksimal midlertidig spenning

2.2 Krav til dimensjonering av banestrømforsyning

Det er i [3] drøftet normenes krav til spenning og hvordan dette skal fortolkes. Uansett er det for dimensjonering av banestrømforsyningen vedtatt følgende regler for prosjektering i JD 546, og her er hele kapittelet om krav til energiforsyningen gjengitt:

Generelle Krav til Energiforsyningen

For tog fremført med elektrisk trekraftmateriell er den elektriske energiforsyningens kvalitet viktig for å kunne holde ruteplanen. Med den elektriske energiforsyningen menes både banestrømforsyningsanlegg og kontaktledningsanlegg for levering av elektrisk energi helt fram til togets strømvaktaker.

Med *normal trafikk* menes:

- Trafikk i henhold til den til enhver tid gjeldende ruteplan, inklusive ekstratog kjørt innenfor rammene av restkapasitet, og de til enhver tid gjeldende ruteplanforutsetninger for vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
- Fremtidig trafikkprognose (se avsnitt 2.6) for vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket

Begrepet trafikk omfatter både ruteplan, togsammensetning/trekraft og togvekt.

Med *normal infrastruktur* menes:

- Drift av og forhold ved infrastrukturen som lagt til grunn under prosjektering av opprinnelig anlegg, det gjelder både
 - koblingsbilde i overføringsnett,
 - tilgjengelig og installert ytelse i matestasjoner,
 - samkjøring av matestasjoner samt
 - bruk av andre banestrømforsyningsanlegg (kondensatorbatterier etc).

Med overføringsnett menes kontaktledning, mateledning, fjernledning og AT-ledninger.

Overordnet krav

- a) Kvaliteten på den elektriske energiforsyningen skal ved *normal infrastruktur* ikke være en begrensning for *normal trafikk*.
- b) *Normal infrastruktur* skal utvikles slik at kvaliteten på den elektriske energiforsyningen ikke blir begrensende for *normal trafikk*.
- c) Kvaliteten på den elektriske energiforsyningen skal tilpasses de andre infrastrukturelementene slik at infrastrukturen, samlet sett, blir mest mulig optimal på kort og lang sikt sett i forhold til både drift-, vedlikeholds- og investeringskostnader samt kapasitet og tilgjengelighet for togframføring.

Spenningskrav

- a) Spenningen på togs strømvaktaker skal ikke underskride verdiene gitt i tabell 5.1.
 1. Dersom den vurderte trafikken ikke inkluderer endringene angitt i avsnitt 0 punkt a)3.1 og b)3.1 er bør-kravene i tabellen å oppfatte som skal-krav.
 2. Vurdering av spenning:
 - 2.1. Med kortvarig spenning menes laveste effektivverdi av spenning som måles på togs strømvaktaker. Ett sekund er godkjent samplingsintervall.
 - 2.2. Med langvarig spenning menes gjennomsnitt av effektivverdi av spenning over en periode av 2 minutter som måles på togs strømvaktaker.
 - 2.3. Med gjennomsnittlig spenning menes $U_{\text{mean useful}}$ for tog (train) og område (zone) som definert i EN 50388.

Tabell 5.1 Krav til spenning. Alle tall i kV.

	Type krav	Kortvarig	Langvarig	Gjennomsnitt
Normalt krav	Vedlikehold	Skal $\geq 12,0$ Bør $\geq 12,5$	Bør $\geq 13,5$	Skal $\geq 13,5$
	Prosjektering	Skal $\geq 13,0$	Skal $\geq 14,0$	Skal $\geq 14,0$
Redusert krav	Vedlikehold	Skal $\geq 11,0$	Skal $\geq 12,0$	Skal $\geq 13,5$
	Prosjektering	Skal $\geq 12,0$	Skal $\geq 12,0$	Skal $\geq 13,5$

Krav til behandling av driftsituasjoner (redundanskrav):

- a) Det stilles *normalt krav* til spenning i *normale driftsituasjoner* og i *normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes*.
- Den elektriske energiforsyningen skal ikke medføre forstyrrelser, forsinkelser og begrensninger for togtrafikken.
 - Med *normal driftsituasjon* menes:
 - Normal trafikk
 - Normal infrastruktur
 - Vedlikehold hvor *normal infrastruktur* kan opprettholdes
 - Med *normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes* menes for eksempel:
 - Trafikk:
 - Forsinkelser i togtrafikken som en normalt kan forvente.
 - Enkelttilfeller av bytte av trekraft.
 - Enkelttilfeller av ekstra vogner i persontog.
 - Enkelttilfeller av øket lastvekt for godstog dersom operativ ruteplanlegger tillater dette.
 - Ekstratog på baner med baneprioritet 1, 2 og 3.
 - Infrastruktur:
 - Uforutsett utfall/stans av en mateenhet i en matestasjon i Oslo-området. Med Oslo-området menes banestrekningene med baneprioritet 1 i og rundt Oslo.
- b) Det stilles *reduisert krav* til spenning i *avvikssituasjoner*.
- Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken bør unngås ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
 - Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken skal unngås ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket
 - Med *avvikssituasjoner* menes for eksempel:
 - Trafikk:
 - Ekstratog på baner med baneprioritet 4 og 5.
 - Infrastruktur:
 - Feil i matestasjon hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut 100 % av stasjonens installerte ytelse fordelt på alle utgående linjeavganger.
 - Samtidig utfall/stans av en mateenhet i to forskjellige matestasjoner i Oslo-området.
 - Vedlikehold:
 - Planlagt vedlikehold av overføringsnett eller andre seriekomponenter (kondensatorbatteri etc.) som ikke hindrer togframføringen fysisk.
 - Planlagt vedlikehold av matestasjoner hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut etterspurt effekt fordelt på alle utgående linjeavganger.
 - Kravene vedrørende planlagt vedlikehold anses også som oppfylt dersom vedlikeholdet kan legges til perioder med liten trafikk slik at *normalt krav* til spenning kan opprettholdes for de togene som på det tidspunktet er i trafikk.
- c) Det stilles redusert krav til spenning i unormale driftsituasjoner.

1. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken bør begrenses/redueres ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
 2. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken skal begrenses/redueres ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket
 3. Med *unormale driftsituasjoner* menes for eksempel:
 - 3.1. Trafikk:
 - 3.1.1. Oppløsning etter masseforsinkelse i henhold til gjeldende rutiner
 - 3.2. Infrastruktur:
 - 3.2.1. Alvorlig feil i matestasjon hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut 50 % av stasjonens installerte ytelse fordelt på alle utgående linjeavganger.
 - 3.2.2. Utfall av energiforsyning til en matestasjon
 - 3.2.3. Brudd i samkjøringen, både planlagt og uforutsett, mellom matestasjoner som følge av brudd i samkjøringen i trefasenettet.
 - 3.2.4. Uforutsett brudd på samkjøringen eller elektrisk øydannelse på grunn av brudd i overføringsnett og andre seriekomponenter (kondensatorbatteri etc.) som ikke fysisk hindrer togframføringen på de(n) elektriske øyen(e).
Med elektrisk øydannelse menes seksjonering av overføringsnett som fører til at banestrekninger eller deler av banestrekninger isoleres elektrisk fra samkjøringen med resten av nettet.
 - 3.3. Vedlikehold av infrastruktur:
 - 3.3.1. Større vedlikehold av matestasjoner hvor begrensning i ytelsen er nødvendig, for eksempel bytte av roterende aggregater.
 4. Begrensning/reduksjon av forsinkelser og begrensninger i togtrafikken som følge av lav spenning på togs strømvaktar kan for eksempel være:
 - 4.1. Strategiske, taktiske og/eller operative disponeringer i trafikken.
 - 4.2. Optimalisering av seksjoneringsmuligheter.
 - 4.3. Etablering av flere mulige matingsveier.
 - 4.4. Planlegging av vedlikehold.
- d) Det stilles ikke krav til spenningen i berørt(e) seksjon(er) i *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig*.
1. Energiforsyningens nedetid i *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig* skal reduseres mest mulig
 2. Med *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig* menes for eksempel:
 - 2.1. Trafikk:
 - 2.1.1. Stående feil/kortslutning i rullende materiell.
 - 2.2. Infrastruktur:
 - 2.2.1. Regionalt kraftsystemutfall med manglende energiforsyning til to eller flere nærliggende matestasjoner.
 - 2.2.2. Brudd i samkjøringen, både planlagt og uforutsett, i overføringsnett som fysisk hindrer togframføringen.
 - 2.2.3. Utsiktet utløsning av nødfrakobling
 - 2.3. Vedlikehold:
 - 2.3.1. Annet vedlikehold (ikke energiforsyningen) som hindrer fysisk togframføringen.

Tilgjengelighetskrav

- a) Den elektriske energiforsyningens nedetid per år for togframføring i henhold til *normal trafikk med endringer som ofte kan forventes* bør ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket, og skal ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket, være mindre enn gitt i tabell 5.2.
 1. Tilgjengelighetskravene gjelder forstyrrelser og begrensninger i togtrafikken på grunn av feil med og vedlikehold av den elektriske energiforsyningen. Feil og avbrudd som kan lastes togselskap eller deres aktivitet regnes i utgangspunktet ikke med ved

- beregning av nedetid.
- Den elektriske energiforsyningens nedetid per år for togframføring i henhold til *normal trafikk med endringer som ofte kan forventes* på grunn av enkelthendelser bør tilfredsstillende verdiene gitt i tabell 5.3.
 - Nedetiden på grunn av enkelthendelser kan fravikes dersom systemets totale nedetid ikke økes. Vurderingene som legges til grunn for dette skal dokumenteres.

Tabell 5.2 *Krav til maksimal nedetid med ulike konsekvenser oppgitt i timer per spormil per år*

Baneprioritet	a) Tillatt tid for feil uten konsekvenser for togtrafikken	b) Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken unngås	c) Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken begrenses/ reduseres	d) Tillatt tid uten krav til spenning i berørt(e) seksjon(er) hvor togtrafikk ikke er mulig
1: Oslo-området	5	13	0,5	0,5
1-3	-	22	0,7	0,5
4-5	-	43	1,4	1,0

Belastningskrav (strøm-/effektkrav)

- Ved vurdering av energiforsyningens belastning skal det tas høyde for usikkerheter i vurderingene, avvikssituasjoner og fremtidig trafikkøkning.
 - Normale driftssituasjoner, normale driftssituasjoner med endringer som ofte kan forventes, avvikssituasjoner og unormale driftssituasjoner skal ikke føre til at den elektriske energiforsyningens anlegg og komponenter overbelastes. Margin/reserve mot tillatt belastning av komponenter og systemer bør være minst 5 %.
 - I normale driftssituasjoner bør det ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket og skal det ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket legges til grunn minst 10 % reserve/margin for å ta høyde for trafikken i normale driftssituasjoner med endringer som ofte kan forventes og i avvikssituasjoner dersom dette ikke er inkludert i trafikkprognosen.
 - Ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket skal det både i normale driftssituasjoner, normale driftssituasjoner med endringer som ofte kan forventes, avvikssituasjoner og unormale driftssituasjoner tillegges ytterligere minst 20 % reserver/margin for å ta høyde for trafikkøkning utover trafikkprognosene.
 - Ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket av komponenter/anlegg med lang levetid samt dyr og vanskelig oppgradering/utbygging bør det vurderes ytterligere reserver/marginer.
 - Vurdering av belastningen bør på grunn av variasjonen omfatte både kortvarige og langvarige belastninger.
 - Vurderingene som legges til grunn skal dokumenteres.

2.3 Simuleringer og dimensjonering av system og komponenter

2.3.1 Simulering av normalsituasjon

Simulering av normal driftssituasjon og dimensjonerende ruteplan gjøres for hvert av alternativene og en forvisser seg om at spenning for togene blir akseptabel samt at belastning av alle seriekomponenter blir tilfredsstillende. Marginer for effekt og strømbelastning for komponenter gjøres vanligvis etter de fastsatte krav i regelverket, men for Ofofbanen sin del kan dette lett føre til meget stor overdimensjonering av enkelte komponenter da den

dimensjonerende ruteplanen og de forutsatte togvekter allerede er meget store. En kan ikke forvente at det i fremtiden kan gjøres ytterligere utvidelser av verken lastvekt (på grunn av at akselvekten på malmtogene ikke kan økes ut over de forutsatte 30 tonn og lengden av togene neppe kan gjøres lengre) eller at togfølgetiden kan gjøres mindre.

Her vil det ikke legges til 20 % reserve/margin for å ta høyde for trafikkøkning ut over dimensjonerende ruteplan (JD 546 avsnitt 2.5). Imidlertid vil margin på 5 % mot høyeste tillatte belastningsgrense for systemer og komponenter legges til, samt marginen på 10 % for å ta høyde for trafikken i normale driftssituasjoner med endringer som ofte kan forventes å forekomme. Imidlertid vil det bli utført egne simuleringer for en del tenkte alvorlige avvikssituasjoner som bør kunne takles og da vil ikke marginen på 20 % legges til, bare den på 5 %.

2.3.2 Simulering av avvikssituasjoner og unormale driftssituasjoner

Mange av situasjonene beskrevet som ”avvikssituasjoner” og ”unormale driftssituasjoner” er ikke enkle å etterligne i simuleringer uten at det blir svært mye arbeid med for eksempel å omarbeide innleste ruteplaner. Noen av de simuleringene som en kan vurdere å utføre og som sannsynligvis ville gitt større eller mindre avvik fra normalsituasjonen er:

- Mindre forsinkelser.
- Bytte av trekraft, flere vogner, økt lastvekt, ekstratog etc.
- Feil i matestasjon slik at denne ikke kan mate ut kontinuerlig 100 % av sin installerte ytelse. Dette kan gjøres i simuleringen ved å stoppe en omformerenheter i en stasjon.
- Alvorlig feil i matestasjon der den ikke kontinuerlig kan mate ut 50 % av installert ytelse. Dette simuleres med å koble ut en eller flere omformerenheter avhengig av ytelse.
- Planlagt vedlikehold av overføringsnett som ikke hindrer togtrafikken fysisk. Simuleres ved å bryte forbindelsen mellom to omformerstasjoner.
- Utfall av energiforsyningen til en hel omformerstasjon. Simuleres med utfall av kraftlinjen til stasjonen.
- Uforutsett brudd på samkjøringen eller elektrisk øydannelse på grunn av brudd i seriekomponenter som ikke fysisk hindrer togfremføringen på den elektriske øyen. Simuleres ved å koble ut forbindelsen mellom Rombak og Tornehamn (øydannelse for Rombak) i kortere eller lengre tid.

Tilfellene er forsøkt sortert i stigende alvorlighetsgrad. De første tilfellene er ”avvikssituasjoner” og er ikke så alvorlige som ”unormale driftssituasjoner”. Tilfeller med forsinkelser kunne vært interessant å simulere for å finne hva en kan forvente av laveste spenning i normal drift, men mange tilfeller burde da vært undersøkt og arbeidet ville blitt meget omfattende. Dette uten at en sannsynligvis ville sett særlig store spenningsfall eller vesentlig økning av strømmen. En får anta at om spenningen for dimensjonerende ruteplan og normal driftstilstand er god (sjeldent/kortvarig under nominell spenning) vil banestrømforsyningen være så robust at små forsinkelser og avvik ikke skaper særlig mye annerledes situasjoner som drar spenningen ytterligere ned.

De mest alvorlige feiltilfellene vil kunne simuleres ved å koble ut kraftlinjen til en omformerstasjon, koble fra utmatingen i en retning fra en omformerstasjon slik at nabostasjonen får ensidig mating, eller utkobling slik at det oppstår elektrisk øy (øydannelse). Å koble ut omformerstasjonen på enden av banestrekningen (Rombak) vil sannsynligvis være

noe av det verste på grunn av stort effektbehov i de store stigningene hele strekningen fra Narvik til Riksgrensen og et stykke inn på Malmbanan. De øvrige feilene regnes på langt nær å være så alvorlige, eller de er ikke så vanskelige å oppfylle dimensjoneringskravene for.

2.3.3 Belastning av omformere

Tabell 2-2 nedenfor viser den tillatte belastningsgraden for Jernbaneverkets roterende omformeraggregater. Av hensyn til redundans i strømforsyningen og nødvendig ytelse er det i de fleste omformerstasjoner installert to eller flere aggregater.

Tabell 2-2 Belastning av roterende omformeraggregater

Aggregat Type	Maks 6 min belastning [MVA]	Maks time belastning [MVA]	Maks 2sek belastning [A]
ASEA Q24	4,8	3,1	450
ASEA Q38	8	5,8	625
Nebb 7,0 MVA	11	7,0	825
ASEA Q48/ Nebb 10,0 MVA	14	10	1180

Definisjonen av disse verdiene er som følger:

- Timebelastningen er aggregatenes nominelle ytelse (kontinuerlig belastning). Maksimal tillatte temperatur oppnåes for aggregatet.
- Maksimal 6 minutters belastning defineres som aggregatenes/stasjonenes termiske overbelastbarhet. Denne verdien stiller for de roterende aggregatene krav til at belastningen forut for maksimalbelastningen har vært under grunnlasten som er ca. halve 6 minutters verdien. Om dette er oppfylt vil maksimalt tillatte temperatur oppnåes, som om aggregatet var belastet med nominell effekt i en time.
- Maksimal 2-sekunders verdi er aggregatenes maksimale strømbelastbarhet. Denne grensen er satt etter starttrinnet for generatorens overstrømsvern. Dersom denne grenseverdien overskrides vil det kunne føre til at overstrømsvernet kobler ut stasjonen.

Aggregatene vil selvsagt belastes med stadig varierende verdier. Innenfor for eksempel maksimal 6 minutters verdi kan derfor belastningen tillates å overskride fastsatt verdi, hvis belastningen senere innenfor denne perioden er tilsvarende mye under. Således er det gjennomsnittsbetlastningen innenfor den aktuelle tidsperioden som er av betydning. Det samme gjelder for 1-times og 2-sekunders belastning.

Et ytterligere krav som ikke er en del av teknisk regelverk, men mer en tommelfingerregel avledet av dette, sier at om et aggregat faller ut skal det/de gjenværende ikke overbelastes og kunne fortsette å forsyne banestrekningen uten problemer (et n-1 kriterium). Dermed kan en sette opp en tommelfingerregel om at stasjoner med to roterende omformere aldri må belastes mer enn tilsammen 50-60 % av sin nominelle ytelse. For stasjoner med tre omformere tillates ikke større belastning enn 66 – 76 % og for fire 75 – 85 %. Prosenttallene er satt opp for et intervall fordi nabostasjoner vil ta opp en del av mer av belastningen ved utfall. Dette gjelder om alle omformerne i samme stasjon er like store.

Når det skal dimensjoneres anlegg for banestrømforsyning sier teknisk regelverk (JD 546) at det skal legges til noen marginer. Det bør være en margin for overbelastning på 5 % og det skal være en margin for tillatte endringer i trafikken (forsinkelser i trafikken, bytte av trekraft, ekstra vogner etc.) som kan forventes å forekomme på 10 %. Endelig skal det for normale og unormale driftssituasjoner tillegges minst 20 % margin for å ta høyde for fremtidig trafikkøkning utover trafikkprognosen. Med disse "skal-" og "bør-kravene" for bestykning av omformerstasjoner kan det synes mye i overkant å si at det skal være så store marginer når en skal planlegge fremtidig kapasitet. Tross alt kan omformerstasjoner med roterende aggregater bygges ut senere. Samtidig vil så stor overkapasitet føre til store tomgangstap og at aggregater sjeldent eller aldri er i drift. Ser en på de to marginene som ikke skyldes trafikkvekst (5 + 10 % margin) og antar at de ikke vil oppstå samtidig med utfall av omformere skulle redundanskravet alene være tilstrekkelig.

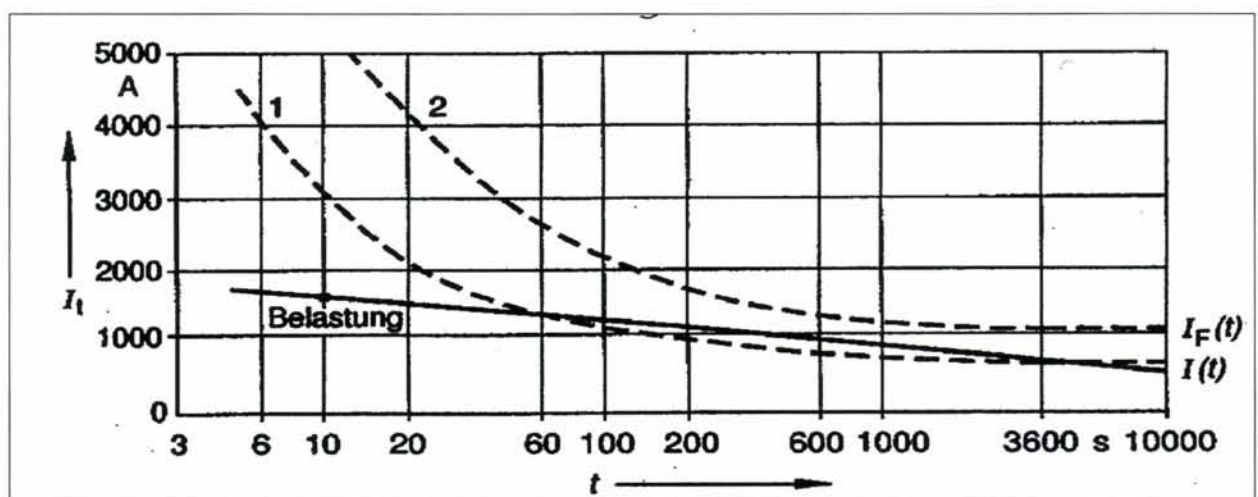
For Rombak omformerstasjon med dagens bestykning vil verste tilfelle være utfall av et av de to aggregatene på 10,0 MVA og ved normal driftssituasjon og maksimal last kan ikke høyere belastning enn **ca 61 %** tillates. For Tørnehamn vil samme resonnement gi ca 68 %.

2.3.4 Kontaktledningens strømføringsevne

Kontaktledningen for de fleste strekninger er av typen Cu 100 mm² kontakttråd og 50 mm² bæreline. figur 2-1, kurve 1 nedenfor viser denne type kontaktlednings strømføringsevne, se [4]. Det er forutsatt følgende; at kontakttråden er slitt 10 %, det er 35 °C lufttemperatur og 1m/s vindhastighet. Nominell strømføringsevne er 600 A.

Tilnærmede verdier for strømbelastningen kan avleses for kontaktledning uten forsterkningsleder (kurve 1): Tillatt strøm for 10 sekunders belastning 3000A, for 1 minutt 1250A og for 6 minutter 800A. På samme måte som for belastning av omformerne gjelder verdiene belastning av angitt strøm kontinuerlig over angitt tid. Også ved bygging av nytt kontaktledningsanlegg vil denne typen materiell benyttes.

For tilfelle med forsterkningsleder på 240 mm² Al (kurve 2) fåes for 10 sekunder over 5000 A, for 1 minutt 2700 A og 6 minutter 1400 A. Nominell belastningsevne avleses til omtrent 1050 A.



Figur 2-1 Kontaktledningens strømføringsevne, tid i sekunder

2.3.5 Belastningsevne for lederne på høyspentlinjen

Lederne på dagens høyspentlinje er av typen ACSR 95-26/7 og er blankledere, det er ikke oppgitt belastbarhet for disse i fabrikantenes kataloger. På strekningen fra Rombak til Narvik skal lederne skiftes ut, fortrinnsvis til samme type. Følgende formel for varmeutvikling i en elektrisk leder er oppgitt i [5]:

$$I^2 R + \varepsilon_s s d_y = H_c + \varepsilon C_s \left[\left(\frac{\vartheta_s + T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_b + T_0}{100} \right)^4 \right] \pi d_y$$

I denne formelen er:

I = Strømmen

R = Resistansen i ledere

ε_s = absorpsjonskoeffisient for solstråling (0,6 for blank leder)

s = solstråleintensitet (W/m^2)

d_y = lederens ytre diameter (m)

H_c = Konveksjonstap. Eksperimentelt bestemt, men for naturlig konveksjon for leder med flere kordeler gjelder $H_c = 12,8 \cdot 10^{-2} \cdot d_y^{0,0699} \cdot \vartheta_0^{1,233}$. For leder som utsettes for forsert

konveksjon, altså vind, gjelder denne sammenhengen: $H_c = 13,8 \cdot 10^{-2} (v \cdot d_y)^{0,448} \cdot \vartheta_0$ der v er vindhastighet i cm/s og d_y lederens diameter i cm. Videre i formel 1 gjelder:

ε = emisjonskoeffisient, 1 for absolutt sorte flater, 0,2 – 0,3 for blanke ledere.

C_s = strålingskonstanten, Stefans konstant 5,775

ϑ_s = lederens sluttemperatur

ϑ_b = lederens omgivelsestemperatur

$\vartheta_0 = \vartheta_s - \vartheta_b$ = lederens temperatur over omgivelsestemperaturen

For lederne i høyspentlinjen gjelder: $d_y = 17,24$ mm. $R = 0,1911$ Ohm/km.

Ofte forutsettes ekstremt varmt vær med 40°C og vindstille, samt intens solinnstråling ved termisk ledningsberegning. Litt mer realistiske forhold kan forutsettes ved at det om sommeren i Norge sjeldent er temperaturer over 30°C , det samme gjelder i Narvik, se [6]. At det i tillegg er totalt vindstille er også meget uvanlig, setter vindhastigheten til 0,5 m/s som er en vindhastighet mellom "vindstille" og "flau vind". Setter en solinnstråling på 400 W/m^2 , noe som er moderat, men sannsynligvis realistisk så langt mot nord.

Forholdene ellers er med dette; $\varepsilon_s = 0,6$, $\varepsilon = 0,5$, $s = 400 \text{ W/m}^2$, omgivelsestemperatur $\vartheta_b = 30^\circ\text{C}$ og driftstemperatur $\vartheta_s = 80^\circ\text{C}$.

Driftstrøm som fremkommer med disse forutsetningene er **550 A**.

I [1] oppgis det imidlertid at grenselasten for denne linjen er 523 A. Det som får størst betydning for strømføringsevnen er at vindhastigheten er økt fra 0 m/s som ofte brukes, til 0,5 m/s, noe som øker varmeavgivelsen mye. Strålingsintensiteten fra solen har lite å si og denne kunne gjerne vært økt til det dobbelte uten at driftsstrømmen endres noe særlig.

2.3.6 Belastning av autotransformatorer

Belastbarheten for autotransformatorene er gitt som generelle verdier for denne typen komponenter. Egne termiske beregninger for de størrelsene som er aktuelle er ikke utført fra fabrikanten. Verdiene nedenfor viser veiledende tall. Strømmen er referert 30,0kV spenningsnivå, dette er det samme som den faktiske strøm i viklingene.

Tabell 2-3 Preliminære verdier for overbelastbarhet av autotransformatorer

Størrelse for autotransformator	Nominell strøm [A]	2 sek [A]	30 sek [A]	90 sek [A]	60 min [A]
6 MVA	200	6000	1500	500	260
3 MVA	100	6000	1500	250	130

2.3.7 Beregning av tap og energiforbruk

For hver av simuleringene av alternativene i normal driftssituasjon er tapene for kontaktledning og for summen av kontaktledning og matestasjonene beregnet. Totale tap for kontaktledning og omformere blir oppgitt i absolutte verdier [MWh] og også høyeste effektopptak pr minutt og pr time blir undersøkt. Det er benyttet det som i [7] er benevnt "metode 5" og som angir forholdet mellom energi tapt i banestrømforsyningen i forhold til den som er matet inn:

$$E_{tap} = \frac{\text{Energi matet inn} - \text{Energi ut}}{\text{Energi matet inn}}$$

Alle elementene i banestrømforsyningen sees på som svarte bokser (tog, randsoner, tilleggslaster, sporvekselvarme etc.) I prosent og med de forskjellige komponenter innsatt fåes:

$$E_{tap\%} = \frac{(E_{innmat} + E_{innrand} + E_{avlevert}) - (E_{utmat} + E_{opptatt} + E_{utrand} + E_{tillegg})}{E_{innmat} + E_{innrand} + E_{avlevert}} \cdot 100 [\%]$$

der E_{innmat} og E_{utmat} er energi henholdsvis levert og avlevert ved enten kontaktledning eller omformerstasjon, $E_{opptatt}$ og E_{utmat} er energi henholdsvis opptatt og avlevert fra togene, de øvrige størrelsene skulle være selvforklarende.

3 SIMULERINGSMODELLENE

I dette kapittelet beskrives kort de modeller som anvendes i simuleringen og inndata for disse. Mange av modellene som er med i simuleringen er meget avanserte standardmodeller som er definert i SIMPOW og TracFeed og det henvises til manualene for disse programmene. En stor datamengde er hentet fra Jernbaneverkets egen database og Banverket. Det vil bli altfor omfattende om alle disse dataene skulle beskrives i denne simuleringsrapporten.

3.1 Avgrensning av simuleringsområde

Følgende grenser for kjøreveien er valgt:

- **Narvik Havn** ved km 0
- **Stenbacken omformerstasjon** ved km 109,1 (fra Narvik)

Banestrekningene er modellert med den relevante infrastruktur slik som kurvatur, skiltet hastighet, kontaktledningsnett og omformerstasjoner.

3.2 Banestrømforsyning

3.2.1 Matende trefasenett

Trefasenettet fra Rombak til Stenbacken er modellert som sammenhengende ekvivalent system sett fra omformerstasjonene. Det går en 132 kV linje mellom disse omformerstasjonene og effekttransitten på denne linjen avgjør spenningsvinkelen på disse stedene. I simuleringen er det forutsatt at det er null spenningsvinkel.

3.2.2 Omformerstasjoner

For omformerstasjonenes aggregater er både motor og generator modellert med såkalte 6. ordens modeller. Det vil si at det er 6 differensialligninger som beskriver stasjonær- og transient oppførsel. Parametere som beskriver mekaniske egenskaper, samt elektromagnetiske parametere for stator og rotor er inngangsdata til SIMPOW. På grunn av begrensede tilgjengelige data er ikke parametere som angår dynamiske egenskaper for transienter med varighet kortere enn 1 sekund fullgodt beskrevet. Dette vil imidlertid spille liten rolle da så korte tidsforløp ikke er av interesse i denne typen undersøkelser. Belastingsavhengige tap for omformeraggregatene er inkludert i SIMPOW's standard modeller, men tomgangstapene er inkludert spesielt ved at tomgangslaster er lagt til. Disse er for aggregatet i Rombak omformerstasjon på 5,7 MVA til sammen 157 kW og for de på 10 MVA til sammen 258 kW pr enhet. Dette inkluderer tomgangstap i motor, generator, hovedtransformator, øvrige tap og friksjonstap, se for øvrig [9].

3.2.3 Spenningsregulering for omformerstasjonene

For å få ønsket karakteristik for en omformerstasjons spenning er det innført medkomponerende samkjøring mellom aggregatene i samme stasjon. For å få ønsket samkjøring mellom stasjonene kan en innføre forskjellige typer karakteristik for spenningen ved økende belastning. I et simuleringsarbeid utført for Banverket [10] er det funnet at fallende statikk med 4 % spenningsfall ved merkeytelse (reaktiv) er gunstig for AT-system

mellom omformerstasjonene og her blir strekningsimpedansen omentrent tilsvarende lav. Innstillingen er gjort slik som Bane Energi sitt prøveutstyr brukes for innstilling av spenningsregulatoren ved at en laster opp aggregatene til merkelast og med en faseforskyvning på 70° reaktivt skal ønsket spenning (her 15,84 kV) innstilles. Fallende karakteristikk for omformerstasjonene skal forhindre effektflyt i nettet ved tomgang og gi en gunstigere lastfordeling mellom stasjonene. Tapene i kl-anlegget skal ved denne innstillingen bli minst. Det er ikke gjort undersøkelser for å optimalisere denne innstillingen. For alle simuleringene er intern stabilisering mellom aggregatene i samme stasjon 5 %.

I simuleringene for alternativ 1 med konvensjonelt kl-anlegg er spenningen på samleskinne i omformerstasjonene 16,2 kV uansett belastning, mens for fjernledning i alternativ 2 og for fjernledningssystem med autotransformatorer i alternativ 3 er den 16,5 kV i tomgang og altså fallende med 4 % ved merkeytelse.

3.3 Kontaktledningsanlegg og overføring

3.3.1 Konvensjonelt kontaktledningsanlegg

I simuleringene kun med kontaktledningsanlegg er det benyttet forsterkningsledning og impedansen som er benyttet er: $0,124 + j 0,176$ Ohm/km. Dette gjelder for hele strekningen fra Narvik til Bjørnfjell og er basert på målinger for strekningen Rombak-Bjørnfjell med forsterkningsleder, se [11]. Det er ikke som i tidligere modeller forutsatt at mateledningen er innkoblet og dermed påvirker strømfordeling og impedans. Dermed går det heller ikke strømmer ut i jord. Imidlertid er ikke impedanstillegg for eventuelle sugetransformatorer i dette alternativet inkludert.

For alternativene med fjernledning med toviklings- eller autotransformatorer, er det ikke forutsatt forsterkningsleder og impedansen som er benyttet er $0,1798 + j 0,1589$ Ohm/km i henhold til beregninger av Proff. György Varju, se vedlegg 1.

3.3.2 Fjernledningssystem

Med fjernledningssystem forutsettes det at dagens linetype forlenges helt ned til Narvik og at det blir sammenhengende line av typen ACSR 95 -26/7. Spenningsnivå forutsettes til 66 kV. Med dagens faseavstand får denne en impedans på $0,3822 + j0,2777$ Ohm/km. (Loop impedance), se vedlegg 1. Det er videre forutsatt transformatorer på 10 og 15 MVA med kortslutningsimpedans $u_z = 0,8$ % og $u_r = 8$ %

3.3.3 Fjernledningssystem med autotransformatorer

For alternativet med autotransformatorer benyttes høyspentledningen på samme måte som for fjernledningssystem, men spenningsnivået 30 kV (+15/-15 kV) forutsettes. Impedansen for lederne blir dermed som ovenfor i avsnitt 3.3.2. Ved at det ikke fremføres verken negativ- eller positivleder på kontaktledningsanlegget blir dette systemet mer som et fjernledningssystem der en istedenfor toviklingstransformatorer benytter autotransformatorer.

3.3.4 Bakgrunnslast

Det er lagt inn faste laster langs banestrekningen på norsk side for å dekke ekstrauttak på kontaktledningen. Belastningene som er benyttet er de samme som i "Utredning av

kontaktledningstap”, se [7]. Dette er sporvekselvarme og hjelpesystemer langs banen, forsyning til hytter via frekvensomformere, samt togvarmepost ved Narvik og Fagernes. For autotransformatorene er det forutsatt tomgangstap på 2,6 kW pr enhet og for tovinklingstransformatorer 4,5 kW og 6,5 kW for henholdsvis enheter på 10 MVA og 15 MVA. Belastingsavhengige tap er for øvrig inkludert i standard modeller som SIMPOW benytter.

3.4 Banedata

Banedata er blant annet avgjørende for å beregne togenes kjøremotstand etter formelen:

$$F_{kjøre} = F_{stigning} + F_{kurve} + F_{motstand} = F_{stigning} + F_{kurve} + F_{rulle} + F_{luft}$$

Der kraften for stigning fremkommer av $F_{stigning} = g \cdot M \cdot S / 1000$ der M er togets totale masse og S er stigningen i promille. F_{kurve} er beskrevet i avsnitt 3.4.1, F_{rulle} og F_{luft} er størrelser som kommer frem i formelen som vanligvis har formen: $F_{motstand} = A + B \cdot v + C \cdot V^2$, se avsnitt 3.5

3.4.1 Gradienter og kurver (vertikal og horisontalkurvatur)

Disse data er hentet fra banedatabanken. I disse simuleringene er ikke bare vertikalkurvatur tatt med, men også horisontalkurvatur. Kurver over 1000 m radius er ikke inkludert. Formelen for kurvemotstand som er benyttet:

$$F_k = \frac{M_{tog} \cdot 6,5}{R - 55}$$

For malmtogene er imidlertid faktoren 5,297 benyttet istedenfor 6,5.

3.4.2 Adhesjonskoeffisient

For å bestemme adhesjonen benytter TracFeed Curtius og Kniffers formel:

$$Adhesjonskoeffisienten = 0,161 + \frac{7,5}{44 + v}$$

Denne formelen med faktoren 0,161 gir forholdene for dårlige adhesjonsforhold, det vil si regn og glatte skinner.

3.4.3 Tunneler

For tunnelene er luftmotstanden økt med en faktor på 2 i forhold til fri strekning.

3.4.4 Hastighetsprofil

For simuleringene er det benyttet to ulike hastighetsprofiler; normal og pluss hastighet. For togtypene gjelder:

- Malmtogene holder 60 km/t på fri strekning oppover, men reduserer hastigheten til 40 km på stasjonsområdene, unntatt Narvik stasjon der det kjøres i 20 km/t. Nedover kjører malmtogene ikke fortere enn 50 km/t.
- Godstogene holder normalhastighet, men har 90 km/t som maksimal hastighet.
- Persontogene holder normalhastighet på norsk side og pluss hastighet på svensk side begrenset oppad til maks 120 km/t.

3.5 Lokomotiver og vognmateriell

For å beregne togenes opptatte effekt må til enhver tid krefter bestemt av banedata og togenes trekkraft samt en rekke andre størrelser beregnes fortløpende.

3.5.1 Malmtog

For samtlige malmtog forutsettes det at lokomotiver av typen IORE med en motorytelse på 10,8 MW (gir et effekttrekk på i underkant av 13 MW på strømvaktaker). Maksimal trekkraft er 1200 kN og elektrisk bremskraft 750 kN. Effektfaktoren er 1,0 ved kjøring, men når lokomotivet bremses og spenningen stiger vil vinkelen øke fra 0° ved spenning 14,8 kV til -66,8° (ind.) når spenningen kommer opp mot 18,3 kV.

For hvert malmtog benyttes det 68 vogner av den nye typen kalt "Malmvagn 2000". Gangmotstand for disse er oppgitt fra LKAB og tabellen nedenfor viser de parametrene som er benyttet for de tre tog kategoriene som er med i simuleringene. Lengden av malmtogene er 746 m for alle.

Tabell 3-1 Vekt og friksjonsfaktorer for de togkategoriene som er med i simuleringen.

Tog	Lastvekt/ totalvekt [tonn]	Dynamisk vekt [tonn]	Friksjonskoeffisienter i formelen $F = A + B \cdot v + C \cdot v^2$
Fullastet Malmtog	8160 / 8520	8678	98,826 / 0,0415 / 0,00698
Tomt tog med Olivin	4240 / 4600	4782	64,216 / 0,0415 / 0,00698
Tomtog	1400 / 1760	1833	39,142 / 0,0415 / 0,00698

3.5.2 Godstog

For simuleringene er det benyttet fireakslede lokomotiver av typen Rc4 for samtlige godstog. Telefilterkondensator er forutsatt innkoblet og dermed forbedres effektfaktoren noe i forhold til hvor lav denne vanligvis er for tyristorstyrte lokomotiver. Det er antatt at lokomotivene må gå i multippel for å trekke en lastvekt på 1500 tonn som er forutsatt som fremtidig lastvekt for Ofotbanen. Maksimalt effektuttak fra kontaktledningen for hvert lokomotiv er 10 MW og deres vekt er 78 tonn. Friksjonsfaktorene som er benyttet for disse togene er $A = 22,570$, $B = 0,0114$ og $C = 0,00519$. Det er forutsatt en lengde av disse togene på 750 m, vogner med fire akslinger og blanding av åpne og lukkede vogner.

3.5.3 Persontog

Alle persontogene settes opp med Rc6 lokomotiver. Det er forutsatt 12 vogner for togene mellom Narvik og Stockholm og 6 vogner for togene til Boden. Totalvekten for de største togene blir da 624 tonn og 351 tonn for de mindre.

3.5.4 Akselerasjon

Akselerasjon beregnes etter formelen $a = (F_{\text{trekkraft}} - F_{\text{kjøre}}) / M_{\text{dyn}}$ der altså dynamisk masse for togene gjelder. Mange faktorer bestemmer akselerasjonen, men følgende begrensninger gjelder for tillatt høyeste akselerasjon: $0,5 \text{ m/s}^2$ for malmtog og godstogene, for persontogene $1,0 \text{ m/s}^2$.

For retardasjon gjelder disse begrensningene; $0,4 \text{ m/s}^2$ for IORE lokomotivene, $0,45 \text{ m/s}^2$ for godstogene og $0,85 \text{ m/s}^2$ for persontogene.

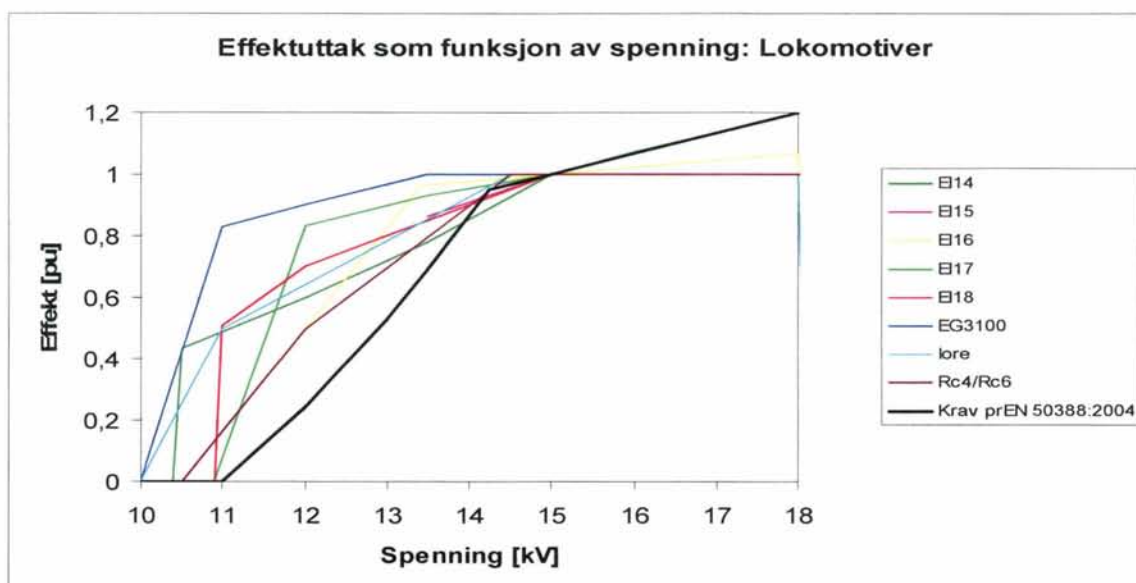
3.5.5 Trekkraft som funksjon av spenning

Trekkraftmateriellets prestasjonsevne reduseres normalt når spenningen minker. For eldre materielltyper vil trekkraftreduksjonen være direkte definert av fysiske og elektriske begrensninger i traksjonsutrustningen. For nyere materiell vil fremdeles fysiske og elektriske begrensninger være gjeldende, men kun indirekte da spenningsavhengigheten gjerne defineres gjennom enhetens programvare.

EN 50388 pkt. 7 stiller krav til spenningsavhengighet på nytt trekkraftmateriell. Dette for å ivareta stabile driftsbetingelser i svak banestrømforsyning eller i unormale driftssituasjoner. Begrensningen skal være automatisk.

Figur 3-1 viser maksmalt effektuttak (gjennom strømvaktaker) som funksjon av spenningen for et utvalg lokomotiver og motorvogner som trafikkerer (eller kan være aktuelle for) norske spor. Kurvene forutsetter at virkningsgrad og tilleggsuttak holdes konstant. Inntegnet er også EN 50388 sitt krav til effektbegrensning som funksjon av spenningen for nytt materiell. Kravet i EN 50388 er omregnet fra strøm til effekt.

I simuleringene som er gjort her er begrensninger i henhold til EN50388 ikke innført for noen av togene og maksimalt effektuttak for lokomotivene (IORE, Rc4 og Rc 6) er som vist i figur 3-1. Grunnen for dette er at lave spenninger vanligvis ikke er noe problem på Ofofbanen/Malmbanan verken i normal- eller unormal driftssituasjon.



Figur 3-1: Effektuttak som funksjon av spenningen for lokomotiver.

3.5.6 Spenningsavhengig utstyr i togene

I tillegg til reduksjon i trekraften kan det være annet utstyr om bord i det rullende materiell som er avhengig av spenningen. En oversikt over det utstyr som er kartlagt/oppført av trafikkutøverne følger i tabell 3-2. En har imidlertid grunn til å tro at listen ikke er fullstendig og heller ikke nødvendigvis er helt korrekt på grunn av motstridende opplysninger.

Tabell 3-2: Oversikt over spenningsavhengig utstyr i rullende materiell.

Utstyr/anlegg	Hendelse	Ved spenning [kV]	Gjelder materiell
Høyspentbryter	Faller	10-11	Alt
Kompressorer	Overbelastes	10-12	Vekselspenningsslok (EI 14 osv.)
Trekraft	Utfall av trekraft/banemotor	<12	EI18 ved tungt tog
Batterilading	Stopper	<13,5	Tp73

EN 50163 anbefaler at underspenningsvern i rullende materiell bør stilles inn på 0,85 til 0,95 ganger $U_{\min 2}$, det vil si 9,35 til 10,45 kV.

3.6 Ruteplan

Ruteplanen som skal være grunnlaget for simuleringene er utarbeidet av Banverket i samarbeid med Jernbaneverket og togselskapene i forbindelse med prosjektet "Ofofbanen utredning utviklingsplan", se [8]. Med denne ruteplanen forutsettes det tre persontogpar, åtte NEW godstogpar, tre ARE godstogpar, ett øvrig godstogpar og ti malmtogpar pr døgn. Dette er en betydelig trafikkvekst og det forutsetter både noe større fart, utvidelse av krysningssporlengde, samt at noen flere stasjoner enn dagens får tre spor, dette siste gjelder imidlertid på svensk side.

Når det gjelder transporter med olivin fra Narvik til Kiruna kan denne taes med i returnerende tomme malmtog, enten i ett eller fordelt over to tog pr døgn. I simuleringene er det verste tilfellet undersøkt, nemlig kun et returnerende tog med olivin oppsatt på en tid av døgnet som ser ut til å gi størst trafikk. Banestrømforsyningen blir dermed forutsatt dimensjonert for en hard belastingssituasjon.

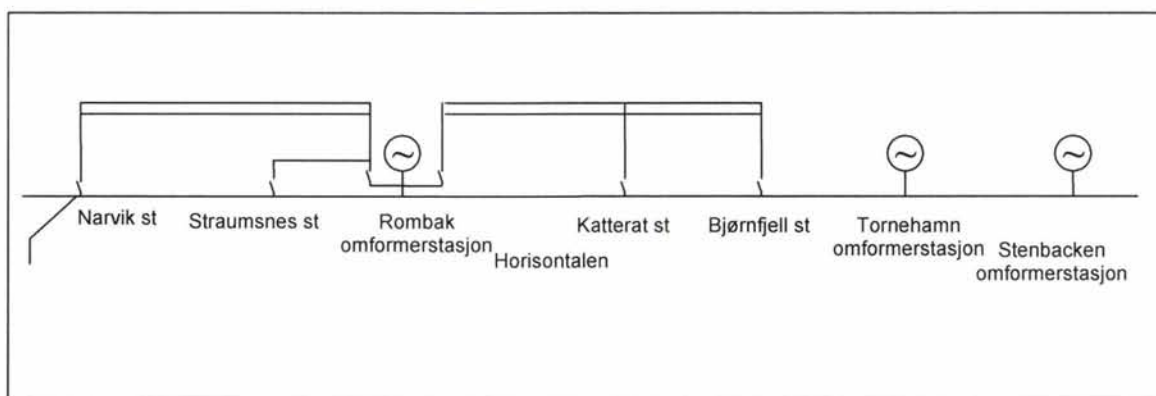
4 SIMULERINGSRESULTATER

Resultater fra simuleringene presenterer først resultatene for belastningsverdier som har betydning for den faste infrastrukturen, deretter resultater for togene først og fremst spenning. Når det gjelder spenning for togene blir samtlige tog undersøkt for 10-sekunders og 2-minuttersverdi (RMS). Ved å undersøke begge disse verdiene fåes en indikasjon på om spenningen er i henhold til teknisk regelverk både for verdier over og under 2 minutter. 10-sekunders periode er valgt fordi momentane verdier kan være så kortvarige at egne vurderinger må gjøres, altså om en allikevel må kunne akseptere lave spenninger for så kortvarig spenningsdipp. Lave spenninger for 10-sekundersverdier undersøkes spesielt, men det bemerkes at det sjeldent er særlig stor forskjell på momentan og 10-sekundersverdier.

4.1 Simulering 1 – Dagens banestrømforsyning med mateledningen utkoblet

Simulering 1 gjelder for alternativ 1 med konvensjonelt kontaktledningsanlegg der dagens mateledning på høyspentmaster er frakoblet. Denne kan brukes som forbikobling i unormale driftssituasjoner. Dessuten er kontaktledningen sammenkoblet for hele strekningen og det er dessuten forutsatt at forsterkningsleder er nødvendig for å få tilstrekkelig strømføringsevne for kontaktledningsanlegget. Nedenfor viser figur 4-1 stilisert hvordan dette anlegget er sammensatt i simuleringen. På svensk side forutsettes det at dagens anlegg består og at det ikke innføres AT-system. Det forutsettes i denne simuleringen dimensjonerende ruteplan og normal driftssituasjon. Videre forutsettes det at malmtog (tomtog) med olivin i retur til Kiruna fremføres i rute 9901. Dette er forutsatt å føre til størst belastning på banestrømforsyningen, fordi det på denne tiden av døgnet ikke er tog som mater tilbake effekt på vei vestover og fordi det er andre tog foran og bak som trekker stor effekt.

Kontaktledningsimpedansen er satt til $Z = 0,165 + j0,148 \Omega/\text{km}$ for strekningene fra Narvik stasjon til LKAB sitt losseområde og til Fagernes terminalområde, $Z = 0,124 + j0,176 \Omega/\text{km}$ for strekningen fra Narvik stasjon til Riksgrensen og $Z = 0,14 + j0,16 \Omega/\text{km}$ fra Riksgrensen til Stenbacken omformerstasjon. Disse impedansverdiene bygger på målinger foretatt i eksisterende anlegg.

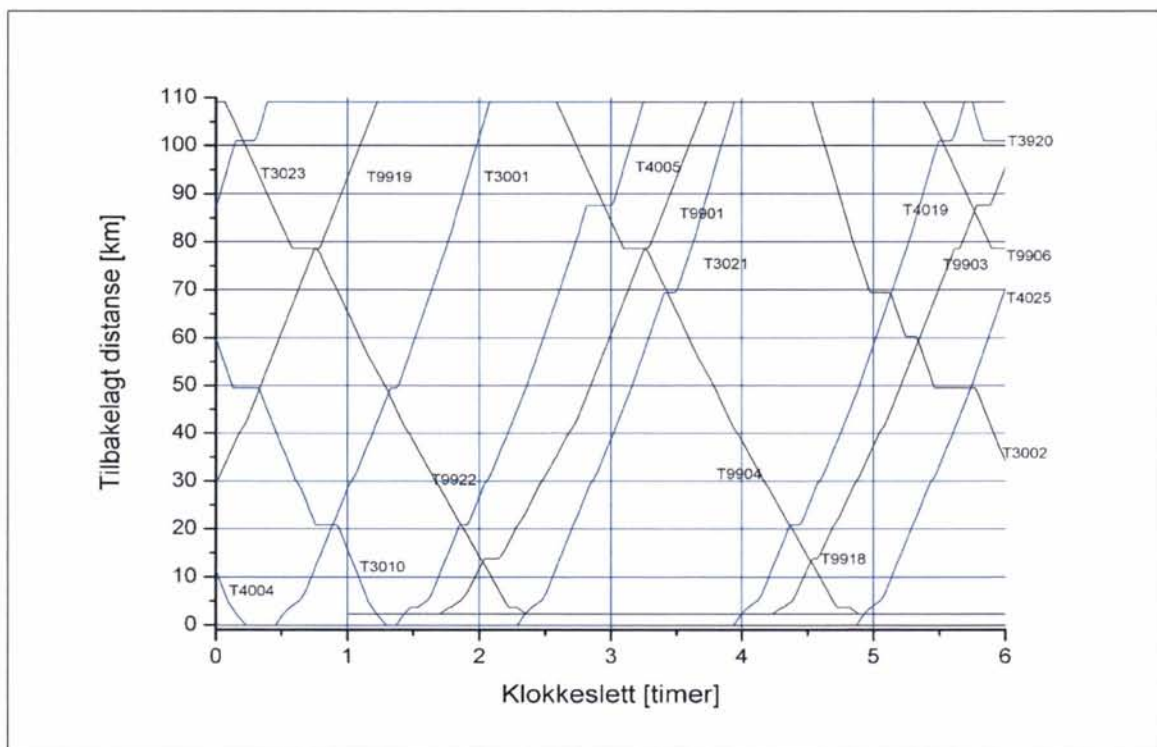


Figur 4-1 Enlinjeskjema for alternativ 1 med dagens mateledningen utkoblet og sammenkoblet kontaktledning. Forsterkningsledning forutsettes i dette alternativet.

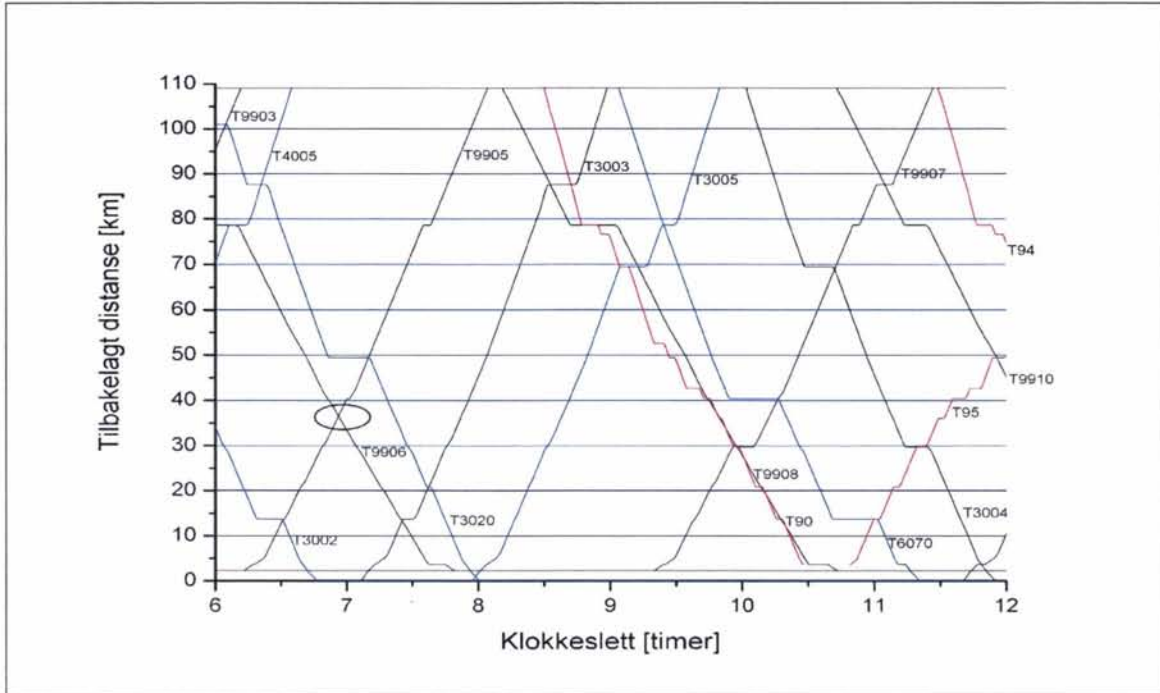
4.1.1 Kjørt distanse og oppsatt rute

Når simuleringen utføres første gang undersøkes kjøretid for alle tog ved at tilbakelagt distanse som funksjon av tid settes inn i diagrammer som ligner grafiske ruteplaner (tid-sted-diagram), se figur 4-2, figur 4-3, figur 4-4 og figur 4-5. En får da kontrollert om kryssing skjer riktig og om noen av togene er forsinket eller ligger foran ruten.

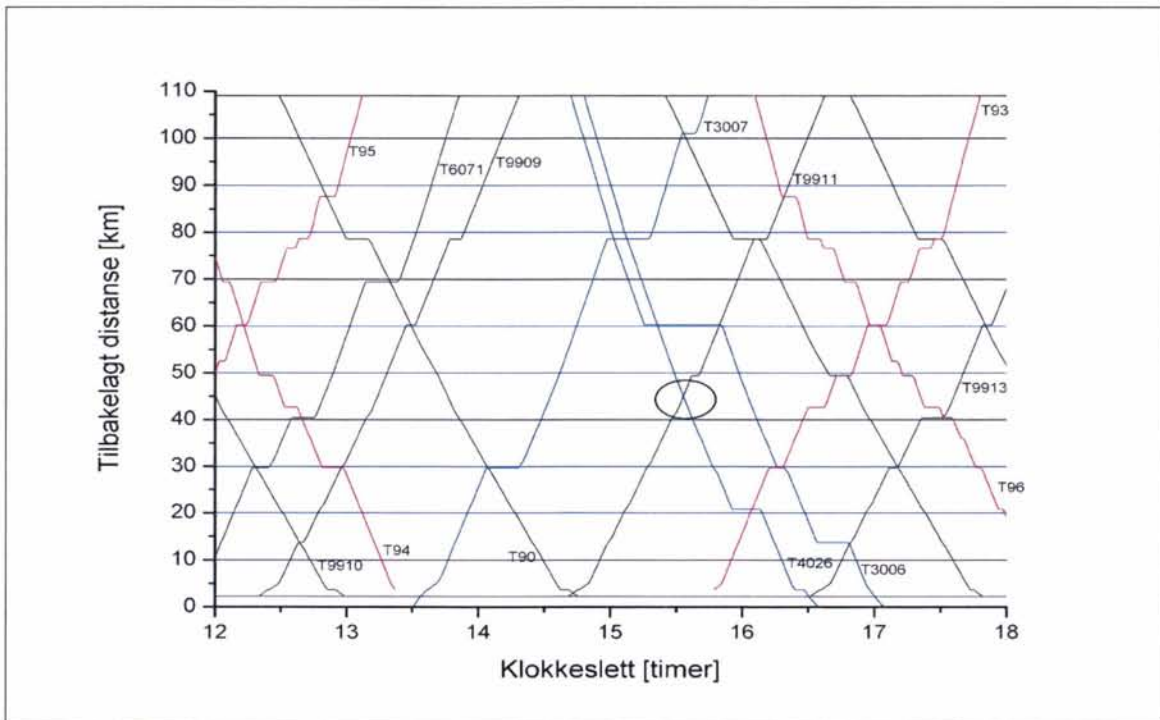
I figur 4-3 ser en at tog 9905 og 9906 ikke krysser riktig, men noe vest for Bjørnfjell stasjon, markert med ring. TracFeed er ikke så avansert at signalanlegget er med og programmet tar heller ikke hensyn til at krysning på enkeltsporet bane bare kan skje på stasjoner (via avviksspor). Videre kan en se at også se at tog 4026 og 9911 i figur 4-4 og tog 4016 og 9917 i figur 4-5 heller ikke krysser riktig, men utenfor stasjonene. Årsaken kan være at togene opp fra Narvik ikke holder stor nok fart og at togene fra Sverige kommer foran ruten når de gjør få stopp. For å bøte på dette er ruteplanen korrigert ved at togene 9906, 4026 og 4016 gis ekstra stopp på de stasjonene som de ankommer for tidlig og at de venter her til møtende tog har kommet frem, se avsnitt 4.1.2. Se nedenfor til som viser disse korrigeringsene.



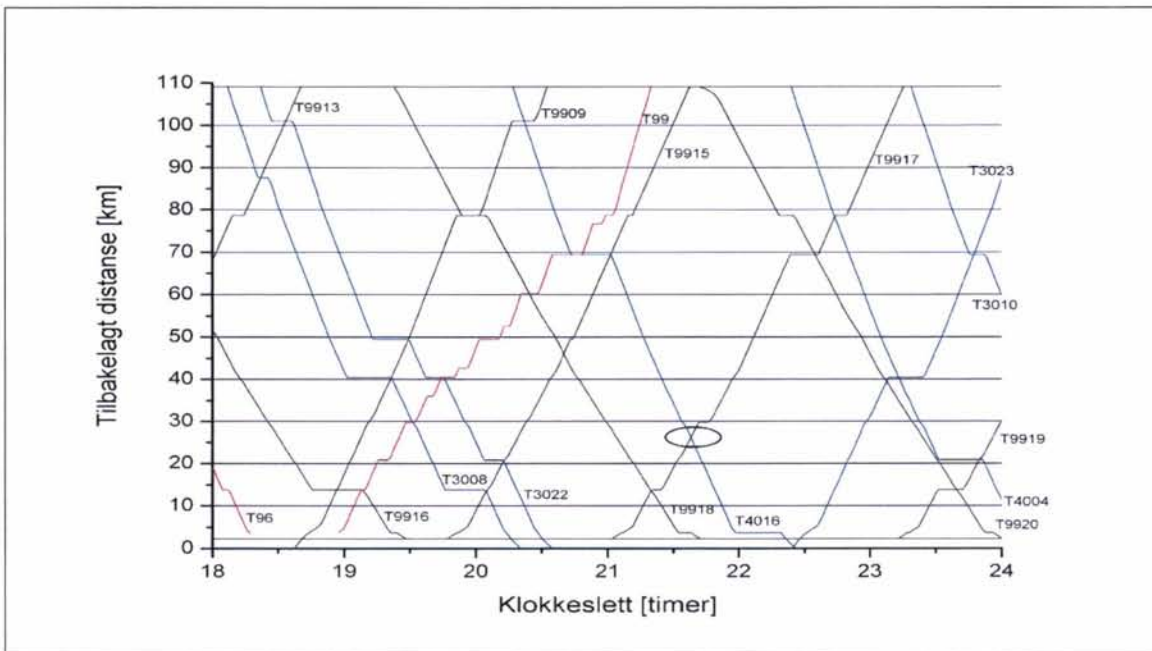
Figur 4-2 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 00:00 og 06:00 fremstilt som grafisk rute. Det ser ut til at togene krysser stort sett riktig.



Figur 4-3 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 06:00 og 12:00 fremstilt som grafisk rute. En ser at kryssingen mellom tog 9906 og 9905 ikke skjer på stasjonen (Bjørnfjell), men noen km vest for denne. Dette skyldes at tog 9906 er langt foran oppsatt rute.



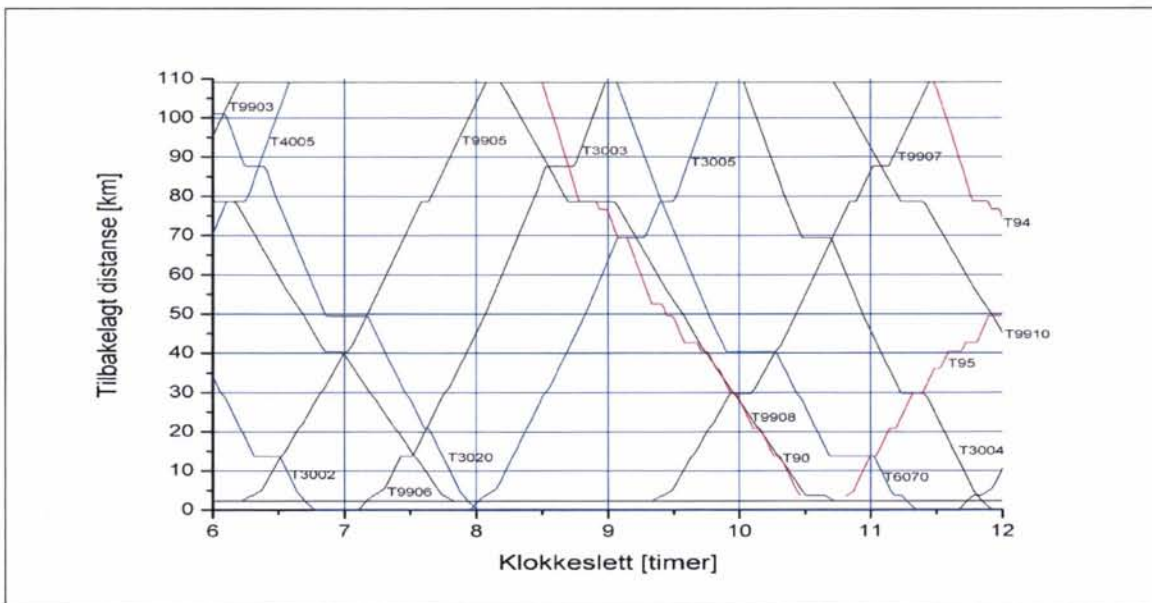
Figur 4-4 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 12:00 og 18:00 fremstilt som grafisk rute. En ser at kryssingen mellom tog 9926 og 9911 ikke skjer på stasjonen (Vassijaure), men noen km vest for denne. Dette skyldes at tog 4026 er mye foran oppsatt rute



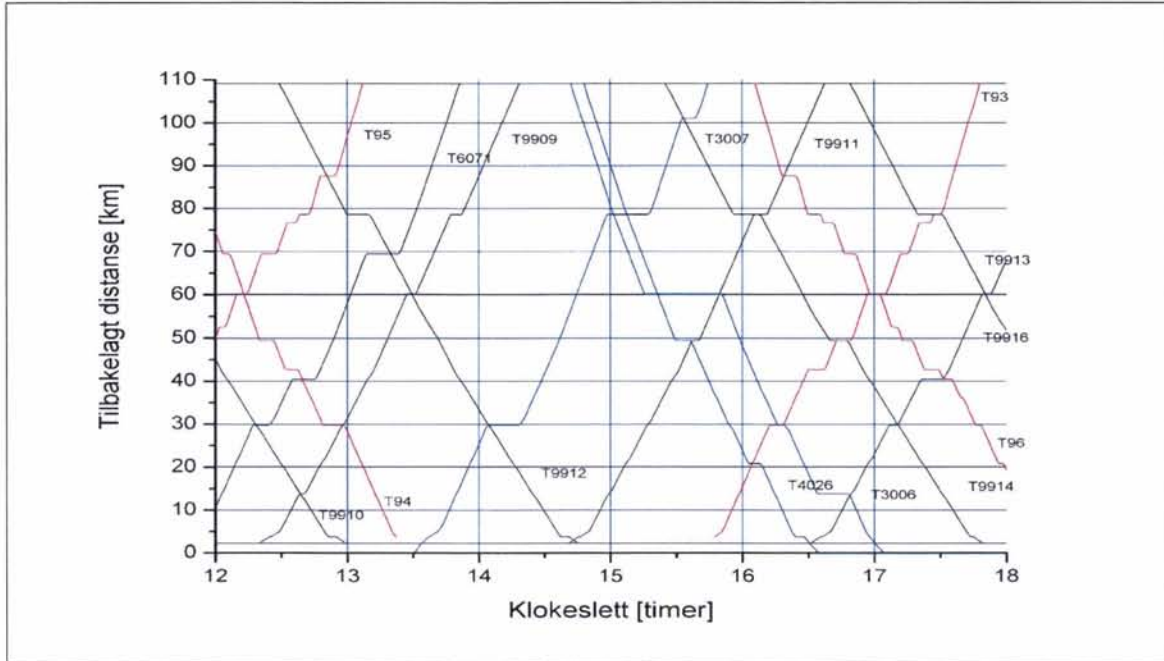
Figur 4-5 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 18:00 og 24:00 fremstilt som grafisk rute. En ser at kryssingen mellom tog 4016 og 9917 ikke skjer på stasjonen (Katterat), men noen km vest for denne. Dette skyldes at tog 4016 er mye foran oppsatt rute.

4.1.2 Kjørt distanse og korrigert rute

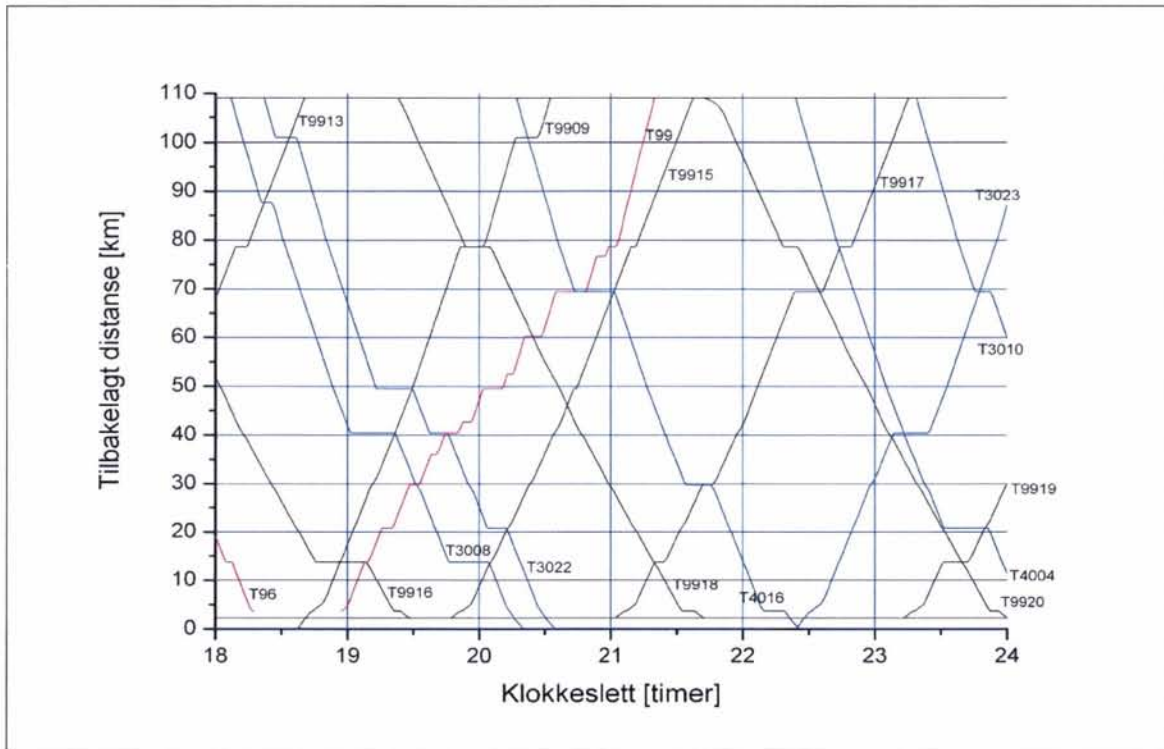
Nedenfor viser Figur 4-6 til Figur 4-8 togenes kjøring etter at noen av togene gis ekstra stopp for å vente på møtende tog. Denne endringen av ruteplanen gjøres for alle simuleringene. Disse ekstra stoppene vil nok kunne føre til noe økt energiforbruk, men totalt sett kan dette antas å være svært lite.



Figur 4-6 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 06:00 og 12:00 fremstilt som grafisk rute når korrigeringer er utført. Ved å la tog 9906 få en stopp på Bjørnfjell stasjon skjer kryssingen med tog 9905 riktig.



Figur 4-7 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 12:00 og 18:00 fremstilt som grafisk rute. En ser at kryssingen mellom tog 9926 og 9911 nå skjer på stasjonen (Vassijaure) når 9926 gies et opphold her.



Figur 4-8 Tilbakelagt distanse for togene med utgangspunkt i Narvik Havn (0 km) mellom klokken 18:00 og 24:00 fremstilt som grafisk rute. En ser at kryssingen mellom tog 4016 og 9917 nå skjer på stasjonen (Katterat) når 4016 gies en stopp her.

4.1.3 Belastning av omformere

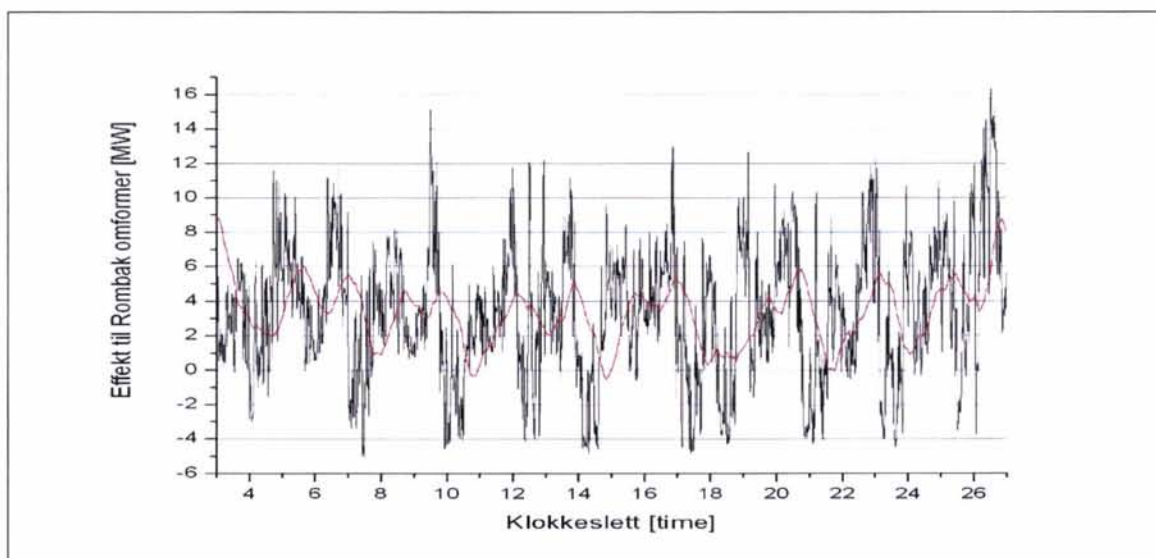
Nedenfor viser tabell 4-1 belastningen av Rombak og Tornehamn omformerstasjoner med simulering av dimensjonerende ruteplan. En har funnet at for Rombak er høyeste tillatt prosentvise belastning i normalsituasjon 61 % for å unngå overbelastning om et av aggregatene på 10,0 MVA skulle falle ut, for Tornehamn er denne tilsvarende grense 68 %. En ser at begge omformerstasjonene ligger innenfor denne grensen. Belastningen for Stenbacken omformerstasjon er ikke vist her fordi simuleringmodellen ikke inkluderer togtrafikken øst for denne og dermed vil simulert belastning av denne bli mindre enn hva den virkelig blir belastet.

Tabell 4-1 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	23,787	48	18,860	52	12,798	50
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	24,334	41	16,885	38	8,666	40

4.1.4 Levert effekt og energi fra trefasenettet og elektriske energitap

Levert aktiv effekt til Rombak omformerstasjon er undersøkt og vist i figur 4-9 og som en ser oppstår høyeste effekttopptak rundt klokken 01:00 til 04:00 (eller 25:00 til 28:00 i figuren). Dette har sannsynligvis sammenheng med at det i denne perioden er to godstog (T4005 og T3021) og et malmtog med olivin (T9901) på veg oppover fra Narvik.



Figur 4-9 Levert aktiv effekt, MEAN-verdi for 1 minutt (sort) og 1 time (rød) for Rombak omformerstasjon. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

I tabell 4-2 nedenfor er en rekke størrelser vedrørende banestrømforsyningens energioptak for den norske delen av strekningen presentert. Maksimalt effekttopptak (middel over 1

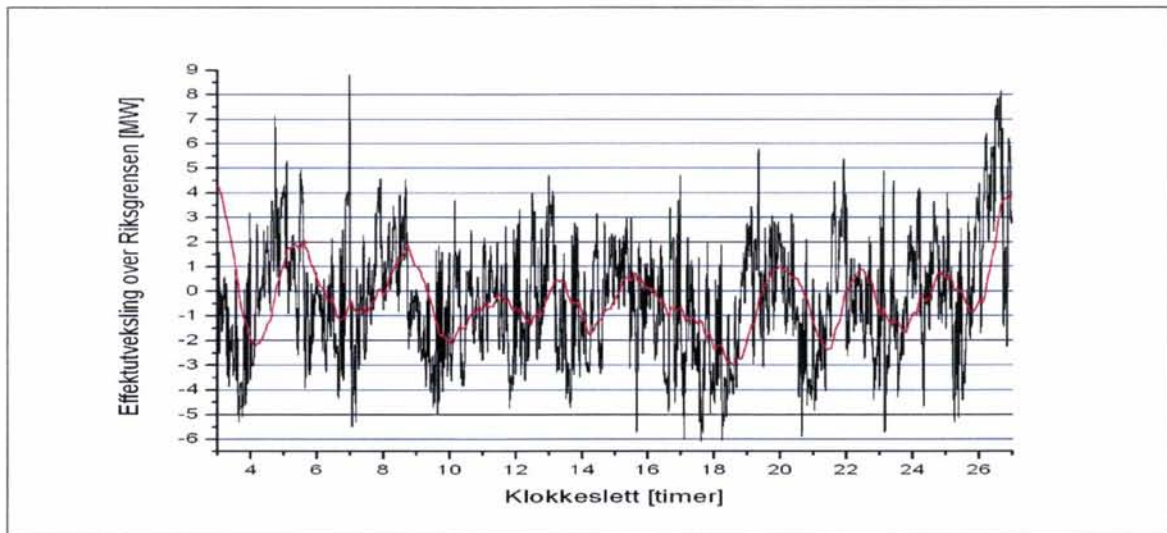
minutt) og høyeste middelværdi over en time er vist, videre total levert og avlevert energi over de simulerte 24 timene for Rombak omformerstasjon, tap i selve overføringen (kontaktledningsanlegget) og totale tap som omfatter omformertapene. En ser at tapene i overføringen utgjør knapt 4 %, mens totale tap kommer over 13 %. Omformertap er alltid større enn overføringstap, men det kan tenkes at de i dette tilfellet er spesielt store siden alle omformeraggregatene er i drift samtidig og ikke startes og stoppes i takt med trafikken.

I tapsberegningene er tomgangstap og belastingsavhengige tap i omformere og transformatorer inkludert. Det er også inkludert tap på grunn av overføring av effekt til sporvekselvarme.

Uttekslingen av energi over Riksgrensen er undersøkt og 21,64 MWh går mot Ofofbanen, 29,24 MWh fra og altså 7,60 MWh overføres netto til Malmbanan i løpet av de simulerte 24 timer. I figur 4-10 er effektutvekslingen over Riksgrensen vist time for time for MEAN-verdi midlet over et minutt og en time, positive verdier indikerer effekt fra Malmbanan til Ofofbanen.

Tabell 4-2 Levert effekt for Rombak omformerstasjon, levert og avgitt energi, samt tap for transmisjon og totale tap i omformer i absolutte og relative verdier, samt maksimal 1-minuttsverdi og høyeste 1-timesverdi (MEAN) for aktiv effekt er vist. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1					
Omformer stasjon	Effekt [MW]		Energi inn/ut/sum [MWh]	Tap transmisjon [MWh]/[%]	Totale tap [MWh]/[%]
	Maks	Middel			
Rombak	16,33	10,53	90,89/-11,30/79,59	6,16/3,64	25,0/13,32



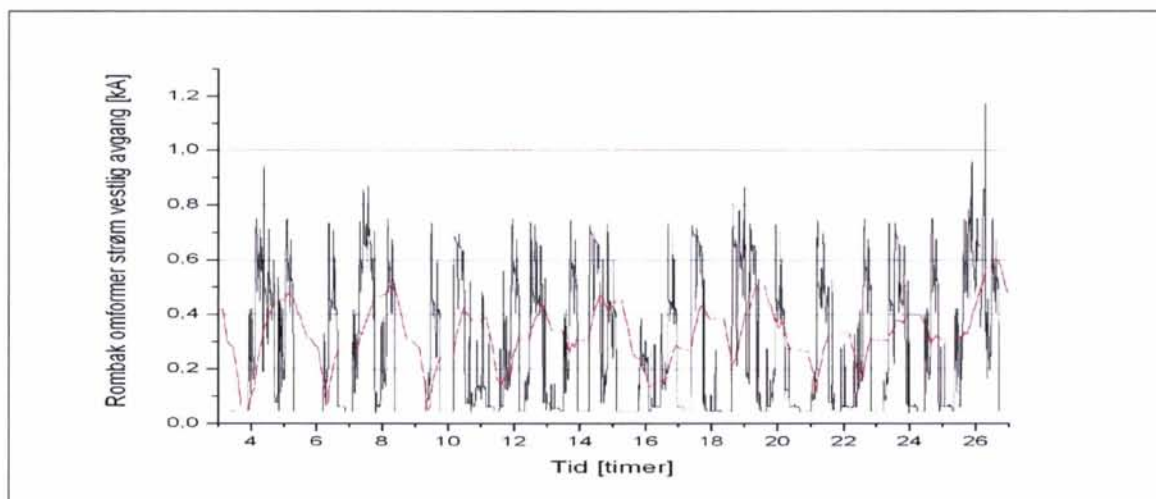
Figur 4-10 Uttekslet aktiveffekt over riksgrensen der positive verdier indikerer effekt fra Malmbanan til Ofofbanen, MEAN-verdi for 1 minutt (sort) og 1 time (rød). Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

4.1.5 Belastning av kontaktledningen

Kontaktledningens belastning er undersøkt for høyeste RMS-verdier av tidsperioder som vist i tabell 4-3. Det ser ut til at med forsterkningsledning blir belastningen godt innenfor kravene, med en belastingsprosent på 64 % for 6-minuttersverdi og 60 % for 1-timesverdien for vestlig avgang fra Rombak. Derimot ser det ut til at en vil komme noe over uten forsterkningsleder. Imidlertid viser figur 4-11 at en høy belastningsperiode for den avgangen med størst strømverdier (vestlig avgang fra Rombak) etterfølges av en periode med liten eller ingen belastning. Dermed kan det for normalsituasjon se ut som om nødvendigheten av forsterkningsleder kan vurderes, men avvikssituasjoner kan vise noe annet. I figuren er kontinuerlig 1-times og 1-minuttsverdier av strømmens RMS-verdi vist.

Tabell 4-3 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1					
KL avgang ved omformerstasjon	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	3,607	2,246	1,173	0,898	0,620
Rombak øst	1,007	0,985	0,808	0,666	0,441
Rombak sum	3,831	2,496	1,396	1,170	0,825
Tornehamn vest	1,331	1,324	1,125	0,836	0,450



Figur 4-11 Strøm på vestlig avgang fra Rombak omformerstasjon. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Rod strekviser 1-timesverdi og sort viser 1-minuttsverdi.

4.1.6 Spenningen for togene

Spenningen for samtlige tog i simuleringen er vist i tabell 4-4 nedenfor. Alle togene får tilfredsstillende spenning bortsett fra tog 9922 som får noe lav spenning for 10-sekundersverdien, noe som må sies å være noe uventet. Nedenfor viser figur 4-11 til figur 4-18 spenningen som funksjon av tilbakelagt distanse fra Narvik til Tornehamn for forskjellige togkategorier.

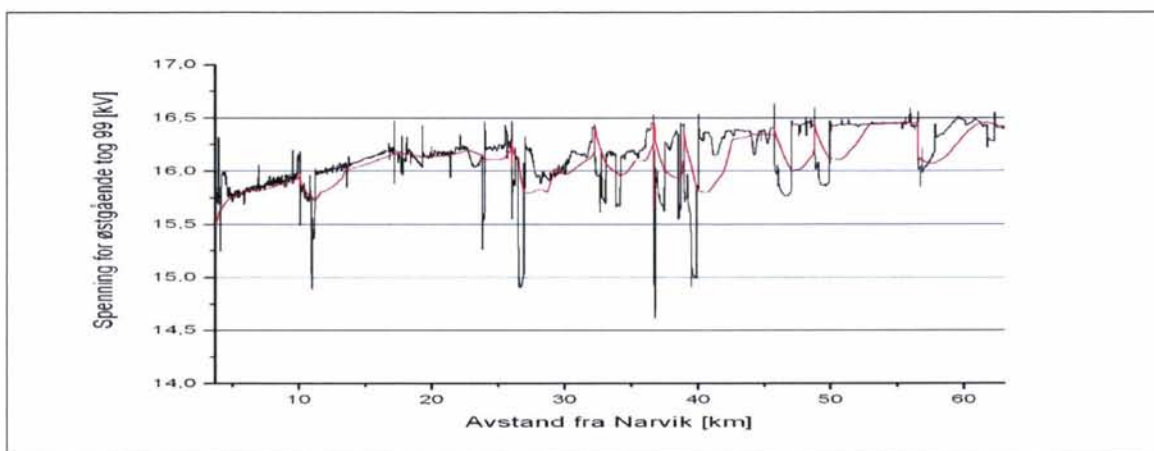
Det er oppsiktsvekkende at tog 9922 får såpass lav spenning som 12,5 kV ved Narvik stasjon når det allikevel kjører nokså sakte, men det kan ha sammenheng med at tog 3021 samtidig akselerer oppover fra Narvik stasjon, i tillegg til at tog 9901 er inne på matestrekingen ved Rombak. Dette beror mest sannsynlig mye på tilfeldigheter og lokomotivførernes pådrag i dette øyeblikket. En får her si at alle togene får akseptabel spenning.

Tabell 4-4 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

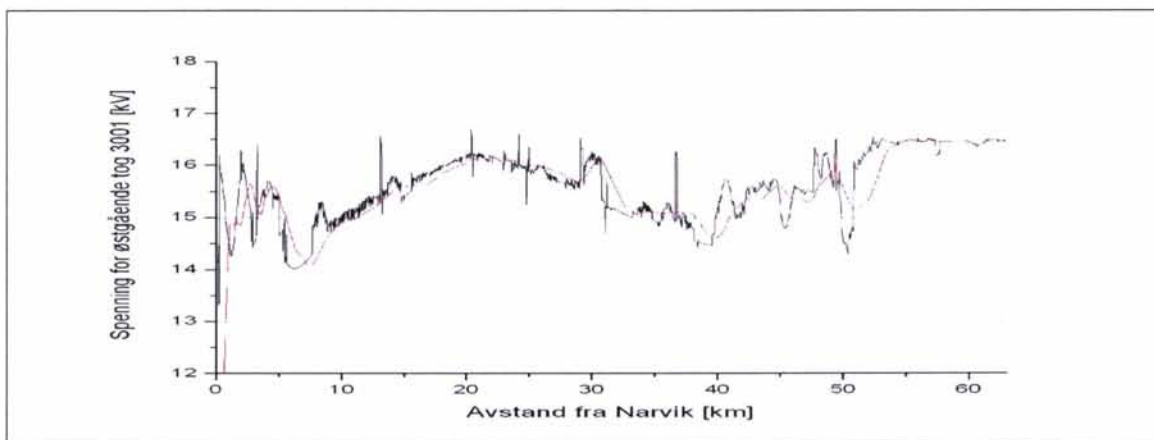
Simulering 1		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	14,0	15,1
93	14,5	15,0
94	15,1	15,2
95	14,4	14,9
96	15,2	15,7
99	14,8	15,6
3001	14,0	14,1
3002	14,7	15,6
3003	13,6	14,1
3004	14,7	15,5
3005	14,0	14,1
3006	13,4	14,8
3007	14,0	14,1
3008	14,4	14,7
3009	14,0	14,0
3010	14,7	15,4
3020	13,2	14,4
3021	14,0	14,1
3022	13,9	15,4
3023	13,4	14,1
4004	14,0	15,1
4005	13,5	14,1
4016	14,0	15,1
4019	14,0	14,1
4025	13,4	14,1
4026	14,5	14,9
6070	14,5	15,4
6071	14,0	14,1
9901	13,9	14,4
9901	13,9	14,4
9903	13,9	15,0
9904	13,5	14,2
9905	14,5	15,1
9906	13,4	14,5
9907	13,6	14,8
9908	13,8	14,7
9909	14,9	15,0
9910	13,6	14,7
9911	14,1	15,0
9912	14,1	14,8
9913	14,7	15,1

Simulering 1

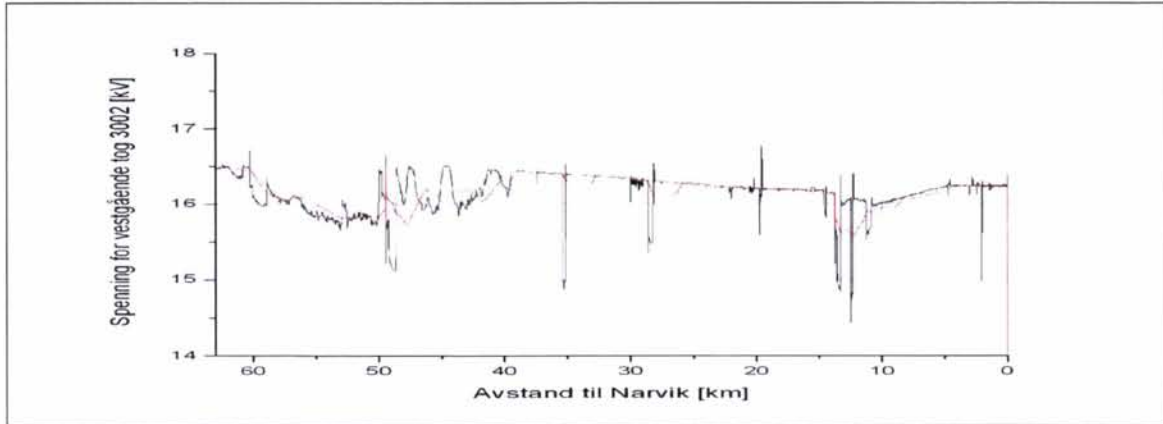
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
9914	14,2	14,5
9915	14,2	15,1
9916	14,2	15,0
9917	14,7	15,0
9918	14,2	15,1
9919	13,9	15,0
9920	13,4	14,4
9922	12,5	14,5



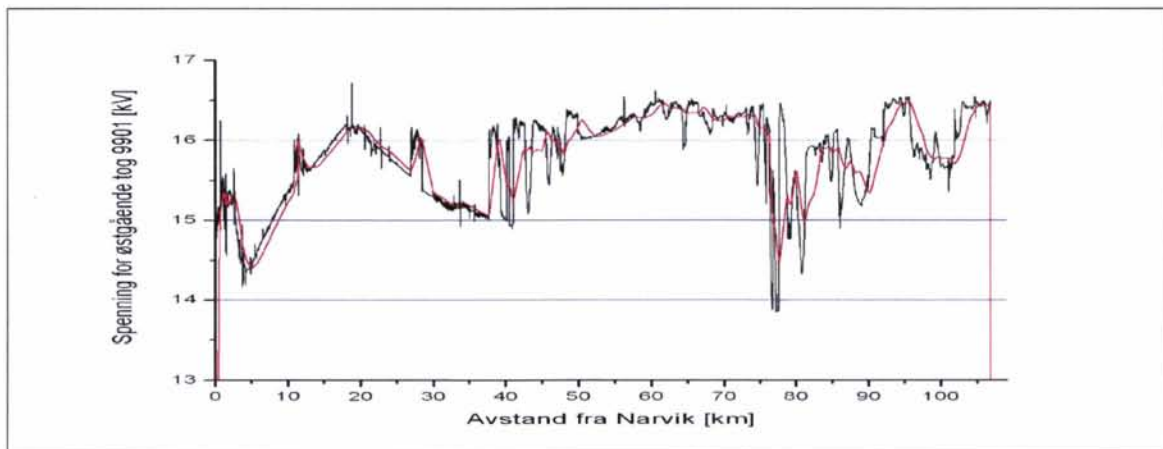
Figur 4-12 Spenningen for østgående passasjertog 99 med seks vogner. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



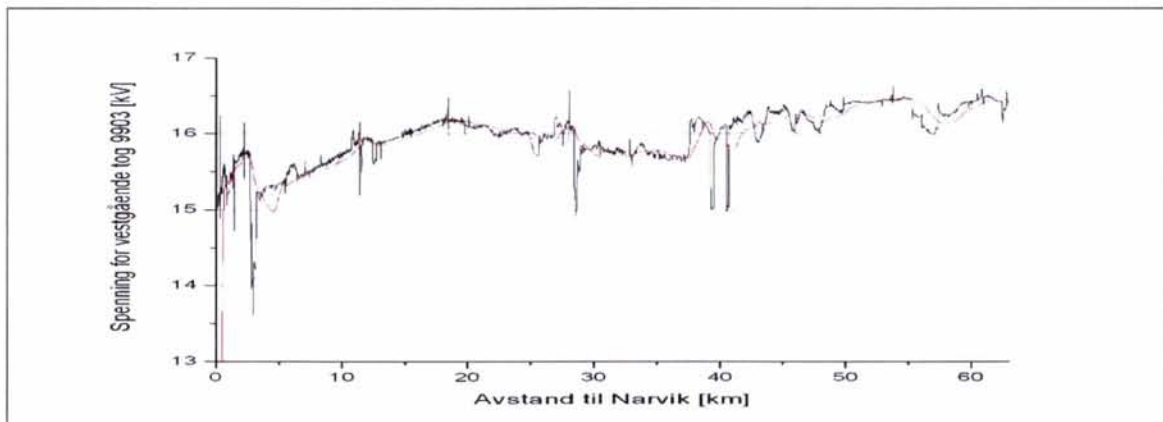
Figur 4-13 Spenningen for østgående godstog 3001 med multippel Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



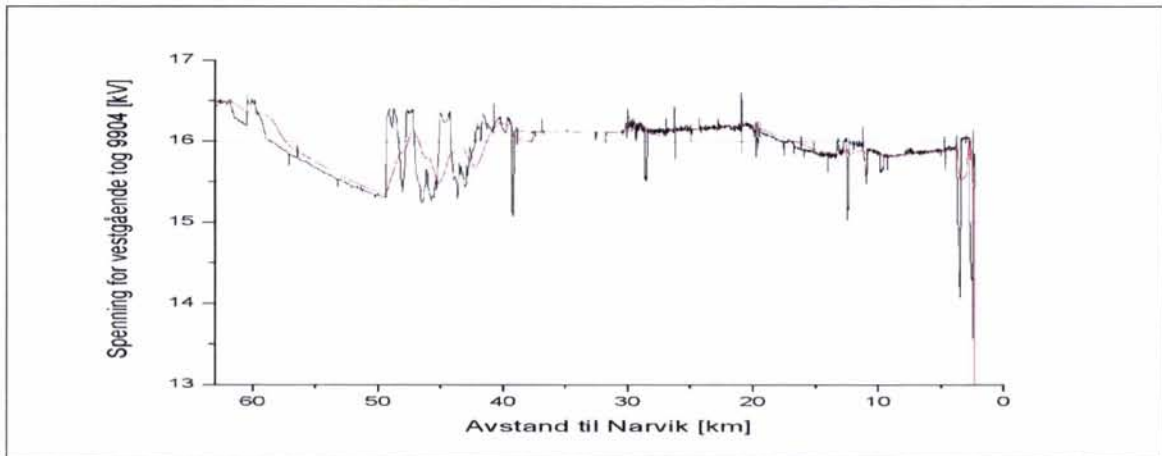
Figur 4-14 Spenningen for vestgående godstog 3002 med multippel Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



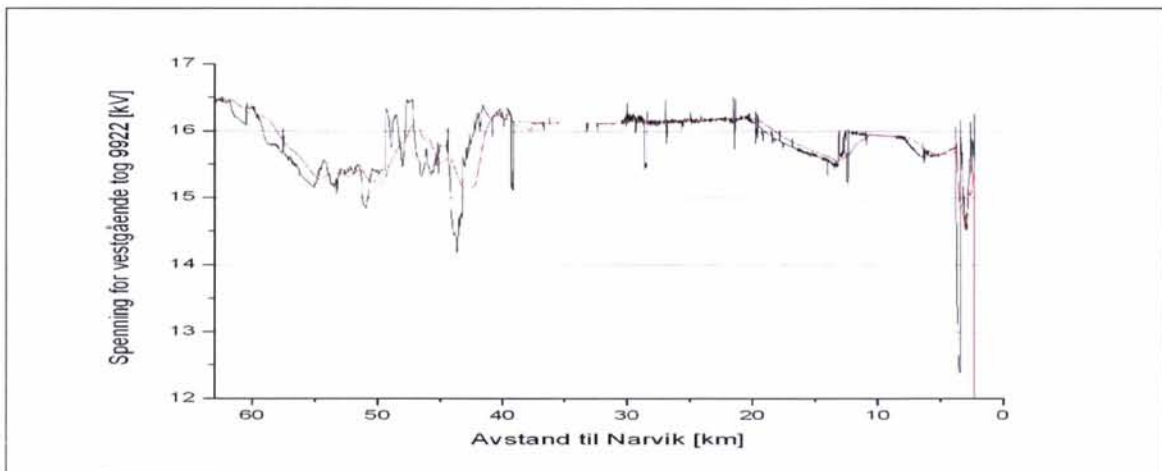
Figur 4-15 Spenningen for østgående malmtog 9901 med olivin og 4240 tonn lastvekt. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-16 Spenningen for østgående tomtog 9903. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-17 Spenningen for vestgående malmtog 9904. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-18 Spenningen for østgående malmtog 9922. Dette toget får en noe overraskende lav spenning like ved Narvik stasjon. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).

4.2 Simulering 1b – utfall av Rombak omformerstasjon

Utfall av Rombak omformerstasjon vil være en meget sjelden forekommende feil, men en situasjon der det tillates begrensinger i togtrafikken og en tillater redusert spenning ned til 12,0 kV.

4.2.1 Belastning av omformere

Nedenfor viser tabell 4-5 belastningen av nabostasjonen i Tornehamn når Rombak omformerstasjon faller ut. Som en ser blir Tornehamn nå belastet nokså mye, men allikevel godt innenfor sine grenser.

Tabell 4-5 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1b med utfall av Rombak omformerstasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1b							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	-	-	-	-	-	-
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	37,284	63	29,218	66	18,482	86

4.2.2 Belastning av kontaktledningen

I tabell 4-6 nedenfor ser en at belastningen på den svenske delen av banestrekningen bli spesielt stor og at forsterkningsleder er nødvendig her. Kontakteledningen ved Bjørnfjell blir belastet 67 % for 6-minuttersverdi og 74 % for 1-timesverdien.

Tabell 4-6 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1b med utfall av Rombak omformerstasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1b					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Bjørnfjell	1,330	1,323	0,975	0,943	0,779
Thornehamn vest	1,923	1,913	1,816	1,641	1,053

4.2.3 Spenningen for togene

Spenningen for togene blir tydeligvis mye lavere enn det som settes som krav for denne feilsituasjonen, med mange tog som får spenning under 12,0 kV, se tabell 4-7 under.

Tabell 4-7 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 1b med utfall av Rombak omformerstasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1b		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	10,2	11,9
93	11,9	12,2
94	11,1	12,3
95	11,6	12,5
96	11,8	13,4
99	8,7	11,2
3001	11,3	11,5
3002	10,1	10,3
3003	10,9	12,0
3004	11,9	13,9
3005	11,8	11,9

Simulering 1b		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
3006	10,4	10,6
3007	11,0	11,8
3008	10,6	11,1
3009	10,8	11,4
3010	11,6	11,7
3020	10,9	12,0
3021	11,2	11,3
3022	11,2	11,9
3023	11,0	11,7
4004	10,4	12,1
4005	10,1	11,3
4016	11,3	12,2
4019	9,7	11,0
4025	11,2	11,5
4026	11,6	12,2
6070	11,5	12,5
6071	10,9	11,6
9901	9,8	10,4
9903	10,4	11,3
9904	9,8	10,8
9905	10,1	10,2
9906	10,2	11,9
9907	9,8	10,1
9908	10,2	12,0
9909	9,5	10,2
9910	9,6	11,2
9911	10,7	10,7
9912	9,8	13,1
9913	10,4	10,6
9914	10,0	12,5
9915	10,0	10,0
9916	10,0	10,7
9917	9,6	10,9
9918	9,7	11,9
9919	10,6	10,7
9920	9,8	12,1
9922	9,7	10,0

4.3 Simulering 1bb - ensidig mating fra Rombak omformerstasjon til Tornehamn

I tilfelle arbeid med kontaktledningsanlegget, eller arbeid i og ved sporet som krever utkobling av kontaktledningen mellom Bjørnfjell og Tornehamn, vil Rombak omformerstasjon gå i øydrift. Tog kan riktignok ikke gå forbi bruddstedet, men så lenge disse situasjonene varer kan det være mange tog i drift på både Ofotbanen og Malmbanan. Simuleringen her er gjort med dimensjonerende ruteplan i et helt døgn, men for et scenario som beskrevet vil trafikken kunne gå for fullt i maksimalt en time før togene rekker frem til enten Narvik eller bruddstedet og etter en tid vil all trafikk stanse. Resultatene fra denne simuleringen har derfor bare relevans innenfor en avgrenset tidsperiode. I simuleringen er avgangen vestover fra Tornehamn omformerstasjon koblet ut og det er dermed ensidig matet

strekning helt fra Rombak til Tornehamn. Muligens kan en det tenkes at en slik situasjon kan ha lang varighet i tilfelle en effektbryter, kabel eller annen seriekomponent i Tornehamn omformerstasjon er ødelagt i lengre tid, men sannsynligheten er liten for dette da slike komponenter er dublerne og det uansett kan gjøres midlertidige omkoblinger.

4.3.1 Belastning av omformere

I tabell 4-8 nedenfor ser en maksimal belastning for Rombak omformerstasjon for de vanlige tidsintervallene. En ser at det ikke vil være problemer med stasjonenes leveringskapasitet.

Tabell 4-8 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

Simulering 1bb							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	32,468	66	23,944	67	16,973	66
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	-	-	-	-	-	-

4.3.2 Belastning av kontaktledningen

Belastningen for kontaktledningen er vist i tabell 4-9 og for østlig avgang fra Rombak er høyeste 6-minuttersverdi **102 %** og for 1-timesverdi er den 82 %. Dermed er det fare for overbelastning selv med forsterkingsleder om denne situasjonen oppstår samtidig som det er varmt vær. Strømmen ved Bjørnfjell der forsterkningsledningen stopper er avlest og en ser at denne strømmen for sin 1-timesverdi er såpass stor at det også for kontaktledningsanlegget fra Bjørnfjell til Riksgrensen og videre på svensk side må/bør ha strømføringsevne over 600 A. Dermed må/bør det være forsterkningsledning her også.

Tabell 4-9 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

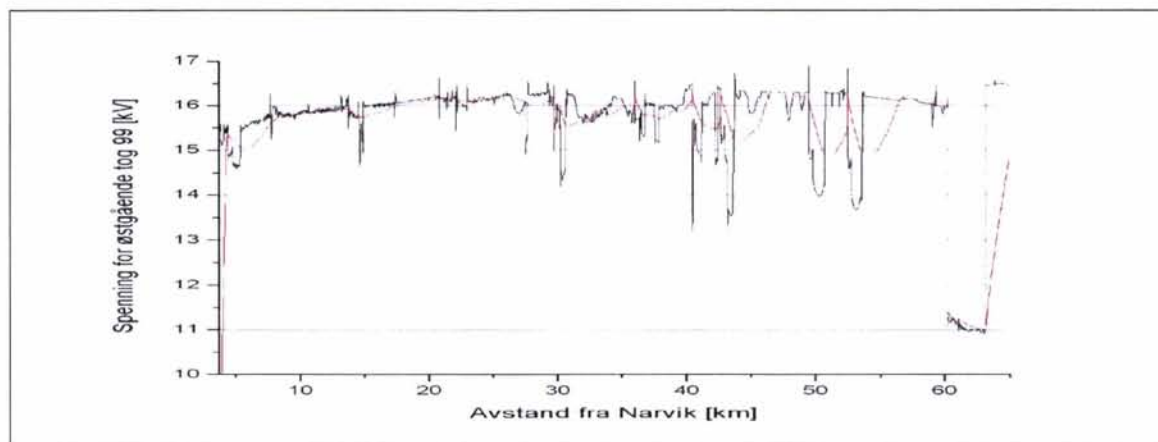
Simulering 1bb					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,691	1,677	0,997	0,917	0,620
Rombak øst	1,830	1,786	1,547	1,424	0,859
Bjørnfjell	1,432	1,378	1,206	1,028	0,623
Tornehamn vest	-	-	-	-	-

4.3.3 Spenningen for togene

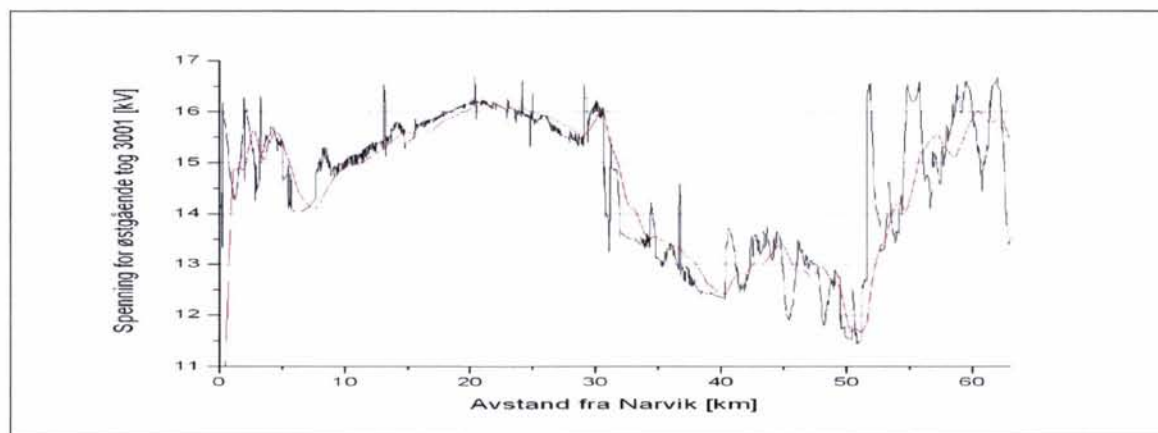
Av tabell 4-10 ser en at spenningen er langt under det akseptable for alle togene. Selv for 2-minuttersverdier kommer spenningen ned i verdier under 11 kV. Spenning og tilbakelagt distanse er vist for de vanlige utvalgte togene i figur 4-19 til figur 4-23 nedenfor. Som en kan se er det på strekningen fra Bjørnfjell til Tornehamn at spenningen blir lav, mens den på den norske delen av strekningen blir akseptabel.

Tabell 4-10 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

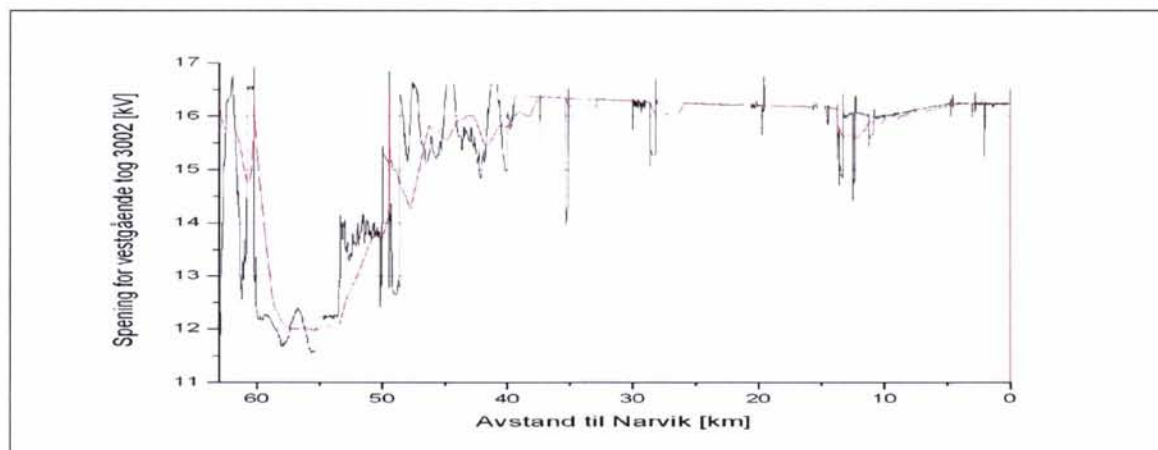
Simulering 1bb		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	11,8	11,8
93	11,8	12,4
94	12,8	13,5
95	11,8	12,3
96	13,0	14,0
99	11,0	11,0
3001	11,5	11,7
3002	11,6	12,0
3003	12,6	13,9
3004	12,6	13,5
3005	12,6	13,9
3006	11,7	12,1
3007	12,6	13,9
3008	12,6	13,5
3009	11,8	13,1
3010	12,0	12,5
3020	11,2	11,3
3021	12,5	13,5
3022	11,9	12,9
3023	11,9	12,4
4004	11,0	11,0
4005	12,2	13,9
4016	12,7	13,5
4019	12,2	13,9
4025	12,7	14,1
4026	12,2	12,5
6070	11,2	11,3
6071	12,5	13,9
9901	10,7	13,1
9903	11,2	11,8
9904	11,4	11,7
9905	12,3	13,6
9906	11,4	11,6
9907	13,3	14,4
9908	11,2	11,3
9909	10,3	10,3
9910	10,9	11,5
9911	11,5	12,2
9912	10,4	10,5
9913	10,3	10,3
9914	11,0	11,3
9915	10,9	12,3
9916	10,5	10,6
9917	13,5	15,0
9918	10,8	11,1
9919	12,1	13,1
9920	11,1	11,2
9922	10,8	10,9



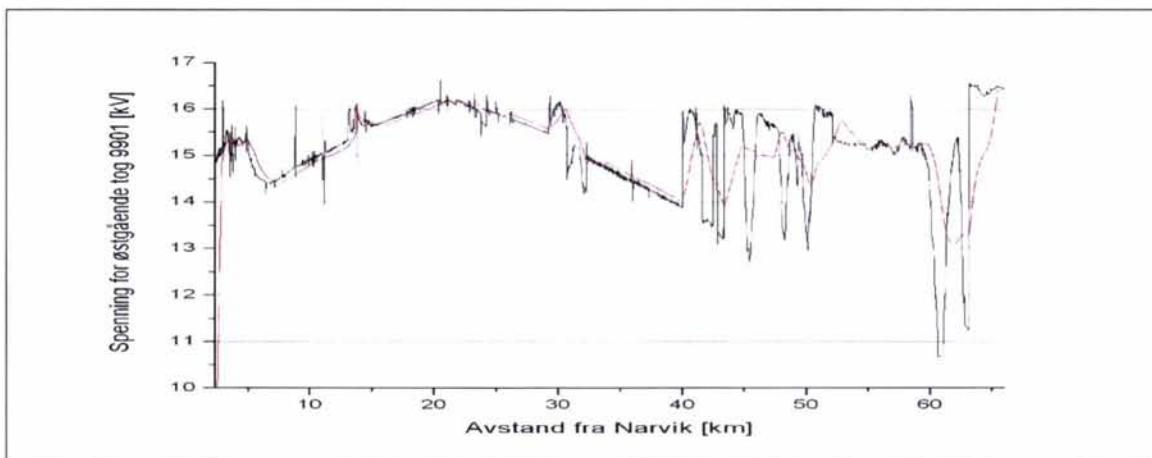
Figur 4-19 Spenningen for østgående passasjertog 99 med seks vogner. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.



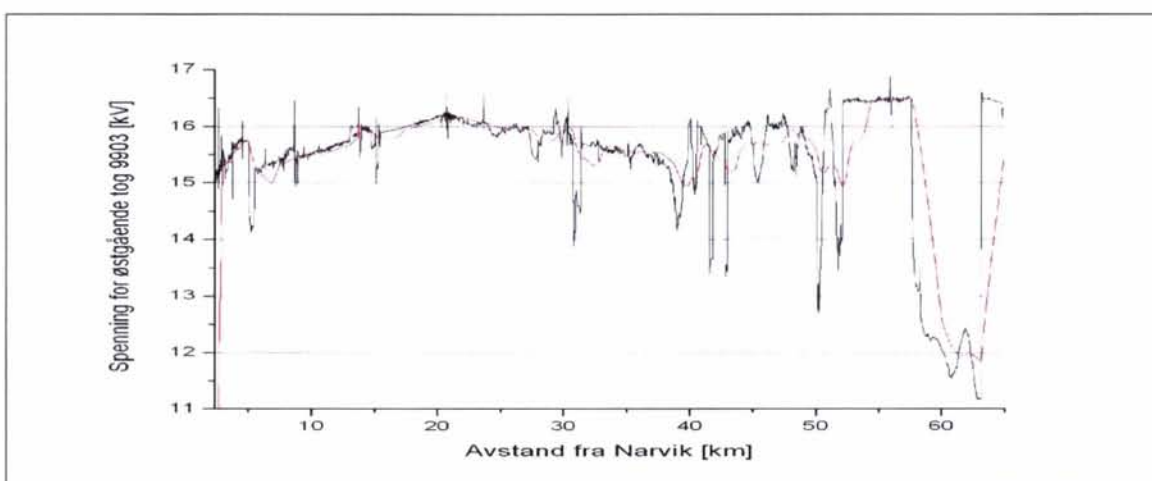
Figur 4-20 Spenningen for østgående godstog 3001. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.



Figur 4-21 Spenningen for vestgående godstog 3002. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.



Figur 4-22 Spenningen for østgående godstog 9901. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.



Figur 4-23 Spenningen for østgående godstog 9903. Simulering 1bb med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen.

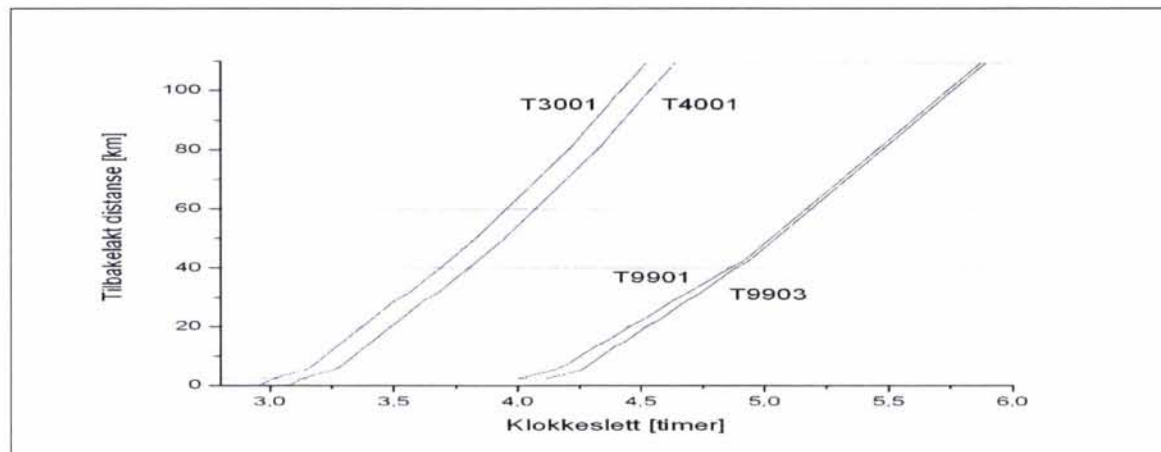
4.4 Simulering 1aa – trafikkendring slik at tog kjører i "blokkpostavstand"

En hyppig forekommende endring i trafikken på Ofofbanen er at tog gis anledning til å kjøre rett etter hverandre i såkalt "blokkpostavstand". Det vil si at de kjører ut fra Narvik stasjon med ned til 7 minutters avstand. I henhold til teknisk regelverk (JD 546) står ikke denne avvikstilstanden nemt, men det synes naturlig at dette tilfellet kommer i kategorien "normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes". Dermed kreves det normal spenning for slike hendelser.

4.4.1 Kjørt distanse

Nedenfor viser figur 4-24 de togene som er simulert og deres tilbakelagte strekning fra Narvik til Stenbacken. Denne avvik situasjonen er lagt opp slik at det første toget passerer Narvik klokken 03:00. Togene passerer Narvik stasjon uten å stoppe, men en stopp her ville sannsynligvis ført til enda lavere spenning for togene.

Togene 3001 og 4001 er godstog med 1500 tonn lastvekt og multiple Rc4 lokomotiver, mens 9901 og 9903 er henholdsvis retur malmtog med olivin og tomtog. Tog 9901 har en lastvekt på 4240 tonn, og det kan være tvilsomt om en vil kunne tillate et annet tog å komme rett etter dette. Med hensikt er de to gruppene av tog kjørt med et opphold mellom slik at de ikke påvirker hverandre i særlig grad.



Figur 4-24 Tilbakelagt distanse for tog som kjører med 7 minutters avstand ut fra Narvik stasjon. Tog 9901 og 9903 får etter en tid meget kort avstand mellom seg noe som sannsynligvis skyldes at togene har forskjellig tyngde, men samme lokomotiv. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

4.4.2 Belastning av omformere

I tabell 4-55 og tabell 4-56 nedenfor er belastningen for omformerstasjonene vist for henholdsvis første periode med tog 3001 og 4001 og andre periode med tog 9901 og 9903. Som en kan se av tabellene og figur 4-25 er de to periodene ganske like, selv om det er tog med ganske store forskjeller når det gjelder lastvekt og lokomotiver. Som en ser av figuren er de to gruppene av tog såpass nært hverandre i tid at det er mulig at 1-timesverdien for effekten i andre periode er påvirket av den første perioden.

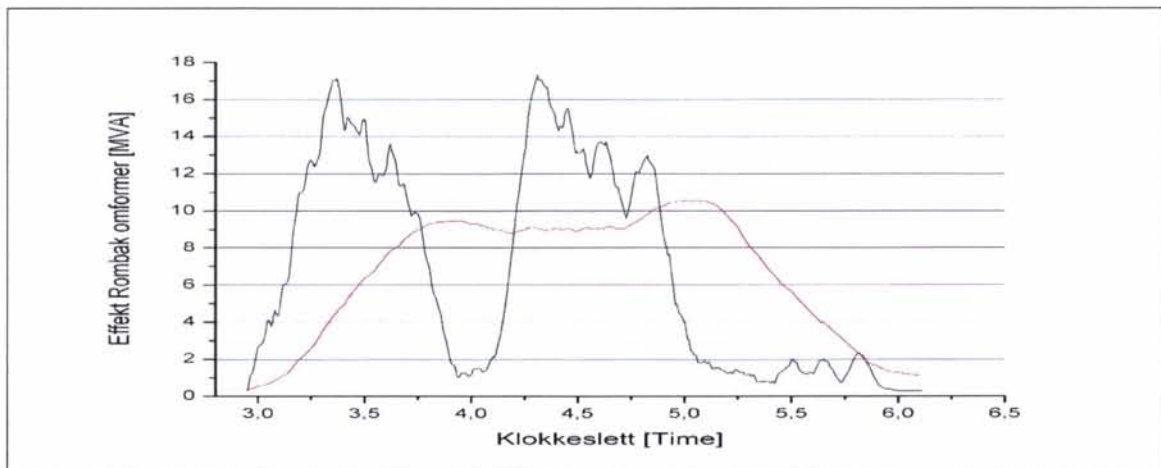
Sammenlignes belastningen for denne simuleringen med belastningen i simulering 1 med normal trafikk, se avsnitt 4.1.3, ser en at det er svært små forskjeller. Denne belastningen kan ikke sies å være spesielt intensivt hva gjelder belastning for omformerstasjonen i Rombak. Men allikevel er belastningen såpass stor at om et av aggregatene på 10 MVA er utkoblet vil de gjenværende bli overbelastet. Belastningen for Tornehamn er av mindre interesse.

Tabell 4-11 Belastning av omformerstasjoner. Effekt ut fra Rombak omformerstasjon når tog 3001 og 4001 kjører. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 1aa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	22,941	47	17,114	48	9,052	35
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	8,824	15	6,092	14	2,944	14

Tabell 4-12 Belastning av omformerstasjoner. Effekt ut fra Rombak omformerstasjon når tog 9901 og 9903 kjører. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 1aa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	22,115	45	16,351	45	9,852	38
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	14,753	25	10,056	23	6,902	32



Figur 4-25 Belastning av Rombak omformerstasjon. Sort strek for 1-timesverdi og rød strek for 6-minuttersverdi. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

4.4.3 Belasting av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-13 og tabell 4-14 strømbelastningen på avgangen i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for de to gruppene av tog. Belastningen når tog 3001 og 4001 kjører blir helt akseptabel, men som en ser gir tilfellet med de siste to togene, 9901 og 9903, noe større belastning på kontaktledningen. Her blir belastningen for 6-minuttersverdien 92 %. Dermed bør en være forsiktig med å la det tunge olivintoget (9901) kjøre så nært andre tog selv om dette skal kunne gå uten overbelastning.

Tabell 4-13 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 3001 og 4001 kjører. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 1aa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,453	1,450	1,385	1,117	0,535
Rombak øst	1,019	0,985	0,945	0,810	0,396

Tabell 4-14 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 9901 og 9903 kjører. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

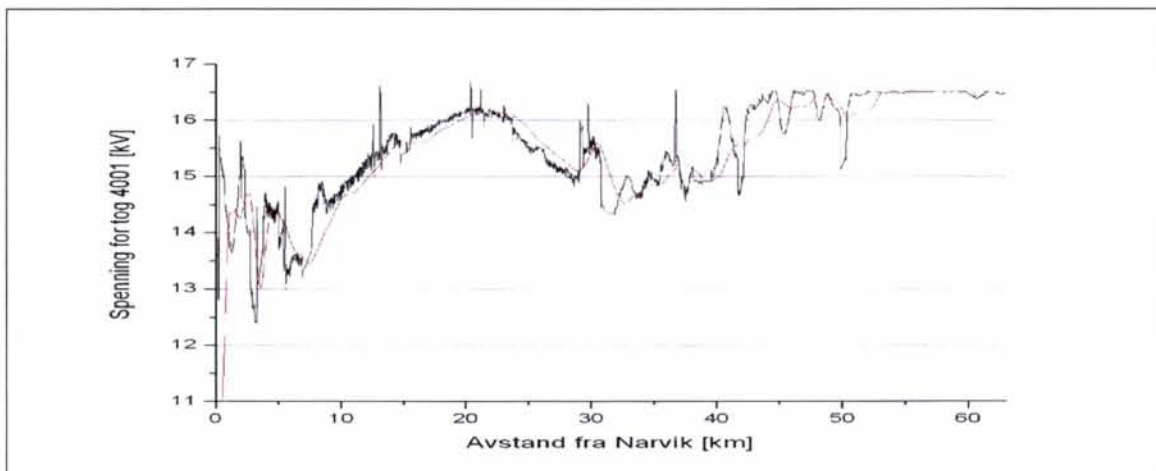
Simulering 1aa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,811	1,810	1,663	1,291	0,658
Rombak øst	1,210	1,203	0,984	0,774	0,473

4.4.4 Spenning for togene

Spenningen for togene er beregnet for 10-sekunder og 2-minuttersverdi (RMS) og oppstilt i tabell 4-15 nedenfor, og som en ser får togene noe for lav spenning. Paradoksalt er det tunge toget med olivin 9901, som får best spenning. Skal en forutsette at denne situasjonen skal gi spenninger som for normalt tilstand kan en ikke tillate spenninger under 14,0 kV, eller 13,0 kV for 2 minutters varighet. figur 4-26 viser spenningen for toget som får lavest spenning. Som forventet oppstår den lave spenningen ved Narvik der en får lengst endematet strekning i tillegg til spenningsfallet på grunn av tog 3001 som ligger mellom omformerstasjonen og tog 4001.

Tabell 4-15 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 1aa		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
3001	12,7	13,2
4001	12,4	13,0
9901	13,4	14,1
9903	12,8	13,7



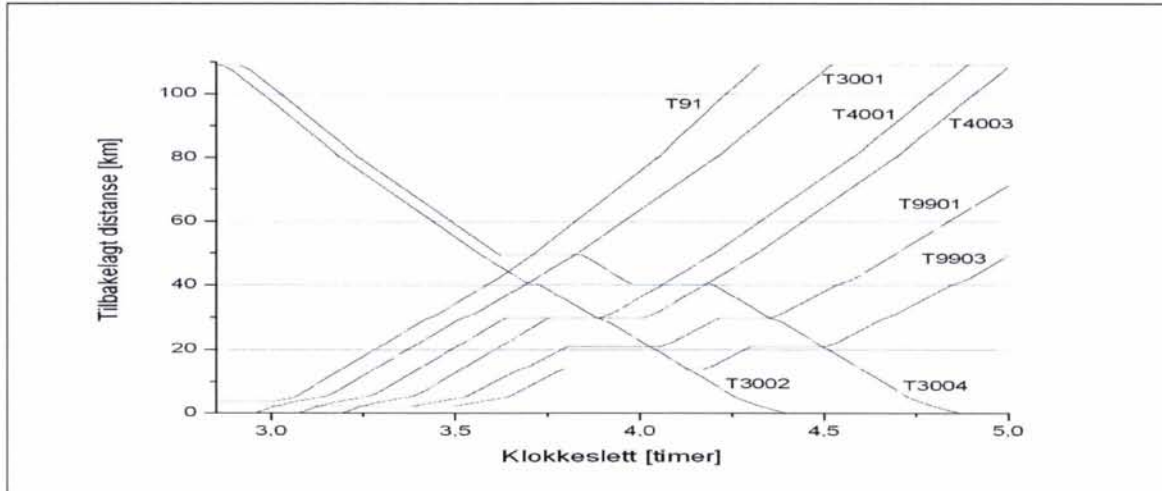
Figur 4-26 Spenningen for tog 4001. Simulering 1aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).

4.5 Simulering 1aaa – trafikkendring slik at 6 tog kjører i "blokkpostavstand" fra Narvik og 2 tog kommer imot

Det er simulert med et tilfelle med mange tog som kjører ut med "blokkpostavstand" fra Narvik og noen tog som kommer imot. Dette kan være situasjonen etter en blokade av banen og påfølgende oppstart av trafikken etter dette. Situasjonen kan komme i kategorien "Oppløsning etter masseforsinkelse..." og bestemmelsene for spenningen blir da som for *redusert spenning*, der spenningen aksepteres å komme ned mot 12,0 kV. Ved vurderinger for prosjektering skal forsinkelser og begrensninger i togtrafikken begrenses. I denne situasjonen er det antatt at spenningen neppe blir særlig mindre enn for situasjonen med normalt forekommende avvikssituasjoner, som i avsnitt 4.4 foran, men effektbelastningen for omformerstasjonene og for kontaktledningsanlegget blir sannsynligvis større.

4.5.1 Kjørt distanse

I figur 4-27 er tilbakelagt distanse for senariet vist. Flere tog kjøres ut fra Narvik etter de prioriteringer som er vanlig i dag og som forventes å gjelde i fremtiden. Det vil si persontog kjøres først (91), så godstogene (3001 som er NEW tog og 4001 og 4003 som er ARE tog), til sist kommer tomme malmtog (9901 og 9903). Imot kommer to godstog (3002 og 3004 som er NEW tog) som i dette tenkte tilfellet har stått og ventet på Stenbacken og kjører ut med kort avstand mellom. Krysninger blir lagt til Vassijaure, Bjørnfjell, Katterat, Rombak og Straumsnes. Den tenkte ruten er lagt opp slik at det første toget passerer Narvik klokken 03:00 og samtidig kjører det første vestgående toget ut fra Stenbacken.



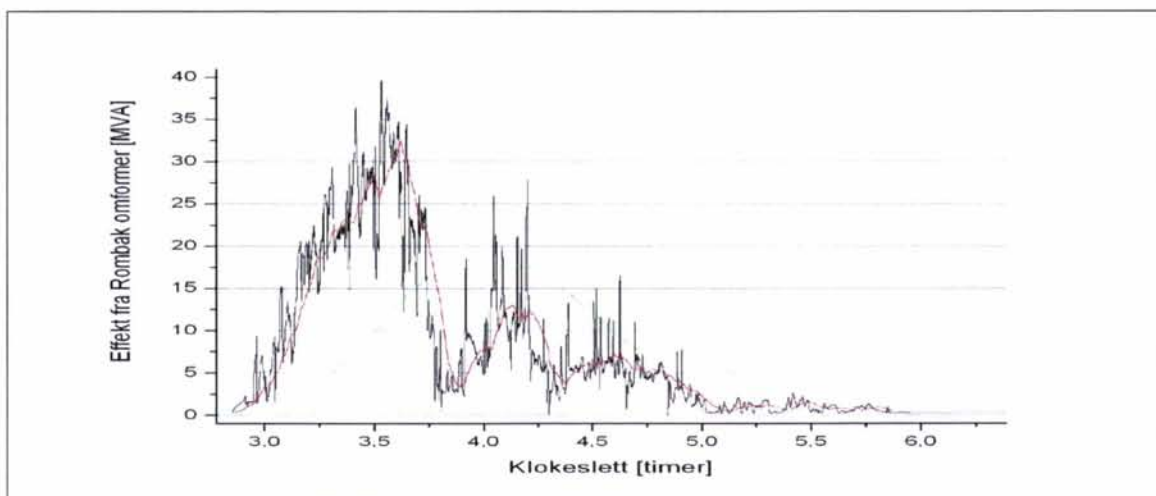
Figur 4-27 Tilbakelagt distanse for tog som kjører med 7 minutters avstand ut fra Narvik stasjon, og to motgående tog som kjører ut fra Stenbacken samtidig.. Simulering 1aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet.

4.5.2 Belastning av omformere

Tabell 4-16 nedenfor viser belastningen av omformerstasjonene under denne avvikssituasjonen. Som forventet er belastningen på Rombak omformerstasjon meget stor mens Tornehamn belastes moderat. Faktisk er belastningen for Rombak så stor at et slikt scenario kan føre til utfall av stasjonen, men som en ser av figur 4-28 oppstår denne store belastningen for 2-sekunders og 6-minuttersverdien meget kortvarig og det kan hende at disse store belastningstoppene kan tilskrives en for brutal kjørestil fra TracFeed sin "lokomotivfører". En legger også merke til at det er rundt klokken 03:30 når alle tog samtidig kjører med marsfart på matestrekningen at belastningen er størst, med en gang togene begynner å stoppe for å vente for krysninger faller belastningen drastisk.

Tabell 4-16 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpost avstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet.

Simulering 3aaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	39,650	81	32,453	90	17,800	69
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	19,966	34	14,785	34	8,563	40



Figur 4-28 MEAN-verdi av effekt avlevert fra Rombak omformerstasjon for 2-sekunders-, 6-minutters- og 1-timesverdi. Simulering 1aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet.

4.5.3 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-17 hvordan avgangene til kontaktledningen blir belastet for forskjellige tidsintervaller for RMS-verdier av strømmen. Her kan det se ut til at det for 6-minutters og 1-times verdi oppstår strømmer nesten opp mot grenseverdiene for vestlig avgang. For 6-minuttersverdien er belastningen oppimot 99 % og for 1-timesverdien 87 %, i henhold til teknisk regelverk skal marginen mot overbelastning være minst 5 %. Dette er ikke oppfylt her, men uansett kan det tenkes at i slike spesielle situasjoner må visse begrensinger for togene settes, for eksempel pådragsbegrensning.

Tabell 4-17 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet.

Simulering 1aaa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,696	1,690	1,608	1,388	0,910
Rombak øst	1,384	1,372	1,307	1,075	0,589

4.5.4 Spenningen for togene

Når det gjelder spenningen for togene viser tabell 4-18 at alle togene får akseptabel spenninger i og med at 12,0 kV er laveste tillatte spenning for denne situasjonen.

Tabell 4-18 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 1aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet.

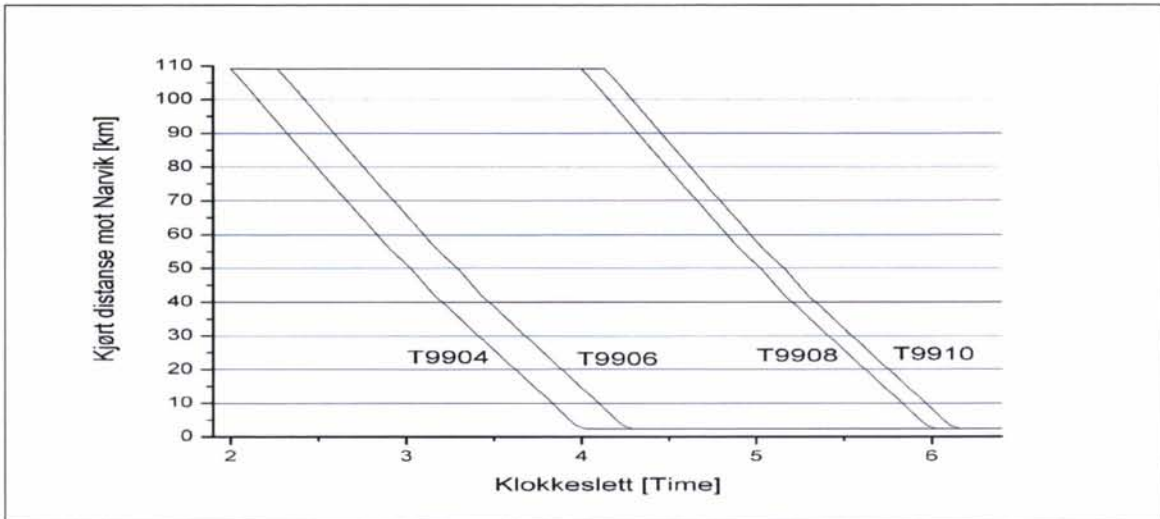
Simulering 1aaa		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
91	13,6	14,0
3001	12,6	12,9
3002	13,5	14,4
3004	13,1	14,5
4001	12,5	12,8
4003	12,9	13,3
9901	13,0	14,2
9903	13,0	14,2

4.6 Simulering 1aaaa – trafikkendring slik at tog kjører i "blokkpostavstand"

En nokså hyppig forekommende endring i trafikken på Ofofbanen er at malmtog gis anledning til å kjøre rett etter hverandre i "blokkpostavstand" også nedover mot Narvik. Dette vil bety meget store strømmer om togene gis anledning til å bremse regenerativt uten restriksjoner. En vil undersøke hvordan dette vil påvirke kontaktledningen. I den dimensjonerende ruteplanen som er simulert er det relativt lang tid mellom hvert malmtog som kjører ned til Narvik slik at situasjoner der malmtog kommer på "stasjonsavstand" eller "blokkpostavstand" faktisk ikke forekommer. Derfor kan begge disse tilfellene være interessante å undersøke. I simuleringen som er gjort her er det 16 minutter mellom togene når de kjører med "stasjonsavstand" og 8 minutter når de kjører i "blokkpostavstand".

4.6.1 Kjørt distanse

Nedenfor viser figur 4-29 de togene som er simulert og deres tilbakelagte strekning fra Stenbacken til Narvik. Denne avvikssituasjonen er lagt opp slik at det første toget starter ut fra Stenbacken klokken 02:00 og 16 minutter etterpå kommer neste tog i det som er antatt å være minste avstand slik at de kjører i "stasjonsavstand". Neste gruppe av tog kommer en god tid senere slik at strømbelastningen ikke påvirkes av den første gruppen av tog. Det er antatt av minste "blokkpostavstand" er 8 minutter.



Figur 4-29 Tilbakelagt distanse for tog 9904 og 9906 i "stasjonsavstand" (16 minutter mellom) og tog 9908 og 9910 med "blokkpostavstand" (8 minutter mellom). Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

4.6.2 Belastning av omformere

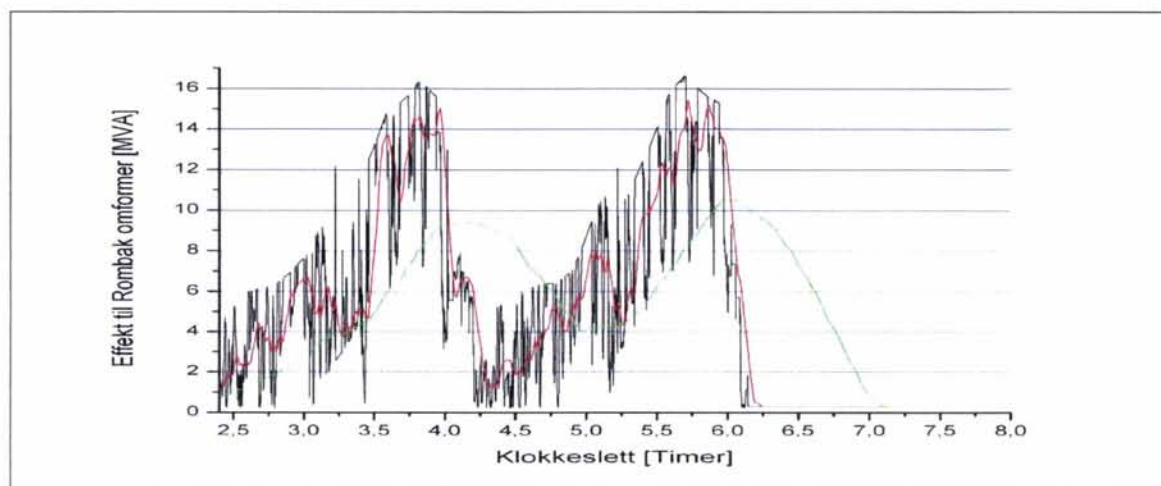
Nedenfor viser tabell 4-19 og tabell 4-20 belastningen for henholdsvis første belastningsperiode med tog 9904 og 9906 og andre periode med tog 9908 og 9910. Som en ser er forskjellen på de to periodene ikke særlig stor. Figur 4-30 viser tilsynelatende effekt for Rombak omformerstasjon som funksjon av tiden.

Tabell 4-19 Belastning av omformerstasjoner første periode med tog 9904 og 9906. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

Simulering 3aaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	16,649	34	15,417	43	10,553	41
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	18,048	30	16,387	37	10,442	48

Tabell 4-20 Belastning av omformerstasjoner andre periode med tog 9908 og 9910. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet.

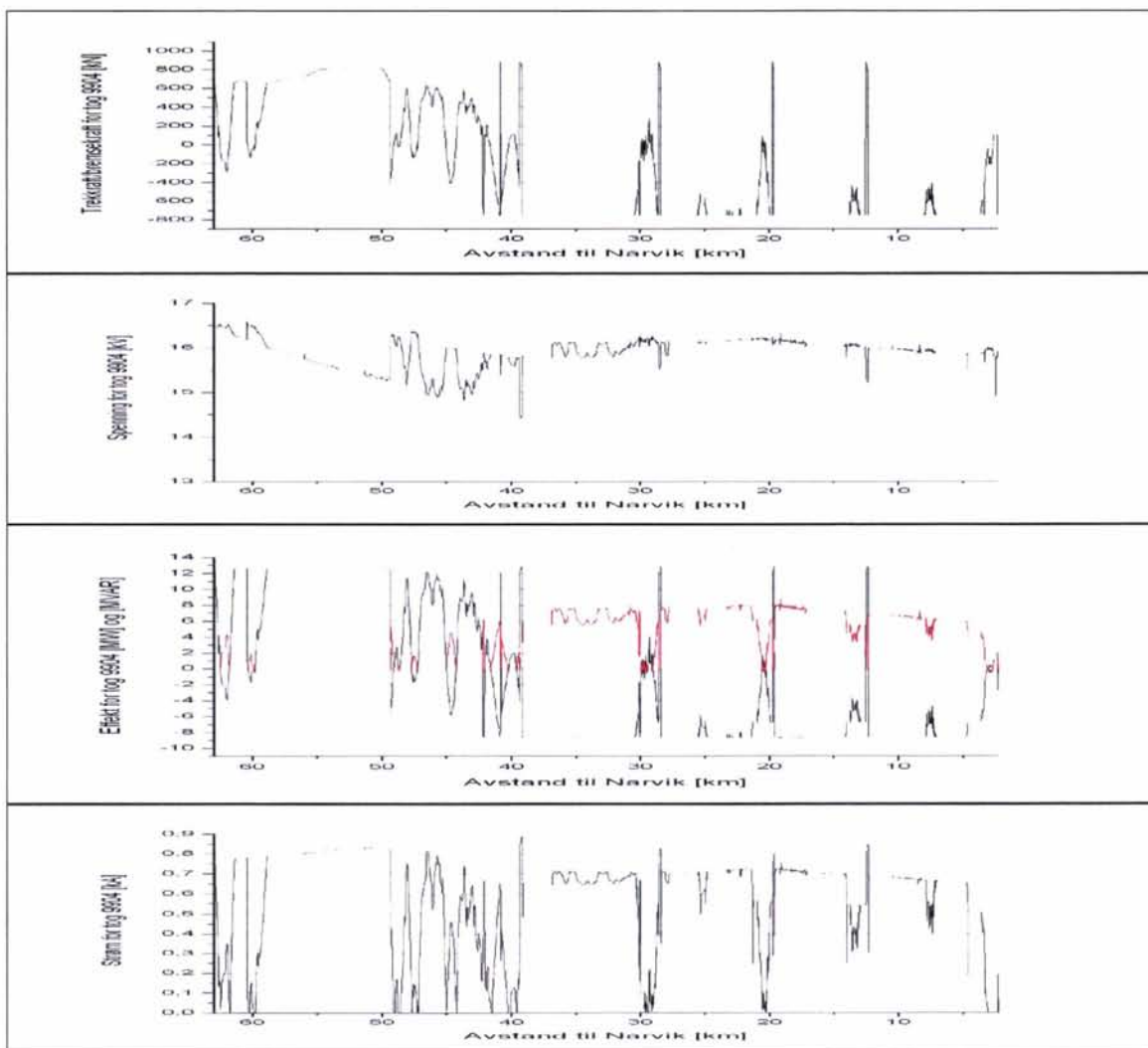
Simulering 3aaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	16,334	33	15,042	42	9,298	36
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	17,553	29	15,443	35	9,887	46



Figur 4-30 Belastning av Rombak omformerstasjon for de to tidsperiodene i samme figur. Svart strek viser 2-sekundersverdi, rød 6-minutters- og grønn 1-timesverdi. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

4.6.3 Strøm og effekt fra togene

Det kan være interessant å undersøke hvordan forskjellige parametere endres når toget bremses nedover mot Narvik og i figur 4-31 er en rekke forskjellige parametere undersøkt for tog 9904 og plassert i samme figur med felles x-akse. I det øverste bildet ser en at trekraften har negative verdier omtrent hele strekningen fra Bjørnfjell, her bremses toget elektrisk og ved innkjøring til stasjonene bremses toget hastigheten og akselererer når stasjonene er passert. Det andre bildet viser at spenningen holder seg jevnt høyt og toget passer selv på å regulere effekt faktoren slik at spenningen ikke skal bli for stor. Toget gjør dette ved å levere ut induktiv reaktiv effekt slik som det tredje bildet viser. Det fjerde og siste bildet viser at strømmen varierer en del og altså er avhengig av både bremskraft og spenning på kontaktledningen.



Figur 4-31 Trekraft, spenning, strøm og effekt (sort strek for aktiv og rød strek for reaktiv effekt) for tog 9904 til Narvik. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

4.6.4 Belasting av kontaktledningen

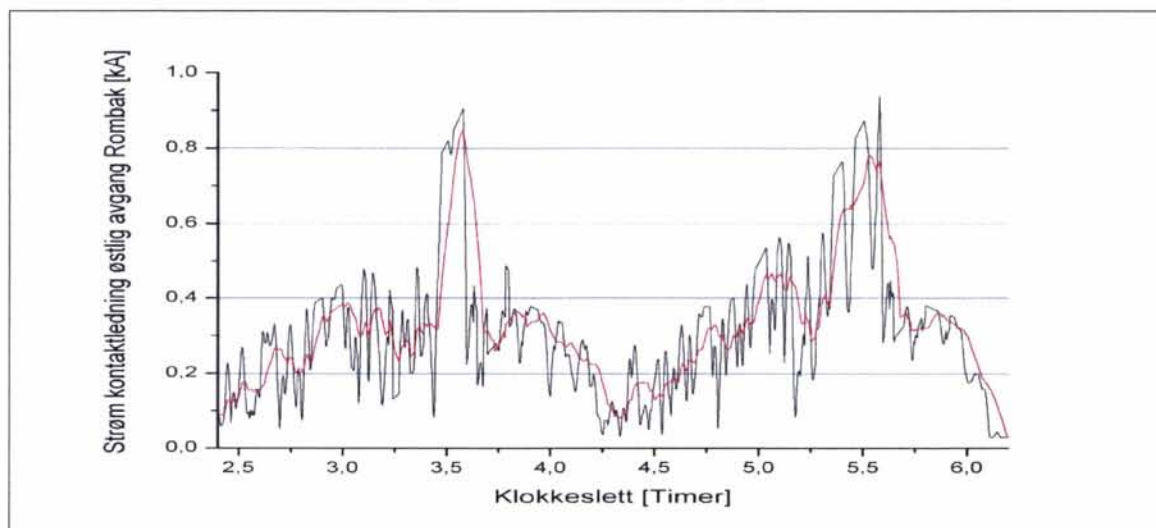
Nedenfor viser tabell 4-21 og tabell 4-22 strømbelastningen på avgangen i vestlig og østlig fra Rombak omformerstasjon for de to gruppene av tog kjører forbi. Som en ser er belastningen på avgangene nokså like for de to periodene, men noe større for den andre perioden hvor belastningen for 6-minuttersverdien blir 92 % for vestlig avgang fra Rombak omformerstasjon. I figur 4-32 kan en se hvordan strømmen på kontaktledningen er for de to gruppene av tog. Av figuren kan det se ut som om belastningen med tog med 8 minutter mellom gir noe mer intens belastning.

Tabell 4-21 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 3001 og 4001 kjører. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

Simulering 1aaaa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,375	1,374	1,353	1,287	0,613
Rombak øst	0,917	0,915	0,904	0,849	0,423

Tabell 4-22 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 9901 og 9903 kjører. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

Simulering 1aaaa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	1,368	1,367	1,362	1,294	0,665
Rombak øst	0,976	0,974	0,937	0,780	0,482

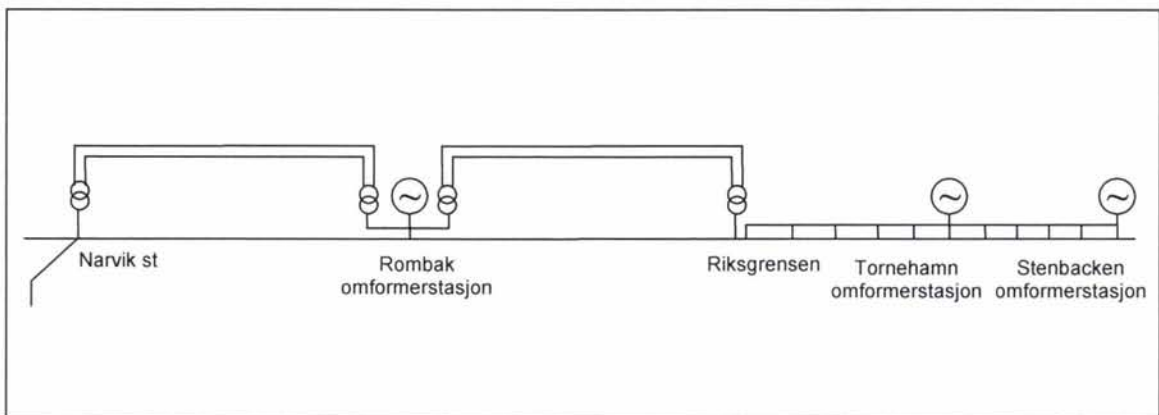


Figur 4-32 Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med forsterkningsledning og mateledningen utkoblet

4.7 Simulering 2 – banestrømforsyning med fjernledning på 66 kV

Simulering 2 for alternativ 2 gjelder når dagens mateledning benyttes som fjernledning med innmatetransformatorer ved Narvik og Bjørnfjell, se figur 4-33 nedenfor. Det er forutsatt en overføringsspenning på 66 kV og at det på svensk side bygges AT-system frem til Riksgrensen. Simulering 2 gjelder for dimensjonerende ruteplan og normal driftsituasjon, som for simulering 1.

Svakheten med dette alternativet er at når kontaktledningsanlegget ikke har forsterkningsleder kan strømbelastningen bli for stor i visse avvikssituasjoner. Flere av togene trekker strømmer mellom 500 og 800 A mer eller mindre kontinuerlig, se appendiks B der en del tog er undersøkt. I en situasjon med utkobling av kontaktledningen og dermed ensidig mating vil dette bli strømmen på kontaktledningen frem til toget kommer frem til bruddstedet. Kan det være to tog inne på strekningen samtidig vil strømmen bli tilsvarende stor. På grunn av dette er ikke dette alternativet undersøkt videre, annet enn for en unormal driftsituasjon som forventes å oppstå relativt hyppig for å se hvilke marginer som er mot overbelastning av kontaktledningen. Denne simuleringer er kalt 2aaa og scenariet er en situasjon med tog i "blokkpostavstand" ved oppstart av flere tog etter en blokkade.



Figur 4-33 Enlinjeskjema for alternativ 2 med fjernledningsystem som gjør bruk av dagens høyspentlinje (mateledning) og transformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. AT-system på svensk side forutsettes noe som vil gi en meget stiv banestrømforsyning.

4.7.1 Belastning av omformere

Nedenfor viser tabell 4-23 belastningen av omformerstasjonene, og sammenlignet med belastningen for simulering 1 med konvensjonelt system, se avsnitt 4.1.3, ser en belastningen av omformerstasjonene nå er litt mindre.

Tabell 4-23 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	22,167	45	16,729	47	12,140	47
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	22,225	37	14,751	34	7,833	36

4.7.2 Belastning av transformatorer

Av tabell 4-24 nedenfor ser en at belastningen av transformatorene er meget moderat i forhold til innsatt ytelse. Unormale driftsituasjoner kan allikevel gjøre såpass store transformatorer ønskelig.

Tabell 4-24 Belastning av transformatorer for fjernledningen. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for times verdi er angitt, men ikke belastningsprosent for andre størrelser da disse ikke er kjent. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		10 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Narvik	10	10,116	-	4,890	-	3,192	32
Rombak vest	15	10,346	-	4,937	-	3,205	21
Rombak øst	15	6,978	-	4,571	-	2,733	18
Bjørnfjell	10	7,035	-	4,947	-	2,738	27

4.7.3 Belastning av fjernledning

I avsnitt 2.3.5 er kontinuerlig høyeste belastningsstrøm for høyspentlinjens ledere funnet til å være 550 A. Med den belastningen som er gjengitt i tabell 4-25 vil belastningen bli langt under denne grensen.

Tabell 4-25 Høyeste belastningsstrøm på fjernledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2					
KL avgang ved omformerstasjon	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	0,173	0,153	0,104	0,083	0,055
Rombak øst	0,111	0,110	0,085	0,078	0,047

4.7.4 Levert effekt og energi fra trefasenettet

Tabell 4-26 nedenfor viser at tapene med fjernledning er noe redusert med fjernledning i forhold til konvensjonelt anlegg i simulering 1, se avsnitt 4.1.4, men forskjellene er ikke store.

Utvekslingen av energi over Riksgrensen er undersøkt og 25,72 MWh går mot Ofofbanen, 36,42 MWh fra og altså 10,70 MWh overføres netto fra Rombak omformerstasjon til Malmbanan i løpet av de simulerte 24 timer.

Tabell 4-26 Levert effekt for Rombak omformerstasjon, levert og avgitt energi, samt tap for transmisjon og totale tap i omformer i absolutte og relative verdier. Maksimal 1-minuttsverdi og høyeste 1-timesverdie (MEAN) for aktiv effekt er vist. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2					
Omformer stasjoner	Effekt [MW]		Energi inn/ut/sum [MWh]	Tap transmisjon [MWh]/[%]	Totale tap [MWh]/[%]
	Maks	Middel			
Rombak	14,89	8,89	89,94/-8,58/81,36	5,39/3,11	24,16/12,60

4.7.5 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-27 at belastningen av kontaktledningen blir nokså høy og bare så vidt innenfor belastningsgrensene. Høyeste belastning oppstår for vestlig avgang fra Rombak der 6-minuttersverdien er belastet oppimot 93 % av forutsatt høyeste grenseverdi. Dermed kan det se ut som om forsterkningsledere bør innføres for å tilfredsstille normal belastningssituasjon og endringer som ofte kan forventes å forekomme for alternativ 2. Med forsterkningsledning blir marginene mot overlast store.

Tabell 4-27 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra transformatorene for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

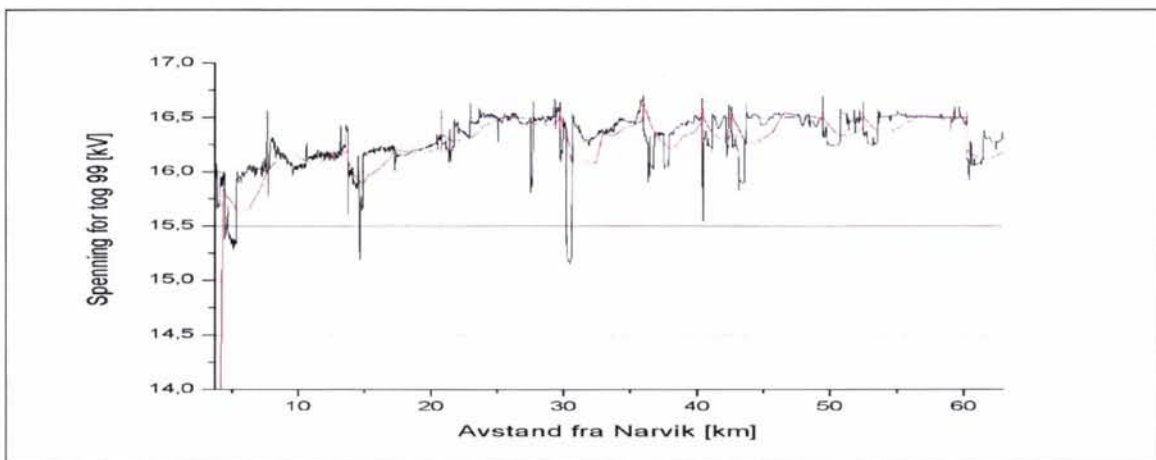
Simulering 2					
KL avgang ved omformerstasjoner	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,733	0,648	0,440	0,314	0,197
Rombak vest	1,285	1,267	0,814	0,747	0,450
Rombak øst	0,854	0,846	0,744	0,649	0,402
Rombak sum	1,389	1,287	1,119	1,034	0,764
Bjørnfjell vest	1,050	0,965	0,696	0,606	0,338
Bjørnfjell øst	0,919	0,886	0,673	0,604	0,445
Thornehamn vest	1,232	1,223	1,036	0,785	0,493

4.7.6 Spenningen for togene

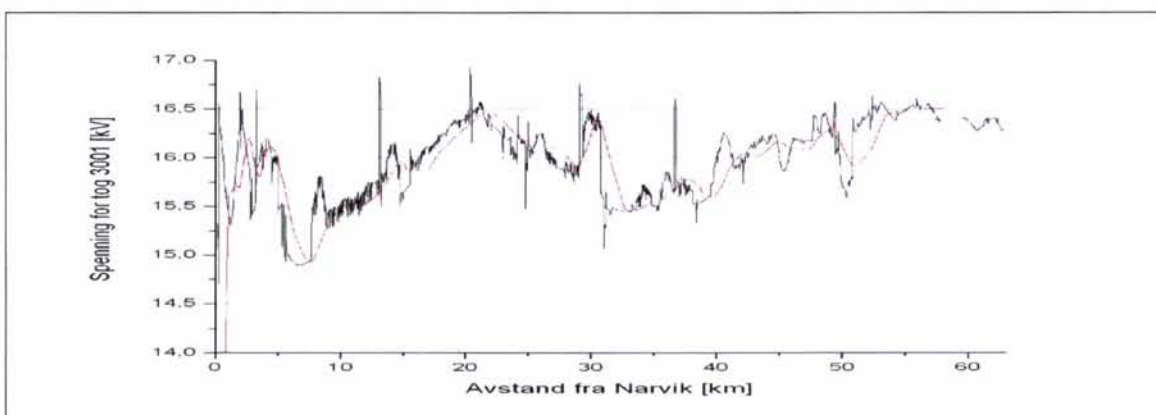
Tabell 4-28 nedenfor viser ikke overraskende at alle tog får meget akseptable spenninger. I figur 4-34 til figur 4-41 er spenningen for de samme utvalgte togene som i simulering 1 vist.

Tabell 4-28 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

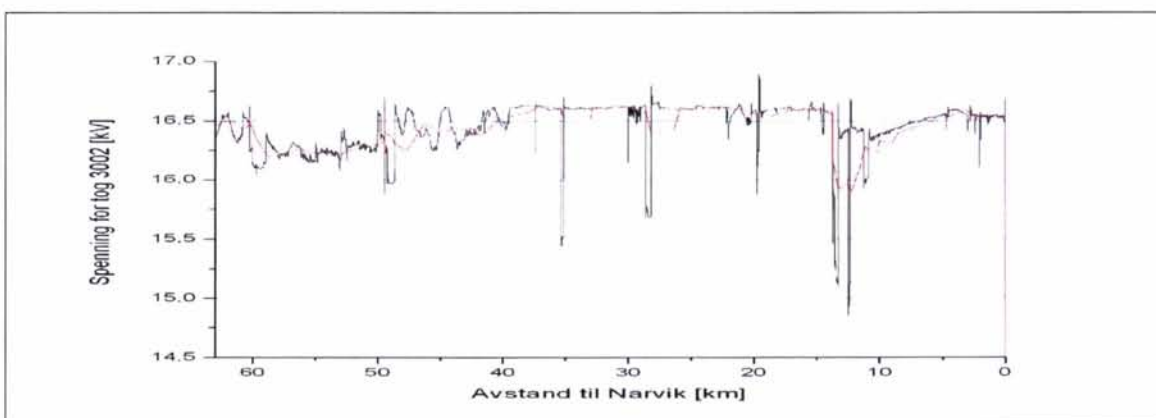
Simulering 2		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	15,2	15,9
93	15,5	16,0
94	15,2	16,0
95	15,1	15,9
96	16,0	16,2
99	15,2	15,9
3001	14,9	14,9
3002	15,2	15,9
3003	14,8	14,8
3004	15,5	16,1
3005	14,9	14,9
3006	15,1	15,9
3007	14,9	14,9
3008	15,2	15,8
3009	14,9	14,9
3010	15,2	16,0
3020	14,9	15,8
3021	14,8	14,9
3022	15,3	16,0
3023	14,9	15,0
4004	15,3	15,9
4005	14,9	14,9
4016	15,4	15,9
4019	14,8	14,8
4025	14,9	15,0
4026	15,4	16,0
6070	14,9	15,9
6071	14,9	14,9
9901	15,0	15,0
9903	15,3	15,6
9904	15,3	15,7
9905	14,0	15,5
9906	14,7	15,7
9907	15,3	15,8
9908	15,2	15,9
9909	15,0	15,7
9910	15,3	16,0
9911	15,6	15,8
9912	15,4	16,0
9913	15,1	15,8
9914	15,4	15,7
9915	15,2	15,8
9916	15,3	15,6
9917	15,6	15,7
9918	15,5	16,0
9919	15,6	15,6
9920	15,1	15,7
9922	14,3	15,5



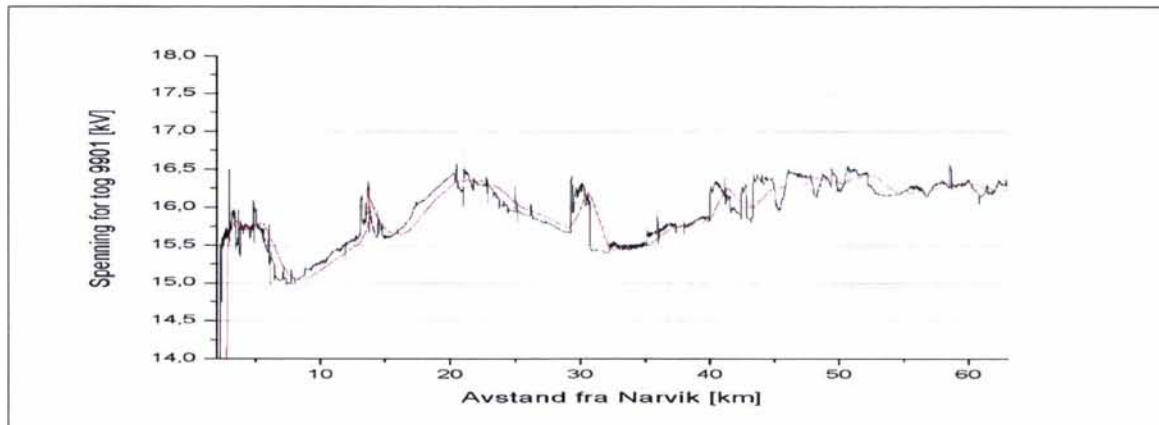
Figur 4-34 Spenningen for østgående passasjertog 99 med seks vogner. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjerntledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



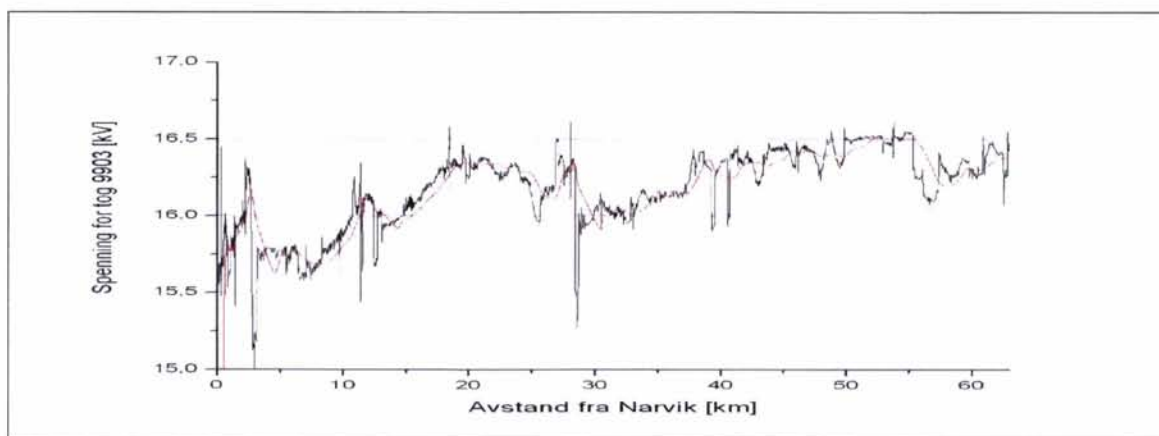
Figur 4-35-36 Spenningen for østgående godstog 3001 med multipl Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjerntledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



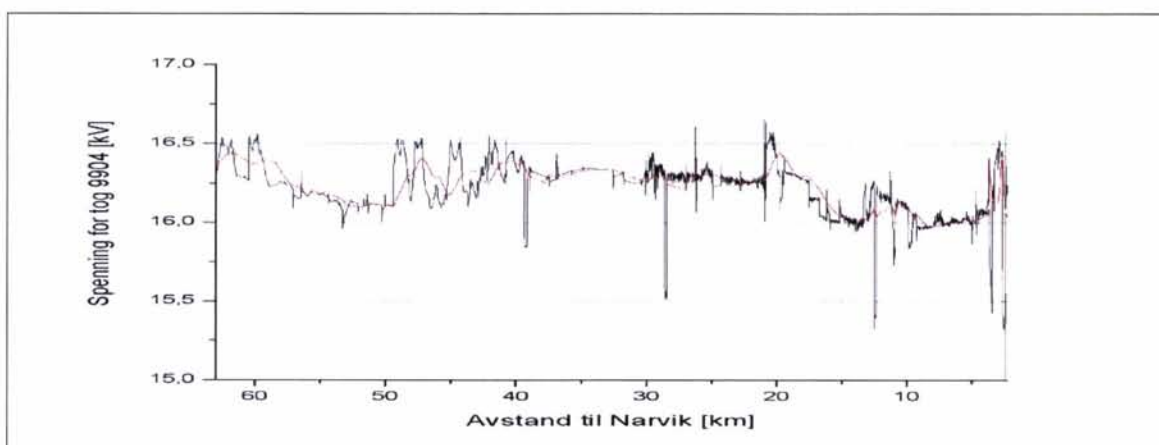
Figur 4-37 Spenningen for vestgående godstog 3002 med multipl Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjerntledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-38 Spenningen for østgående malmtog 9901 med olivin og 4240 tonn lastvekt. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-39 Spenningen for østgående tomtog 9903. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-40 Spenningen for vestgående malmtog 9904. Simulering 2 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).

4.8 Simulering 2aaa – trafikkendring slik at 6 tog kjører i "blokkpostavstand" fra Narvik og 2 tog kommer imot

For å undersøke noe mer vedrørende høye belastningsstrømmer i en situasjon som kan oppstå relativt hyppig gjøres simuleringen med mange tog som kjører med kort avstand mellom også for alternativ 2.

4.8.1 Belastning av omformere

Nedenfor viser tabell 4-29 belastningen av omformerstasjonene under denne spesielle avvikssituasjonen. Gjennomgående blir belastningen for Rombak omformerstasjon noe mindre enn i simulering 1aaa, se avsnitt 4.5.2, men dette kan bero på at med forsterkning av banestrømforsyningen også på svensk side vil Tornehamn omformerstasjon kunne bidra noe ved denne hendelsen.

Tabell 4-29 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand", dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2aaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	35,427	72	28,540	79	16,226	63
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	19,815	33	15,563	35	8,903	41

4.8.2 Belastning av transformatorer

Nedenfor ser en av tabell 4-30 at belastningen av transformatorene er moderat i forhold til innsatt ytelse.

Tabell 4-30 Belastning av transformatorer for fjernledningen. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for times verdi er angitt, men ikke belastningsprosent for andre størrelser da disse ikke er kjent. Simulering 2aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand", dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2aaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		10 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Narvik	10	10,5059	-	7,27953	-	4,06710	-
Rombak vest	15	10,7466	-	7,38833	-	4,09913	-
Rombak øst	15	6,12396	-	4,33625	-	2,85435	-
Bjørnfjell	10	6,15311	-	4,51990	-	2,85602	-

4.8.3 Belastning av fjernledning

Hvis høyeste kontinuerlig belastningsstrøm for høyspentlinjens ledere er 550 A, ser en av tabell 4-31 at belastningen selv for denne situasjonen er helt minimal.

Tabell 4-31 Høyeste belastningsstrøm på fjernledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand", dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2aaa					
KL avgang ved omformerstasjon	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest	0,188	0,184	0,158	0,125	0,078
Rombak øst	0,100	0,098	0,088	0,074	0,050

4.8.4 Belastning av kontaktledningen

I tabell 4-32 nedenfor er strømmen til avgangene til kontaktledningen ved omformerstasjoner og transformatorstasjoner vist. Spesielt for strekingen mellom Narvik og Rombak blir belastningen stor og forsterkingsleder er nødvendig. Med forsterkningsleder er 6-minuttersverdien for vestlig avgang fra Rombak belastet 70 % av forutsatt verdi og marginene mot overlast er tilstrekkelig. Imidlertid er det ikke gunstig med så stor belastning på vestlig avgang fra Rombak, der belastningsgraden blir **105 %**.

Tabell 4-32 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 2aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand", dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2aaa					
KL avgang	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,490	0,486	0,394	0,295	0,193
Rombak vest	1,340	1,274	1,128	0,985	0,631
Rombak øst	1,071	1,027	0,999	0,824	0,457
Bjørnfjell vest	0,874	0,842	0,799	0,511	0,336
Bjørnfjell øst	0,937	0,903	0,803	0,691	0,440
Tornehamn vest	1,461	1,433	1,370	1,212	0,675

4.8.5 Spenningen for togene

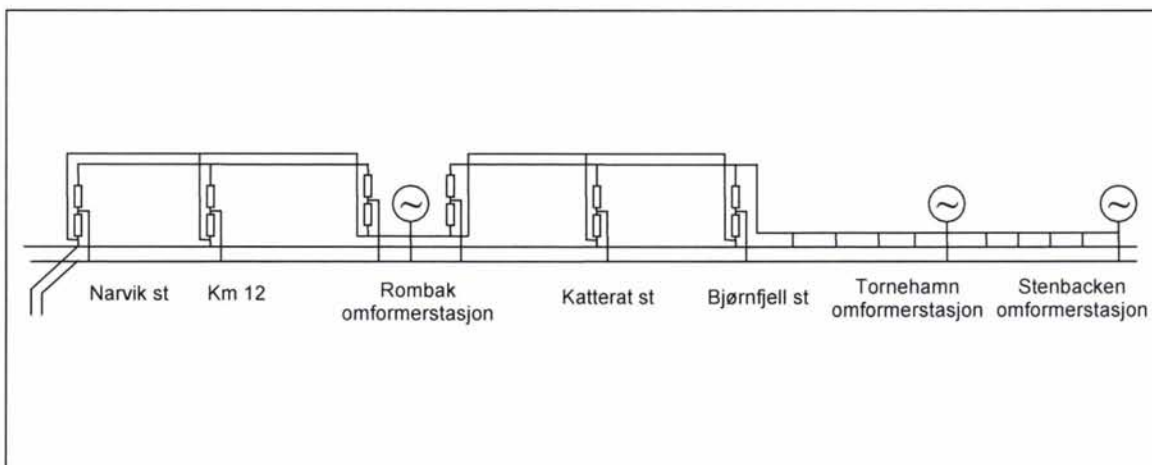
Når det gjelder spenningen for togene viser Tabell 4-33 at alle togene får akseptabel spenning i og med at 12,0 kV er laveste tillatte spenning for denne situasjonen.

Tabell 4-33 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 2aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand", dimensjonerende ruteplan og fjernledning mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Innmatetransformatorer ved Narvik, Rombak og Bjørnfjell.

Simulering 2aaa		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
91	14,7	14,7
3001	13,4	14,0
3002	14,9	15,5
3004	14,8	15,6
4001	13,0	13,7
4003	13,8	14,1
9901	14,9	15,0
9903	15,3	15,3

4.9 Simulering 3 – Fjernledningssystem med autotransformatorer med negativ- og positivleder på høyspentlinjen

Alternativ 3, se figur 4-41, er et fjernledningssystem med autotransformatorer for innmating istedenfor toviklingstransformatorer. Det forutsettes å benytte dagens høyspentlinje for fremføring av NL og PL, og er dermed ikke tenkt å skulle føre noen ekstra ledere langs med kontaktledningsanlegget. Autotransformatorene står plassert som vist nedenfor ved Narvik stasjon, ved km 12 (noe nedenfor Straumsnes stasjon), ved Rombak omformerstasjon, ved Katterat stasjon og på Bjørnfjell stasjon. Overføringsspenningen på NL/PL er +15/-15 kV. Ved Rombak omformerstasjon er det forutsatt å være nødvendig med fire autotransformatorer og ved Bjørnfjell to stykker. Simulering 2 gjelder for dimensjonerende ruteplan og normal driftssituasjon, som for simulering 1.



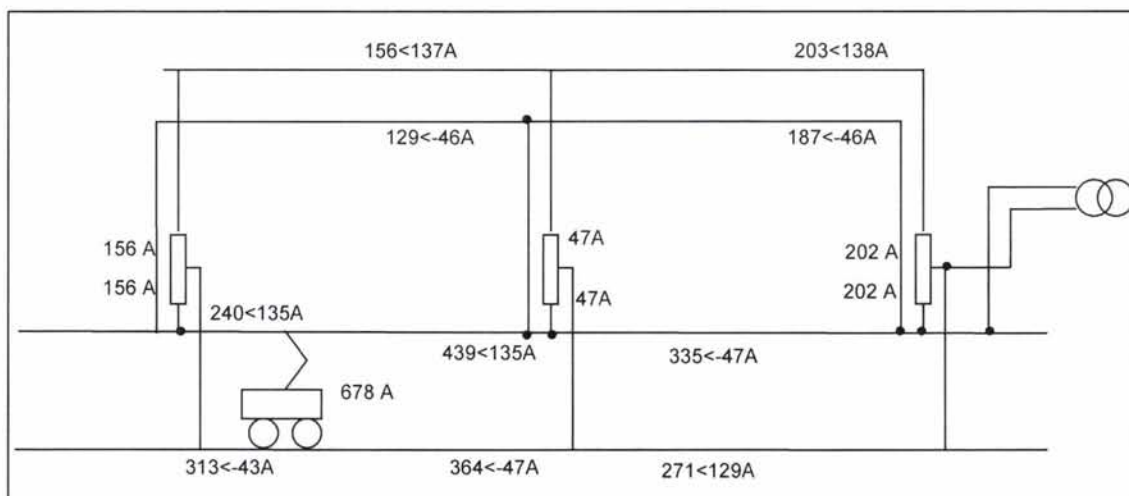
Figur 4-41 Enlinjeskjema for alternativ 3 med fjernledningssystem med autotransformatorer som gjør bruk av dagens høyspentlinje (mateledning) for negativ- og positivleder. Autotransformatorer ved Narvik, noe nedenfor Straumsnes (ca ved km 12), Rombak, Katterat og Bjørnfjell. AT-system på svensk side forutsettes, noe som vil gi en meget stiv banestrømforsyning.

4.9.1 Undersøkelse av modell for fjernledning og autotransformatorer

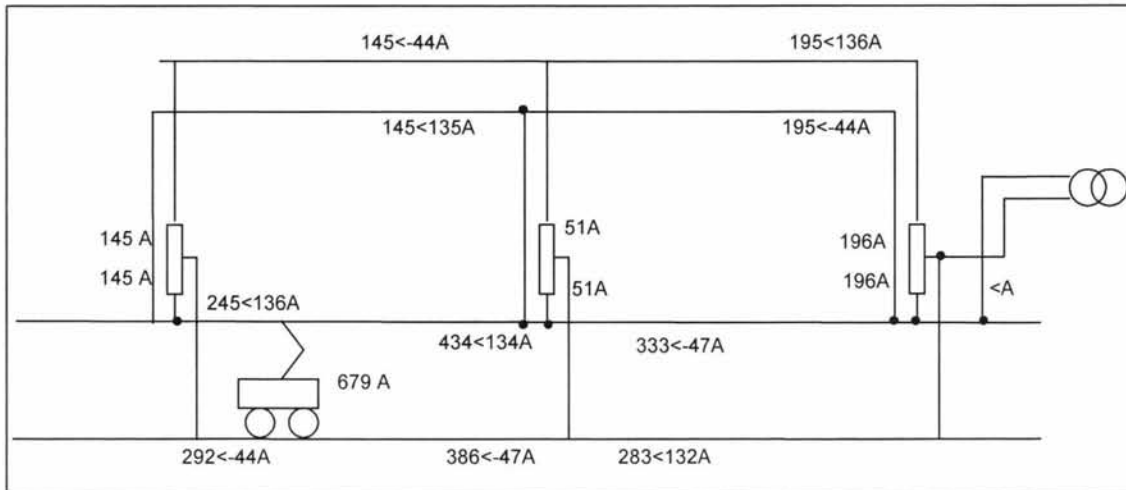
For modellen som er valgt for simuleringene for autotransformatorer benyttes linjer med resistans og reaktans for hver av faselederne og ikke per fase representasjon som for alternativ 1 og 2. Per fase representasjon er det vanlige for alle simuleringer i SIMPOW og det vil da være systemets plussfølgeimpedans som gjelder for beregninger når en ser på symmetrisk belastingsstrøm. Ved å benytte modell med linjer for hver av faselederne får en brukt den ferdige modellen for autotransformatorer, noe en ønsker for å finne belastningen på disse og for å angi riktig impedans.

Problemet med denne modellen er at gjensidig impedans blir vanskelig å inkludere, men i dette spesielle tilfellet med bruk av høyspentlinjen som fjernledning er avstanden mellom kontaktledningen og denne så stor at magnetisk kobling ved symmetriske strømmer ikke er av betydning. Det er bare gjensidig induktans mellom hver av faselederne (NL og PL) i fjernledningen, og kontaktledningsanleggets kontaktråd og bærewirer og skinner, som har betydning og denne kan inkluderes som et tillegg til egenreaktansen til hver av lederne. Et annet forhold er at gjensidig induktans vil gjøre at det vil tilstrebes å gå samme strøm i NL/PL og i KL/RR, denne effekten kan en ikke få med denne modelleringen i SIMPOW når begge faselederne er representert. Derfor er det gjort en undersøkelse der en kjører simuleringen og ser på strømmene som går i systemet for et enkelt og oversiktlig tilfelle med bare et tog mellom Narvik og Rombak, se figur 4-42. Det ser ut til å være til dels veldig store forskjeller mellom strømmene som går i systemet og spesielt er det påfallende stor forskjell mellom NL og PL på fjernledningen i seksjonen med tog.

Får å få en mer riktig strømfordeling settes det inn fiktive sugetransformatorer for lederne i fjernledningen og simuleringen gjøres på nytt. Resultatet er vist i figur 4-43. Som en ser blir strømfordelingen nå helt lik for NL og PL i fjernledningen, mens det fortsatt er en del forskjell mellom KL og skinne. Imidlertid vil det være en del strøm som "lekker" ut ved at sporvekselvarme og lignende belastninger er satt inn som shuntimpedanser og disse tar ut strøm direkte fra KL som går i retur via "felles jord" i modellen.



Figur 4-42 Strøm i fjernledningssystemet med autotransformatorer når tog 3001 er ved km 6,9 og klokken er 24:41 simulering 3a. Polar representasjon for strømmene med amplitude etterfulgt av vinkel etter "<" tegnet. Ikke fiktive sugetransformatorer innsatt.



Figur 4-43 Strøm i fjernledningssystemet med autotransformatorer når tog 3001 er ved km 6,9 og klokken er 24:41 for simulering 3a. Polar representasjon for strømmene med amplitude etterfulgt av vinkel etter "<" tegnet. Fiktive sugetransformatorer innsatt.

4.9.2 Belastning av omformere

I tabell 4-34 nedenfor er effektopptaket for Rombak og Tornehamn omformerstasjoner vist. Som en ser er belastningen ikke særlig endret fra simulering 1, se avsnitt 4.1.3 og simulering 2, se avsnitt 4.7.1.

Tabell 4-34 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	21,968	46	17,229	48	12,339	48
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	21,788	37	14,465	33	7,662	35

4.9.3 Belastning av autotransformatorer

Nedenfor viser tabell 4-35 at belastningsgraden for autotransformatorene er minimal med innsatt enheter på 6 MVA (200 A). En kunne også vurdert enheter på 3 MVA, men marginene mot overbelastning er da atskillig mindre spesielt for belastninger over en time.

Ved avgangene i Rombak er det planlagt grupper på to og to parallellkoblede transformatorer, men en kan ut fra belastningen her spørre seg om det er nødvendig. Riktignok vil ytelsen i omformerstasjonen i så fall komme til å bli svært mye høyere enn samlet ytelse for autotransformatorene, men dette har jo også sammenheng med roterende omformeres sviktintensitet og utetid som jo er høyere enn for transformatorer. En annen grunn for å velge å ha flere autotransformatorer plassert ved Rombak omformerstasjon er at ved et eventuelt havari på en av de andre enhetene kan disse fungere som reserve.

For Bjørnfjell transformatorstasjon er det satt inn så mye som 2 x 6 MVA ytelse, men om overgangen til AT-systemet på svensk side kan skje via NL og PL og ikke på 15,0 kV nivå skulle det ikke være nødvendig med mer enn én enhet her. Dette blir undersøkt og kommentert senere i rapporten.

Tabell 4-35 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Narvik	200	0,387	6	0,304	20	0,207	41	0,108	42
Straumsnes	200	0,303	5	0,219	15	0,200	40	0,090	35
Rombak vest	400	0,347	3	0,272	9	0,223	22	0,146	28
Rombak øst	400	0,252	2	0,221	7	0,209	21	0,119	23
Katterat	200	0,343	6	0,270	18	0,245	25	0,114	44
Bjørnfjell	400	0,258	2	0,220	7	0,200	20	0,122	23

4.9.4 Belastning av negativ- og positivleder på høyspentlinjen

Nedenfor viser tabell 4-36 at strømbelastningen for lederne i høyspentlinjen er små og langt under høyeste driftsstrøm på 550 A, se for øvrig avsnitt 4.7.3.

Tabell 4-36 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3					
KL avgang ved omformerstasjon	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest NL/PL	0,354	0,321	0,222	0,231	0,146
Rombak øst NL/PL	0,253	0,249	0,214	0,184	0,117

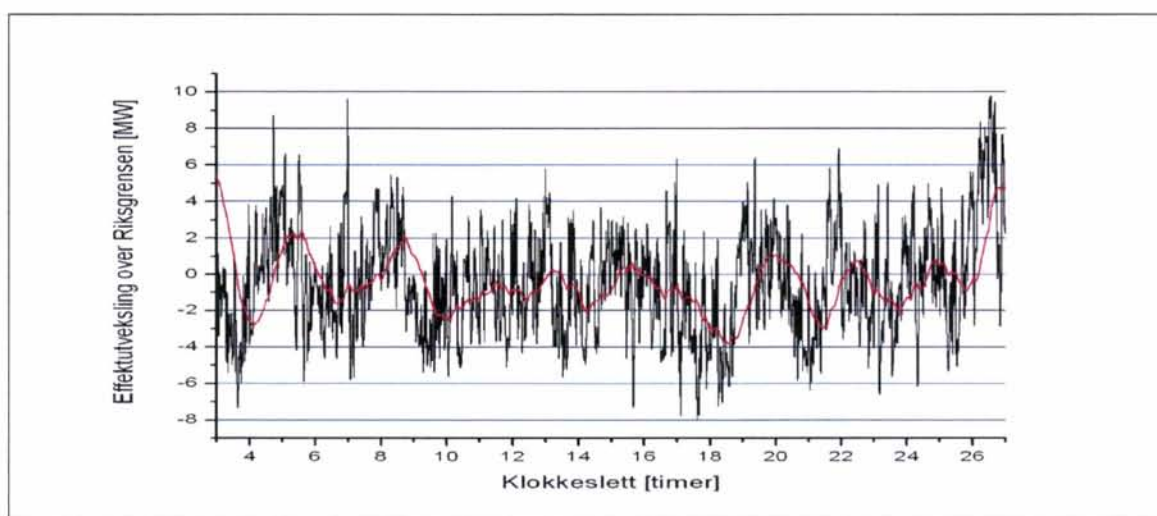
4.9.5 Levert effekt og energi fra trefasenettet

Tabell 4-26 nedenfor viser at tapene er noe redusert med fjernledningssystem med autotransformatorer i forhold til konvensjonelt anlegg i simulering 1, se avsnitt 4.1.4.

Uttekslingen av energi over Riksgrensen er undersøkt og 25,40 MWh går mot Ofotbanen, 37,58 MWh fra og altså 12,18 MWh overføres netto til Malmbanan i løpet av de simulerte 24 timer. I figur 4-44 er effektutvekslingen over Riksgrensen vist time for time for MEAN-verdi midlet over et minutt og en time, positive verdier indikerer effekt fra Malmbanan til Ofotbanen. Sammenlignet med simulering 1 ser det ut til at det nå er større effekter som overføres over grensen, noe som kan forventes ved at den elektriske avstanden mellom omformerstasjoner og mellom omformerstasjoner og tog er forkortet. Netto energi overført fra Malmbanan til Ofotbanen er økt fra 7,6 MWh i simulering 1 til 12,18 MWh her.

Tabell 4-37 Levert effekt for Rombak omformerstasjon, levert og avgitt energi, samt tap for transmisjon og totale tap i omformer i absolutte og relative verdier. Maksimal 1-minuttsverdi og høyeste 1-timesverdi (MEAN) for aktiv effekt er vist. Simulering 3 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3					
Omformer stasjon	Effekt [MW]		Energi inn/ut/sum [MWh]	Tap transmisjon [MWh]/[%]	Totale tap [MWh]/[%]
	Maks	Middel			
Rombak	14,70	8,91	91,48/-8,45/83,04	4,78/2,75	24,31/12,60



Figur 4-44 Utvekslet aktiveffekt over riksgrensen, MEAN-verdi for 1 minutt (sort) og 1 time (rød) der positive verdier indikerer effekt fra Malmbanan til Ofofbanen. Simulering 3 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

4.9.6 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-38 at belastningen av kontaktledningsanlegget er nokså moderat med fjernledningssystem med autotransformatorer. For 6-minuttersverdien er det vestlig avgang ved Straumsnes som får høyest verdi der belastningen er 82 % av tillatt verdi for kontaktledning uten forsterkningsleder. Marginen mot overbelastning er 18 % (marginen bør være minst 15 %), men en skulle ha ønsket en enda større margin.

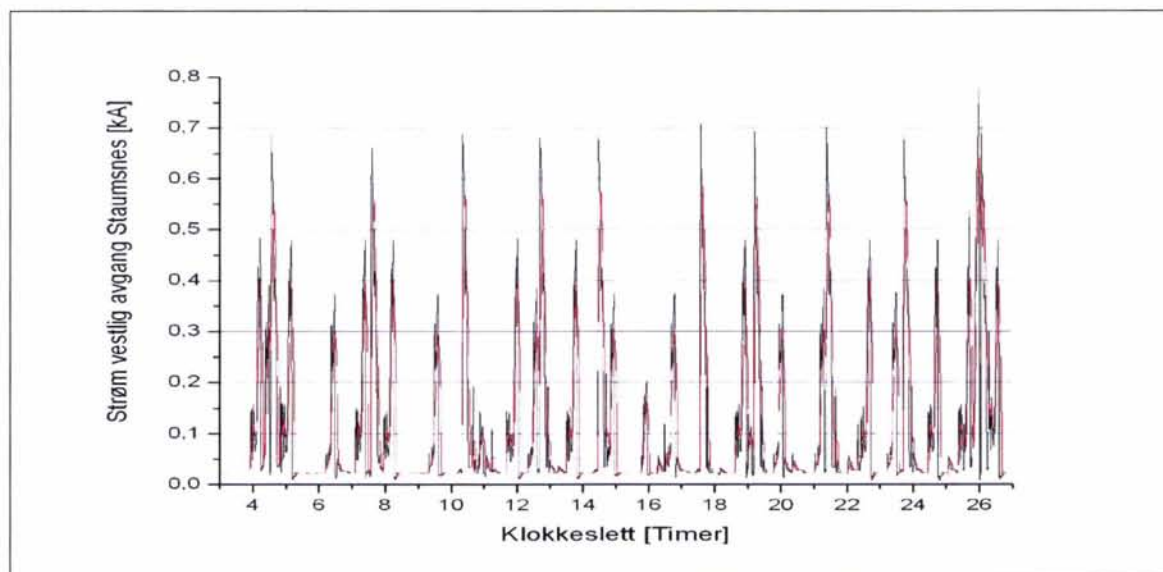
For å undersøke litt mer vedrørende belastningsstrøm er strømmen for vestlig avgang fremstilt for 1- og 6-minuttersverdi av strømmen (RMS) i figur 4-45 nedenfor. Av denne ser en at den høye 1-minuttersverdien på 780 A oppstår bare meget kortvarig omtrent klokken 01:00 og bare en gang pr døgn, de høyeste verdiene for resten av døgnet er rundt 700 A. Også for 6-minuttersverdien oppstår den høye verdien på 657 A på denne tiden og for resten av døgnet oppstår lignende kortvarige belastninger på under 600 A. Det ser også ut til at alle de korte belastningstoppene ledsages av en belastningsfri periode på anslagsvis 20 minutter, men ofte mer. Dette understøttes også av at høyeste 1-timesverdi er såpass lav. En skulle dermed kunne anta at det er såpass lange avkjølningsperioder at kontaktledningen aldri skulle kunne oppnå særlig høye temperaturer. Og nettopp det er en fordel med fjernledningssystem med autotransformatorer at en får mange innmatepunkter på kontaktledningen, og at det da oppstår

relativt lange perioder der de mellomliggende seksjonene blir belastet moderat når det ikke er tog inne på disse.

På østlig avgang mot Riksgrensen blir kontaktledningen belastet mye, men så blir også all effekten i modellen som er benyttet omformet til 15 kV i overføringen til Banverkets AT-system. Det vil være å foretrekke om en isteden lar NL og PL lederne fra høyspentlinjen forlenges helt inn til Riksgrensen og tilkobles de tilsvarende lederne i det Svenske AT-systemet. Lederne for NL og PL kan monteres på kontaktledningsmastene som i AT-systemet under planlegging for resten av landet. Strømverdiene her må divideres på 2 for å få riktig strøm for spenningsnivået på 30 kV.

Tabell 4-38 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra autotransformatorene for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,484	0,462	0,437	0,320	0,177
Straumsnes vest	0,804	0,799	0,780	0,657	0,358
Straumsnes øst	0,695	0,691	0,672	0,562	0,310
Rombak vest	1,147	1,131	0,769	0,616	0,345
Rombak øst	0,773	0,764	0,699	0,542	0,298
Rombak sum	1,385	1,287	1,123	1,070	0,781
Katterat vest	0,781	0,773	0,632	0,503	0,258
Katterat øst	0,675	0,670	0,650	0,512	0,284
Bjørnfjell vest	1,048	0,969	0,694	0,557	0,291
Bjørnfjell øst	0,966	0,935	0,688	0,657	0,473
Tornehamn vest	1,225	1,215	1,030	0,749	0,517



Figur 4-45 Belastningsstrøm på kontaktledningen i vestlig retning fra Straumsnes autotransformator for tidsperiode på 1-minutt (sort strek) og 6-minuttresverdi (rød strek). Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

4.9.7 Spenning for togene

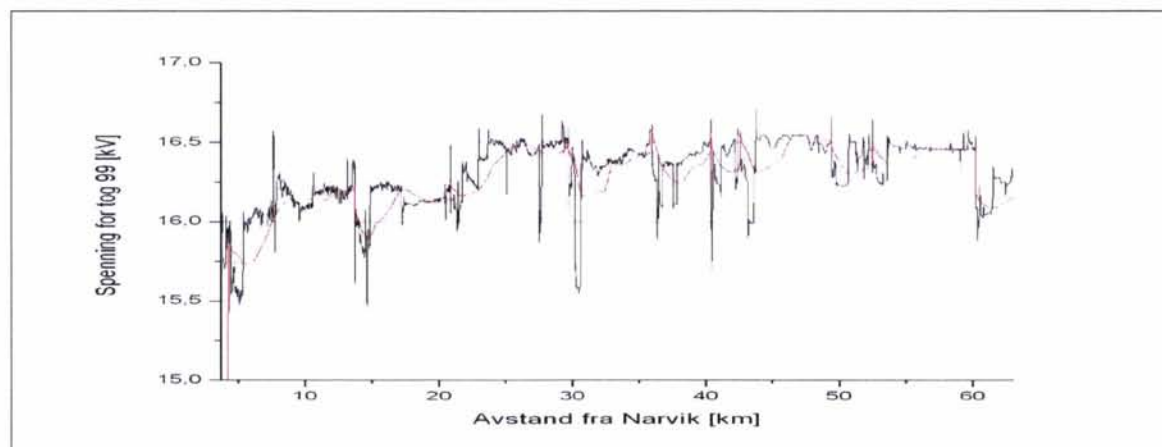
Nedenfor viser tabell 4-39 spenningen for samtlige tog og som en kan se er spenningen meget tilfredsstillende. I figur 4-46 til figur 4-51 er spenningen for de samme utvalgte togene som i simulering 1 og 2 vist.

Tabell 4-39 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3 med normal driftssituasjon og dimensjonerende ruteplan. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjornfjell.

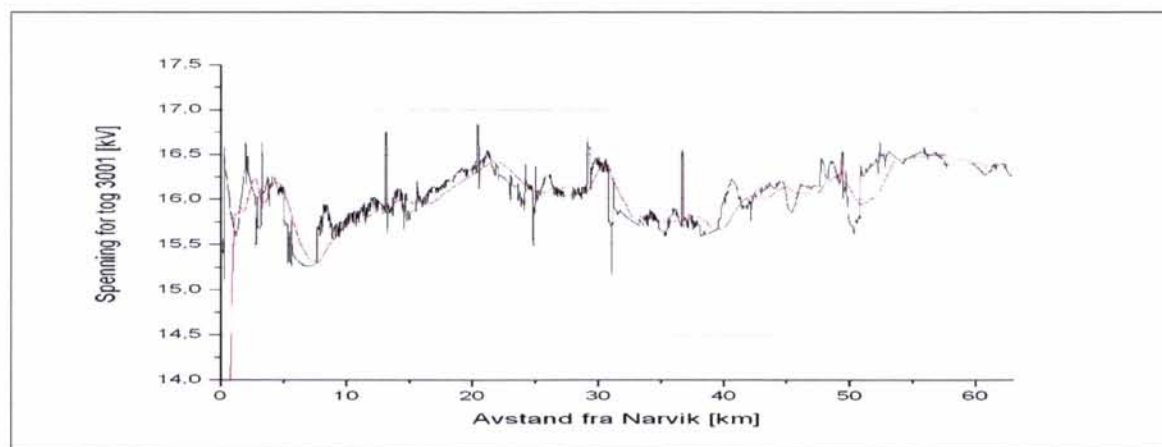
Simulering 3		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	15,6	15,9
93	15,7	16,0
94	15,7	16,0
95	15,3	15,9
96	15,9	16,1
99	15,6	15,9
3001	15,3	15,3
3002	15,3	16,0
3003	15,2	15,2
3004	15,7	16,1
3005	15,3	15,3
3006	15,3	15,9
3007	15,3	15,3
3008	15,4	15,9
3009	15,2	15,3
3010	15,6	16,1
3020	15,3	15,7
3021	15,2	15,2
3022	15,4	15,9
3023	15,3	15,4
4004	15,5	15,9
4005	15,1	15,2
4016	15,5	15,9
4019	15,1	15,2
4025	15,3	15,3
4026	15,7	15,9
6070	15,4	15,9
6071	15,2	15,3
9901	15,2	15,2
9903	15,5	15,7
9904	15,4	15,7
9905	15,3	15,9
9906	15,0	15,6
9907	15,6	15,8
9908	15,5	15,9
9909	15,4	15,7
9910	15,5	16,0
9911	15,8	15,9
9912	15,5	15,9
9913	15,3	15,8
9914	15,5	15,7
9915	15,4	15,8
9916	15,6	15,7

Simulering 3

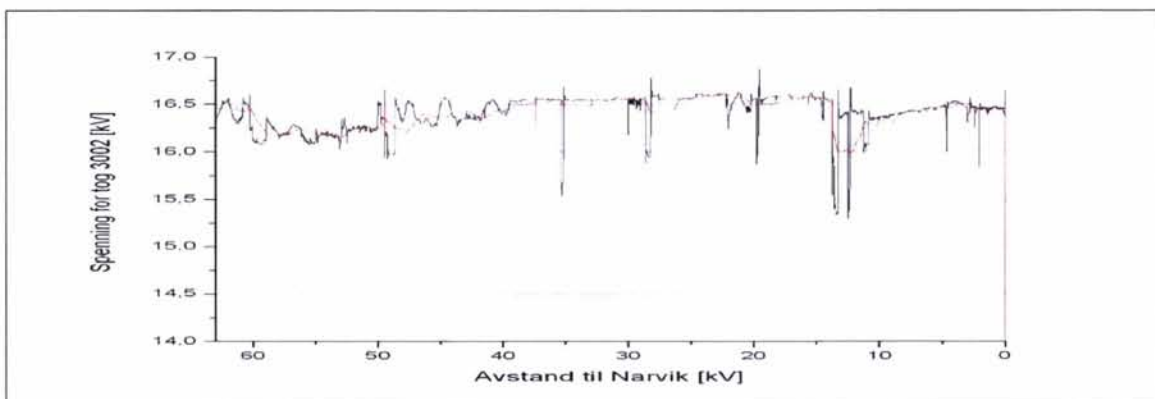
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
9917	15,7	15,7
9918	15,5	16,0
9919	15,6	15,7
9920	15,2	15,7
9922	14,7	15,7



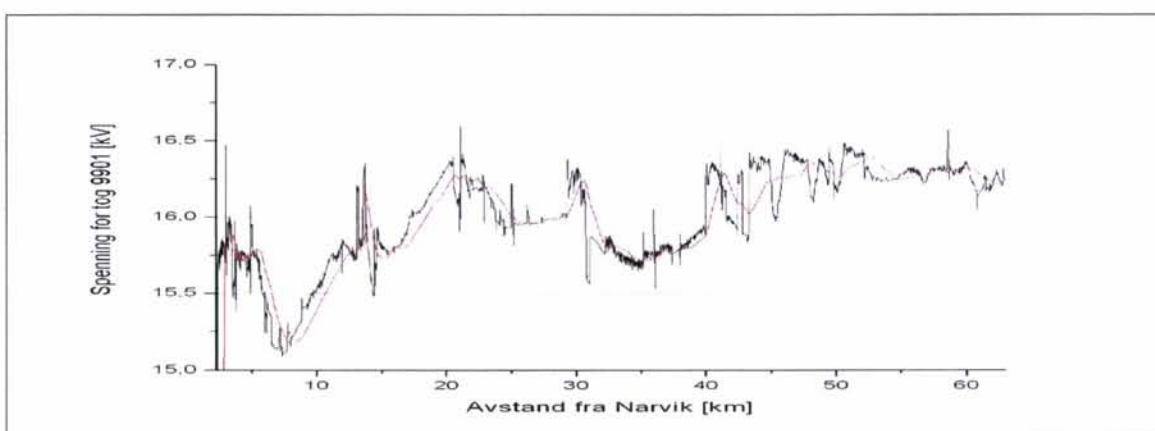
Figur 4-46 Spenningen for østgående passasjertog 99 med seks vogner. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



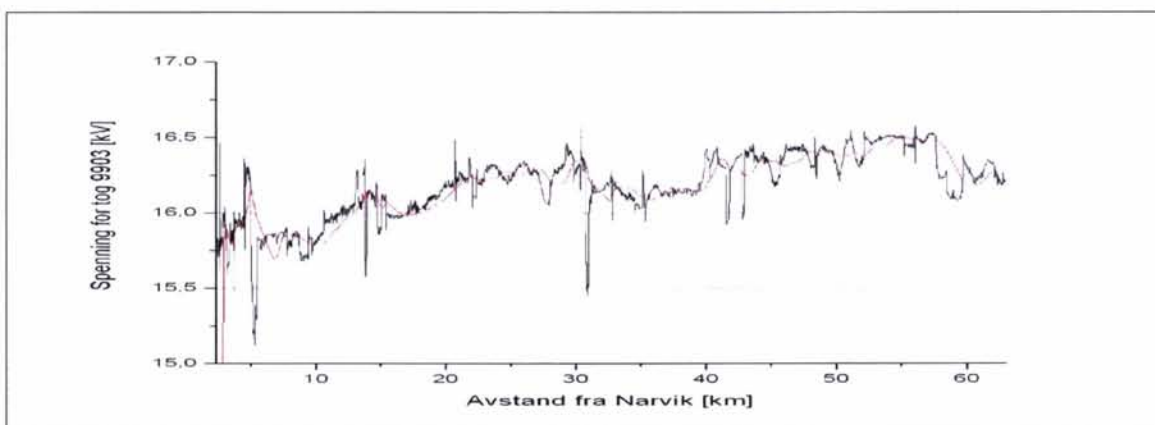
Figur 4-47 Spenningen for østgående godstog 3001 med multiplert Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



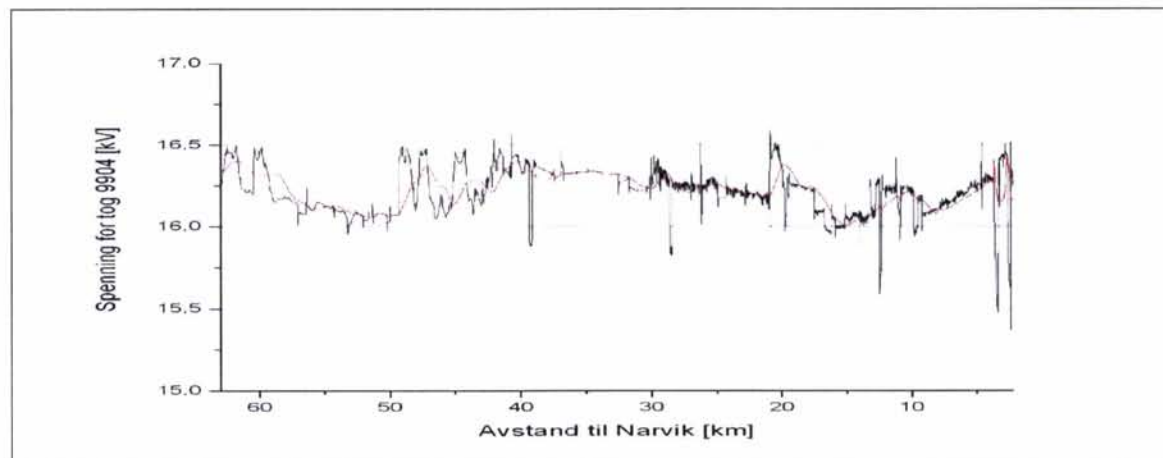
Figur 4-48 Spenningen for vestgående godstog 3002 med multippel Rc4 lokomotiver og 1500 tonn lastvekt. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-49 Spenningen for østgående malttog 9901 med olivin og 4240 tonn lastvekt. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-50 Spenningen for østgående tomtog 9903. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



Figur 4-51 Spenningen for vestgående malmtog 9904. Simulering 3 med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).

4.10 Simulering 3b utfall av Rombak omformerstasjon

Samme tilfelle som i simulering 1b utføres her for alternativ 3 og med fjernledningssystem med autotransformatorer på hele strekningen Tornehamn – Narvik forventes betydelig forbedring av spenningen for togene.

4.10.1 Belastning av omformere

Nedenfor viser tabell 4-40 belastningen for Tornehamn omformerstasjon når Rombak omformerstasjon faller ut. Sammenlignet med simulering 1b, se avsnitt 4.2.1, ser en at belastningen nå er litt mindre.

Tabell 4-40 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3b							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	-	-	-	-	-	-
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	36,0032	73	25,395	71	16,856	65

4.10.2 Belastning av autotransformatorer

Belastningen av autotransformatorene forventes ikke å bli særlig endret under denne unormale driftstilstanden, bortsett fra for enheten ved Bjørnfjell som kan bli mye belastet om forbindelsen fra det svenske AT-systemet skjer over en 15,0 kV forbindelse. Om derimot overføringen skjer ved en direkte overgang fra det svenske AT-systemet sine NL og PL ledere til disse lederne i det aktuelle systemet på norsk side vil belastningen ikke bli noe større enn

normalt for selve autotransformatoren. Nedenfor sees i tabell 4-41 at belastningen er innenfor akseptable grenser med to enheter her.

Tabell 4-41 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3b med unormal driftsituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3b									
Auto- transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm RMS							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Bjørnfjell	400	0,500	3	0,415	12	0,411	34	0,287	55

4.10.3 Belastning av negativ- og positivleder

Belastningen av negativ- og positivleder blir akseptabel, se tabell 4-42 der belastningen ved Bjørnfjell som vil overføre mest strøm er undersøkt. Det hadde vært ønskelig om fjernledningen hadde tatt en større del av strømmen som skal overføres i denne situasjon, men selvfølgelig er det forholdet mellom impedansen på de to parallelle linjene som avgjør dette.

Tabell 4-42 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i vestlig og østlig retning fra Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3b med unormal driftsituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3b					
NL/PL avgang ved	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Bjørnfjell vest NL/PL	0,502	0,489	0,412	0,397	0,287

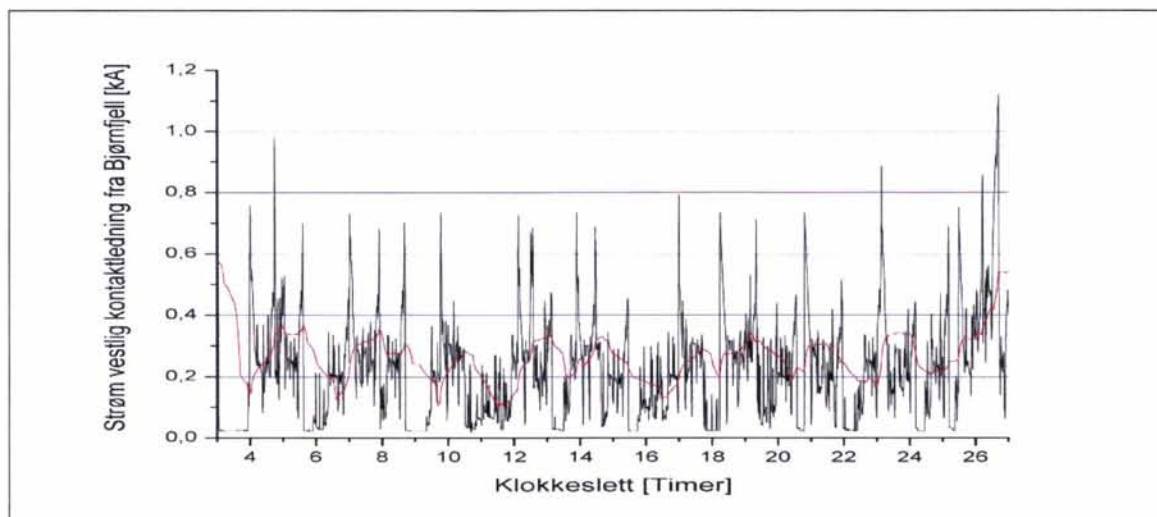
4.10.4 Belastning av kontaktledningen

Belastningen av kontaktledningen ved Bjørnfjell og vestover blir som en ser i Tabell 4-43 så stor at en må frykte skadelig oppvarming. For 1-minuttsverdien er belastningen 90 %, for 6-minuttersverdien kommer den opp mot **126 %** og **100 %** for 1-timesverdien. Med slike belastningsstrømmer kan det være sikrest å innføre trafikkrestriksjoner. Figur 4-52 viser at denne høye belastningen oppstår rundt klokken 03:00 altså den tiden der det tunge olivintoget 3001 kjører fra Narvik. Resten av kurven viser mer moderat belastning og det kan gå bedre i denne situasjonen om en holder tilbake dette spesielle toget. Om det allikevel skulle skje at Rombak omformerstasjon er helt utkoblet vil dette med størst sannsynlighet bare skje for kortere tid, antageligvis under 1 time. Av belastningen ved Bjørnfjell ser en at det er flere perioder da en kan kjøre med normal rute uten at belastningen er særlig stor.

Verdien som er vist for avgangen i østlig retning fra Bjørnfjell og vestlig retning fra Tornehamn gjelder for 15 kV nivå fordi det svenske AT-systemet er representert med en forenklet modell, dermed må verdien omregnes (divideres på 2 for spenningsnivået 30 kV) for å få riktig verdi for strøm på negativleder(e), forsterknings og kontaktledning. Her ser en at belastningsverdiene er høye og for konvensjonelt kl-anlegg er sannsynligvis forsterkningsledning nødvendig.

Tabell 4-43 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene ved Bjørnfjell og Tornehamn. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3b					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Bjørnfjell vest	1,600	1,479	1,122	1,009	0,600
Bjørnfjell øst	1,926	1,833	1,568	1,477	1,146
Tornehamn vest	2,014	1,993	1,876	1,503	1,202



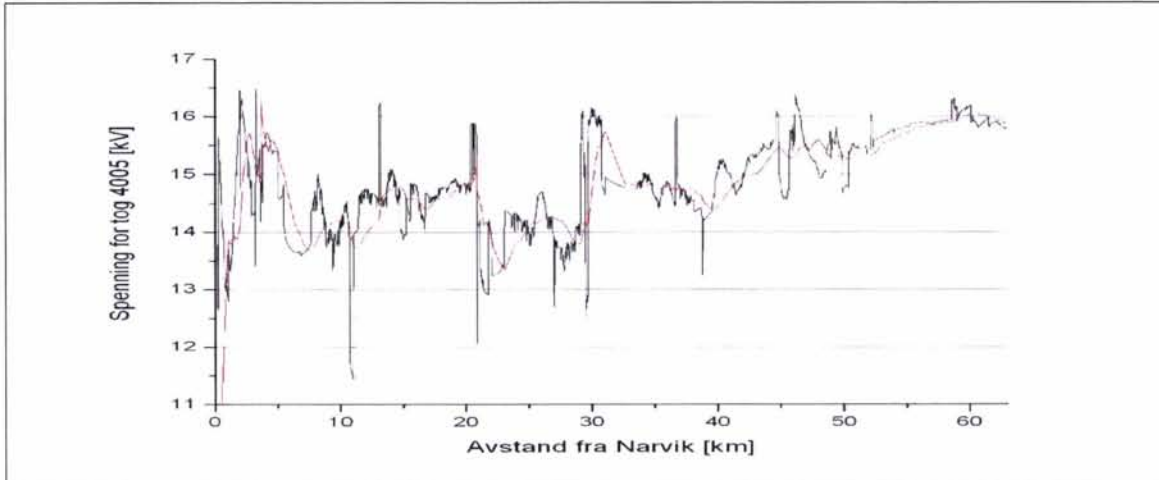
Figur 4-52 Strøm for vestlig kontaktledningsavgang fra autotransformator på Bjørnfjell. Sort strek viser 1-minuttsverdi og rød strek 1-timesverdi. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

4.10.5 Spenningen for togene

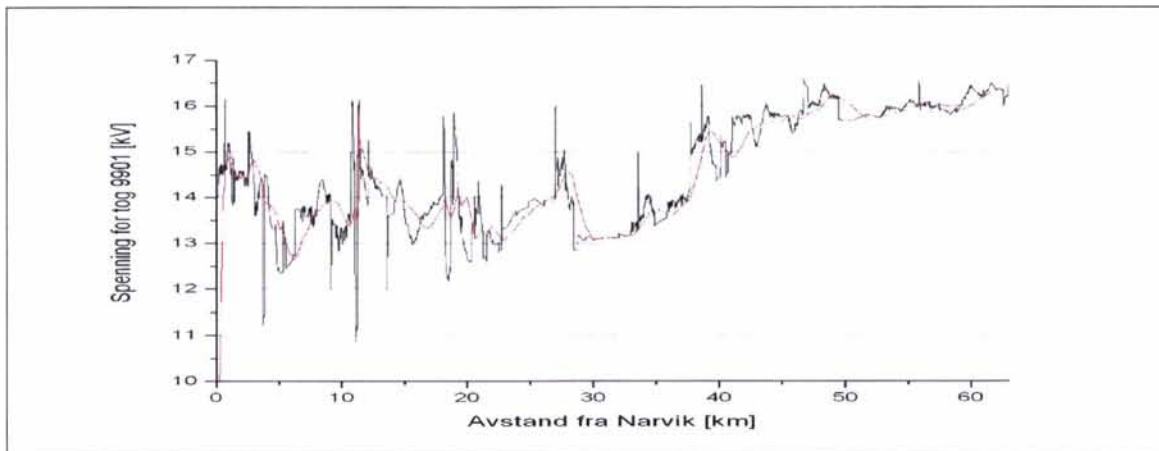
For noen av togene blir spenningen noe i laveste laget, se tabell 4-44. Bare noen få tog er tatt ut og fremstilt med figur for spenning og tilbakelagt distanse, se figur 4-54 og figur 4-54.

Tabell 4-44 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	13,1	14,9
93	13,8	14,8
94	13,3	14,9
95	12,5	14,4
96	14,4	15,4
99	11,7	13,6
3001	12,2	13,0
3002	12,3	14,2
3003	12,1	13,9
3004	13,8	15,4
3005	13,0	13,1
3006	12,1	13,8
3007	12,5	12,8
3008	12,3	14,1
3009	12,5	12,6
3010	12,6	13,7
3020	12,0	14,4
3021	12,1	12,1
3022	12,7	14,6
3023	12,9	13,0
4004	12,8	14,7
4005	11,6	13,4
4016	13,1	15,0
4019	12,2	13,6
4025	12,4	12,7
4026	13,3	14,8
6070	12,6	14,5
6071	12,6	12,8
9901	11,1	12,6
9903	11,8	13,8
9904	11,7	13,8
9905	12,3	14,2
9906	11,	14,6
9907	12,5	13,2
9908	13,0	15,0
9909	11,5	13,3
9910	12,1	13,9
9911	13,6	14,2
9912	12,3	15,2
9913	12,1	13,8
9914	12,7	15,2
9915	12,0	13,7
9916	11,7	13,1
9917	11,6	14,0
9918	12,2	14,6
9919	12,7	14,5
9920	12,2	14,7
9922	11,2	12,7



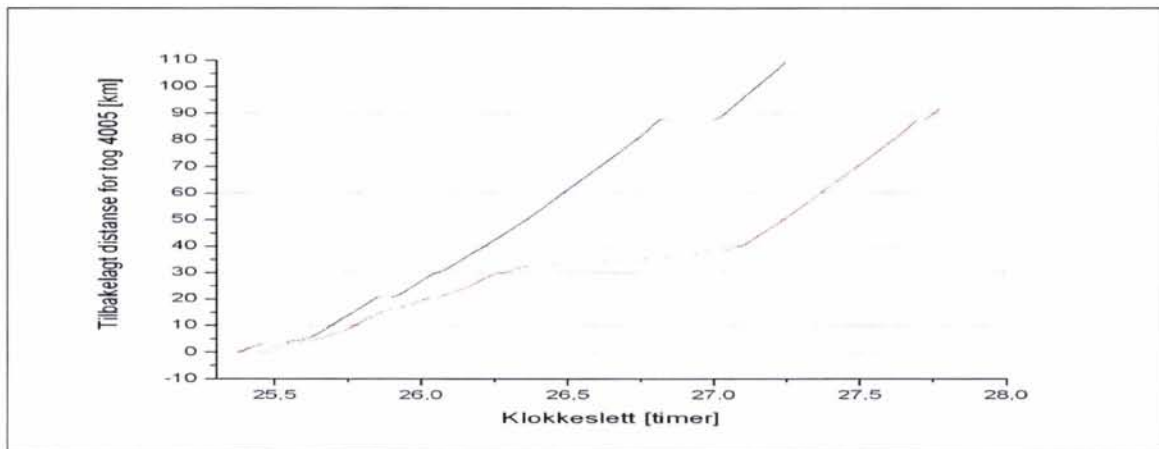
Figur 4-53 Spenningen for østgående godstog 4005. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).



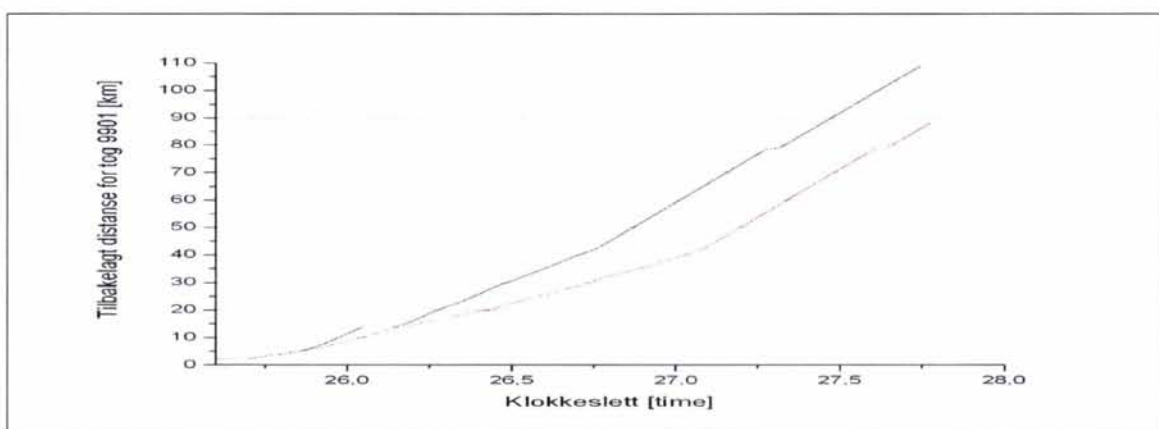
Figur 4-54 Spenningen for østgående godstog 9901. Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Sort strek viser momentanverdi og rød strek viser 2-minuttersverdi (RMS).

4.10.6 Kjørt distanse

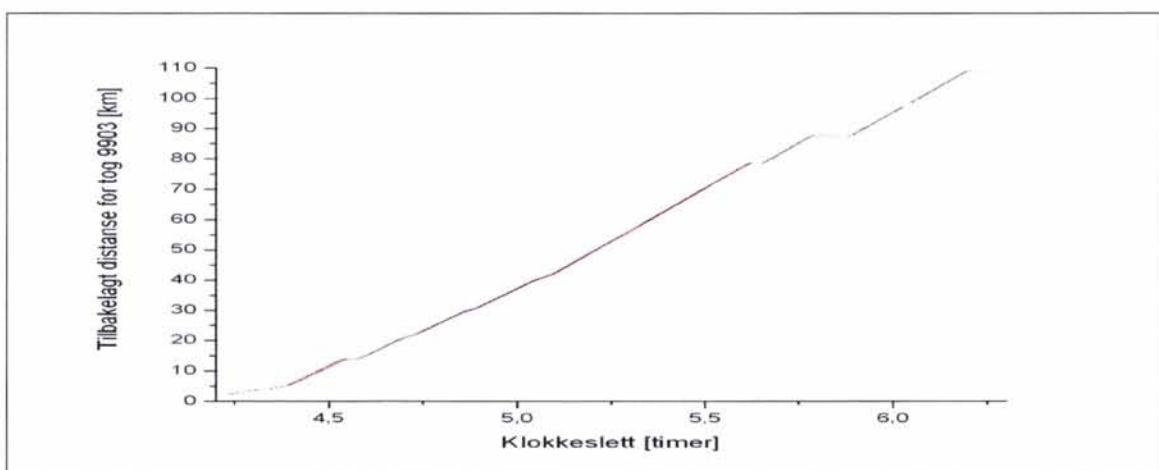
Nedenfor er det i figur 4-55 til figur 4-57 sett på kjøretid for noen få utvalgte tog i østlig retning som fikk lav spenning og sammenlignet med simulering 1b (rød strek). Som en ser er det betydelig forskjell på kjøretiden i de to simuleringene og det er tydelig at med alternativ 1 med kontaktledningsanlegg oppstår store forsinkelser. Selv om det skulle være bare noen få av togene som blir forsinket vil dette forplante seg til alle togene på strekningen. Med alternativ 3 ser det ut til at togene kommer tidsnok frem til krysningsstedene og får ventetid der.



Figur 4-55 Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 1b med rød strek.



Figur 4-56 Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 1b med rød strek.



Figur 4-57 Simulering 3b med unormal driftssituasjon der Rombak omformerstasjon er utkoblet, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 1b med rød strek.

4.11 Simulering 3bb ensidig mating fra Rombak omformerstasjon til Tornehamn

Samme tilfelle som i simulering 1bb utføres her for alternativ 3 og med fjernledningssystem med autotransformatorer forventes også her betydelig forbedring av spenningen for togene.

4.11.1 Belastning av omformere

Nedenfor er det i tabell 4-45 vist belastningen på omformerstasjonene ned utfall av vestlig avgang fra Tornehamn.

Tabell 4-45 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bb							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	33,946	69	23,920	66	16,456	63
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	-	-	-	-	-	-

4.11.2 Belastning av autotransformatorer

Nedenfor viser tabell 4-46 den høyeste RMS-verdien av strømmen gjennom de to autotransformatorene ved Bjørnfjell. Belastningen i prosent er lav.

Tabell 4-46 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bb									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm RMS							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Bjørnfjell	400	0,511	4	0,501	17	0,421	42	0,179	34

4.11.3 Belastning av negativ- og positivleder

Belastningen av lederne på høyspentlinjen som fører negativ- og positivleder er gjengitt i tabell 4-47 nedenfor, og igjen er belastningsverdiene godt innenfor hva som kan aksepteres.

Tabell 4-47 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i østlig retning fra Rombak omformerstasjon og Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bb					
NL/PL avgang ved	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst NL/PL	0,532	0,526	0,491	0,401	0,216
Bjørnfjell vest NL/PL	0,512	0,508	0,449	0,365	0,179

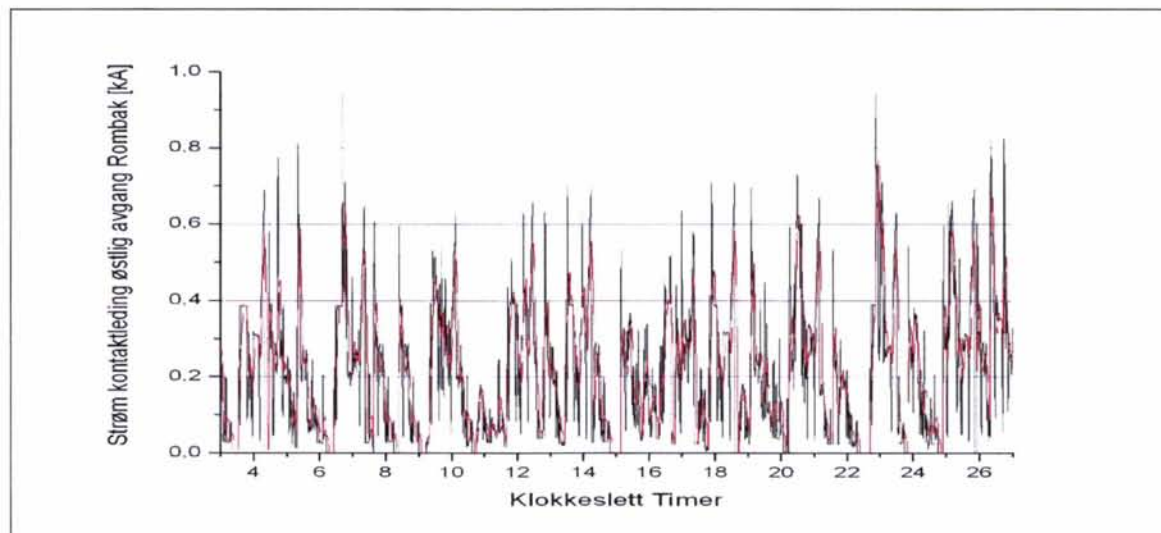
4.11.4 Belastning av kontaktledningen

Tabell 4-48 viser strømbelastningen på avgangen til kontaktledningen for Rombak og Bjørnfjell, som en ser er belastningen nokså stor. Østlig avgang fra Rombak får en belastningsgrad på 75 % for sin 1-minuttsverdi, 95 % for 6-minuttsverdien og 69 % for 1-timesverdien. Marginene mot overlast er med andre ord ikke stor for 6-minuttsverdien. I figur 4-58 er varigheten for denne strømmen undersøkt og som en kan se er dette en meget kortvarig strøm.

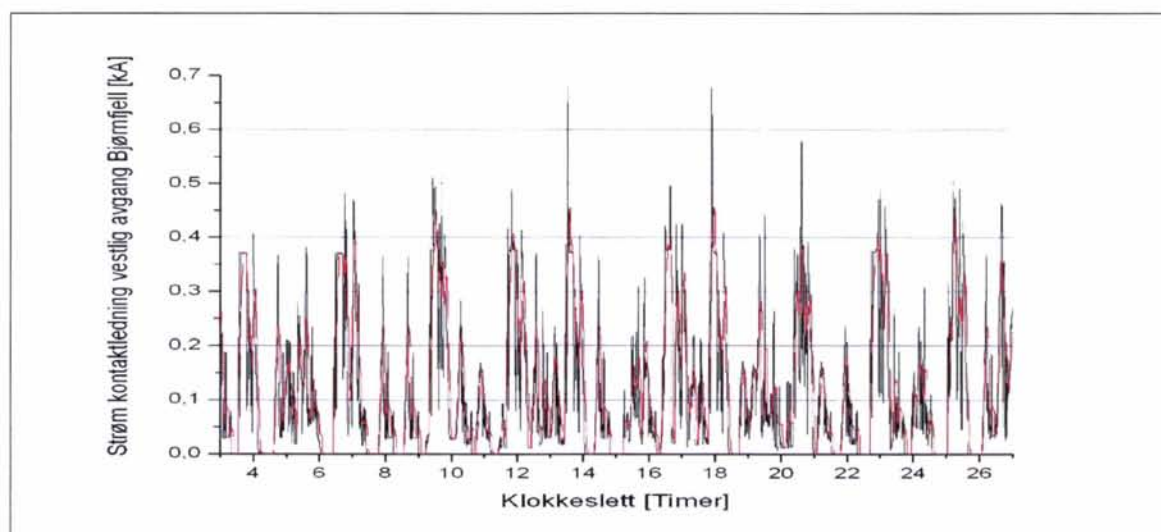
Som presisert tidligere er det desto mer effekt som skal overføres videre fra Bjørnfjell mot Riksgrensen der fjernledningen ender og her bør NL og PL føres videre og tilknyttes det svenske kl-anlegget. Som forklart tidligere i avsnitt 4.9.6 finnes strømmen for østlig avgang ved Bjørnfjell ved å dividere på to om det her innføres et AT-system. Strømmen blir da moderat.

Tabell 4-48 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene fra Rombak omformerstasjon og ved Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bb					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst	1,146	1,138	0,944	0,767	0,414
Bjørnfjell vest	0,764	0,759	0,680	0,456	0,264
Bjørnfjell øst	1,788	1,773	1,578	1,060	0,550



Figur 4-58 Strøm for østlig kontaktledningsavgang fra autotransformator ved Rombak. Sort strek viser 1-minuttsverdi og rød strek 6-minuttersverdi. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.



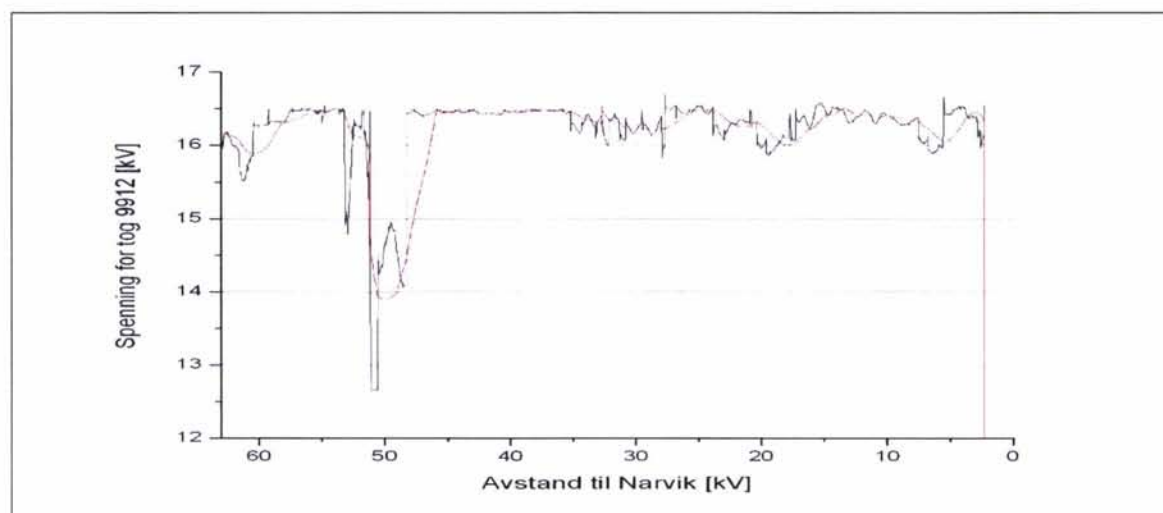
Figur 4-59 Strøm for vestlig kontaktledningsavgang fra autotransformator på Bjørnfjell. Sort strek viser 1-minuttsverdi og rød strek 1-minuttersverdi. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

4.11.5 Spenningen for togene

I tabell 4-49 ser en at spenningen for togene med simulering 3bb er akseptabel, og det er laget en figur for spenningen kun for tog 9912 som får noe lavere spenning enn de andre togene, se figur 4-60 nedfor.

Tabell 4-49 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

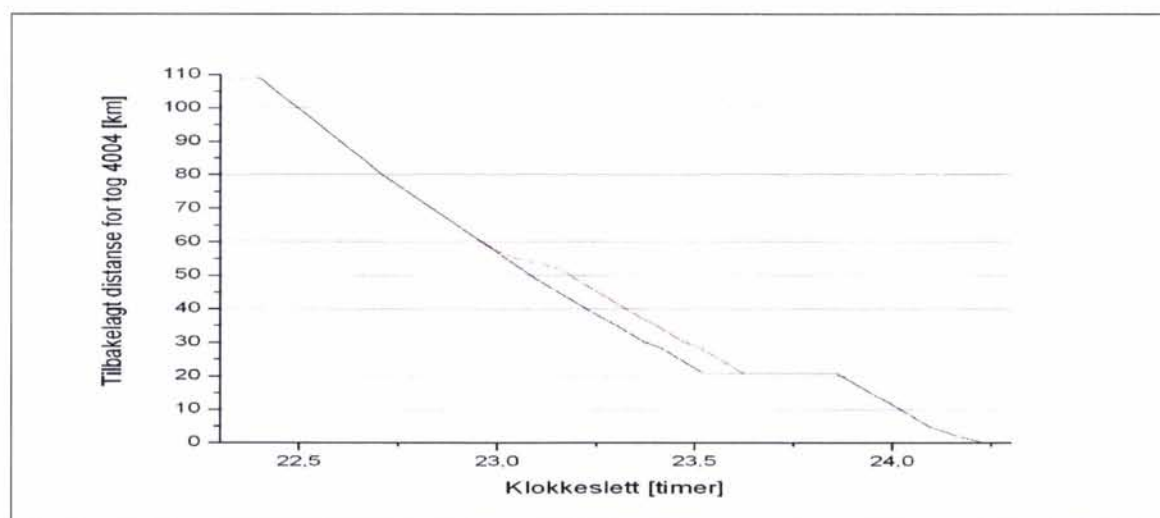
Simulering 3bb		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	13,9	14,2
93	14,3	14,7
94	14,7	15,1
95	14,4	14,8
96	15,0	15,4
99	13,2	13,7
3001	13,6	14,5
3002	14,4	14,8
3003	14,8	15,2
3004	15,4	15,6
3005	14,8	15,4
3006	14,1	14,7
3007	14,7	15,3
3008	15,0	15,3
3009	13,2	15,3
3010	14,5	15,3
3020	14,1	14,4
3021	14,8	15,3
3022	13,2	15,1
3023	14,2	14,7
4004	13,2	13,9
4005	14,7	15,1
4016	15,2	15,4
4019	14,4	15,2
4025	15,0	15,4
4026	15,2	15,3
6070	13,9	14,5
6071	14,8	15,2
9901	14,6	15,3
9903	14,4	14,8
9904	14,6	14,7
9905	14,4	15,2
9906	14,2	14,6
9907	15,1	15,5
9908	13,8	14,0
9909	13,6	13,8
9910	14,0	14,4
9911	14,0	14,7
9912	12,6	13,8
9913	13,6	13,9
9914	14,1	14,5
9915	13,8	14,8
9916	12,7	13,9
9917	15,3	15,7
9918	13,3	13,8
9919	14,5	15,3
9920	13,5	14,0
9922	13,7	13,8



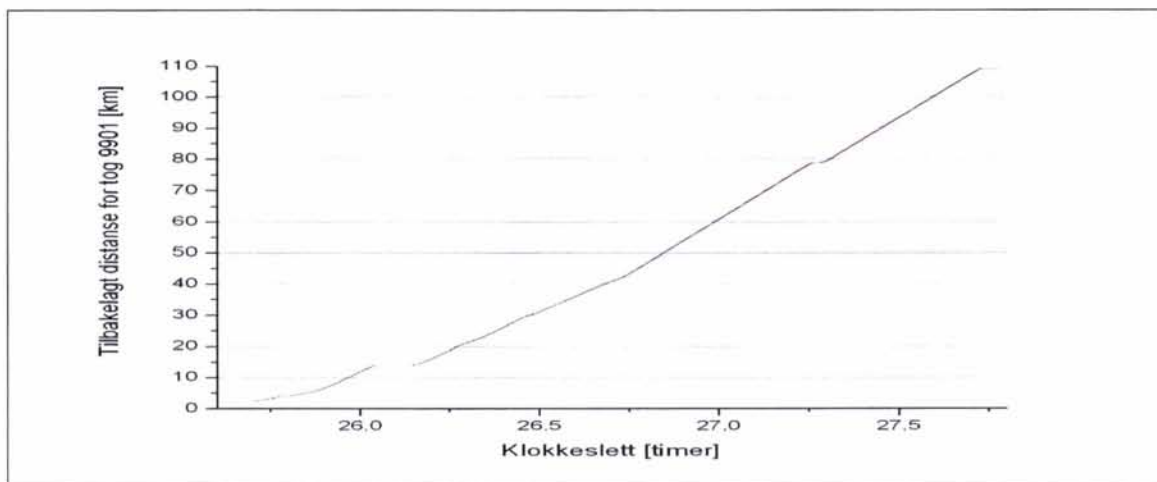
Figur 4-60 Spenningen for vestgående godstog 9912. Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

4.11.6 Kjørt distanse

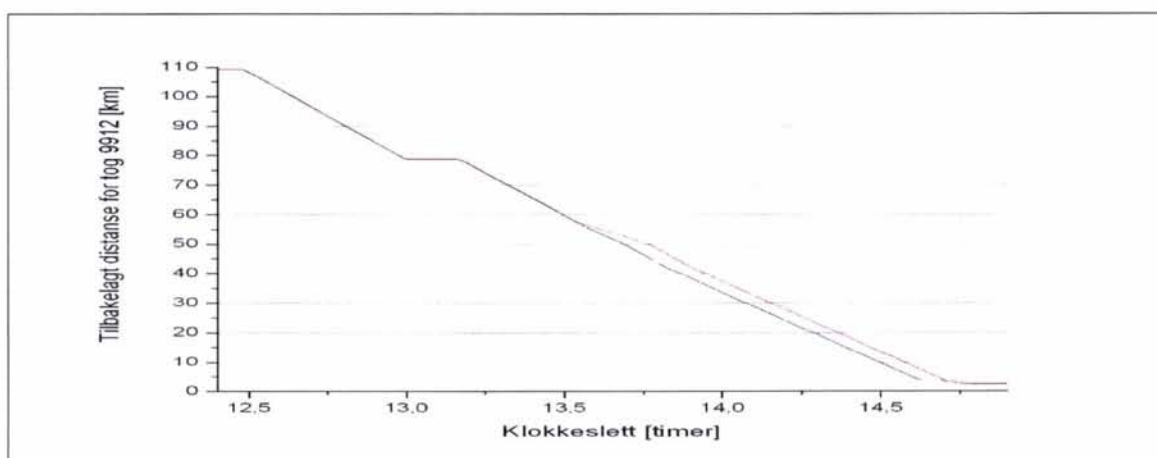
Noen av togene som får lavest spenning og som kan tenkes å være interessante å studere er undersøkt med hensyn på kjøretid og sammenlignet med simulering 1bb (rød strek), se figur 4-61 til figur 4-63 nedenfor. Som en ser er det de østgående togene som denne gangen blir forsinket rett ved passering av Tornehamn, her er det store stigninger i vestlig retning. Derimot oppstår det ikke problemer selv for det østlige tunge malmtog som returnerer med olivin. Forsinkelsene for de togene som er undersøkt i simulering 1bb er såpass store at forsinkelser som forplanter seg for alle togene er sannsynlig. Med alternativ 3 ser det ut til at ruten holdes uten problemer.



Figur 4-61 Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 1bb med rød strek.



Figur 4-62 Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 1bb med rød strek.



Figur 4-63 Simulering 3bb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Simulering 1bb med rød strek.

4.12 Simulering 3bbb utfall av autotransformator ved Narvik

En simulering der en autotransformator er ute av drift er interessant for å se om nabotransformator, kontaktledning og lederne i fjernledningen blir overbelastet. Det antas at verste tilfelle vil være om autotransformatoren ved Narvik faller ut fordi denne strekningen er ensidig matet og fordi all effektoverføring i et slikt tilfelle må skje på kontaktledningen. Nabotransformatoren ved Straumsnes vil dessuten bli belastet hardt. At det skal bli lav spenning for noen av togene forventes ikke.

4.12.1 Belastning av autotransformator ved Straumsnes

Nedenfor viser tabell 4-50 den høyeste RMS-verdi av strømmen gjennom gjenværende autotransformator ved Straumsnes. Belastningen i prosent er tydeligvis selv i dette tilfellet bare helt moderat, men om en ser det som et alternativ å benytte transformatorer med bare halvparten av ytelsen, altså 3 MVA med 100 A som nominell strømstyrke, ville det ha

oppstått overbelastning. Dermed kan valget av 6 MVA enheter som standard se ut til å være fornuftig.

Tabell 4-50 Belastning av autotransformator. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3bbb med unormal driftssituasjon med utfall av autotransformator ved Narvik, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

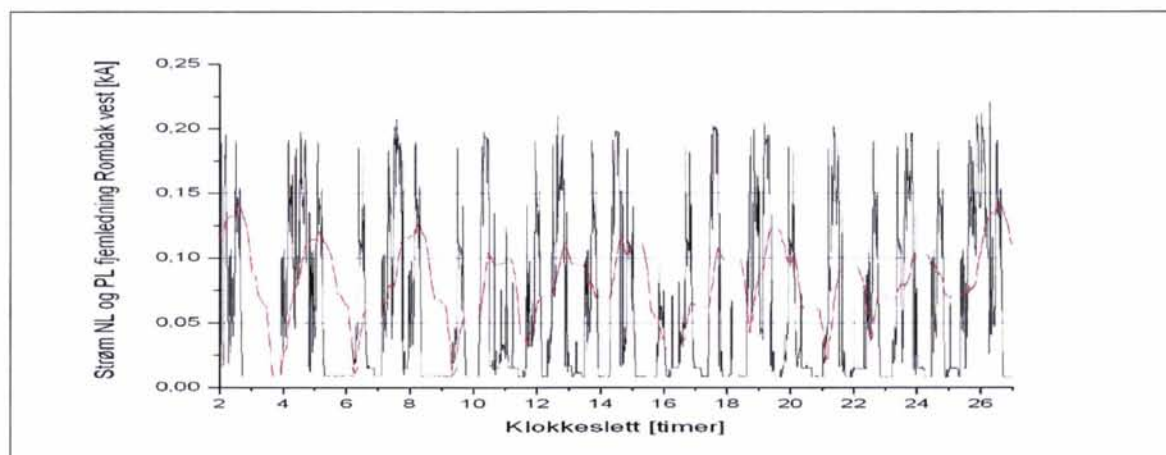
Simulering 3bbb									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm RMS							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Straumsnes	200	0,349	6	0,281	19	0,221	44	0,143	55

4.12.2 Belastning av negativ- og positivleder

Belastningen av lederne på høyspentlinjen som fører negativ- og positivleder er gjengitt i tabell 4-58 og når høyeste kontinuerlige belastningsstrøm ble kalkulert til 550 A ser en at belastningen i dette tilfellet er langt under dette.

Tabell 4-51 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i vestlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3bbb med unormal driftssituasjon med utfall av autotransformator ved Narvik, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bbb					
NL/PL avgang ved	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest NL/PL	0,353	0,332	0,221	0,227	0,143



Figur 4-64 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i vestlig retning fra Rombak omformerstasjon. Sort strek viser 1-minuttsverdi og rød strek 1-timesverdi. Simulering 3bbb med unormal driftssituasjon med utfall av autotransformator ved Narvik, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell

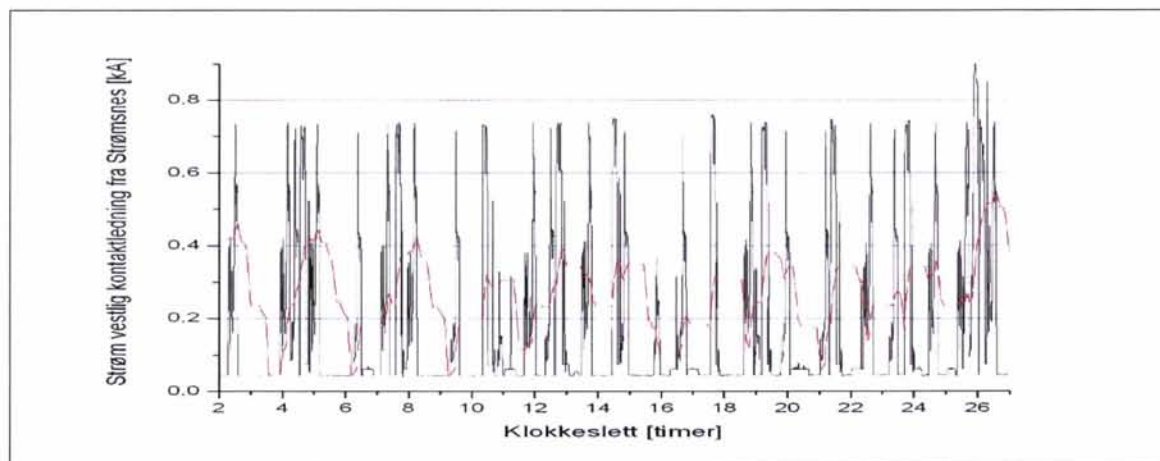
4.12.3 Belastning av kontaktledningen

Tabell 4-52 viser strømbelastningen på avgangen til kontaktledningen for Straumsnes og Rombak og som en ser er belastningen nokså høy. For vestlig avgang fra Straumsnes er høyeste belastningsgrad for 1-minuttsverdien 73 %, for 6-minuttersverdien **109 %** og for 1-timesverdien 91 %. Altså er det fare for overbelastning. Imidlertid kommer dette an på værforholdene, noe som en kan ta med i vurderingen for en så sjelden feil. På en kald og vindfull dag er neppe dette noe problem, og som en ser av figur 4-65 oppstår denne store belastningsstrømmen rundt klokken 26, eller 02:00. Dette er tidspunktet når det tunge olivintoget, se avsnitt 4.1.1, starter ut fra Narvik.

I praksis har en dermed flere muligheter for å unngå denne store belastningstoppen; ikke kjøre olivintoget som et, men dele det i to tog om det er helt nødvendig å transportere olivin i en slik situasjon, eller kjøre det om natten (som i simuleringen) når temperaturen er lav og belastningsevnen større. Imidlertid kan feilen skje om vinteren når temperaturen uansett er lav hele døgnet og disse belastningstømmene sannsynligvis ikke er noe problem. For resten av døgnet ser en at belastningstoppene er kortvarige og etterfulgt av lavlastperioder og samme vurderinger som i avsnitt 4.9.6 gjør seg gjeldende.

Tabell 4-52 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene fra Rombak omformerstasjon og ved Straumsnes for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3bbb med unormal driftssituasjon med utfall av autotransformator ved Narvik, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3bbb					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Straumsnes vest	1,355	1,276	0,910	0,874	0,547
Rombak øst	1,197	1,178	0,771	0,618	0,353



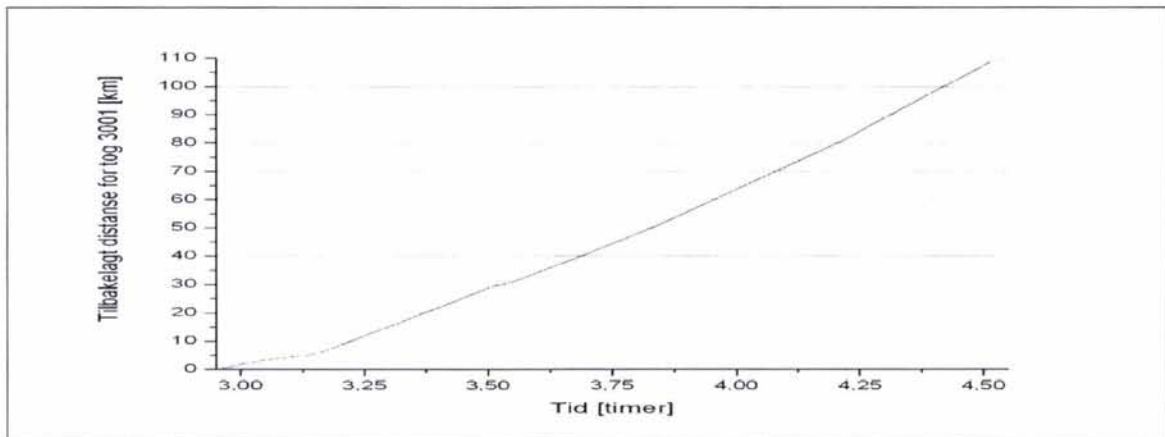
Figur 4-65 Sort strek viser 1-minuttsverdi og rød strek 1-timesverdi. Simulering 3bbb med unormal driftssituasjon med utfall av autotransformator ved Narvik, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell

4.13 Simulering 3aa – trafikkendring slik at tog kjører i "blokkpostavstand"

Samme avvikssituasjon for trafikken som i simulering 1aa, se avsnitt 4.4, er simulert på nytt med fjernledningssystem med autotransformatorer. Altså en normalt forekommende situasjon der tog kjører etter hverandre med "blokkpostavstand" på 7 minutter. Simuleringen for avvikssituasjonen er igjen gjort med to godstog (3001 og 4001) som kjører østover fra Narvik og noe senere et tungt tog med olivin og et tomt malmtog.

4.13.1 Kjørt distanse

Sammenligninger med simulering 1aa viser ingen tegn til forskjellig kjøretid for togene selv om spenningen er en hel del lavere for simulering 1aa enn for 3aa, se figur 4-66 nedenfor. I diagrammet er svart strek er benyttet for simulering 3bb og rød for 1bb, men kurvene dekker over hverandre fullstendig.



Figur 4-66 Tilbakelagt distanse for tog 3001 for simulering 1aa og 3aa. Kurvene for toget i de to simuleringene ligger helt oppå hverandre. Simulering 3aa med konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning innkoblet. Simulering 3aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Simulering 1bb med rød strek.

4.13.2 Belastning av omformere

Nedenfor viser tabell 4-57 og tabell 4-58 er belastningen for omformerstasjonene. Som en ser er belastningen veldig lik den i simulering 1aa og det er gode marginer mot overbelastning, men om et av aggregatene på 10 MVA er utkoblet vil det kunne oppstå overbelastning.

Tabell 4-53 Belastning av omformerstasjoner. Effekt fra Rombak omformerstasjon når tog 3001 og 4001 kjører. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 3aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 3aa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	21,586	44	16,351	45	9,342	36
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	7,600	13	5,334	12	3,981	18

Tabell 4-54 Belastning av omformerstasjoner. Effekt fra Rombak omformerstasjon når tog 9901 og 9903 kjører. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 3aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og konvensjonelt kontaktledningsanlegg med mateledning utkoblet.

Simulering 3aa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	22,115	45	16,351	45	9,852	38
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	14,753	25	10,056	23	6,902	32

4.13.3 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor tabell 4-55 og tabell 4-56 viser at belastningen av kontaktledningsanlegget er nokså moderat for belastningen når tog 3001 og 4001 kjører. Største 1-minuttsverdi oppstår ved vestlig avgang fra Katterat med en belastningsgrad på 57 % og for 6-minuttersverdien blir denne størst på vestlig avgang fra Rombak med en belastningsgrad på 77 %. Belastningen blir større når togene 9901 og 9903 kjører. Høyeste 1-minuttsverdi oppstår på vestlig avgang fra Straumsnes med belastningsgrad 83 % og for 6-minuttersverdien er høyeste belastning også på avgangen fra Straumsnes med belastningsgrad 100 %. Også andre steder kommer 6-minuttersverdien tett opp mot 800 A. Altså ser en igjen at en bør være forsiktig med å kjøre det tunge olivintog i "blokkpostavstand" fra andre tog.

Tabell 4-55 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra autotransformatorene for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 3001 og 4001 kjører.

Simulering 3aa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,299	0,296	0,293	0,214	0,102
Straumsnes vest	0,627	0,587	0,571	0,484	0,214
Straumsnes øst	0,567	0,531	0,491	0,385	0,186
Rombak vest	0,780	0,742	0,698	0,614	0,277
Rombak øst	0,629	0,616	0,585	0,483	0,228
Katterat vest	0,435	0,413	0,397	0,303	0,168
Katterat øst	0,757	0,754	0,717	0,464	0,219
Bjørnfjell vest	0,660	0,650	0,608	0,402	0,184
Bjørnfjell øst	0,577	0,574	0,554	0,442	0,304

Tabell 4-56 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra autotransformatorene for noen utvalgte tidsperioder. Strøm på avgangene ut fra Rombak omformerstasjon når tog 9901 og 9903 kjører.

Simulering 3aa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,596	0,587	0,474	0,309	0,130
Straumsnes vest	1,152	1,143	1,040	0,796	0,294
Straumsnes øst	0,809	0,805	0,709	0,559	0,236
Rombak vest	1,145	1,135	1,014	0,784	0,349
Rombak øst	1,097	1,087	0,852	0,612	0,284
Katterat vest	0,824	0,816	0,792	0,568	0,261
Katterat øst	0,858	0,838	0,813	0,647	0,296
Bjørnfjell vest	1,034	1,023	0,971	0,782	0,318
Bjørnfjell øst	0,907	0,901	0,772	0,720	0,477

4.13.4 Spenning for togene

I tabell 4-57 kan en se at spenningen for de fire togene som kjører er meget gode. Fjernledningssystem med autotransformatorer gir altså en meget god spenning også for slike store effektuttak som denne spesielle kjøringen gir.

Tabell 4-57 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3aa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "blokkpostavstand" og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aa		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
3001	14,6	14,9
4001	14,5	14,7
9901	14,9	15,3
9903	14,6	15,2

4.14 Simulering 3aaa – trafikkendring slik at 6 tog kjører i "blokkpostavstand" fra Narvik og 2 tog kommer imot

Togtrafikk som for simulering 1aaa for alternativ 1 gjentas her. Det er sannsynlig at belastningen for omformerstasjonene blir omtrent den samme som simulering 1aaa for alternativ 1, dessuten er det sannsynlig at ledere, autotransformatorer og andre seriekomponenter ikke overbelastes.

4.14.1 Belastning av omformere

I tabell 4-58 nedenfor er belastningen for omformerstasjonene vist. Som en ser blir belastningen her noe mindre enn for simulering 1aaa, dette kan skyldes at kortere elektrisk avstand til Tornehamn gjør at en får en viss effektutveksling fra denne.

Tabell 4-58 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 3aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og fjerndningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnffjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnffjell.

Simulering 3aaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	36,427	74	30,123	84	16,829	65
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	17,724	30	14,581	33	8,640	40

4.14.2 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-59 belastningen for alle kontaktledningsavgangene når alle de forskjellige tunge togene kjører med kortest mulig avstand mellom og som en ser blir det mindre strømbelastning enn i simulering 3aa for de kortere periodene, men 1-timesverdiene blir nå jevnt over større. Høyeste 1-minuttsverdi på avgangen fra Rombak i vestlig retning har en belastningsgrad på 66 % også 6-minuttersverdien blir høyest her med 91 %. 1-timesverdiene er godt innenfor nominell strømføringsevne på 600 A. Det er margin mot høyeste tillate driftsstrøm i forhold til det som kreves, men det er en viss sannsynligheten for overlastning allikevel. Med så mange tog inne på strekningen samtidig kan en ikke være trygg for ugunstige sammenlagringer av store effektuttak. Om det tunge olivintog hadde blitt kjørt senere hadde dette neppe blitt noe problem.

Tabell 4-59 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 3aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aaa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,465	0,459	0,358	0,204	0,134
Straumsnes vest	0,707	0,690	0,649	0,571	0,341
Straumsnes øst	0,721	0,703	0,631	0,474	0,283
Rombak vest	0,994	0,935	0,826	0,728	0,466
Rombak øst	0,860	0,847	0,725	0,606	0,342
Katterat vest	0,484	0,429	0,371	0,308	0,235
Katterat øst	0,768	0,764	0,720	0,502	0,300
Bjørnfjell vest	0,713	0,683	0,631	0,454	0,283
Bjørnfjell øst	0,977	0,948	0,847	0,704	0,460

4.14.3 Spenningen for togene

Spenningen for samtlige tog blir meget god, se tabell 4-58 nedenfor. Spenningen er bedre for togene nå enn for simulering 1aa og 3aa slik at forskjell i kjøretid for togene i de to simuleringene er enda mindre sannsynlig nå enn for simulering 1aa og 3aa.

Tabell 4-60 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3aaa med unormal driftsituasjon med mange tog i "blokkpostavstand" og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aaa		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
91	14,9	15,2
3001	14,3	14,7
3002	15,5	15,7
3004	15,2	15,7
4001	14,1	14,4
4003	14,0	14,4
9901	14,3	14,7
9903	14,4	15,4

4.15 Simulering 3aaaa – trafikkendring slik at malmtog som bremser regenerativt mot Narvik kjører med kort avstand mellom seg

Samme simulering og undersøkelse som i simulering 1aaaa for alternativ 1 gjentas her for fjernledningssystem med autotransformatorer for å se om belastningen for kontaktledningen vil bli gunstigere med større mulighet for å fordele strøm på kontaktledning og fjernledning. Det simuleres altså med to fullastede malmtog 9904 og 9906 på veg mot Narvik som kjører etter hverandre i "stasjonsavstand" med 16 minutter mellom seg, senere kommer togene 9908 og 9910 i "blokkpostavstand" med 8 minutter mellom.

4.15.1 Belastning av omformere

I Tabell 4-61 og tabell 4-62 nedenfor ser en at belastningen for omformerstasjonene for de to periodene med tog i henholdsvis "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand" er meget moderat.

Tabell 4-61 Belastning av omformerstasjoner for første periode når tog 9904 og 9906 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	12,832	26	11,922	25	7,976	31
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	14,465	24	12,639	30	8,313	38

Tabell 4-62 Belastning av omformerstasjoner for andre periode når tog 9908 og 9910 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	13,302	27	12,689	35	9,145	35
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	15,151	25	13,631	31	8,982	42

4.15.2 Belastning av kontaktledningen

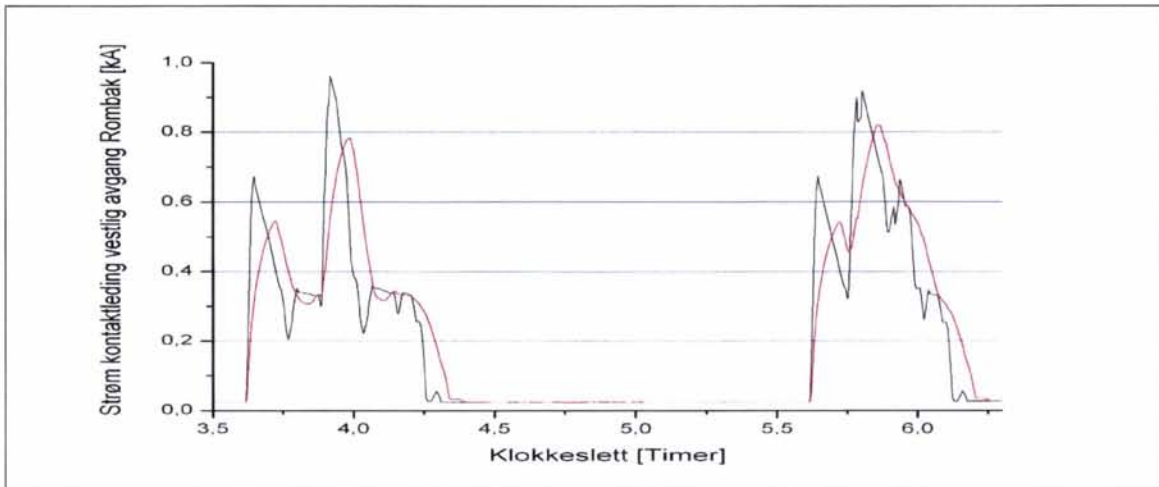
Belastningen for første periode med malmtog 9904 og 9906 i stasjonsavstand viser noe høye strømmer på kontaktledningsanlegget på enkelte avganger, se tabell 4-63. Det er avgangene ut fra Rombak omformerstasjon som belastes mest og for 1-minuttsverdien er belastningsgraden her 77 % og for 6-minuttersverdi blir belastningsgraden 98 %. For perioden når tog 9908 og 9910 passerer i "blokkpostavstand" blir belastningen noe større for 6-minutters og 1-timesverdiene, se tabell 4-64. Belastning over marginen fåes denne gangen for vestlig avgang fra Rombak med **103 %** for 6-minuttersverdien. I figur 4-67 og figur 4-68 sees strømmen for henholdsvis vestlig og østlig avgang for kontaktledningen ved Rombak omformerstasjon for de to periodene. Med såpass store strømmer kan det se ut som om en absolutt bør være forsiktig med å kjøre malmtogene nedover mot Narvik så nært hverandre. Om dette skal gjøres bør en sette begrensninger for hvor mye togene skal få lov til å bremse regenerativt.

Tabell 4-63 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for første periode når tog 9904 og 9906 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

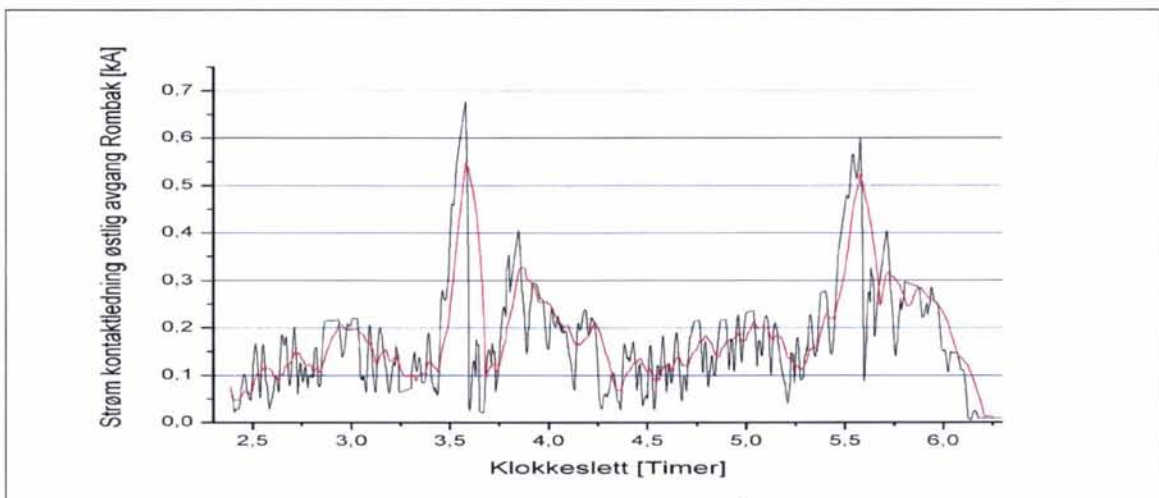
Simulering 3aaaa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,445	0,442	0,423	0,311	0,108
Straumsnes vest	0,707	0,703	0,684	0,564	0,198
Straumsnes øst	0,820	0,807	0,686	0,473	0,152
Rombak vest	0,983	0,982	0,961	0,784	0,332
Rombak øst	0,703	0,699	0,678	0,547	0,248
Katterat vest	0,702	0,699	0,680	0,541	0,261
Katterat øst	0,730	0,725	0,581	0,425	0,252
Bjørnfjell vest	0,740	0,738	0,716	0,616	0,335
Bjørnfjell øst	0,782	0,780	0,770	0,756	0,539

Tabell 4-64 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for andre periode når tog 9908 og 9910 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3aaaa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,495	0,489	0,455	0,324	0,152
Straumsnes vest	1,034	1,026	0,971	0,706	0,305
Straumsnes øst	0,673	0,673	0,663	0,588	0,247
Rombak vest	0,940	0,939	0,919	0,820	0,395
Rombak øst	0,702	0,689	0,600	0,523	0,275
Katterat vest	0,733	0,725	0,668	0,527	0,278
Katterat øst	0,803	0,796	0,761	0,540	0,288
Bjørnfjell vest	0,818	0,814	0,781	0,587	0,332
Bjørnfjell øst	0,795	0,793	0,790	0,728	0,550



Figur 4-67 Belastningsstrøm på kontaktledningen for første periode når tog 9904 og 9906 passerer. Sort strek for 1-minuttsverdi og rød for 6-minuttersverdi (RMS). Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.



Figur 4-68 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for andre periode når tog 9908 og 9910 passerer. Sort strek for 1-minuttsverdi og rød for 6-minuttersverdi (RMS). Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

4.16 Simulering 3aaaaa – trafikkendring slik at malmtog som bremsar regenerativt mot Narvik kjører med kort avstand mellom seg men bremsekraften redusert til 500 kN

Samme simulering og undersøkelse som i simulering 3aaaa, men her reduseres høyeste tillat regenerativ bremsekraft fra 750 kN til 500 kN. Dette for å se om en slik reduksjon vil føre til mindre belastning for kontaktledningen slik at det ikke blir fare for overbelastning.

4.16.1 Belastning av omformere

Belastningen for omformerstasjonene i de to periodene med tog 9904 og 9906 i "stasjonsavstand" og tog 9908 og 9910 i "blokkpostavstand" er vist nedenfor i henholdsvis tabell 4-68 og tabell 4-69. Effekten er nå noe mindre når togene bremses mindre regenerativt.

Tabell 4-65 Belastning av omformerstasjoner for første periode når tog 9904 og 9906 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.

Simulering 3aaaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	11,235	23	8,280	23	6,158	24
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	14,466	24	12,637	29	7,910	37

Tabell 4-66 Belastning av omformerstasjoner for andre periode når tog 9908 og 9910 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.

Simulering 3aaaaa							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	9,445	19	8,734	24	6,910	27
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	6,294	11	6,122	14	8,331	39

4.16.2 Belastning av kontaktledningen

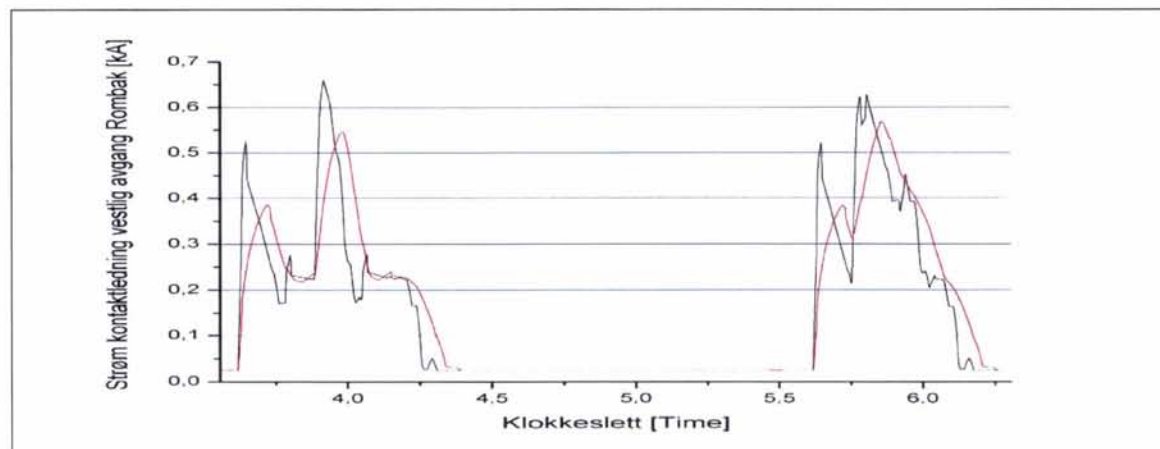
Belastningen for kontaktledningen i første periode med malmtog 9904 og 9906 i stasjonsavstand er vist i tabell 4-67, og når tog 9908 og 9910 passerer er vist i tabell 4-68. Ingen strømverdier blir for store denne gangen og høyeste 1-minutsverdi fås for andre periode på vestlig avgang fra Straumsnes og her blir strømmen 53 % av tillat verdi. For høyeste 6-minuttersverdi oppstår denne på vestlig avgang fra Rombak og samme periode, belastningsgraden blir 71 %. Om det altså innføres en slik begrensning for regenerativ bremsing om malmtogene skal kjøre med "stasjons-" eller "blokkpostavstand" vil det ikke være fare for overbelastning av kontaktledningen.

Tabell 4-67 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for første periode når tog 9904 og 9906 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.

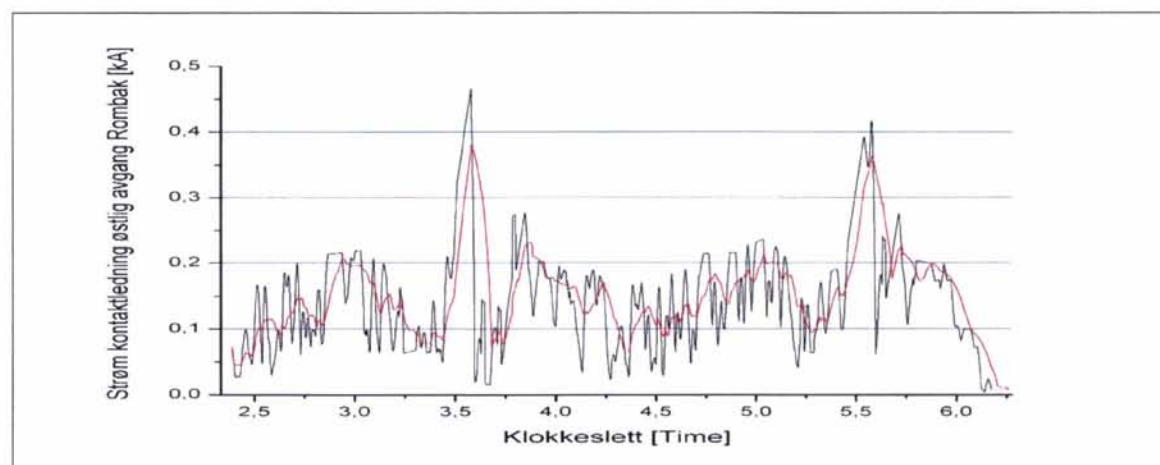
Simulering 3aaaaa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,305	0,305	0,291	0,220	0,108
Straumsnes vest	0,492	0,489	0,476	0,396	0,195
Straumsnes øst	0,409	0,404	0,277	0,240	0,158
Rombak vest	0,770	0,760	0,659	0,546	0,256
Rombak øst	0,483	0,480	0,467	0,380	0,186
Katterat vest	0,688	0,679	0,476	0,381	0,196
Katterat øst	0,557	0,553	0,402	0,283	0,183
Bjørnfjell vest	0,587	0,581	0,512	0,430	0,246
Bjørnfjell øst	0,678	0,670	0,526	0,516	0,410

Tabell 4-68 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for andre periode når tog 9908 og 9910 passerer. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for utvalgte tidsperioder. Simulering 1aaaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.

Simulering 3aaaaa					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,338	0,334	0,311	0,226	0,106
Straumsnes vest	0,705	0,700	0,660	0,483	0,209
Straumsnes øst	0,459	0,459	0,451	0,408	0,173
Rombak vest	0,769	0,758	0,628	0,568	0,276
Rombak øst	0,477	0,473	0,417	0,363	0,203
Katterat vest	0,693	0,685	0,471	0,372	0,207
Katterat øst	0,547	0,542	0,519	0,370	0,208
Bjørnfjell vest	0,575	0,564	0,533	0,408	0,240
Bjørnfjell øst	0,542	0,541	0,536	0,503	0,410



Figur 4-69 Belastningsstrøm på kontaktledningen for første periode når togene passerer. Sort strek for 1-minuttsverdi og rød for 6-minuttersverdi (RMS). Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.



Figur 4-70 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningen for andre periode når togene passerer. Sort strek for 1-minuttsverdi og rød for 6-minuttersverdi (RMS). Simulering 1aaaa med normal forekommende avvikssituasjon med tog i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell. Høyeste elektriske bremsekraft redusert fra 750 til 500 kN.

4.17 Simulering 3c uten Tornehamn omformerstasjon

Det kan være aktuelt for Banverket å legge ned Tornehamn omformerstasjon og opprettholde driften ved Stenbacken omformerstasjon. Simulering 3c er utført for å se om spenninger og strømbelastninger fremdeles er innenfor akseptable grenser.

4.17.1 Belastning av omformere

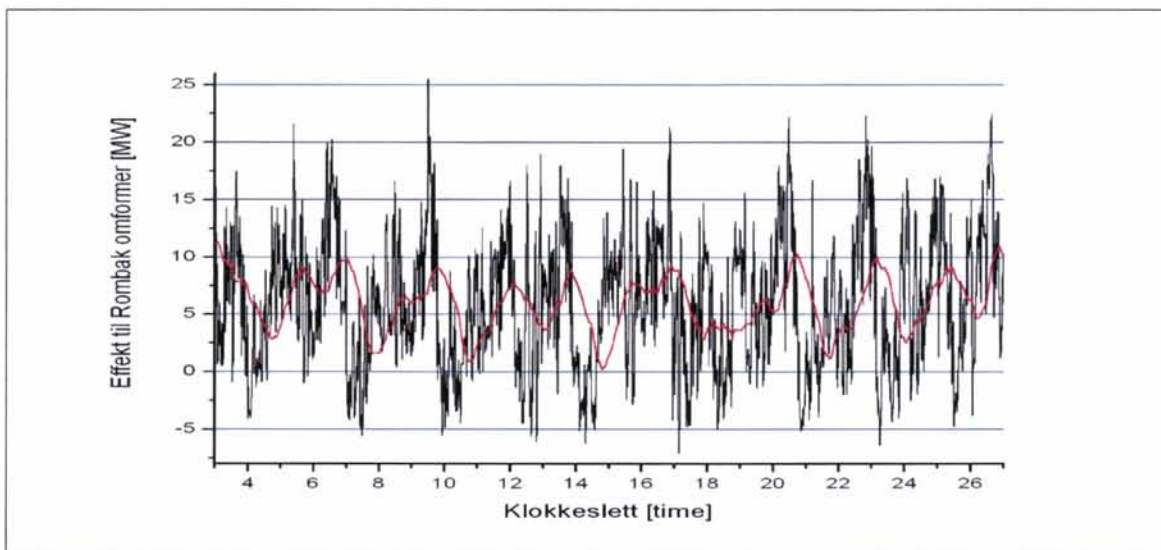
I tabell 4-69 nedenfor effektorptaket for Rombak og Stenbacken omformerstasjoner når Tornehamn ikke er i drift. Som det fremgår blir belastningen på Stenbacken omformerstasjon stor og utvidelser vil sannsynligvis være nødvendig for dette tilfellet. En annen ting er at belastningen sannsynligvis vil bli enda større fordi modellen ikke tar med banen og togtrafikken videre østover fra Stenbacken.

Tabell 4-69 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell og Tornehamn omformerstasjon nedlegges. Autotransformatorer plasseres ved Narvik, Straumsnes, Rombak Katterat og Bjørnfjell.

Simulering 3c							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10,0 + 5,8	27,949	52	19,920	55	14,194	55
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	-	-	-	-	-	-
Stenbacken	5,8 + 10,0	26,044	87	15,105	69	7,428	47

4.17.2 Levert effekt fra trefasenettet

I figur 4-71 nedenfor er opptaket og avlevering av aktiv effekt fra Rombak omformerstasjon vist. Sammenlignes dette med effektopptaket i tilfellet med konvensjonelt kontaktledningsanlegg i alternativ 1 og Tornehamn omformerstasjon i drift, se simulering 1 og resultatet i avsnitt 4.1.3, ser en at Rombak omformerstasjon nå tar opp mer effekt. Maksimal 1-minuttersverdi av effekt blir nå ca 25 MW, mot tidligere ble 16. Her ser det ut til at 1-timesverdien kommer på ca 12 MW, mot tidligere 9. Dette er som forventet ved at effekten som blir levert fra Tornehamn nå må fordeles mellom Rombak og Stenbacken omformerstasjoner.



Figur 4-71 Levert aktiv effekt, MEAN-verdi for 1 minutt (sort) og 1 time (rod) for Rombak omformerstasjon. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

4.17.3 Belastning av autotransformatorer

Nedenfor viser tabell 4-70 at belastningsgraden for autotransformatorene er mer eller mindre den samme som for simulering 3, men de enhetene som leverer effekt mot øst som skal dekke opp bortfallet av Tornehamn får betydelig større belastning. Dette gjelder autotransformatorer plassert ved Rombak øst og Bjørnfjell.

Tabell 4-70 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

Simulering 3c									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Narvik	200	0,383	6	0,303	20	0,207	41	0,107	21
Straumsnes	200	0,305	5	0,216	14	0,199	40	0,088	17
Rombak vest	400	0,344	3	0,271	18	0,221	22	0,146	28
Rombak øst	400	0,431	4	0,385	26	0,355	36	0,167	32
Katterat	200	0,344	6	0,266	18	0,241	48	0,113	44
Bjørnfjell	400	0,366	3	0,321	11	0,293	29	0,154	30

4.17.4 Belastning av negativ- og positivleder på høyspentlinjen

Nedenfor viser tabell 4-71 at strømbelastningen for lederne i høyspentlinjen er økt en del for kortere tidsavsnitt på østlig avgang. Men fremdeles er belastningen meget moderat sammenlignet med maksimal belastningsevne.

Tabell 4-71 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i vestlig og østlig retning fra Rombak omformerstasjon for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

Simulering 3c					
KL avgang ved omformerstasjon	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak vest NL/PL	0,351	0,318	0,220	0,229	0,146
Rombak øst NL/PL	0,432	0,429	0,361	0,309	0,167

4.17.5 Belastning av kontaktledningen

Nedenfor viser tabell 4-72 at belastningen av kontaktledningsanlegget er økt en del på østlige avganger. Høyeste 1-minuttsverdi oppstår ved østlig avgang fra Katterat med en belastningsgrad på 65 % og for høyeste 6-minuttersverdi i østlig retning som oppstår ved Rombak er belastningsgraden 76 %. Belastningen her er ikke større enn at det kan aksepteres, men i unormale driftssituasjoner vil sannsynligvis belastningen kunne bli for stor. Med AT-system fra Bjørnfjell og videre mot Riksgrensen skal belastningsstrømmene som forklart tidligere divideres på to.

Tabell 4-72 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene i vestlig og østlig retning fra autotransformatorene for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

Simulering 3c					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Narvik øst	0,480	0,460	0,435	0,317	0,177
Straumsnes vest	0,802	0,797	0,779	0,655	0,357
Straumsnes øst	0,695	0,691	0,672	0,562	0,309
Rombak vest	1,138	1,121	0,765	0,614	0,345
Rombak øst	0,930	0,916	0,817	0,609	0,330
Katterat vest	0,767	0,746	0,654	0,523	0,283
Katterat øst	0,875	0,869	0,836	0,601	0,324
Bjørnfjell vest	0,899	0,824	0,643	0,512	0,260
Bjørnfjell øst	1,226	1,219	1,013	0,781	0,517
Stenbacken vest	1,630	1,620	1,271	0,959	0,548

4.17.6 Spenning for togene

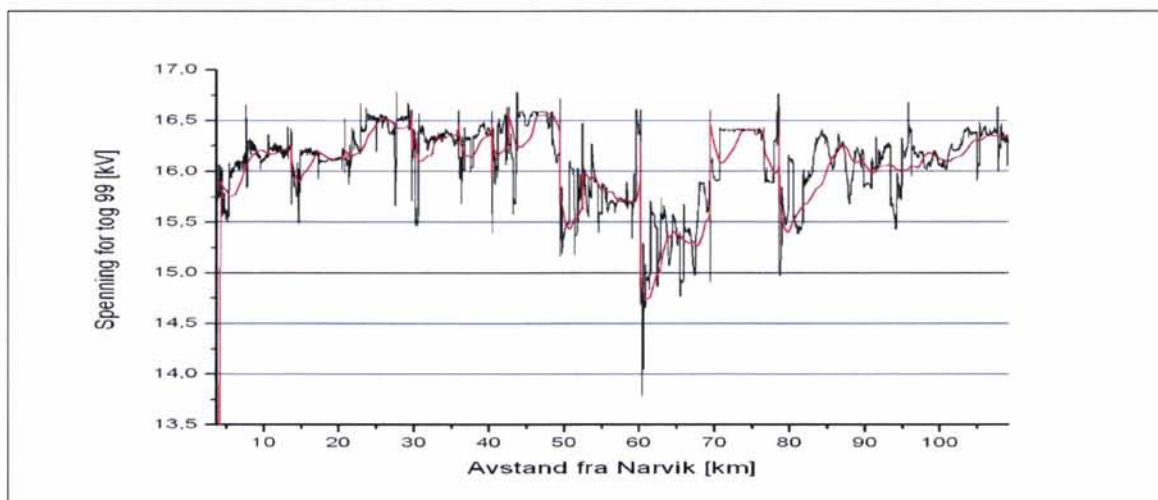
I tabell 4-73 nedenfor ser det ut til at samtlige tog får en spenning godt over regelverkskravet for dimensjonering av nye anlegg. I figur 4-72 til figur 4-77 ser en at togene får en tendens til noe lavere spenning enn i tidligere simulering rundt km 60, noe som en kan forvente når Tornehamn ikke lenger er i drift. Men uansett er dette spenninger som er helt akseptable.

Tabell 4-73 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

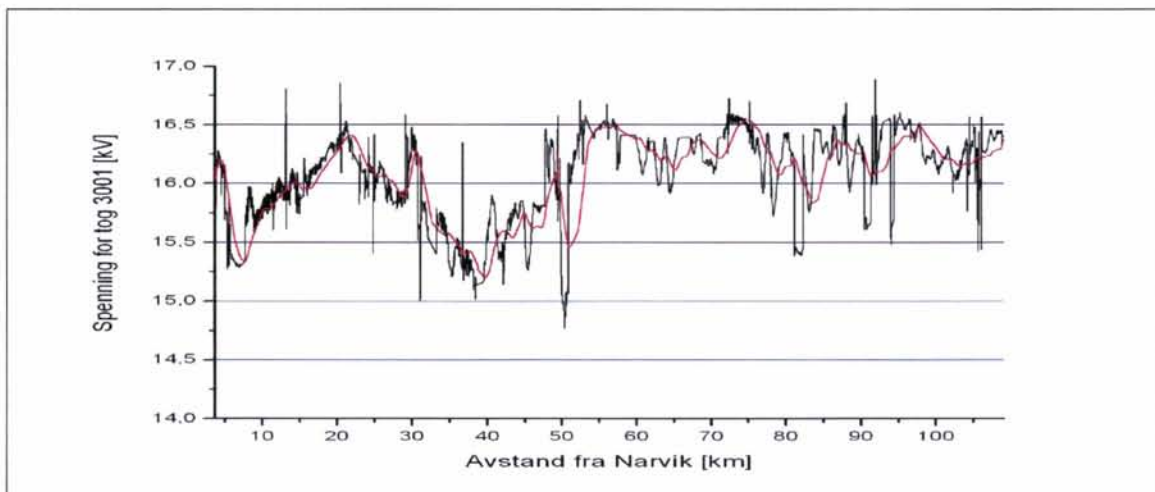
Simulering 3c		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	14,2	14,6
93	15,0	15,4
94	15,2	15,5
95	15,0	15,4
96	15,2	15,5
99	14,1	14,7
3001	14,8	15,2
3002	14,7	15,2
3003	14,8	15,2
3004	15,1	15,6
3005	14,2	14,6
3006	14,7	15,2
3007	14,9	15,3
3008	15,3	15,5
3009	14,6	15,3
3010	14,9	15,3
3020	14,1	15,0
3021	14,6	14,9
3022	14,6	15,7
3023	14,8	15,2
4004	14,4	15,0
4005	14,6	15,0

Simulering 3c

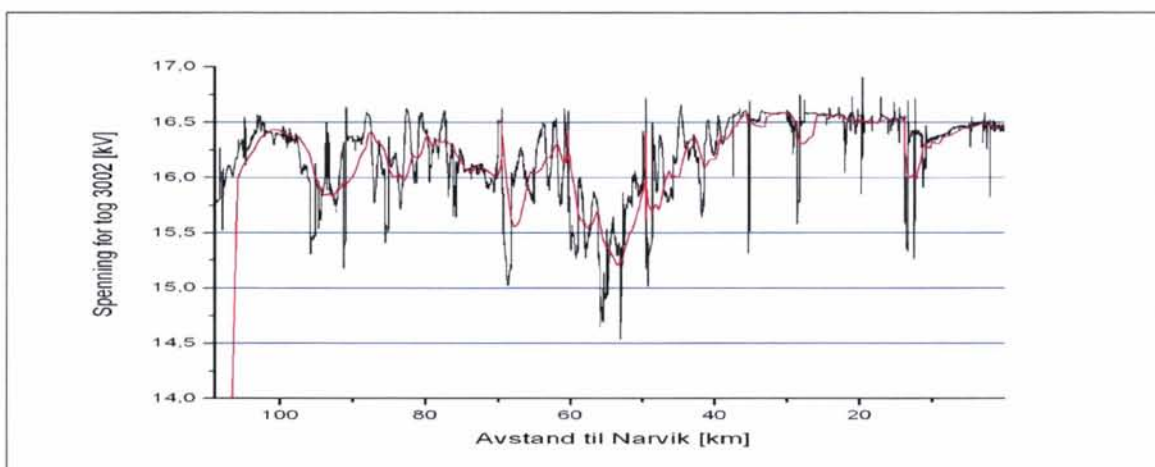
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
4016	14,3	15,1
4019	14,8	15,2
4025	14,4	15,1
4026	15,0	15,3
6070	14,1	14,5
6071	14,7	15,0
9901	14,6	15,0
9903	14,6	15,2
9904	14,4	14,9
9905	15,3	15,7
9906	14,2	14,8
9907	15,1	15,6
9908	14,0	14,5
9909	14,6	15,1
9910	15,0	15,4
9911	14,7	15,2
9912	14,6	14,9
9913	14,7	15,3
9914	14,9	15,2
9915	14,7	15,3
9916	14,7	15,2
9917	14,5	15,2
9918	14,1	14,7
9919	14,9	15,3
9920	14,4	15,0
9922	14,8	15,1



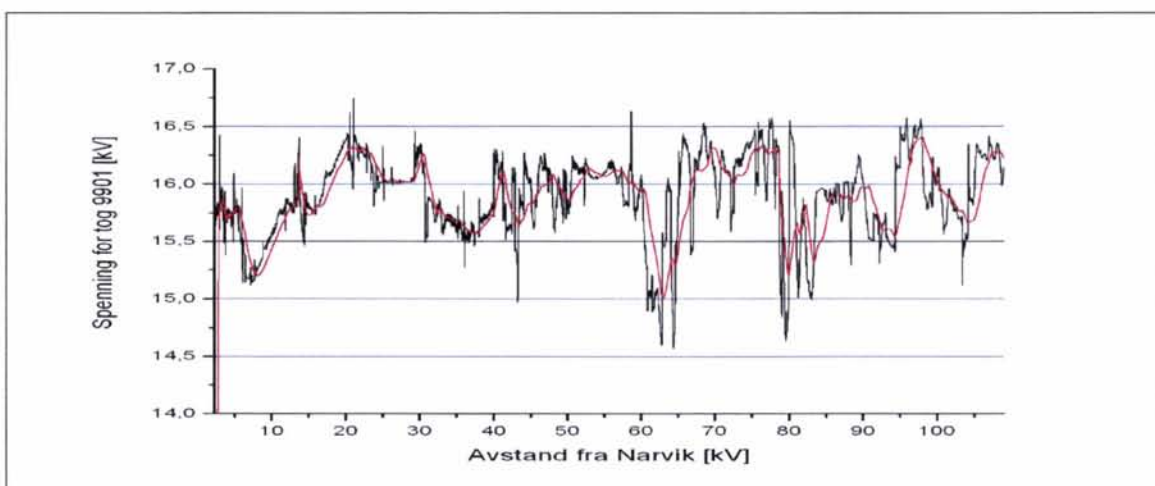
Figur 4-72 Spenningen for østgående persontog 99. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.



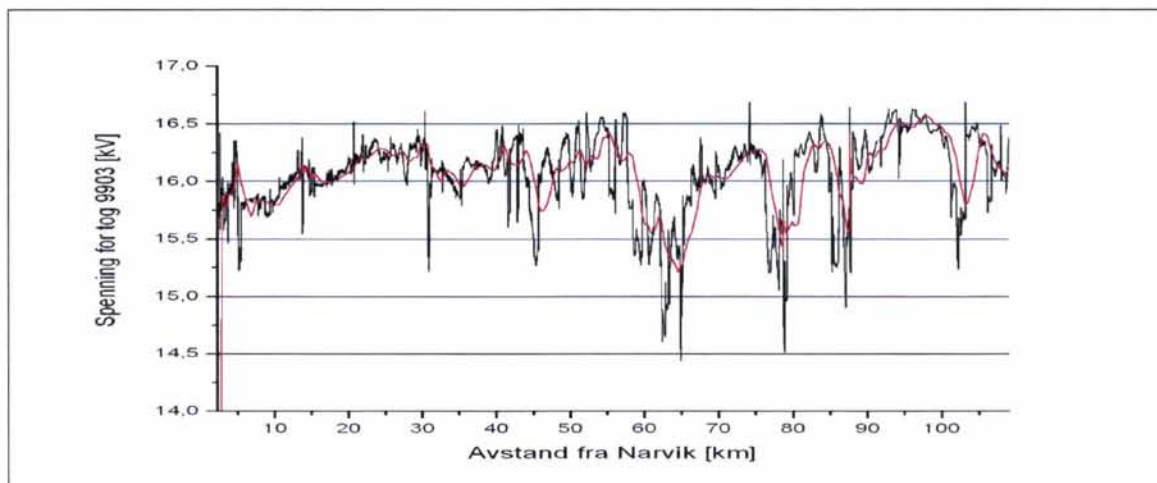
Figur 4-73 Spenningen for østgående godstog 3001. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.



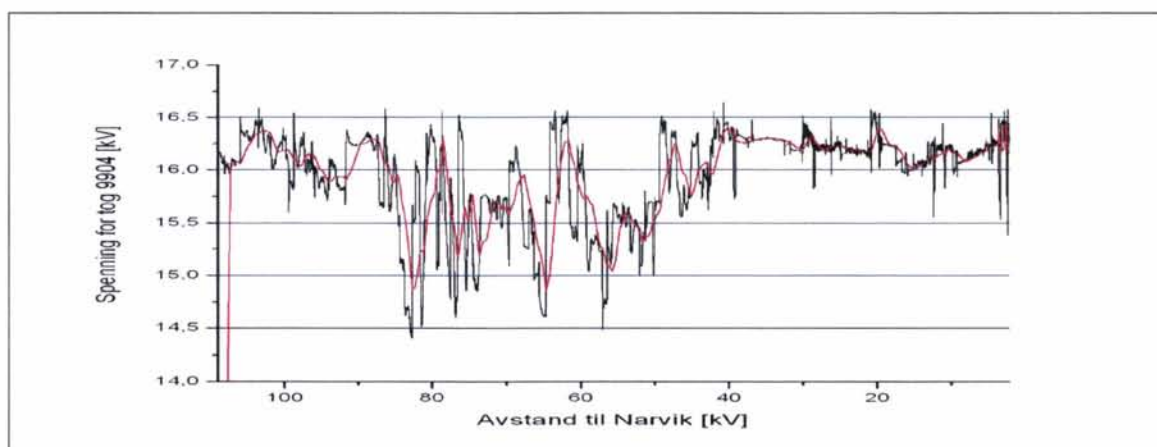
Figur 4-74 Spenningen for vestgående godstog 3002. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.



Figur 4-75 Spenningen for østgående olivintog 9901. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.



Figur 4-76 Spenningen for østgående tomtog 9903. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.



Figur 4-77 Spenningen for vestgående malmtog 9904. Simulering 3c med normal driftssituasjon, dimensjonerende ruteplan, fjernledningssystem med autotransformatorer og uten drift ved Tornehamn.

4.18 Simulering 3cb ensidig mating fra Rombak omformerstasjon til Stenbacken

I tilfelle Tornehamn omformerstasjon legges ned og det gjøres arbeid på linjen eller andre forhold gjør at en må koble ut kontaktledningen ved Stenbacken omformerstasjon. Matestrekningen fra Rombak med ensidig mating blir da nesten 90 km, noe som er meget langt med de store togene som trafikkerer stekningen. Simuleringen 3cb gjøres for å undersøke om spenningen blir for lav og kjøretiden for togene påvirkes.

4.18.1 Belastning av omformere

Nedenfor er det i tabell 4-74 vist belastningen for Rombak omformerstasjon ned utfall av vestlig avgang fra Stenbacken. Som en ser blir belastningen svært stor og spesielt for 6-minuttersverdien er marginene mot overlast svært liten, men en må også ta i betraktning at utkoblingen ikke nødvendigvis behøver å inntreffe på det tidspunkt der høyeste døgnbelastning inntreffer. En slik utkobling vil som oftest også være planlagt og med en begrenset varighet. Men uansett er det en margin på bare 4 % mot overlast for 6-

minuttersverdien om dette skjer på verst tenkelige tidspunkt. Her må det sannsynligvis gis beskjed om redusert pådrag/forsiktig kjøring for togene for å unngå utfall av aggregatene, eventuelt kan Rombak omformerstasjon bestykkes med 3 x 10,0 MVA omformerenheter.

Tabell 4-74 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cb							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	43,959	89	34,246	96	19,917	77
Stenbacken	10 + 5,8	-	-	-	-	-	-

4.18.2 Belastning av autotransformatorer

Nedenfor viser tabell 4-80 den høyeste RMS-verdien av strømmen gjennom autotransformatorene ved Bjørnfjell. Belastningen i prosent for 90-sekunders og 1-timesverdi så høy at to autotransformatorer er nødvendig. Men som påpekt tidligere vil belastningen på disse transformatorene bli betydelig mindre om NL og PL forlenges fra Bjørnfjell til Riksgrensen og overføringen dermed skjer på 30 kV nivå istedenfor ved 15 kV.

Tabell 4-75 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cb									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm RMS							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Bjørnfjell	400	0,652	5	0,643	21	0,629	63	0,353	68

4.18.3 Belastning av negativ- og positivleder

Belastningen av lederne på høyspentlinjen som fører negativ- og positivleder er gjengitt i tabell 4-76 nedenfor, og igjen er belastningsverdiene godt innenfor hva som kan aksepteres hva angår 1-timesverdi, og høyst sannsynlig også for kortere tidsavsnitt selv om belastningen da er større enn 550 A som ble beregnet som høyeste kontinuerlige belastningsverdi.

Tabell 4-76 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i østlig retning fra Rombak omformerstasjon og Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cb					
NL/PL avgang ved	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst NL/PL	0,722	0,720	0,683	0,608	0,362
Bjørnfjell vest NL/PL	0,655	0,647	0,635	0,578	0,353

4.18.4 Belastning av kontaktledningen

Tabell 4-48 viser strømbelastningen på avgangen til kontaktledningen for Rombak og Bjørnfjell, som en ser er belastningen spesielt ved Bjørnfjell og østover mye over hva som tillates for et kl-anlegg uten forsterkningsledning. Men som forklart tidligere bør det være AT-system videre mellom Bjørnfjell og Riksgrensen og da divideres strømmen her på to. Dette problemet unngås ved å forlenge NL og PL til Riksgrensen som tilliggere beskrevet. Mer bekymringsfullt er det at belastningen på kontaktledningen østover fra Rombak blir så høyt belastet, for 1-minuttsverdien er belastningsgraden 84 % for 6-minuttersverdien er den **105 %**. Det er med andre ord fare for overbelastning i en slik situasjon om den oppstår ved høy utetemperatur.

Tabell 4-77 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene fra Rombak omformerstasjon og ved Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

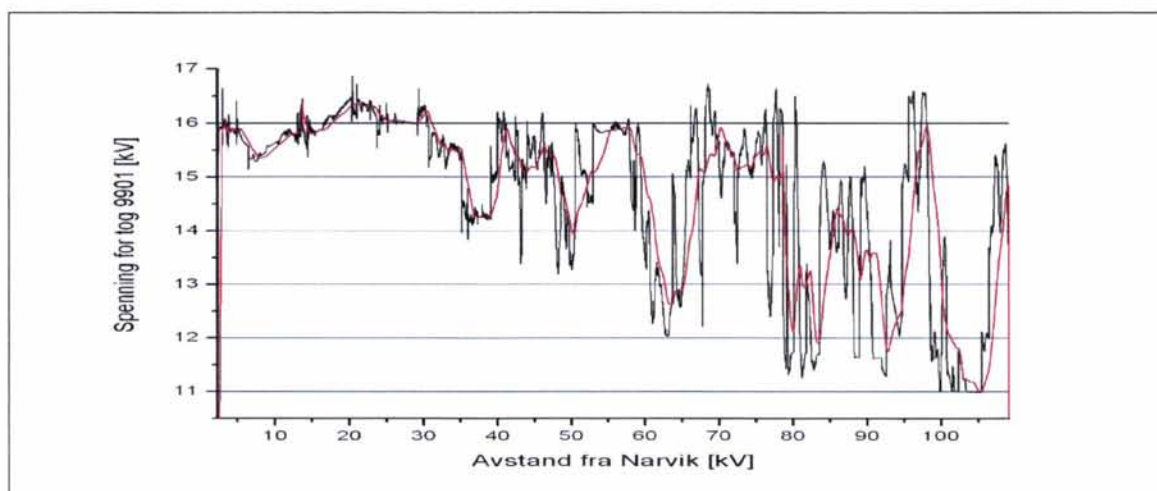
Simulering 3cb					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst	1,245	1,235	1,054	0,843	0,475
Bjørnfjell øst	1,990	1,961	1,824	1,645	1,066

4.18.5 Spenningen for togene

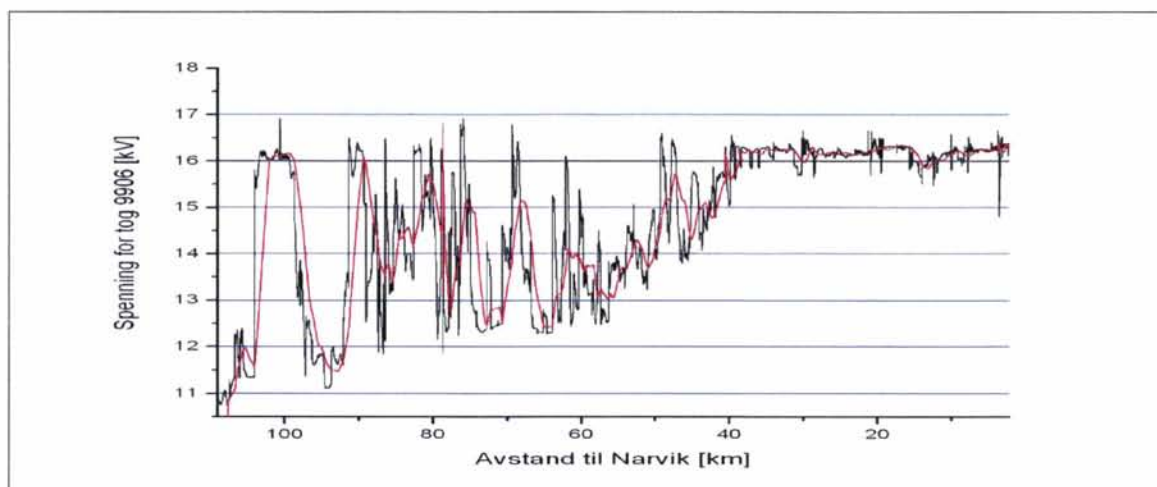
Tabell 4-78 viser at spenningen for togene i simulering 3cb er gjennomgående under det akseptable, selv for 2-minuttersverdien kommer spenningen under 12,0 kV som er det laveste tillatte spenningen får lov til å komme når det prosjekteres nye anlegg i Jernbaneverket. For Banverket kan det derimot gjelde andre regler. Nedenfor viser figur 4-78 og figur 4-79 spenningen for et vest og østgående tog, hvorav tog 9901 er olivintoget med høyest lastvekt for østgående tog.

Tabell 4-78 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cb		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	12,5	12,7
93	11,8	12,7
94	12,5	13,3
95	12,1	12,6
96	12,0	12,4
99	11,9	12,2
3001	12,7	14,0
3002	12,2	12,3
3003	11,9	12,0
3004	12,5	13,0
3005	11,8	11,8
3006	11,9	12,4
3007	11,2	11,5
3008	12,5	12,9
3009	11,4	11,5
3010	12,5	13,0
3020	11,5	11,9
3021	11,4	11,5
3022	11,9	12,2
3023	11,1	11,4
4004	11,5	12,0
4005	11,3	11,8
4016	11,5	11,6
4019	11,1	11,2
4025	11,6	11,8
4026	11,9	12,2
6070	11,9	12,0
6071	11,8	12,4
9901	11,0	11,0
9903	11,5	11,9
9904	11,4	11,8
9905	12,3	14,6
9906	11,1	11,5
9907	11,5	12,4
9908	11,7	11,7
9909	12,0	12,8
9910	11,4	12,5
9911	11,1	11,5
9912	11,8	12,4
9913	11,9	12,1
9914	11,3	11,6
9915	12,0	13,8
9916	11,8	12,8
9917	11,3	11,9
9918	12,0	12,2
9919	11,6	12,1
9920	12,1	12,5
9922	11,2	11,4



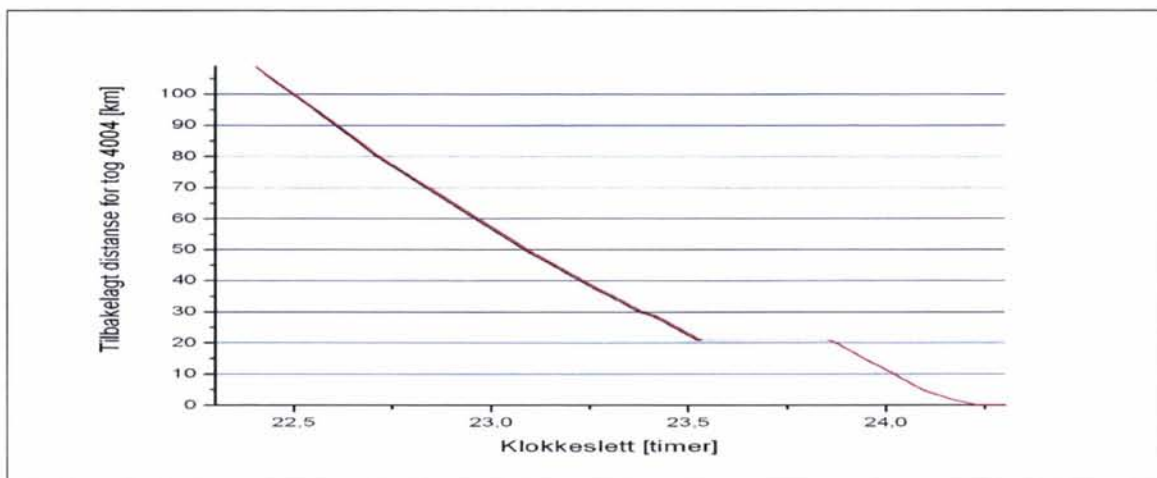
Figur 4-78 Spenningen for østgående olivintog 9901. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjerntledningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.



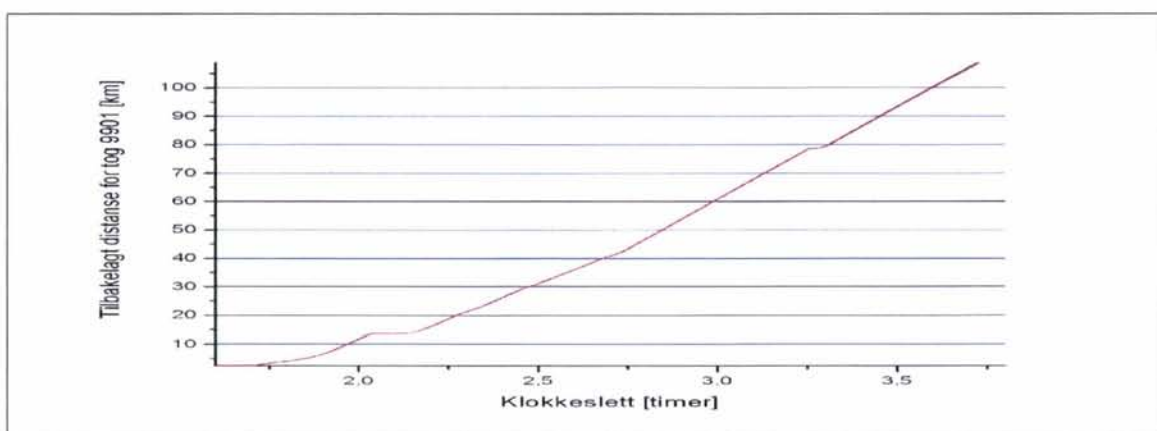
Figur 4-79 Spenningen for vestgående malmtog 9906. Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjerntledningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

4.18.6 Kjørt distanse

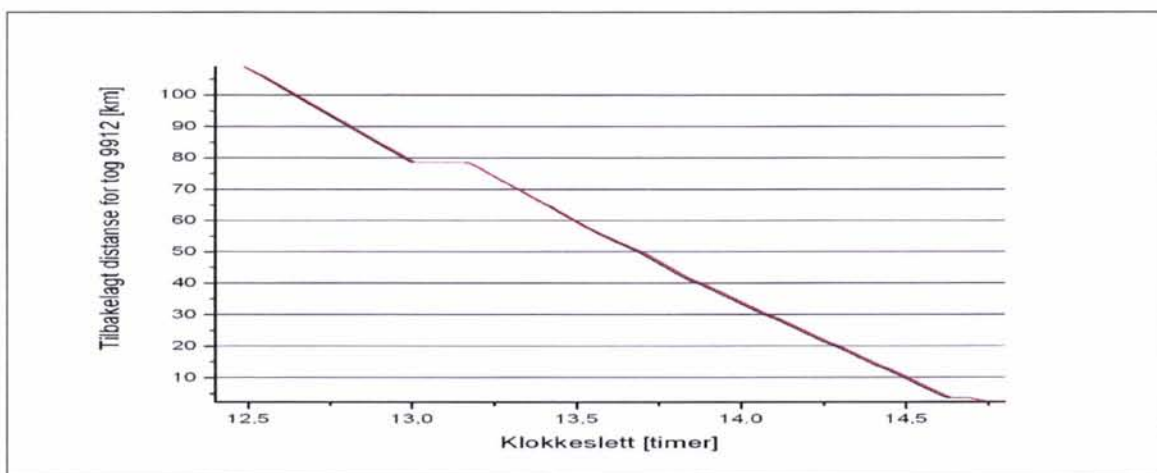
Også kjørt distanse er undersøkt for tre utvalgte tog, se figur 4-80 til figur 4-82. Rød strek viser resultatet fra simulering 3bb med ensidig mating fra Rombak til Tornehamn og sort strek resultatet fra denne simuleringen for sammenligningens skyld. Paradoksalt nok kommer togene knapt noe etter oppsatt rute, og selv det tunge olivintog holder ruten. Men i praksis kan det tenkes at lokomotivføreren ved såpass lav spenning vil redusere pådraget og da vil det være større sannsynlighet for noe forsinkelse.



Figur 4-80 Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 3bb med rød strek.



Figur 4-81 Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 3bb med rød strek.



Figur 4-82 Simulering 3cb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Stenbacken når Tornehamn omformerstasjon ikke lenger er i drift, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 3bb med rød strek.

4.19 Simulering cbb ensidig mating fra Rombak omformerstasjon mot Tornehamn med konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan

I en periode frem til minst 2020 er det sannsynlig at det ikke bygges nytt kontaktledningsanlegg med AT-system mellom Riksgrensen til Stenbacken. Først ved dette årstallet vil Banverket vurdere om AT-system skal bygges på denne strekningen av Malmbanan. Dermed vil en forsterkning av banestrømforsyningen skje på norsk side, men ikke på Malmbanan og i en avvikssituasjon er det interessant å se hvordan situasjonene med ensidig mating mot Tornehamn kan avvikles.

4.19.1 Belastning av omformere

Nedenfor er det i figur 4-63 vist belastningen på omformerstasjonene ned utfall av vestlig avgang fra Tornehamn. Belastningen blir nokså høy, men allikevel innenfor akseptable grenser.

Tabell 4-79 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cbb							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	35,601	72	24,478	68	16,492	64
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	-	-	-	-	-	-

4.19.2 Belastning av autotransformatorer

Nedenfor viser tabell 4-46 den høyeste RMS-verdien av strømmen gjennom autotransformatorene ved Bjørnfjell. Belastningen i prosent er ikke spesielt stor.

Tabell 4-80 Belastning av autotransformatorer. Prosentvis høyeste belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte verdier. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cbb									
Auto-transformator	Innsatt ytelse [A]	Strøm RMS							
		2 sek		30 sek		90 sek		1 time	
		[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Bjørnfjell	400	0,565	5	0,508	17	0,462	46	0,218	42

4.19.3 Belastning av negativ- og positivleder

Belastningen av lederne på høyspentlinjen som fører negativ- og positivleder er gjengitt i tabell 4-81 nedenfor, og igjen er belastningsverdiene godt innenfor hva som kan aksepteres, i og med at kortvarig belastning vanligvis tillates å være høy.

Tabell 4-81 Høyeste belastningsstrøm på negativ- og positivleder på høyspentlinjen i østlig retning fra Rombak omformerstasjon og Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3ccb					
NL/PL avgang ved	Strøm RMS [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst NL/PL	0,612	0,607	0,595	0,472	0,253
Bjørnfjell vest NL/PL	0,565	0,563	0,469	0,406	0,218

4.19.4 Belastning av kontaktledningen

Tabell 4-82 viser strømbelastningen på avgangen til kontaktledningen for Rombak og Bjørnfjell i østlig retning, som en ser er belastningen nokså stor spesielt ut fra Bjørnfjell mot Riksgrensen. Det spør om ikke forsterkningsleder fra Bjørnfjell mot Riksgrensen som tilsluttes forsterkningslederen i det svenske kl-anlegget må installeres for å unngå overbelastning. 1-timesverdien her er 99 % av nominell belastningsverdi, 6-minuttersverdien er 138 % og 1-minuttsverdien **109 %** om det ikke legges inn en forsterkningsleder.

Tabell 4-82 Høyeste belastningsstrøm på kontaktledningene fra Rombak omformerstasjon og ved Bjørnfjell for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

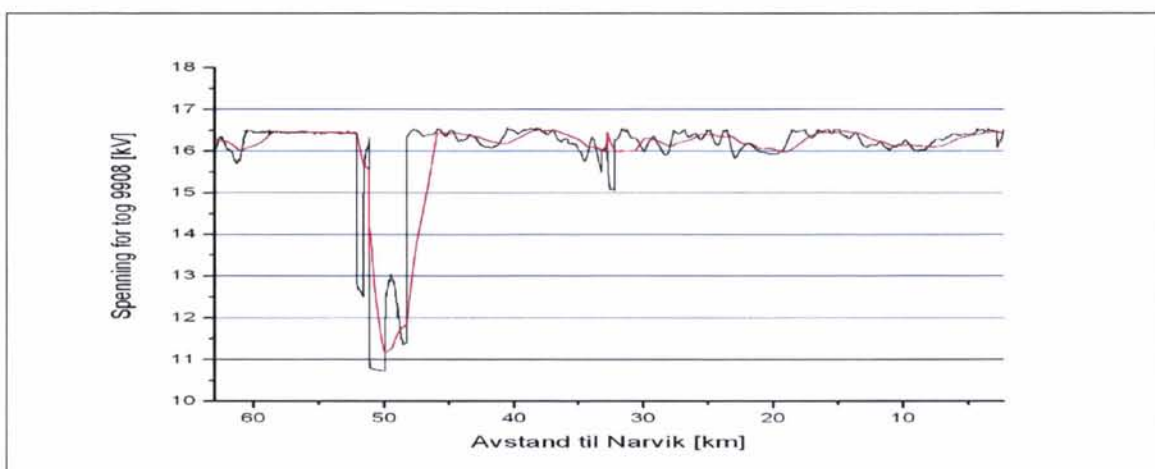
Simulering 3cbb					
KL avgang ved autotransformatorer	Strøm [kA]				
	1 sek	10 sek	1 min	6 min	1 time
Rombak øst	1,093	1,084	0,909	0,716	0,391
Bjørnfjell øst	1,743	1,735	1,367	1,102	0,592

4.19.5 Spenningen for togene

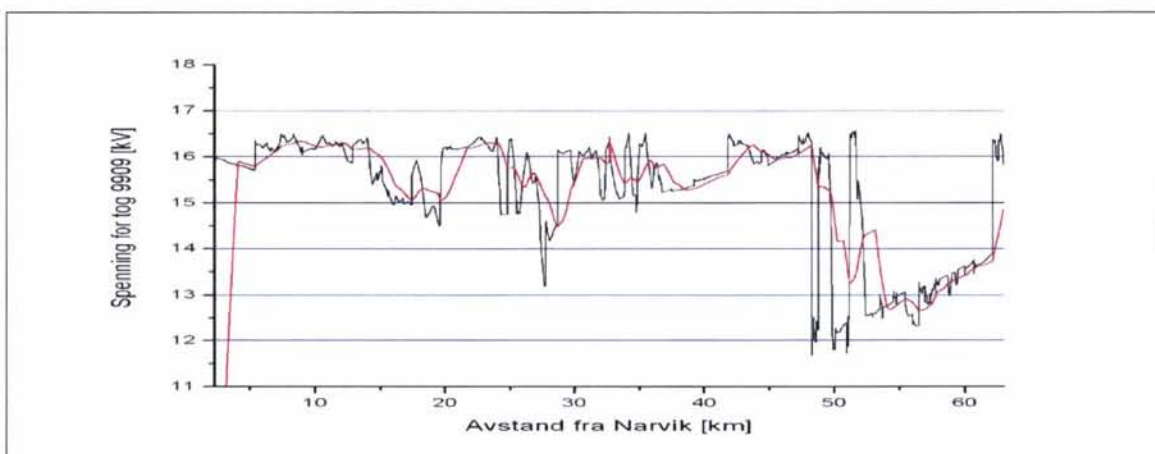
Nedenfor i tabell 4-83 ser en at spenningen for togene med simulering 3cbb er lave for mange tog, 10 tog får spenning under akseptabelt nivå som her er 12,0 kV. Det ser dermed ut til å ha stor betydning om det er AT-system eller konvensjonelt system på Malmbanan, se simulering 3bb, avsnitt 4.11, der ingen av togene fikk for lav spenning. I figur 4-83 og figur 4-84 nedenfor er spenningen for et vest- og et østgående tog vist og en ser at det er ved km 50 at lave spenninger oppstår, ellers er spenningene helt akseptable

Tabell 4-83 Laveste RMS-verdier av spenningene for samtlige tog for kort og noe lengre tidsperiode. Simulering 3cbb med unormal driftsituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

Simulering 3cbb		
Tog	Minimum spenning RMS [kV]	
	10 sekunder	2 minutter
90	12,5	12,6
93	13,0	13,7
94	13,3	14,1
95	12,9	13,8
96	13,9	14,6
99	11,8	11,8
3001	12,2	12,8
3002	12,3	12,9
3003	13,3	14,4
3004	14,1	14,7
3005	13,7	14,8
3006	12,2	12,6
3007	13,5	14,4
3008	13,8	14,5
3009	12,2	14,5
3010	13,3	14,4
3020	11,7	12,5
3021	13,7	15,1
3022	12,4	14,2
3023	13,6	14,4
4004	11,6	12,0
4005	13,1	13,8
4016	13,5	14,4
4019	13,3	14,3
4025	13,0	14,3
4026	14,0	14,4
6070	11,8	12,8
6071	13,6	15,2
9901	13,1	14,2
9903	11,9	12,9
9904	12,2	12,7
9905	13,1	14,6
9906	12,2	12,7
9907	13,2	14,6
9908	11,9	11,9
9909	10,7	11,2
9910	11,8	12,7
9911	12,0	12,6
9912	11,0	11,4
9913	10,8	11,3
9914	12,0	12,6
9915	12,4	14,2
9916	11,1	11,5
9917	14,5	15,4
9918	12,0	12,1
9919	13,3	14,5
9920	12,1	12,6
9922	11,8	12,1



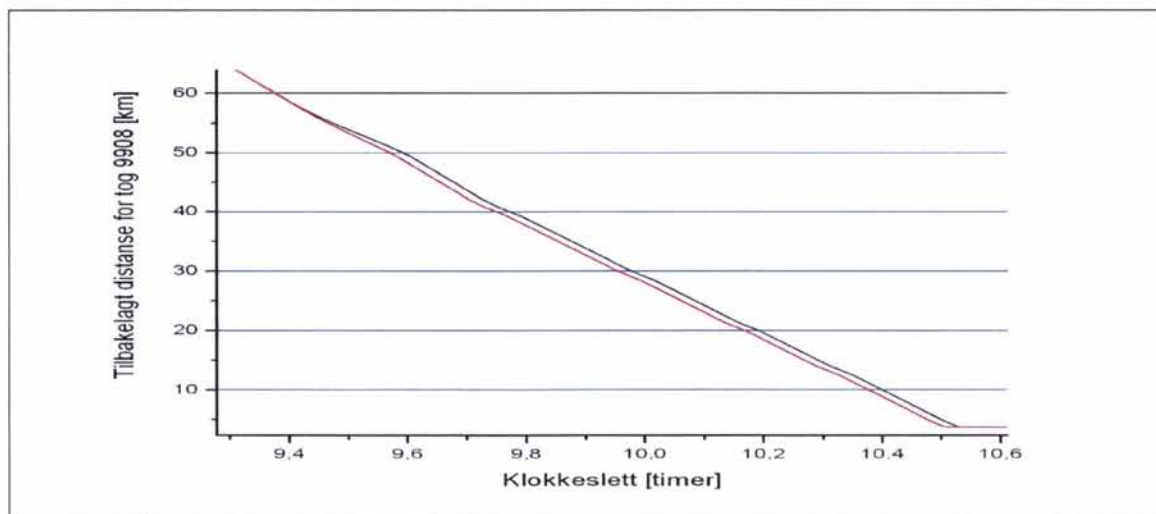
Figur 4-83 Spenningen for vestgående malmtog 9908. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjerntledningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.



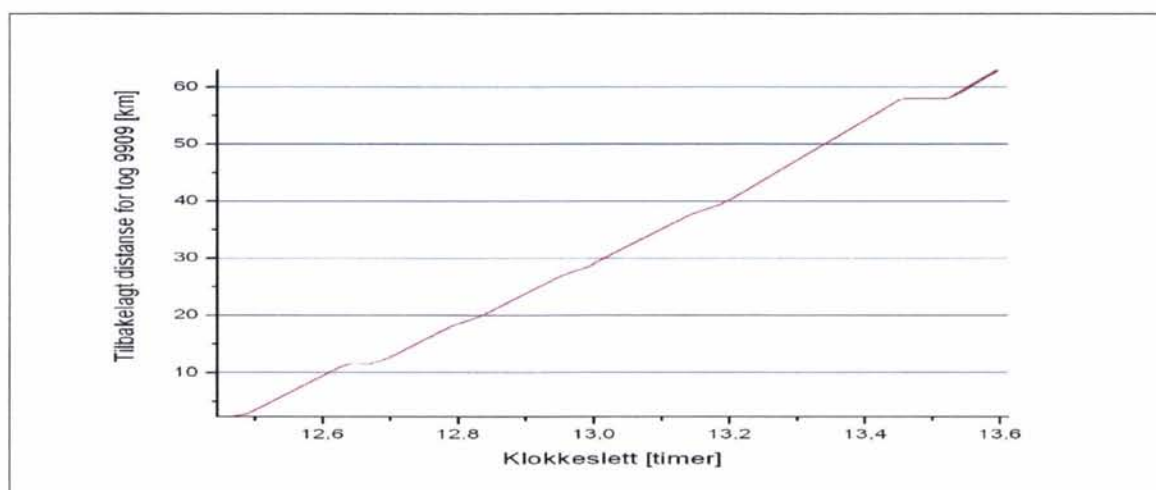
Figur 4-84 Spenningen for østgående tomtog 9909. Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjerntledningsystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell.

4.19.6 Kjørt distanse

For de togene som er det er laget diagram for spenningen for er det også sett på kjøretid og sammenlignet med simulering 3bb der en også hadde ensidig mating til Tornehamn, men AT-system hele på hel strekningen, se figur 4-85 og figur 4-86 nedenfor. Som en kan se er forskjellen på de to tilfellene ikke stor og for det toget som det oppstår størst forsinkelse for, tog 9908 kommer dette bare 23 sekunder senere til Narvik i denne simuleringen.



Figur 4-85 Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 3bb med rød strek.



Figur 4-86 Simulering 3cbb med unormal driftssituasjon med utfall vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon når det er konvensjonelt kontaktledningsanlegg på Malmbanan, dimensjonerende ruteplan og fjernledningssystem med autotransformatorer mellom Narvik-Rombak-Bjørnfjell med sort strek. Simulering 3bb med rød strek.

5 OPPSUMMERING OG DISKUSJON

5.1 Resultater fra simuleringene

Nedenfor er det i Tabell 5-2 forsøkt å sette opp alle vesentlige resultater fra samtlige simuleringer. Spenningsverdier som kommer under det teknisk regelverkets krav for den aktuelle avvikssituasjonen er markert med uthevede tall. Videre er det markert med "ja" eller "nei" om det oppstår forsinkelser eller ikke av betydning. Det vil si forsinkelser på flere minutter (over fem minutter som er tiden som gjør at et tog registreres i statistikken for forsinkelser) til endestasjoner, eller underveis som vil forsinke andre tog og dermed gi sannsynlighet for forsinkelser for alle tog etter en tid. Videre er tapsprosent for normal driftssituasjon for de forskjellige alternativene oppført.

For vurdering av om det vil oppstå for høye belastningsstrømmer for seriekomponenter er det satt "innenfor" når belastningen er under nominell belastningsstrøm med stor margin. "Moderat" er benyttet når belastningen er nært opp til marginen på 5 % for overlast og 10 % for marginen mot endringer som ofte kan forventes. "Høy strømverdi" indikerer at en er bare ca 5 % under nominell belastning eller noe over. Er det utført en simulering for et scenario med avvikssituasjoner eller unormale driftssituasjoner er marginen som tillegges bare 5 %. Hvor strengt en skal vurdere om anlegget er underdimensjonert i forhold til belastningen, vil også avhenge av hvor ofte situasjonen kan forventes å forekomme. Teknisk regelverk tillater dette ved at det åpner at det innføres trafikkbegrensninger eller endog trafikkstans.

Tabell 5-1 Kategorisering av marginer for å bedømme belastningen og forskjellige driftstilstander som krever ulik bedømming. Dette er benyttet ved utfylling av Tabell 5-2 nedenfor.

Uttrykk for belastnings margin:	"Innenfor"	"Moderat"	"Høy"
Margin for simulering for normal situasjon:	>> (5 + 10) %	≥ (5 + 10) %	< 5 %
Margin for simulerte verdier for scenarioer for avvik og unormale driftssituasjoner:	>> 5 %	≥ 5 %	< 5 %
"Skal" eller "bør" vurdering av uttrykkene "innenfor", "moderat" og "høy":	- Bør være vurdering for alle alternativene i normale driftssituasjoner.	- Skal være vurdering for normale driftssituasjoner og bør være for normale driftssituasjoner med endringer som ofte kan forventes og avvikssituasjoner.	- Skal være vurdering for avvikssituasjoner og bør for unormale driftssituasjoner.
Tiltak:		- Øke dimensjonene på seriekomponenter om dette ikke tilfredsstiles. - Forkaste alternativet om økning av dimensjonene ikke er mulig. Gjelder helst for normal driftstilstand. - Anbefale vern og sensorer for å forhindre overbelastning.	- Øke dimensjonene på seriekomponenter om dette ikke tilfredsstiles. - Anbefale vern og sensorer for å forhindre overbelastning eller innføre begrensninger i trafikken.

For alternativ 1 er det funnet et tilfelle med lav spenning i normal driftssituasjon for simulering 1, men dette kan ikke tillegges stor vekt da dette i stor grad beror på uvanlige sammentreff som forklart i avsnitt 4.1.6. For simulering 1aa og 1aaa oppstår det høye strømmer som i stor grad kan tilskrives det usedvanlig tunge returtoget med olivin på 4600 tonn. Det vil være å sette usedvanlig strenge dimensjoneringskrav at dette toget skal kunne ha et tog i nærheten i

”blokkpostavstand”, og dermed vil en kunne se bort fra akkurat denne situasjonen og ikke tillate andre tog så nært for akkurat dette toget.

For alternativ 2 er det bare denne ene simuleringen for normalsituasjon som er utført, samt simulering med mange tog i blokkpostavstand etter en blokade. Det er ikke gjort undersøkelser for flere unormale driftsituasjoner fordi det uansett forventes å bli for store strømmer i kontaktledningsanlegget. For eksempel vil dette gjelde i en avvikssituasjon med ensidig mating ved brudd på kontaktledningen når denne er utkoblet. Eneste tiltak for å unngå dette er forsterkningsleder eller flere transformatorer, men alternativet blir da så kostbart at det langt vil overstige de andre alternativene. Dette fremkommer i Hovedplanen for dette prosjektet.

I alternativ 3 med fjernledningssystem med autotransformatorer fås meget gode spenningsverdier for togene også for de situasjonene med avvikende trafikk. Lave spenninger fås bare for den sjeldne feilen med utfall av hele Rombak omformerstasjon, dessuten i en eventuell fremtidig situasjon der Tornehamn omformerstasjon nedlegges og feiltillfeller oppstår. I disse feiltillfellene blir også strømmene store, spesielt gjelder dette kontaktledningen mellom Rombak og Bjørnfjell uten forsterkningsleder, enda verre blir situasjonen for strekningen videre fra Bjørnfjell til Riksgrensen. Også situasjoner med tog i ”blokkpostavstand” medfører så store strømmer at vise restriksjoner må vurderes. For alle tilfellene er belastningen for fjernledning/negativ- og positivleder godt under høyeste driftsstrøm, dette gjelder også for alternativ 2.

Tabell 5-2 Oppstilte resultater fra samtlige utførte simuleringer for de tre alternativene. For mange av simuleringene med unormal driftssituasjon vil en endring av tidspunkt for avgangen for det tunge olivintoget 3001 eller innstilling av dette få betydning for om overbelastning vil kunne inntreffe. Uthevet skrift for tilfeller der tillatte verdier er overskredet, der det må innføres ytterligere forsterkninger eller begrensninger.

Alternativ	Simulering	Laveste spenning 10 sekunder [kV]	Laveste spenning 2 minutter [kV]	For sinkelser	Totale tap %	Strømbelasting
Alt 1 - Sammenhengende kontaktledning med mateledningen normalt utkoblet	Simulering 1 - normal driftssituasjon med dimensjonerende ruteplan	Persontog: 14,0 Godstog: 13,2 Malmtog: 12,5	Persontog: 15,1 Godstog: 14,0 Malmtog: 14,2	NEI	13,3	Innenfor høyeste tillatte belastningsstrøm med forsterkningsleder.
	Simulering 1b - avvikende driftssituasjon ved utfall av Rombak omformerstasjon	Persontog: 8,7 Godstog: 9,7 Malmtog: 9,5	Persontog: 11,2 Godstog: 11,0 Malmtog: 10,0	JA	-	Innenfor høyeste tillatte belastningsstrøm med forsterkningsleder.
	Simulering 1bb - avvikende driftssituasjon ved utfall av vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon	Persontog: 11,0 Godstog: 11,0 Malmtog: 10,3	Persontog: 11,0 Godstog: 11,0 Malmtog: 10,3	JA	-	Høye strømverdier for østlig avgang fra Rombak; fare for overbelastning selv med forsterkningsleder.
	Simulering 1aa - normalt avvikende trafikksituasjon med 2 tog fra Narvik i "blokkpostavstand"	Persontog: - Godstog: 12,4 Malmtog: 12,8	Persontog: - Godstog: 13,0 Malmtog: 13,7	NEI	-	Innenfor høyeste tillatte belastningsstrøm.
	Simulering 1aaa - avvikende trafikksituasjon med 6 tog fra Narvik og 2	Persontog: 13,6 Godstog: 12,5 Malmtog: 13,0	Persontog: 14,0 Godstog: 12,8 Malmtog: 14,2	NEI	-	Høy strømverdier for vestlig avgang fra Rombak; fare for overbelastning.
	Simulering 1aaaa - normalt avvikende trafikksituasjon med 2 malmtog til Narvik i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand"	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	-	-	Innenfor høyeste tillatte belastningsstrøm.
Alt 2 Fjernledning og toviklingstransformatorer	Simulering 2 - normal driftssituasjon med dimensjonerende ruteplan	Persontog: 15,1 Godstog: 14,8 Malmtog: 14,0	Persontog: 15,9 Godstog: 14,8 Malmtog: 15,0	NEI	12,6	Innenfor høyeste strømverdier for kontaktledning, men uten forsterkningsleder er marginene ved avvik små for vestlig avgang fra Rombak.
	Simulering 2aaa - unormal driftssituasjon 6 tog i "blokkpostavstand" fra Narvik og 2 motkommende tog.	Persontog: 14,7 Godstog: 13,0 Malmtog: 14,9	Persontog: 14,7 Godstog: 13,7 Malmtog: 15,0	NEI	-	Høy strømverdier for vestlig avgang fra Rombak (uten forsterkningsleder); fare for overbelastning.
Alt 3 Fjernledning med autotransformatorer	Simulering 3 - normal driftssituasjon med dimensjonerende ruteplan	Persontog: 15,3 Godstog: 15,2 Malmtog: 14,7	Persontog: 15,9 Godstog: 15,2 Malmtog: 15,2	NEI	12,6	Innenfor høyeste tillatte belastningsstrøm.
	Simulering 3b - avvikende driftssituasjon ved utfall av Rombak omformerstasjon	Persontog: 11,7 Godstog: 11,6 Malmtog: 11,1	Persontog: 13,6 Godstog: 12,1 Malmtog: 12,7	NEI	-	Høye strømverdier for kontaktledningen, fare for overbelastning.
	Simulering 3bb - avvikende driftssituasjon ved utfall av vestlig avgang fra Tornehamn omformerstasjon	Persontog: 13,3 Godstog: 13,2 Malmtog: 12,7	Persontog: 13,8 Godstog: 13,9 Malmtog: 13,8	NEI	-	Høye strømverdier for kontaktledningen, bare så vidt innenfor marginene.
	Simulering 3bbb - avvikende driftssituasjon med utfall autotransformatoren ved Narvik	Persontog: 13,2 Godstog: 13,2 Malmtog: 12,6	Persontog: 13,7 Godstog: 13,9 Malmtog: 13,8	NEI	-	Høye strømverdier for kontaktledningen, bare så vidt innenfor marginene.
	Simulering 3aa - normalt avvikende trafikksituasjon med 2 tog fra Narvik i "blokkpostavstand"	Persontog: - Godstog: 14,5 Malmtog: 14,6	Persontog: - Godstog: 14,8 Malmtog: 15,2	NEI	-	Høye strømverdier for kontaktledningen, fare for overbelastning.

	Simulering	Laveste spenning 10 sekunder [kV]	Laveste spenning 2 minutter [kV]	For-sinkelser	Totale tap %	Strømbelasting
Alt 3 Fjernledning med autotransformatorer	Simulering 3aaa - avvikende trafikksituasjon med 6 tog fra Narvik og 2	Persontog: 14,9 Godstog: 14,0 Malmtog: 14,3	Persontog: 15,3 Godstog: 14,4 Malmtog: 15,0	NEI	-	Moderate strømverdier for kontaktledningen.
	Simulering 3aaaa - normalt avvikende trafikksituasjon med 2 malmtog til Narvik i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand"	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	-	-	Høye strømverdier for kontaktledningen, fare for overbelastning.
	Simulering 3aaaaa - normalt avvikende trafikksituasjon med 2 malmtog til Narvik i "stasjonsavstand" og "blokkpostavstand". Togene får ikke bremse regenerativt mer enn 500 kN.	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	Persontog: - Godstog: - Malmtog: < 15	-	-	Innenfor høyeste tillate belastingsstrøm.
	Simulering 3c - uten Tornehamn omformerstasjon ellers normal driftsituasjon	Persontog: 14,1 Godstog: 14,1 Malmtog: 14,0	Persontog: 14,6 Godstog: 14,6 Malmtog: 14,5	NEI	-	Innenfor høyeste tillate belastingsstrøm.
	Simulering 3cb - uten Tornehamn omformerstasjon og ensidig mating fra Rombak til Stenbacken	Persontog: 11,8 Godstog: 11,1 Malmtog: 11,0	Persontog: 12,2 Godstog: 11,2 Malmtog: 11,0	NEI	-	Høye strømverdier for kontaktledningen mellom Rombak og Riksgrensen, fare for overbelastning
	Simulering 3cbb - ikke AT-system på Malmbanan - uten Tornehamn omformerstasjon og ensidig mating fra Rombak til Stenbacken	Persontog: 11,8 Godstog: 11,6 Malmtog: 10,8	Persontog: 11,8 Godstog: 12,0 Malmtog: 11,2	JA	-	Høye strømverdier for kontaktledningen mellom Rombak og Riksgrensen, fare for overbelastning

5.2 Vurderinger av forholdene rundt de tre alternativene

5.2.1 Generelle vurderinger som ikke er lett kvantifiserbare

5.2.1.1 Mindre belastning og bedre spenninger i virkeligheten

En virkelig lokomotivfører som kjenner banestrekningen og ruten vil kunne kjøre på en mer fornuftig måte enn den lokomotivføreren som er forsøkt gjenskapt i TracFeed sin modell.

Flere ting kan gjøre seg gjeldende, og noen forskjeller er:

- Akselerasjonen, og dermed trekraften, avpasses etter hastigheten. Stor akselerasjon ved større hastigheter betyr stort effektuttak og en virkelig lokomotivfører vil oftest være forsiktig med å kjøre slik.
- En virkelig lokomotivfører har utsikt mot banen og vil neppe gi pådrag i nedoverbakke selv om toget har for liten hastighet i forhold til skiltet hastighet. Toget vil akselerere uten, eller med forsiktig pådrag når bremsing vil uansett bli nødvendig innen kort tid.
- Når lokomotivføreren ser en stigning kan han gi økt pådrag og øke hastigheten før stigningen og dermed få "tilfart" før stigningen slik at hastigheten lettere holdes. Dette gjelder om ruten i utgangspunktet er slakk (det vil si med gode marginer slik at det vil oppstå ventetid på stasjonene om det kjøres etter skiltet hastighet) og det holdes lav hastighet.

- Når lokomotivføreren kjenner både strekning og ruten kan han vite hvor stor hastighet han må holde for å komme tidsnok frem til neste stasjon med stopp. Siden de fleste ruter er lagt opp med ekstra tidsmarginer er det ikke nødvendig alltid å holde skiltet hastighet. Høy hastighet vil da bare resultere i ekstra lange ventetider på stasjonene.
- Et annet resultat av å kjenne strekning og ruten er at lokomotivføreren nødvendigvis heller ikke trenger å holde skiltet hastighet i sterke stigninger, når det senere kommer flate strekninger der eventuelt litt tapt tid kan kjøres inn.
- En lokomotivfører som kjenner neste stoppested, hastighetsøkning eller -minskning en tid før denne kommer, kan kjøre mer avpasset etter dette. For eksempel vil han ikke forsøke å holde skiltet hastighet når toget allikevel skal stoppe for krysning noen kilometer lenger fremme.

Mindre effektuttak og energiforbruk blir gjerne resultatet av slik kjøring, og lokomotivførere kan for enkelte strekninger selv optimalisere kjøringen for å enten redusere energioptaket eller de høyeste effekttoppene. Det trengs utvilsomt en avansert modell for å kunne avpasse kjøringen så bra som punktene over antyder. I TracFeed ville dette gi seg utslag i lavere effekttopper enn det som fremkommer i dag.

5.2.1.2 Adhesjonskoeffisientens sin betydning for større effekttopptak og lavere spenning

På den annen side er adhesjonen mellom skinne og hjul valgt lav (koeffisient lik 0,161) og dermed skulle forholdene på tørre dager (med koeffisient lik 0,4) bli slik at høyeste tillate trekraft blir større. Dermed kan togene komme til å trekke større effekt, men som undersøkelser i appendiks C viser ser disse større effekttopptakene ut til å bli kortvarige. Altså ser det ut til at dette resulterer i at togene med større adhesjon kommer opp i ønsket hastighet hurtigere, men etter dette trekker omtrent samme effekt som om det hadde vært lav adhesjon. I et arbeid der forskjellige parametere ble variert for å se på tapene i Oslo-området ble adhesjonskoeffisienten redusert fra 0,161 til 0,116 for å se på følsomheten for energiforbruk og tap, se [12]. Det viste seg at tapene i kontaktledningsanlegget gikk ned fra 4,5 til 4,4 %. Altså en liten endring, men så kan vel heller ikke endringen av adhesjonskoeffisienten i dette tilfellet sies å være særlig stor. Uten at en kan si for mye om dette i denne forbindelse kan det se ut som om en høyere adhesjonsfaktor gir større kortvarige effekttopper, men sannsynligvis ikke har særlig stor påvirkning for energiforbruk og tap.

5.2.1.3 Lave spenninger ved unormale driftssituasjoner og konsekvensen for kjøretiden

Simuleringene viser at spenningene skal bli nokså lave over lengre strekninger før en ser utslag på togenes kjøretid, men enkelte simuleringer (som simulering 1b og 1bb) viste betydelige utslag. Ofte kan lave spenninger for en kortere del av banestrekningen skape forsinkelser for den berørte delen av banen, men dette kjøres inn senere. Det kan også skje at stopp ved stasjoner uansett er såpass langvarige at om toget kommer sent inn får det bare den konsekvensen at oppholdstiden blir kortere, men avgangen skjer på oppsatt tid. Imidlertid kan en ruteplan med stor trafikk for eksempel forårsake at forsinkede tog i en retning fører til forsinkelse av møtende tog og at det dermed oppstår en kaskaderende virkning.

Etter normen EN 50388 skal lokomotiver ha nokså stor begrensning av tillatt opptatt effekt ved lave spenninger, se avsnitt 3.5.5 med figur som viser at omtrent alle lokomotivene i bruk i Norge trekker til dels betydelig større effekt ved lave spenninger enn denne normen tillater.

Om simuleringene her var utført med denne større begrensningen kan det tenkes at spenningen i unormale driftssituasjoner hadde blitt bedre, men det kunne ha gått på bekostning av lengre kjøretid.

5.2.1.4 Realistiske simuleringer for unormale driftssituasjoner

For en simulering for et driftsavvik der scenariet er en feil som ikke hindrer togfremføringen (kan være utfall av en transformator, omformerstasjon, fjernledning etc.) blir det selvsagt riktig å simulere med den gjeldende ruteplanen. Men for scenarier der det ikke er fysisk mulig for togene å passere et visst punkt, for eksempel ensidig mating fra en omformerstasjon til neste på grunn av arbeid på bane eller kontaktledning, vil selvfølgelig togene måtte stanses på nærmeste stasjon om dette skal være realistisk. Flere tog nærmer seg bruddstedet fra begge sider og de må stoppe på neste nærlignede stasjon. I en slik situasjon blir effektuttaket mindre og mindre, men derimot kan det bli veldig stort og større enn normalt etter at den unormale situasjonen er over, fordi det da er mange tog som kan få klarsignal samtidig.

Dette er imidlertid arbeidskrevende å få simulert riktig fordi det betyr at ruteplanen og toggangen må gjøres om. Imidlertid kan en si at om en simulerer over en lengre tid med slike avvik med uforandret ruteplan er simuleringen gyldig for en begrenset tid av simuleringen. Dermed kan høyeste strøm og midlere verdier for kortere tidsavsnitt (muligens opptil noen minutter) for en slik simulering være riktig, men usannsynlig for midlere verdier for eksempel en time. Dette vil selvfølgelig være forskjellig fra tilfelle til tilfelle og disse simuleringene må derfor sees på som konservative.

Redusert hastighet og pådrag er også vanlig å innføre for de unormale driftssituasjonene beskrevet ovenfor. Dette er det fullt mulig å få med i modellene for simuleringene, men sjeldent å gjøre fordi det er arbeidskrevende.

5.2.1.5 Samspill mellom infrastruktur operatører og lokomotivførere

Når en gjør simuleringer og konstruerer scenarier for avvikssituasjoner gjøres som forklart ovenfor visse forutsetninger om feiltype og konsekvens, men for eksempel at lokomotivførere kan få beskjed om å kjøre mer forsiktig og dermed reduserer effektopptaket, er vanskelig å favne. Lavere effektopptak kan redusere behovet for store ytelser på seriekomponenter samt at laveste spenning ikke blir så lavt som simuleringen viser. På den annen side vil redusert kjøretid kunne føre til trafikkproblemer.

Å sette laveste spenning (eller strømstyrke for ledere og andre seriekomponenter) som et absolutt akseptkrav for dimensjoneringen ut fra noen tenkte scenarier kan altså føre til overdimensjonering ved at lokomotivførere og trafikkleder sammen kan gjøre mye for å redusere disse problemene. Forsiktig pådrag gir bedre spenning og redusert kjøretid kan ofte tas igjen senere. Skjer et slikt avvik om vinteren med lav temperatur og kanskje vind i tillegg oppstår så stor nedkjøling av komponenter at større driftsstrømmer enn de nominelle kan tillates og trafikkproblemene begrenses ytterligere.

Uansett er det menneskelige faktorer og ytre omstendigheter som kan bli avgjørende og danner et komplekst bilde. Simuleringer og beregninger tar ofte bare hensyn til sammenfall av flere verste tilfeller for å være på den sikre side, altså en konservativ beregning. I praktisk drift med stokastiske hendelser vil det sannsynligvis oppstå sjeldnere driftsavvik med så store konsekvenser som beregninger ofte kan gi inntrykk av. Imidlertid vil beregninger der en tar

hensyn til sviktintensitet, reparasjonstid etc. forsøke å fange opp dette. Det bør uansett være visse vern og detektorer som overvåker tilstanden og som beskytter komponentene mot overbelastning, all den tid det er mulighet for flere ugunstige hendelser samtidig og derpå følgende overbelastning.

5.2.1.6 Harmonisering av seriekomponenter

Simuleringene og presentasjonen av resultatene ser på strømmer som RMS-verdier for visse tidsperioder og effekter som MEAN-verdier for hovedkomponenter i banestrømforsyningen. En må undersøke hvordan høyeste strøm eller effekt er i forhold til nominelle verdier. Nominelle strømmer overskrides ofte kortvarig og for mange komponenter har man også oppgitte verdier for hvor store belastninger de kan tåle for kortere tid. Helst burde selve driftstemperaturen undersøkes i beregningene, men dette er arbeidskrevende og mer sjeldent.

Uansett er det driftstemperaturen som er begrensende for hvor store strømmer som kan tillates og hvor lenge. Dette er komponenter som kontaktledningsanlegg, transformatorer, mateledning, fjernledning og andre vesentlige komponenter som blir undersøkt. Dermed må det forutsettes at impedansspoler, matekabler, sugetransformatorer og alle mulige andre mindre komponenter er harmonisert og tilpasset hovedanlegget de er en mindre del av.

5.2.2 Vurderinger av unormale driftssituasjoner

For å få oversikt over alle de unormale driftssituasjoner som er trolig å kunne oppstå er Tabell 5-3 satt opp. Denne viser både de hendelser som er simulert og som en vet konsekvensen av, og en rekke andre hendelser med antatte konsekvenser. Det er forsøkt å gjøre antagelser for om spenningen blir for lav (i forhold til regelverkets krav til verdier i normale og unormale driftssituasjoner), om det er sannsynlig at forsinkelser oppstår og om overbelastning er sannsynlig. Bare kategoriene "JA" og "NEI" er benyttet fordi det er vanskelig å anslå mer presist hvor lav spenningen vil bli, hvor store forsinkelser det vil bli eller om belastningen vil bli for stor, når avvik fra ruteplan, kjørestil, restriksjoner, temperatur og værforhold, lokomotivtyper og en rekke andre faktorer som er vanskelige å forutsette er avgjørende. Enda vanskeligere er det når flere av disse faktorene kan inntre samtidig. En simulering som gir en pekepinn om utfallet er oppført som referanse eller den simuleringen som faktisk er utført for den aktuelle situasjonen brukt (oppført med uthevede bokstaver). Hendelsene er forsøkt gjengitt ved å oppføre hendelsene i stigende rekkefølge etter alvorlighetsgrad.

Bare hendelser eller situasjoner som oppstår når det forutsettes full trafikk er med i tabellen, når det gjelder planlagte hendelser vil disse som regel legges til perioder med liten trafikk, eller til vedlikeholdsperioder uten trafikk. Da kan naturligvis omtrent hvilken som helst hendelse inntreffe uten at det får konsekvenser.

Tabell 5-3 Oppsummering av simuleringresultater for avvikssituasjoner og vurderinger av andre situasjoner som ikke er simulert (kursiv)

Alt	Avvikstilfelle	Lav spenning	Forsinkelser	Overbelastning	Referanse simulering
Alt 1 - Sammenhengende kontaktledning med mateledningen normalt utkoblet	Bytte av trekraft, ekstra vogner, ekstra togvekt, noen få ekstratog etc.	NEI	NEI	NEI	Sim 1
	Kjøring med tog med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	JA	NEI	NEI	Sim 1aa
	Oppstart av trafikken og kjøring av mange tog etter en blokkade	NEI	-	NEI ¹	Sim 1aaa
	Kjøring med malmtog mot Narvik som bremses regenerativt med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	NEI	NEI	NEI	Sim 1aaaa
	Ensidig mating og innkobling av mateledningen, for eksempel fra Narvik mot Rombak ved brudd vest for Rombak, eller fra Bjørnfjell mot Rombak ved brudd øst for Rombak.	Sannsynligvis ned mot 12,0 kV selv med restriksjoner	JA, men begrensinger i trafikken må uansett påregnes ved arbeid på linjen	NEI	-
	Brudd på samkjøringen ved døseksjonen ved Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim 1
	Utfall av et omformeraggregat i Rombak eller Tornehamn	NEI	NEI	NEI	Sim1
	Ensidig mating mot Tornehamn omformerstasjon	JA	JA	JA	Sim1bb
	Utfall av hele Rombak omformerstasjon	JA	JA	NEI	Sim1b
	Utfall av hele Tornehamn omformerstasjon og mating fra Stenbacken	JA	JA	NEI	Sim1bb
Alt 2 Fjernledning og toviklingstransformatorer	Bytte av trekraft, ekstra vogner, ekstra togvekt, noen få ekstratog etc.	NEI	NEI	JA	Sim2
	Kjøring med tog med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	NEI	NEI	JA	Sim 3aa
	Oppstart av trafikken og kjøring av mange tog etter en blokkade	NEI	-	JA	Sim 2aaa
	Kjøring med malmtog mot Narvik som bremses regenerativt med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	NEI	NEI	JA	Sim 1aaaa
	Ensidig mating, for eksempel fra Narvik mot Rombak ved brudd vest for Rombak, eller fra Bjørnfjell mot Rombak ved brudd øst for Rombak.	NEI	JA, men begrensinger i trafikken må uansett påregnes	Sannsynligvis, men unngås om bare ett tog kjøres av gangen og med begrensninger	Sim1
	Utfall av transformator eller fjernledningen på strekningen Narvik - Rombak	NEI	JA, fordi begrensinger for å forhindre overbelastning nok er nødvendig	Sannsynligvis, men unngås om bare ett tog kjøres av gangen og med begrensninger	Sim1
	Utfall av transformator eller fjernledningen på strekningen Rombak - Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim1
	Brudd på samkjøringen ved døseksjonen ved Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim2
	Utfall av et omformeraggregat i Rombak eller Tornehamn	NEI	NEI	NEI	Sim2
	Ensidig mating mot Tornehamn omformerstasjon	NEI	NEI	JA	Sim3bb
	Utfall av hele Rombak omformerstasjon	JA	NEI	JA	Sim3b
	Utfall av hele Tornehamn omformerstasjon	NEI	NEI	NEI	Sim3c

¹ Forutsetter at det tunge olivintog ikke kjøres

Alt	Avvikstilfelle	Lav spenning	Forsinkelser	Overbelastning	Referanse simulering
Alt 3 Fjernledning med autotransformatorer	Bytte av trekraft, ekstra vogner, ekstra togvekt, noen få ekstratog etc.	NEI	NEI	NEI	Sim 3
	Kjøring med tog med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	NEI	NEI	NEI ²	Sim 3aa
	Utfall av fjernledningen mellom Rombak og Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim 1
	Oppstart av trafikken og kjøring av mange tog etter en blokade	NEI	NEI	NEI	Sim 3aaa
	Kjøring med malmtog mot Narvik som bremser regenerativt med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter	NEI	NEI	JA	Sim 3aaaa
	Kjøring med malmtog mot Narvik som bremser regenerativt med mindre avstand mellom enn dimensjonerende ruteplan forutsetter. Begrenset regenerativ bremsing til 500 kN.	NEI	NEI	NEI	Sim 3aaaaa
	Ensidig mating mellom AT'er for eksempel fra Narvik mot Straumsnes, fra Straumsnes mot Rombak, ved brudd ved disse stedene	NEI	JA, pålagte begrensinger i trafikken må påregnes	Mulig overbelastning, men fysisk brudd skaper trafikkstans over berørt strekning uansett	Sim 3
	Utfall av en autotransformator ved Straumsnes, Rombak, Katterat eller Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim 3
	Utfall av en autotransformator ved Narvik	NEI	NEI	JA, men overbelastning bare om det tunge olivintoget kjøres	Sim 3bbb
	Utfall av fjernledningen mellom Rombak og Narvik	Nei	JA, fordi begrensinger for å forhindre overbelastning nok er nødvendig	JA, men unngås om begrensinger innføres	Sim 1
	Brudd på samkjøringen ved døseksjonen ved Bjørnfjell	NEI	NEI	NEI	Sim 3
	Utfall av et omformeraggregat i Rombak eller Tornehamn	NEI	NEI	NEI	Sim 3
	Ensidig mating mot Tornehamn omformerstasjon	NEI	NEI	NEI	Sim 3bb
	Utfall av hele Rombak omformerstasjon	JA	NEI	JA, men overbelastning sannsynligvis bare om det tunge olivintoget kjøres	Sim 3b
	Utfall av hele Tornehamn omformerstasjon	NEI	NEI	NEI	Sim 3bb
	Uten Tornehamn omformerstasjon og ensidig mating fra Rombak til Stenbacken	JA	JA, pålagte begrensinger i trafikken må påregnes	JA, men kan sannsynligvis unngås om begrensinger innføres	Sim 3cb

² Ingen eller liten margin mot overbelastning i forhold til JD546, men grenseverdien for kontaktledningen forutsetter 35 °C som er høyere enn maksimaltemperatur i Narvik. Normalt vil det derfor ikke være noe problem, spesielt om det tunge olivintoget ikke kjøres i blokkpostavstand midt på dagen ved spesielt fint sommervær. Dette forutsetter at termiske vern beskytter kontaktledningen optimalt i forhold til omgivelsene og årstidsvariasjoner.

5.2.2.1 Vurderinger vedrørende unormale driftssituasjoner med alternativ 1

Det største problemet med dette alternativet ser ut til å være de store belastningsstrømmene som oppstår under unormale driftssituasjoner, spesielt tilfelle med ensidig mating til Tornehamn som kan forventes å oppstå nokså hyppig. Imidlertid er belastningsgrensen bare så vidt overskredet og en må kunne forutsette at denne situasjonen vil vedvare en begrenset tid. At det oppstår store belastningsstrømmer med det tunge olivintoget nært andre tog kan ikke tillegges så stor vekt, all den tid dette toget kan deles i to eller kjøres med større avstand til andre tog.

Om alternativ 1 velges og det ikke kommer AT-system på svensk side kan ikke Tornehamn omformerstasjon legges ned fordi spenningen ved ensidig mating mot denne da blir meget lav og problemer med trafikkavviklingen oppstår. Strømbelastningen ved Bjørnfjell og østover blir dessuten så stor at omfattende forsterkningstiltak må gjøres.

5.2.2.2 Vurderinger vedrørende unormale driftssituasjoner med alternativ 2

Om alternativ 2 skulle velges må det innføres forsterkningsleder her for å unngå overbelastning. Med forsterkningsleder langs hele strekningen vil det sannsynligvis være mye mindre sannsynlighet for overbelastninger og det blir bedre marginer. Da kan dette rent teknisk være et meget godt alternativ, men kostnadene for alternativet blir store, se [16].

5.2.2.3 Vurderinger vedrørende unormale driftssituasjoner med alternativ 3

I flere unormale driftssituasjoner oppstår det belastningsstrømmer helt opp mot og over grensene for kontaktledningen, samtidig er strømmene som overføres på NL og PL for fjernledningen høyst moderate. Det er lite en kan gjøre med dette fordi forholdet mellom impedansen på de parallelle linjene (kontaktledning og høyspentlinjen) er gitt av resistansen (aluminium og ledertverrsnitt) og reaktansen (ledertverrsnitt og faseavstand).

Forsterkningsledning mellom Rombak og Bjørnfjell for alternativ 3 kan vise seg å være nyttig på sikt, spesielt om Tornehamn omformerstasjon legges ned når, og om, det bygges AT-system på Malmbanan. Da vil det i unormale driftssituasjoner, slik som ensidig mating fra Rombak til Tornehamn oppstå store belastningsstrømmer. Dermed bør forsterkningslederen som allerede finnes ikke bli demontert, men beholdes og på lengre sikt opprustes gjennom tunnelene. Mellom Rombak og Narvik er forsterkningsleder ikke aktuelt i henhold til den ruteplan og den trafikk som er undersøkt her. Om det skulle oppstå enda større trafikkbelastning på Ofofbanen kan forsterkning skje ved å sette inn forsterkningsleder på hele linjen eller det etableres flere matepunkter via autotransformatorer.

5.2.3 Dimensjonerende ruteplan og endring av ruteopplegget

Som det er forklart noe om i 2.3.1 kan det knapt forventes ytterligere trafikkvekst på Ofofbanen enn det som er planlagt i ruteplanen som er simulert her. En forventer ikke tyngre tog på grunn av at akselvekten i dag allerede er usedvanlig høy (med de sporslitasjer det medfører). Det kan heller ikke forventes lengre tog fordi stasjoner og krysningspunkter da må forlenges. Med det antallet stasjoner en har kan en heller ikke forvente flere tog, spesielt fordi denne ruteplanen er planlagt med forutsetning om at de fleste stasjoner utvides til tre spor.

Dermed skulle det ikke være nødvendig å oppfylle kravet i teknisk regelverk med 20 % margin mot trafikkøkning. Det eneste en ser som kan få betydning for effekt- (og energi-)

behovet er annet lokomotivmateriell. Dette ville sannsynligvis bli materiell med bedre egenskaper enn de Rc4 lokomotivene som er benyttet i simuleringen, som trekker mye reaktiv effekt.

Simuleringer med tog i blokkpostavstand viser store påkjenninger, men kan allikevel tillates uten at spenning eller kortvarige strømbelastninger blir for store for noen av alternativene. Dette gjelder i alle fall om det tunge olivintoget ikke kjøres på denne måten. Det vil si at en kjører dette toget med større avstand til andre tog enn "blokkpostavstand". Disse simuleringene viser at en enda tettere toggang faktisk kan være mulig å takle for banestrømforsyningen (i alle fall for en kortere periode og i normal driftssituasjon), men i praksis er ikke infrastrukturen (avstand mellom stasjoner, lengden på kryssningsspor, aksellast etc.) bygget for å takle dette. Banestrømforsyningen vil for i alle fall mange kapasitetsparametere ha større trafikkapasitet enn selve banen.

Simulering med malmtog som bremses regenerativt og kjører i "blokkpost-" eller "stasjonsavstand" viser at med 750 kN bremsekraft vil strømbelastningen på kontaktledningen bli så stor at det er fare for overbelastning, i alle fall med høye utetemperaturer. Om en ønsker å kjøre togene så nært vil en imidlertid unngå disse problemene om togene får pålegg om å begrense den regenerative bremsen til 500 kN. Flere tog med regenerativ bremsing og tilbakemating av store strømmer vil også kunne påvirke verndekninger og egne vurderinger av innstillingene bør gjennomføres. På sikt burde det undersøkes om ikke effektfaktorens spenningsavhengighet kunne vært noen endret, slik at ikke IORE lokomotivet mater ut så mye reaktiv effekt ved høy spenning og regenerativ bremsing.

5.2.4 Belastning av omformerne og antall aggregater i drift

Simuleringene viser at ikke for noe tilfelle er det fare for utfall av aggregatene i Rombak omformerstasjon med dagens bestykning med aggregater på $5,8 + 2 \times 10,0$ MVA. Dette forutsetter at alle aggregatene er i drift ved alle opptredende unormale driftssituasjoner og at fordelingen av effekt mellom aggregatene er riktig i forhold til ytelse. I normal drift kan ett av aggregatene være utkoblet i perioder av døgnet med den ruteplanen som er simulert her.

Når det gjelder simuleringer av andre normalt forekommende avvikssituasjoner som kjøring av flere tog i "blokkpostavstand" fra Narvik, kan ingen av aggregatene på 10 MVA være utkoblet. Ved kjøring av flere tog i "blokkpostavstand" etter en blokade er det nødvendig at alle omformerene er i drift. For malmtog som kjører regenerativt i "blokkpostavstand" nedover mot Narvik viser ikke simuleringene særlig stor belastning av aggregatene, slik at dette vil gå bra uten alle aggregatene i drift. Dette gjelder om det ikke er annen trafikk i tillegg. Annen trafikk kan imidlertid bidra både positivt og negativt når det gjelder belastningen av Rombak en slik situasjon, men er ikke simulert.

For unormale driftstilstander som feil i infrastrukturen kan det også være tilfeller der ikke alle omformerne behøver å være i drift, for eksempel i simulering 3bb med ensidig mating fra Rombak til Tornehamn. Men om en rett som det er kjører tog i "blokkpostavstand" kan det være at en gjør sikrest i å alltid ha alle omformerne i drift.

5.2.5 Antall transformatorer og størrelsen av disse

Simulering 3b med utfall av Rombak omformerstasjon viste store strømmer for de to autotransformatorene på Bjørnfjell. Som det ble påpekt oppstår denne store belastningen bare

om det forsynes på 15,0 kV nivå fra Malmbanan, om NL og PL videreføres fra Bjørnfjell til det svenske AT-systemet vil det ikke bli slike store strømmer for disse transformatorene. Dermed er det heller ikke nødvendig med to enheter her. Bare om denne situasjonen oppstår før det blir bygget AT-system på Malmbanan vil det være behov for to enheter, men som simuleringen også viser oppstår det veldig lave spenninger for togene og størst strøm over transformatorene om det tunge olivintoget kjøres. Med konvensjonelt system på Malmbanan vil forholdene bli enda verre. Begrensninger for trafikken må uansett innføres om Rombak omformerstasjon faller ut.

Det er bare for tilfelle med utfall av Rombak omformerstasjon at strømbelastningen på autotransformatorene på Bjørnfjell blir så stor. Dermed virker det ikke fornuftig å ha to autotransformatorer ved Bjørnfjell når disse knapt vil avhjelpe situasjonen og det heller ikke er bruk for mer enn en på lang sikt. Ved utfall av Rombak omformerstasjon må en forutsette at dette blir en kortvarig hendelse og om det skulle skje får en holde tilbake det tunge olivintoget og bare kjøre noen få tog av gangen. Sannsynligvis vil det gå enklest om en kan samordne det slik at når et tog skal kjøre opp fra Narvik, kjører et tog med regenerativ bremsing ned fra Bjørnfjell.

5.2.6 Marginer for dimensjonering av komponentene

I henhold til "Regler for prosjektering" JD 546 skal det være vise marginer mot usikkerheter i vurderingene, avvikssituasjoner og fremtidig trafikkøkning. Tallene som er fastsatt er minst 5 % for margin/reserve mot tillat overbelastning, minst 10 % for margin/reserve for endringer som ofte kan oppstå og ytterligere minst 20 % for å ta høyde for trafikkøkninger. Disse marginene legges til både for normale driftssituasjoner for å ta høyde for avvikssituasjoner. Marginen på 5 % er et "bør-krav", de andre er "skal-krav".

Når det gjelder kravene utenom det som har med trafikkvekst er det opplagt at disse bør og må oppfylles. Marginene på 5 % var et "bør-krav" og dermed kan en si at det for alle driftssituasjoner bør være minst 15 % margin. Om ikke skal det være minst 10 % margin, men om avvikssituasjoner og unormal driftstilstand er simulert og undersøkt skal denne marginen på 10 % ikke legges til, da vil "bør-kravet" på minst 5 % margin være tilstrekkelig. For normale driftssituasjoner er det for alle tre alternativene 15 % margin eller mer for kontaktledningsanlegget forutsatt at det innføres forsterkningsleder for alternativ 2. For alternativ 3 er marginen minst med 18 % margin for 6-minuttersverdien ved avgang mot vest ved Straumsnes (hvor strømmen ble 657 A og belastningen høyest).

Avgjørende for alle alternativer og driftssituasjoner er varigheten av strømmen og resulterende oppvarming. Undersøkelser viser at togene trekker mellom 500 og 700 A mer eller mindre kontinuerlig, det tunge olivintoget trekker 800 A praktisk talt kontinuerlig og malmtog på veg ned til Narvik leverer mer eller mindre 700 A kontinuerlig. (Se appendiks A) Altså en har ofte tog som hele tiden trekker eller leverer strøm som er større enn kontaktledningens strømføringsevne. To ting er da avgjørende; avstanden mellom innmatepunkter og nedkjølingsperioder. Simuleringene viser at det vil oppstå slike variasjoner i strømstyrken at det dermed også skal være tilstrekkelig forhold mellom oppvarmings- og nedkjølingsperioder. En vil også for alternativ 3 få tilstrekkelige marginer selv om det hadde vært ønskelig med enda større. Dette gjelder normal driftssituasjon.

For unormale driftssituasjoner viser alle tre alternativene at fare for overbelastning oppstår. Uten at det kan underbygges med simuleringer kan en sannsynligvis forutsette at alternativ 2

med forsterkningsleder vil takle flest avvikstilstander uten overbelastning og med minst restriksjoner for trafikken. For alternativ 1 oppstår fare for overbelastning ved ensidig mating mot Tornehamn, mens for alternativ 3 oppstår det stor overbelastning ved utfall av Rombak omformerstasjon. Det er sannsynligvis mest begrensende at alternativ 1 kan gi overbelastning ved ensidig mating mot Tornehamn, siden dette er en situasjon som kan oppstå oftere enn utfall av Rombak omformerstasjon. Samtidig gir alternativ 1 også svært lave spenninger i denne situasjonen (og noen andre tilfeller også). På den annen side er overbelastningen for alternativ 1 i dette tilfelle ikke særlig stor og dette alternativet viser seg som relativt robust ved at det er få feiltilfeller som kan oppstå for anlegget. Alternativ 3 har derimot en del flere feilkilder, men hyppigheten av disse vil neppe være stor. Imidlertid må det være mulig å detektere disse kritiske situasjonene og innføre de riktige restriksjonene for trafikken om de skulle oppstå.

Et spesielt ugunstig forhold ved unormale driftstilstander med høye strømmer er at dette for flere tilfeller ikke ledsages av lave spenninger, dermed vil ikke lokomotivførerne vite at noe er galt. Det blir da opp til driftsentralen å identifisere unormale situasjoner og gjøre tiltak for å forhindre overbelastning for eksempel ved å innføre begrensninger for togene. For å få størst mulig utnyttelse av komponentene, men samtidig slik at overbelastning ikke skjer, er det viktig med vern for termisk beskyttelse eller andre sensorer som kan detektere skadelig høye temperaturer.

Det tunge olivintoget viser seg å kunne skape kritisk høye strømmer om det får anledning til å kjøres uten noen forbehold. På Ofofbanen kjøres ofte tog med liten avstand mellom ("blokkpostavstand"), men dette bør ikke tillates for det tunge olivintoget med 4600 tonn lastvekt. Dette toget bør enten kjøres med normal "stasjonsavstand" til neste tog eller deles opp i to tog. Overbelastningen er imidlertid så liten at om dette toget kjører om natten når temperaturen er lavere kan det sannsynligvis gå bedre.

Marginene mot overbelastning er ikke så store som en skulle ha ønsket og unormale driftssituasjoner gir også belastning opp mot og over nominelle grenser. En spesiell ting som kan komme inn som en modererende faktor er at belastningsgrensene gjelder for så høy lufttemperatur som 35 °C og i Narvik oppstår det svært sjeldent eller aldri så høye temperaturer. Slitasje virker derimot i motsatt retning ved å minske strømføringsevnen. Termiske vern eller andre typer detektorer til som kan føle kontaktledningstemperaturen direkte, er nødvendig og må anbefales uansett alternativ. Spesielt er dette viktig for alternativ 3 der spenningen vil kunne være høy selv i situasjoner som gir overbelastning av kl anlegget. Det vil dermed ikke være mulig for lokførerne å merke at anlegget er høyt belastet.

5.2.7 Belastingssituasjonen om Tornehamn omformerstasjon legges ned og Stenbacken beholdes

Simuleringer der Tornehamn omformerstasjon legges ned er utført for alternativ 3, simulering 3c, 3cb og 3cbb. I simulering 3c uten Tornehamn omformerstasjon viser det seg at strømbelastningen for en 15 kV overføring mellom Bjørnfjell og Riksgrensen blir stor. I simulering 3cb med ensidig mating mot Stenbacken uten Tornehamn, ser en at spenningen blir lavere enn hva en vil kunne akseptere i henhold til teknisk regelverk for prosjektering av banestrømforsyningen. Allikevel oppstår denne lave spenningen på Malmbanan og Banverket kan ha andre krav. Imidlertid ser en at forsinkelser ikke oppstår og egne vurderinger må gjøres når Banverket skal bestemme fremtiden for disse omformerstasjonene. Mellom

Bjørnfjell og Riksgrensen bør det uansett settes inn AT-system der NL og PL forlenges mot svensk AT-system, om ikke må forsterkningsleder innføres.

Det viktigste en ser fra simulering 3cb er imidlertid at om Tornehamn omformerstasjon legges ned blir belastningen for kontaktledningen stor i dette spesielle avvikstilfellet. Med å innføre forsterkningsleder mellom Rombak og Bjørnfjell kan en unngå store restriksjoner i slike tilfeller. Marginene mot overbelastning i andre tilfeller blir også meget god. Denne forsterkningslederen finnes allerede og en bør absolutt beholde denne selv om den i dag skaper problemer for arbeid i tunneler og snøoverbygg. Om nødvendig får en heller koble denne kablet ut i tunneler og i verste fall fjerne den om problemene blir for store. Senere kan det eventuelt finne en annen forsterknings metode gjennom tunneler og snøoverbygg. For kontaktledningsanlegg ute vil dagens forsterkningsleder i alle fall ikke være til noe fysisk hinder.

5.2.8 Begrensinger for det tunge Olivintoget

Det tunge olivintoget med lastvekt 4240 tonn ser ut til å kunne kjøres i hvilken som helst togrute i den dimensjonerende ruteplanen uten at det skaper for store strømmer. Dette gjelder for alle alternativene, og det er forsøkt å sette dette inn i ruten (9901) på det tidspunktet der sammenlagrede strømmer blir størst.

Unormale driftssituasjoner kan imidlertid være verre og spesielt kan det bli høye belastningsstrømmer om dette tunge olivintoget kjører i "blokkpostavstand" med 7 minutter til tog foran, som undersøkt i simulering 1aa og 3aa. (Antageligvis vil samme problem oppstå om olivintoget er 7 minutter foran et annet tog.) I dette tilfelle ble det funnet store belastningsstrømmer rett under nominell strømføringsevne, men det vurderes til å kunne tillates fordi det i de fleste tilfeller er lavere temperatur i Narvik enn 30 °C og i alle fall lavere enn de 35 °C som er forutsatt for høyeste belastningsevne for kontakteledning. Det vil sannsynligvis ikke være ofte det er rekordvarme i Narvik og at en samtidig ønsker å kjøre det tunge olivintoget midt på dagen i blokkpostavstand til et annet tog. Termiske vern for kontaktledningen er uansett viktig og vil kunne beskytte anlegget om slike ting skulle skje. For alternativ 2 kan dette gå bra om det innføres forsterkningsleder.

Når det gjelder situasjonen med mange tog som kjører ut etter en blokkade er det simulert uten det tunge olivintoget med blant de seks togene opp fra Narvik. Det er sannsynlig at strømmen da blir stor og langt over belastningsgrensen uansett alternativ.

5.2.9 Regenerativ bremsing på fremtidige tog

Den største endringen som kan forventes angående trafikkbelastning og dermed belastning for kontaktledningsanlegget på lengre sikt må være om også godstogene får moderne lokomotiver med bedre effektfaktor og mulighet for regenerativ belastning. Om dette nødvendigvis vil føre til større belastning og høyere temperaturer for kontaktledningen er ikke lett å forutsi. Med den simulerte ruteplanen representerer alle godstog ned mot Narvik ingen belastning, men om de kan mate ut effekt vil de belaste kontakteledningen med ytterligere strømmer. På den annen side vil det ofte være møtende tog og disse vil ta opp denne regenererte strømmen, som dermed ikke overføres over så lange strekninger. En annen faktor er om det for denne typen tog også må være styring av effektfaktoren (induktiv reaktiv effekt) for å unngå høye spenninger ved regenerativ bremsing. Egen vurdering av om slike endringer kan gjøres og om det gir fordeler bør gjennomføres. Egne simuleringer er i så fall nødvendig.

5.2.10 Energi og effektutveksling grunnet spenningsvinkler i overliggende nett

I alle simuleringene er det forutsatt at spenningsvinkelen i overliggende nett er null. Men det går en kraftlinje mellom Ofoten-området til omformerstasjonene på svensk side og over denne linjen kan det overføres 100 MW den ene eller andre veien. Dette er i tidligere undersøkelser [7] funnet å ha betydning for overføring av energi mellom omformerstasjonene og at tapene for kontaktledningen for Ofotbanen øker fra 3,79 til 4,51 %. Dette gjelder med den ruteplan og det togmateriellet som lå til grunn i disse simuleringene.

Med forsterkning av banestrømforsyningen mellom Rømbak – Tornehamn – Stenbacken er det mulig at tapene økes ved at det utveksles mer effekt mellom omformerstasjonene. Effektretingen over kraftlinjen mellom de to land skifter over året og det er dermed umulig å si hva som vil være netto energiretning og hva dette betyr for energiavregningen ved Riksgrensen. Det er ikke undersøkt hva dette vil føre til med tanke på samkjøring av omformerstasjoner og eventuelt tilleggsbelastning for seriekomponenter.

5.2.11 Tilgjengelighetskrav og konsekvens ved unormale driftsituasjoner

I avsnitt 2.3 om regler for dimensjonering av banestrømforsyningen er det en tabell 5.2 som tallfester antall timer som maksimalt aksepteres som utetid pr spormil pr år for forskjellige feilkategorier og baneprioriteter. Ofotbanen er kategorisert som baneprioritet 1 og spesielt strenge krav gjelder for den. Når tallene fra denne tabellen er multiplisert med banens lengde fås tallene for akseptert maksimal utetid, dette er stilt opp i Tabell 5-4 nedenfor.

Tabell 5-4 Tillatt utetid for forskjellige kategorier av driftsforstyrrelser i banestrømforsyningen med konsekvenser for togtrafikken på Ofotbanen.

Bane	A - Tillatt tid for feil uten konsekvenser for togtrafikken	B - Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken unngås	C - Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken begrenses/ reduseres	D - Tillatt tid uten krav til spenning i berørt(e) seksjon(er) hvor togtrafikk ikke er mulig
Ofotbanen	-	92	3	2

Nedenfor viser tabell 5-5 til tabell 5-7 estimert gjennomsnittlig utetid pr år for henholdsvis alternativ 1, 2 og 3, der de forskjellige feilkategoriene for hovedkomponentene er forsøkt anslått ut fra erfaringstall fra alminnelig energiforsyning i Norge, se [14] og [15], feilstatistikk fra Bane Energi. Se appendiks A der mer detaljerte beregninger er gjengitt. Det er satt inn tall for gjennomsnittlig feil pr år (sviktintensitet, λ), reparasjonstid (r), gjennomsnittlig utetid pr år ($\lambda \cdot r$), forventet tid mellom svikt (MTBF, m) og til sist gjennomsnittlig utetid pr år. For hver at feiltypene er det er det tilordnet en kategori. En forklarlig til hver av kategoriene er oppsummert her:

- Brudd på kontaktledningen på grunn av varige feil; det skjer en kontaktledningsfeil pr kilometer pr år. De fleste er forbigående og forsvinner av seg selv når distansereleene kobler ut feilbefengt anleggsdel, men ca 5 % av feilene forsvinner ikke av seg selv. For hele Ofotbanen blir antallet varige feil dermed: $42 \times 1 \times 0,05 = 2$. Det antas

dermed at kontaktledningsfeil skjer 2 ganger i året og at mannskaper som må ut å reparere disse feilene bruker i gjennomsnitt 4 timer hver gang. Fordi banen er så kort og alle tog dessuten er gjennomgående vil togtrafikken praktisk talt stoppe etter bare noen titalls minutter. Dette klassifiseres i kategori D.

- Brudd på kontaktledningen for arbeid i og ved sporet som er planlagt og kan gjøres slik at det ikke fører til problemer for trafikken. Forebyggende arbeid og tilsyn gjøres om sommeren når trafikken er redusert. Dette er vanskelig å sette inn i en av kategoriene, men den vurderes til å stå nærmest A eller B. A er kategorien for anlegget når det er normal driftssituasjon og dette gjelder ikke her, derfor settes denne kategorien til B.
- Utfall av hele Rombak omformerstasjon er kalkulert i henhold til beregninger i appendiks A. Tallene for denne feilen er ikke særlig gode noe som nok skyldes at statistikken fra Bane Energi for de siste årene viser tilfeller der aggregater i stasjoner med to enheter ligger ute nokså lenge. Dette kan delvis skyldes at en ikke starter arbeidet med reparasjon med en gang fordi det vurderes til å være tilstrekkelig å sette i gang dette når det passer med vaktordninger turnuser, reiser eller at en må vente på reservedeler. Hvis dette skjer vil det oppstå lave spenninger og fare for overbelastning i alternativ 2 og 3, togene må derfor pålegges kjørebegrensninger og forsinkelser må påregnes. Dette settes i kategori C.
- Brudd på høyspentlinjen mellom Narvik og Rombak vil for alternativ 2 og 3 føre til at kontaktledningen vil overbelastes og togene må dermed pålegges kjørebegrensninger. Lave spenninger opptrer ikke, men allikevel antas problemene å bli så store at dette settes i feilkategori C. For utfall av fjernledningen mellom Rombak og Bjørnfjell er dette satt i kategori A. Beregning av tallene for pålitelighet er gjengitt i appendiks A. For alternativ 3 er det hentet erfaringstall for alminnelig energiforsyning og det antas at høyspentledningen kan sammenlignes med en 66 kV linje som har en sviktintensitet på 0,0028 feil pr år pr km og at hele linjen er 32,8 km. Det er antatt at reparasjonstiden er 48,5 timer ut fra statistikk for denne typen linjer.
- Parametere for feil på en av autotransformatorene i alternativ 3 er beregnet i appendiks A. Dette vil for enheten ved Narvik føre til fare for overbelastning av kontaktledning, men for utfall av de andre enhetene er det ikke funnet at dette vil skape problemer. Det er bare om det tunge olivintoget kjører at fare for overbelastning er til stede. Om dette toget gis begrensninger kan trafikken mer eller mindre gå som normalt. Feil vil ikke føre til lav spenning. Dette tilfellet er allikevel satt i kategori C. For utfall av de øvrige autotransformatorene kommer dette i kategori A.

Svakheten med disse grunnlagstallene og beregningene som fremkommer er at de er gjennomsnittlige tall for alminnelig energiforsyning, og gjelder ikke for banestrømforsyning. Hvis en av transformatorene i alternativ 2 (inkludert i "brudd på fjernledningen") eller 3 havarerer kan utfallstiden for anlegget bli veldig lang. Dette fordi disse kan være vanskeligere tilgjengelig enn vanlige transformatorstasjoner som står lett tilgjengelig ved veier og organisering av kranbiler etc. for transport er enkelt. Dessuten vil et totalhavari der reparasjon ikke er mulig kreve at nye enheter må produseres på fabrikk og leveringstiden på slike komponenter kan være mange måneder, her er det antatt et år. Nettopp av den grunn er det i alternativ 3 forutsatt at det skal være hele fire autotransformatorer ved Rombak omformerstasjon. Normalt vil disse belastes moderat, men om en av de andre enhetene virkelig går i stykker kan en relativt hurtig "låne" en de enhetene som står ved Rombak. Dette vil være mye vanskeligere for alternativ 2 der feil eller havari vil føre til svært lang utfallstid og der organisering av reserveløsninger i praksis nesten vil være umulig.

Av tabellene kan en se at for kategori A og B har ingen av alternativene problemer med å tilfredsstille kravene til gjennomsnittlig utetid pr år. For kategori C tillates det 3 timer utfall i året og dette kravet får alternativ 2 store problemer med å tilfredsstille ved at samlet utetid for C er beregnet til 63,1 timer. For alternativ 3 er samlet utetid for kategori C funnet til 10,6 timer og det må aksepteres. For kategori D tillates bare 2 timer utfallstid i året og ingen av alternativene tilfredsstiller dette kravet. Imidlertid er dette kravet meget strengt for en bane som Ofofbanen med stor trafikk og kort distanse, enhver kontaktledningsfeil vil nødvendigvis føre til trafikkstans for en kortere eller lengre tid.

Av dette kommer altså alternativ 2 med fjernledning veldig dårlig ut fordi systemet blir svært sårbart om det skulle skje at en av transformatorene havarerer, se Tabell 5-8. Dette er sikkert mer usannsynlig enn det som er antatt her fordi det skal skje meget alvorlige ting før det ikke er mulig å reparere transformatorer. Alternativ 1 får sannsynligvis for gode tall da det her ikke er tatt med ekstra utetid på grunn av feil på forsterkningslederen. Denne kan være utsatt for havari spesielt ved arbeid i tunnelene og dette vil føre til ganske mange timers arbeid å reparere. Alternativ 1 kommer best ut og men alternativ 3 kommer sannsynligvis i praksis bedre ut ved at det takler avvikende driftssituasjoner bedre.

Tabell 5-5 Beregning av utetid pr år for forskjellige feilkategorier for alternativ 1.

Alternativ 1	λ [feil/ år]	r [h]	$\lambda \cdot r$	m [år]	Gjennomsnittlig utetid pr. år [h]	Kategori
Brudd på kl på grunn av varige feil	2	4	8	0,5	8	D
Brudd på kl på grunn av arbeid som planlegges slik at det ikke medfører problemer for togene					-	B
Utfall av Rombak omformerstasjon og innkommende forsyning	0,461	0,399	0,184	2,171	7,7	C

Tabell 5-6 Beregning av utetid pr år for forskjellige feilkategorier for alternativ 2.

Alternativ 2	λ [feil/ år]	r [h]	$\lambda \cdot r$	m [år]	Gjennomsnittlig utetid pr. år [h]	Kategori
Brudd på kl på grunn av varige feil	2	4	8	0,5	8	D
Brudd på kl på grunn av arbeid planlegges slik at det ikke medfører problemer for togene					-	B
Utfall av Rombak omformerstasjon og innkommende forsyning	0,461	0,399	0,184	2,171	7,7	C
Brudd på fjernledningen eller transformatorer mellom Bjørnfjell - Rombak	0,08102	684	55,41768	12,34263	55,4	C
Brudd på fjernledningen eller transformatorer mellom Rombak - Bjørnfjell	0,08102	684	55,41768	12,34263	55,4	A

Tabell 5-7 Beregning av utetid pr år for forskjellige feilkategorier for alternativ 3.

Alternativ 3	λ [feil/ år]	r [h]	$\lambda \cdot r$	m [år]	Gjennomsnittlig utetid pr. år [h]	Kategori
Brudd på kl på grunn av varige feil	2	4	8	0,5	8	D
Brudd på kl på grunn av arbeid planlegges slik at det ikke medfører problemer for togene					-	B
Utfall av AT ved Narvik	0,009	71	0,676	106	0,7	C
Utfall av øvrige AT'er					-	A
Feil på fjernledning mellom Narvik - Rombak	0,045	48,500	2,159	22,4618	2,2	C
Feil på fjernledning mellom Rombak - Bjørnfjell	0,047	48,500	2,295	21,1327	2,3	A
Utfall av Rombak omformerstasjon og innkommende forsyning					7,7	C

Tabell 5-8 Oppsummering av resultatene fra de tre alternativene

Alternativer	A - Tillatt tid for feil uten konsekvenser for togtrafikken	B - Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken unngås	C - Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken begrenses/ reduseres	D - Tillatt tid uten krav til spenning i berørt(e) seksjon(er) hvor togtrafikk ikke er mulig
Krav	-	92	3	2
Alt 1	-	-	7,7	8
Alt 2	55,4	-	63,1	8
Alt 3	2,3	-	10,6	8

5.2.12 Mulighet for forsterkning ved eventuell trafikkøkning

En har sett og kommentert i avsnitt 5.2.6 at det i normaltilfellet er nokså store marginer for lastøkning for alternativ 1 og sannsynligvis også for alternativ 2 om det innføres forsterkningsleder. For alternativ 3 er marginene noe mindre. For alle alternativene er problemet avvikssituasjonene der strømmene blir store. For alternativ 1 blir i tillegg spenningene lave og forsinkelsene store for enkelte tilfeller. Om det til tross for vurderingene som er gjort i avsnitt 5.2.3 skulle bli mulig med ytterligere trafikkvekst eller ruteopplegget kan endres vesentlig vil forsterkninger være mulig. For alternativ 1 og 2 vil ytterligere forsterkning være å innføre en ekstra forsterkningsleder, men for alternativ 1 kan også lav spenning bli et problem og da må en gå over til et av de andre alternativene. For alternativ 2 kan en eventuelt sette opp nye transformatorer (ved Straumsnes og Katterat) som både gir forbedret belastningsevne og spenning.

Dette vil sannsynligvis bli kostbare tiltak og det spørs om ikke forsterkninger av alternativ 3 blir enklest. For dette alternativet er det enkleste å benytte den forsterkningslederen som allerede finnes mellom Rombak og Bjørnfjell, og montere ny mellom Rombak og Narvik. Alternativt kan nye autotransformatorer også vurderes slik at avstanden mellom disse blir mindre. Dette gir mer kortvarige belastningstopper for kontaktledningen.

5.2.13 Oppsummering av fordeler og ulemper med alternativene

I normal driftsituasjon og normal trafikk vil alle alternativene på alle måter gi tilfredsstillende resultater, det eneste som da kan stille alternativ 1 i et litt dårligere lys er tapsprosenten som er litt høyere enn for de andre alternativene. Det må bli de avvikende driftstilstandene som må overveies for å finne det gunstigste alternativet rent teknisk sett. Økonomisk kommer imidlertid alternativ 2 med fjernledning til å bli det desidert dyreste, fordi transformatorene og utstyret rundt koster mye, se [16]. Dessuten må dette alternativet utvides til også å ha forsterkningsleder for å takle flere av de unormale driftssituasjonene, dermed blir kostnadene enda mye større. Dermed står en igjen med alternativ 1 og 3.

Ut fra driftserfaringene med forsterkningslederen som allerede er bygget fra Rombak til Bjørnfjell er denne utsatt for ødeleggelser i de trange tunnelene og snøoverbyggene. Alternativ 1 må dermed ha fordeler, tekniske eller økonomiske som er så gunstige at alternativ 3 med autotransformatorer kommer i skyggen. Når kun tekniske forhold vurderes er ikke alternativ 1 spesielt gunstig om en ser på avvikende driftstilstander:

- Banverket kommer sannsynligvis ikke til å bygge nytt kontaktledningssystem med AT-system om ikke tilsvarende forsterkning skjer på Ofotbanen. Dette gir mindre fleksibilitet ved håndtering ved avvikende driftstilstander. (Denne vurderingen gjelder imidlertid om Tornehamn omformerstasjon beholdes).
- Forsterkningslederen i alternativ 1 vil kunne skape problemer ved vedlikehold i tunnelene og vil kunne være utsatt for nedrivning på strekningen Rombak - Bjørnfjell.
- Alternativ 1 bør ha sugetransformatorer om det skal være i henhold til teknisk regelverk og komme på høyde med alternativ 3 når det gjelder EMC-forhold. Dette skaper ekstra vedlikeholdskostnader og problemer med enten isolerte sporskjøter eller returleder.
- Lave spenninger og fare for overbelastning ved ensidig mating fra Rombak til Tornehamn.
- Ved en ekstrem belastningssituasjon som oppstart av mange tog etter en blokada av banen vil alternativ 3 kunne takle dette bedre enn alternativ 1 på grunn av at togene lengst bort mates over fjernledningene.
- Utfall av Rombak omformerstasjon gir problemer for både alternativ 1 og 3, men størst for alternativ 1.
- Ved utfall av Tornehamn omformerstasjon må matingen skje helt fra Stenbacken og da blir spenningen lav for alternativ 1 og bedre om det var bygget fjernledningssystem med autotransformatorer som i alternativ 3.

Fordeler med alternativ 1 er:

- Kortere nedetid pr år enn for alternativ 3. Dette fordi alternativ 3 har flere komponenter som kan svikte og som det tar nokså lang tid å reparere.
- Robust system som gir stor strømbelastningsevne, og om det belastes hardt i en avvikssituasjon vil spenningen bli lav og lokomotivfører vil kunne skjønne at noe er galt og begrense pådraget, eventuelt melde at noe er unormalt.

Ut fra det en har funnet i simuleringene og oppsummert her peker alternativ 3 seg ut som det mest gunstige teknisk sett. Alternativ 2 med forsterkningsleder kunne ha vært et enda bedre

alternativ om det innføres forsterkningsledere, returleder og sugetransformatorer. Men dette blir da også et svært kostbart og omfattende alternativ, og utetiden er funnet til å være den lengste for de tre alternativene.

6 KONKLUSJON

6.1 Anbefalt alternativ

Alle alternativene gir akseptable spenninger for togene i normal driftstilstand og tilfredsstillende dermed den delen av teknisk regelverk for prosjektering av banestrømforsyningen (JD 546) som har med forholdene under normal drift å gjøre. Derimot er det under unormale driftssituasjoner at en ser forskjeller mellom alternativene. Da er det alternativ 3 med autotransformatorer peker seg ut som det beste. Alternativ 2 med fjernledning og toviklingstransformator er eliminert som realistisk alternativ fordi alternativ 2 krever at det settes inn forsterkningsledning for å takle flere av de unormale driftssituasjoner, dermed vil dette bli et svært kostbart alternativ når også ny transformatorstasjoner kommer i tillegg.

Alternativ 1 der dagens mateledning bare benyttes i avvikssituasjoner og det bygges forsterkningsleder for hele strekningen, tilfredsstillende dimensjoneringsregelverket med hensyn til strømbelastning i normaltilstand og i flere avvikssituasjoner. Men spenningen blir i flere av de simulerte scenariene meget lav og forsinkelser oppstår. Margin mot overbelastning er i normal drift derimot gode og bedre enn for alternativ 3.

Noen av de beste argumentene for alternativ 3 er at dette opplegget ikke trenger forsterkningsleder som gjør vedlikeholdsarbeidet vanskeligere å håndtere i tunnelene. Dette gjelder i alle fall om det på svensk side bygges AT-system mellom Riksgrensen til Tornehamn som er forutsatt i simuleringene. Dessuten er autotransformatorene tenkt plassert på steder slik at avstanden mellom dem blir rundt 10 km. Dermed fås avstander som er standard for disse enhetene og som gjør at returstrømmene i jord blir akseptable og lave. EMC forholdene antas dermed å bli gode. Skal det samme oppnås med de andre alternativene må sugetransformatorer og eventuelt returleder innføres. Kostnadene blir da store.

Det er beklagelig at det er uvishet omkring spørsmålet om forsterkningsleder er nødvendig eller ikke mellom Rombak og Riksgrensen, men slik må det dessvære bli når det fra Banverkets side ikke foreligger noen konkrete planer på nåværende tidspunkt. Banverket står foran store endringer av sin banestrømforsyning på Malmbanan, utredninger har blitt gjort og flere vil komme, men det vil ikke foreligge budsjetter for å gjøre noen systemendringer før om mange år. En blir da nødt til å være forberedt på en løsning som kan kreve bruk av forsterkningsleder fra Rombak til Riksgrensen. Imidlertid gjør tiltakene på norsk side med autotransformatorer og overføring av effekt på høyere spenningsnivå det mer aktuelt for tilsvarende forsterkninger på svensk side, det vil si at de vil være interessert i investeringer som gjør systemet sett under ett mest mulig harmonisert, og i stand til å takle normal- og unormale driftssituasjoner best mulig.

6.2 Størrelse og antall omformere og autotransformatorer

Ut fra simuleringene og vurderinger kan en konkludere med at Rombak omformerstasjon kan beholde dagens bestykning av aggregater. Det settes inn autotransformatorer på 6 MVA ved Narvik, Straumsnes, Rombak, Katterat og Bjørnfjell. På alle disse stedene settes det inn en enhet, bortsett fra ved Rombak der det forutsettes to enheter for hver avgang til fjernledningen.

Kontaktledningsanlegg som i dag med 100 mm² Cu kontakttråd og 50 mm² Bz bæreline vil være tilstrekkelig. I tilfelle at det i fremtiden bygges nytt AT-system på Malmbanan og

Tornehamn omformerstasjon legges ned bør dagens forsterkningsleder fra Rombak til Bjørnfjell benyttes. Dermed bør denne beholdes der den er intakt og eventuelt beskyttes der den er utsatt, for senere å eventuelt kobles inn på denne strekningen. Også for å få større fleksibilitet ved avvikende driftssituasjoner kan det være nødvendig å benytte denne.

6.3 Situasjoner som krever begrensinger i trafikken

For alle alternativene er det kjøring av det tunge olivintoget på 4240 tonn lastvekt i unormale driftssituasjoner som kan skape problemer. Kjøres dette toget i "blokkpostavstand" fås store strømmer i alternativ 3 og ved andre tilfeller oppstår for høye strømmer ved unormal driftssituasjoner i alle tre alternativene. Det som gjør dette spesielt ugunstig for alternativ 2 og 3 er at lokomotivføreren ikke får lav spenning på strømvtagere slik at han ikke får mistanke om at noe er galt. Dermed må driftssentralen identifisere alle disse avvikstilstandene, og på forhånd vite hvilke koblingsbilder som er ugunstige som for eksempel utkobling av fjernledning eller autotransformatorer i alternativ 3. For å kunne få mest mulig ut av situasjoner med avvikende drift bør absolutt optimale termiske vernløsninger etableres, og/eller sensorer som overvåker driftstemperaturer.

6.4 Spesielle forhold som må påses ved prosjektering og drift

Her følger en liste over de tingene som er nevnt som viktige å påse og som i videre arbeid bør være med i planleggingen.

- Det må skrives en henvendelse til Jernbaneverket ITPE om dispensasjon for avvik fra teknisk regelverk om at margin for 20 % trafikkøkning ikke er lagt til grunn ved dimensjonering av anlegget.
- Gå gjennom verninnstillingene for overstrøms- og kortslutingsvern når nytt anlegg bygges.
- Innføre termiske overstrømsvern for avgangene med utetemperatursensorer. Det kan også eller som et tillegg vurderes systemer med direkte temperaturmåling på kontaktledningslinjene.
- Det tunge olivintoget med lastvekt 4240 tonn bør ikke få anledning til å kjøres i "blokkpostavstand" til andre tog. Enten må det være rutine for å påse at dette ikke skjer på svært varme dager eller så får det være en regel å aldri gjøre dette.
- Malmtog som bremses regenerativt med 750 kN vil skape så store regenerative strømmer om de kjøres i "blokkpostavstand" at det er fare for overbelastning, i alle fall på svært varme dager. Enten får man i slike tilfeller begrense regenerativ bremsing til 500 kN, eller unngå kort avstand mellom malmtogene ned til Narvik. Det er også mulig at en ny innstilling for forhold mellom effektfaktor og kontaktledningsspenning kan bøte på dette problemet.
- Beholde forsterkningsledningen mellom Rombak og Bjørnfjell i påvente av en beslutning for Malmbanan om nedleggelse av omformerstasjoner og bygging av AT-system.
- Det bør påses at det på svensk side av banen blir innført de forsterkninger som er nødvendig for å harmonisere anleggene og for å kunne takle store strømmer i unormale driftssituasjoner.

7 APPENDIKS A – BAKGRUNN FOR BEREGNINGER AV PÅLITELIGHET FOR ALTERNATIVENE

Nedenfor er grunnlaget for tilgjengelighetsberegningene i avsnitt 5.2.11 oppstilt for å vise alle de komponentene som ligger bak hver av hovedkategoriene for feil. Tall som er beregnet er gjennomsnittelig feil pr år (sviktintensitet, λ), reparasjonstid (r), gjennomsnittelig utetid pr år ($\lambda \cdot r$), forventet tid mellom svikt (MTBF, m). Tall som gjelder for utfall av en hel omformerstasjon med tre roterende aggregater er beregnet nedenfor i tabell 7-1. Det forutsettes at ved utfall av et av tre aggregater vil en ha fortsatt drift, se for øvrig [13]. Statistikk for utfall er hentet fra Bane Energi. For fjernledningen i alternativ 2 er alle komponenter inkludert inklusiv transformatorene tatt med, se tabell 7-2. Autotransformatorene sine komponenter er satt opp i tabell 7-3. Alle tall er hentet fra erfaringstall fra alminnelig energiforsyning i Norge, se [14] og [15].

Påliteligheten for roterende aggregater ser ut til å være lav noe som mye skyldes datagrunnlag som dette er basert på, der noen enheter ligger ute i lang tid. Statistisk gir dette utslag i en relativt dårlig tilgjengelighet for Rombak omformerstasjon. Videre viser statistikken over flere år at det er svært sjeldent at flere aggregater i en stasjon ligger ute samtidig. Beregnet utetid for Rombak omformerstasjon gir derfor ikke nødvendigvis et helt riktig bilde av situasjonen. For fjernledningen i alternativ 2 er alle komponenter inkludert inklusiv transformatorene tatt med, se tabell 7-2. Autotransformatorene sine komponenter er satt opp i tabell 7-3. Alle tall er hentet fra erfaringstall fra alminnelig energiforsyning i Norge, se [14] og [15].

Tabell 7-1 Beregning av utetiden for Rombak omformerstasjon med overliggende 132 kV forsyning.

Omformerstasjon og nett							
Del 1 innkommende forsyning	λ [feil/år]	R [h]	$\lambda \cdot r$ [h]	m [år]	p	q	Utetid pr. år [t]
A: 132 kV forsyning	0,460	0,380	0,175	2,174			
Del 2, eksisterende anlegg							
Hele anlegget	4,390	70,000	307,300	0,228			
Eksisterende omformerstasjon	4,390	34,509	151,495	0,228	0,983		
Seriekopl 1 omformer pluss nett	4,850	31,272	151,670	0,206			
Del 3, 2 stk eksisterende anl. i parallell eks nett							
P: parallellkobling OO	0,152	17,255	2,620	6,586	0,9997	0,000299	2,619
Del 4, 2 stk eksisterende anlegg inkl nett							
G: seriekobling A+P	0,612	4,568	2,795	1,634			
Del 5, 2 av 3 stk eksisterende anlegg ekskl. nett							
					0,999	0,000857	7,509
Del 6, 2 av 3 stk eksisterende inkl. nett							
Utetid pr. år					0,999	0,000877	7,683

Tabell 7-2 Beregning av utetiden for fjernledningen, transformatorer og samtlige andre komponenter tilhørende fjernledningen. Det er antatt at for transformatorene i Narvik og Bjørn fjell vil bestillingstiden for ny transformator være på 1 år om denne havarerer. For feil på en av transformatorene ved Rombak kan en koble over til den gjenværende slik at denne forsyner i begge retninger. Disse er av den grunn valgt med større ytelse.

Fjernledning fra utgående linje i koblingshus Rombak til utgående linje i koblingshus Narvik				
	λ [feil/ år]	r [h]	$\lambda*r$ [h]	m [år]
A2: PEX beskyttet forlegning 50 m	0,000	7,800	0,003	2985,07
B2: Skillebryter 15 kV	0,001	1,883	0,003	714,29
C2: PEX beskyttet forlegning 10 m	0,000	7,800	0,001	14925,37
D2: Transformator 17/66 kV	0,006	111,000	0,666	166,67
E2: PEX beskyttet forlegning 10 m	0,000	7,800	0,001	14925,37
F2: Effektbryter 66 kV	0,003	3,467	0,009	400,00
G2: PEX beskyttet forlegning 50 m	0,000	7,800	0,003	2985,07
H2: 66 kV luftlinje	0,045	48,500	2,159	22,46
I2: PEX beskyttet forlegning 50 m	0,000	7,800	0,003	2985,07
J2: Effektbryter 66 kV	0,003	3,467	0,009	400,00
K2: PEX beskyttet forlegning 10 m	0,000	7,800	0,001	14925,37
L2: Transformator 66/17 kV	0,006	8760,000	52,560	166,67
M2: PEX beskyttet forlegning 10 m	0,000	7,800	0,001	14925,37
N2: Effektbryter 66 kV	0,003	3,467	0,009	400,00
O2: PEX beskyttet forlegning 10 m	0,000	7,800	0,001	14925,37
P2: Skillebryter 15 kV	0,001	1,883	0,003	714,29
Q2: Samleskinne 15 kV	0,005	10,000	0,050	200,00
R2: Effektbryter 15 kV	0,003	0,003	0,000	400,00
S2: PEX beskyttet forlegning 800 m	0,005	0,007	0,000	186,57
Seriekobling fjernledningssystem Rombak - Narvik	0,081	684,732	55,477	12,34

Tabell 7-3 Beregning av utetiden for autotransformatorene. Det er forutsatt at utfall av en autotransformator ved Rombak ikke vil skape problemer siden de fire enhetene som er planlagt her uansett vil bli moderat belastet.

Utfall av autotransformator				
	λ [feil/ år]	r [h]	$\lambda*r$ [h]	m [år]
1-24 kV lastskillebryter	0,001	1,883	0,003	714,28571
PEX beskyttet forlegning 50 m	0,000	7,800	0,003	2985,0746
Autotransformator med reserve	0,006	111,000	0,666	166,66667
PEX beskyttet forlegning 50 m	0,000	7,800	0,003	2985,0746
1-24 kV lastskillebryter	0,001	1,883	0,003	714,28571
Totalt pålitelighet for <u>en</u> AT kiosk	0,009	71	0,676	106
Utfall av AT i Narvik		71		106

8 APPENDIKS B - EFFEKT OG ANDRE PARAMETERE FOR UTVALGTE TOG

Nedenfor viser figur 8-1 til figur 8-6 utvalgte parametere som funksjon av tilbakelagt distanse for forskjellige tog kategorier. Det er i første graf vist gradienten for banen, så er det vist skiltet hastighet og den faktiske hastigheten for hvert tog, rullemotstanden, trekkraften som lokomotivet utvikler på samtlige hjul, aktiv- og reaktivt effektopptak på strømvatageren, og til sist strømmen toget trekker.

For passasjertog 99 i figur 8-1 fra Narvik sees at trekkraften ligger gjennomsnittelig rundt 50 - 60 kN det meste av strekningen opp til Bjørnfjell, og bare for de stedene der toget akselererer bruker toget stor trekkraft (opp mot 210 kN). Fra stans til oppnådd skiltet hastighet bruker toget knapt 1 km som akselerasjonsdistanse. Av dette kan det se ut til at toget har meget stor ytelse i forhold til den hastighet det holder opp stigningene.

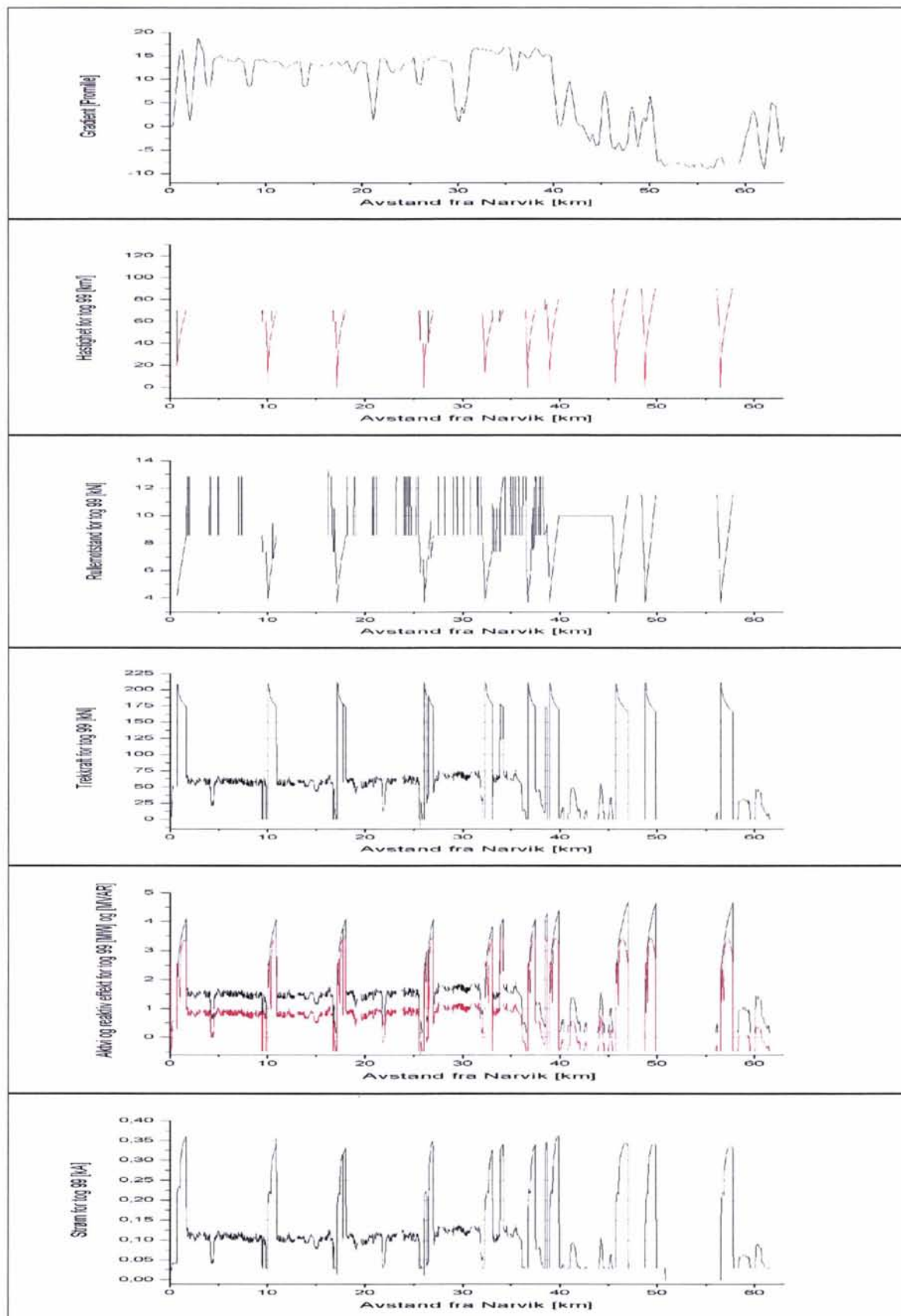
For godstog 3001 i figur 8-2 er situasjonen en helt annen ved at toget bruker lengre akselerasjonsstrekning og bruker på det meste en trekkraft på 420 kN. Mer vanlig trekkraft ved akselerasjon er rundt 350 kN og ved oppnådd hastighet er kraften 250 kN. Aktiv effekt ligger for det meste mellom 6 og 8 MW og bare der hastigheten reduseres noe (gjennom stasjonene) blir effekten noe lavere. Enda kunne lokomotivene tatt ut enda større effekt i og med at trekkraften ved 70 km/t til sammen er ca 490 kN.

For tog 3002 som går nedover til Narvik i figur 8-3 er situasjonene den motsatte ved at dette toget bremses mekanisk helle distansen fra Bjørnfjell. Her er det bare når toget akselererer ut fra stasjonene at det trekker effekt og en virkelig lokomotivfører ville sannsynligvis kjørt noe mer forsiktig her og effekttrekket ville blitt mindre.

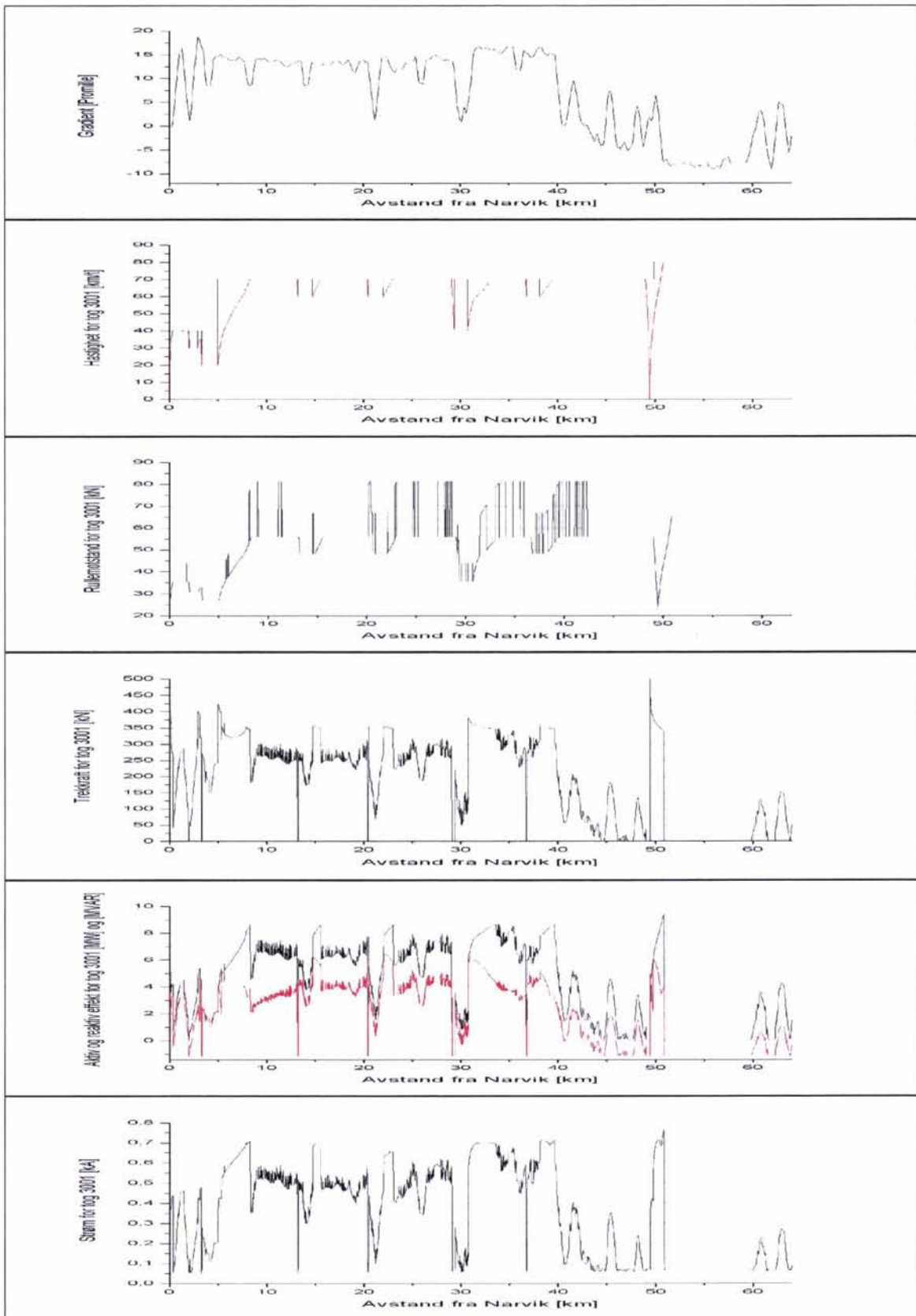
Tog 9901 i figur 8-4 er olivintoget med lastvekt 4240 tonn og dette trekker utrolige 13 MW nokså konstant det meste av strekningen opp til Bjørnfjell. For dette ser effekt og trekkraften ut til å være nokså lik både for akselerasjonsperiodene og for resten av turen.

For tog 9903 i figur 8-5 er forholdet mer markert mellom høy effekt, strøm og trekkraft i akselerasjonsperiodene og periodene med jevn hastighet, slik som for tog 3001. Dette tyder på rikselig overskudd mellom installert effekt og nødvendig effektbehov.

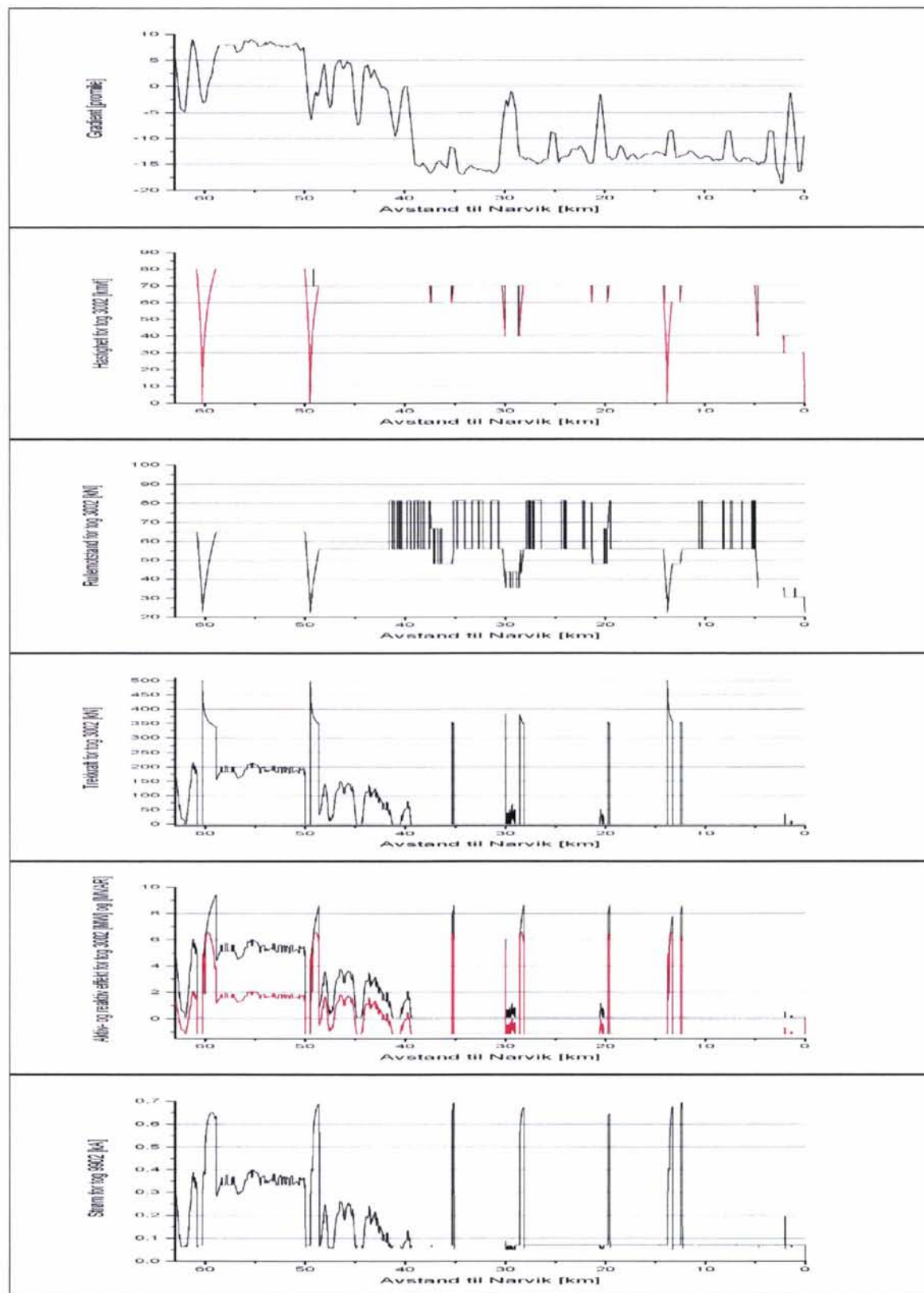
Figur 8-6 viser tog 9904 som kjører nedover mot Narvik og bremses elektrisk det meste av strekningen.



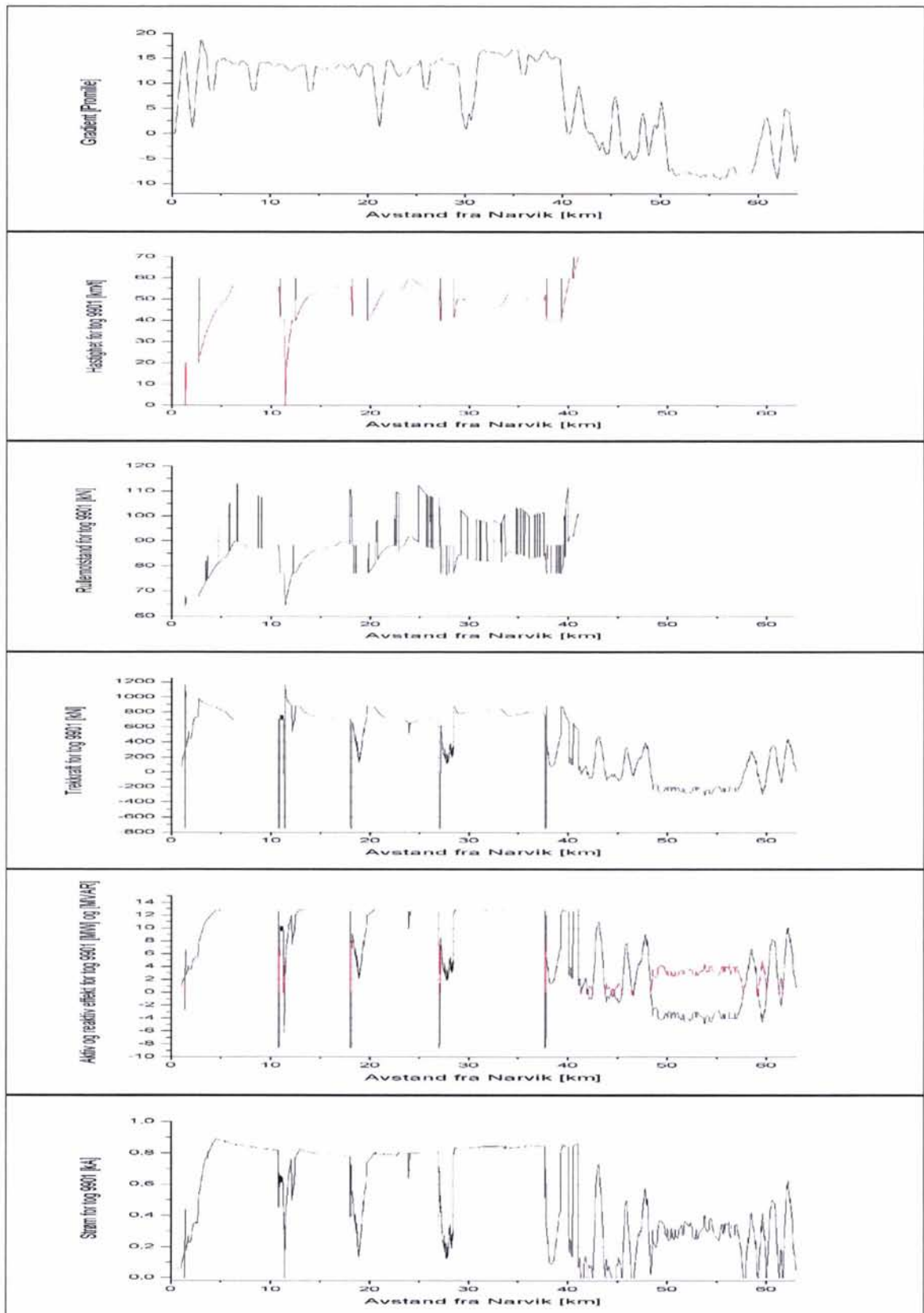
Figur 8-1 Noen utvalgte parametere for persontog 99 fra Narvik til Tornehamn. Rod strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rod reaktiv effekt.



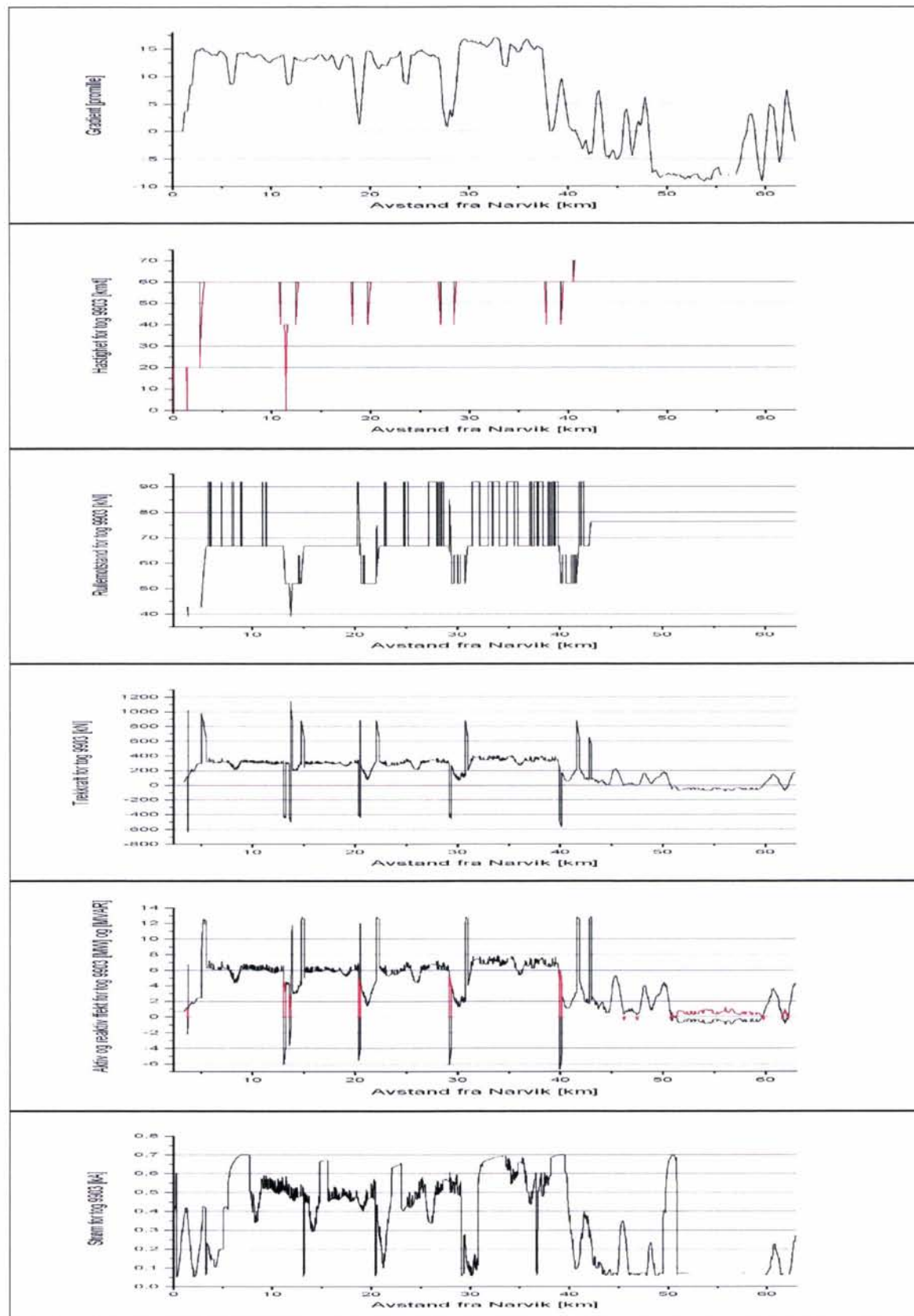
Figur 8-2 Noen utvalgte parametere for godstog 3001 fra Narvik til Tornehamn. Rød strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rød reaktiv effekt.



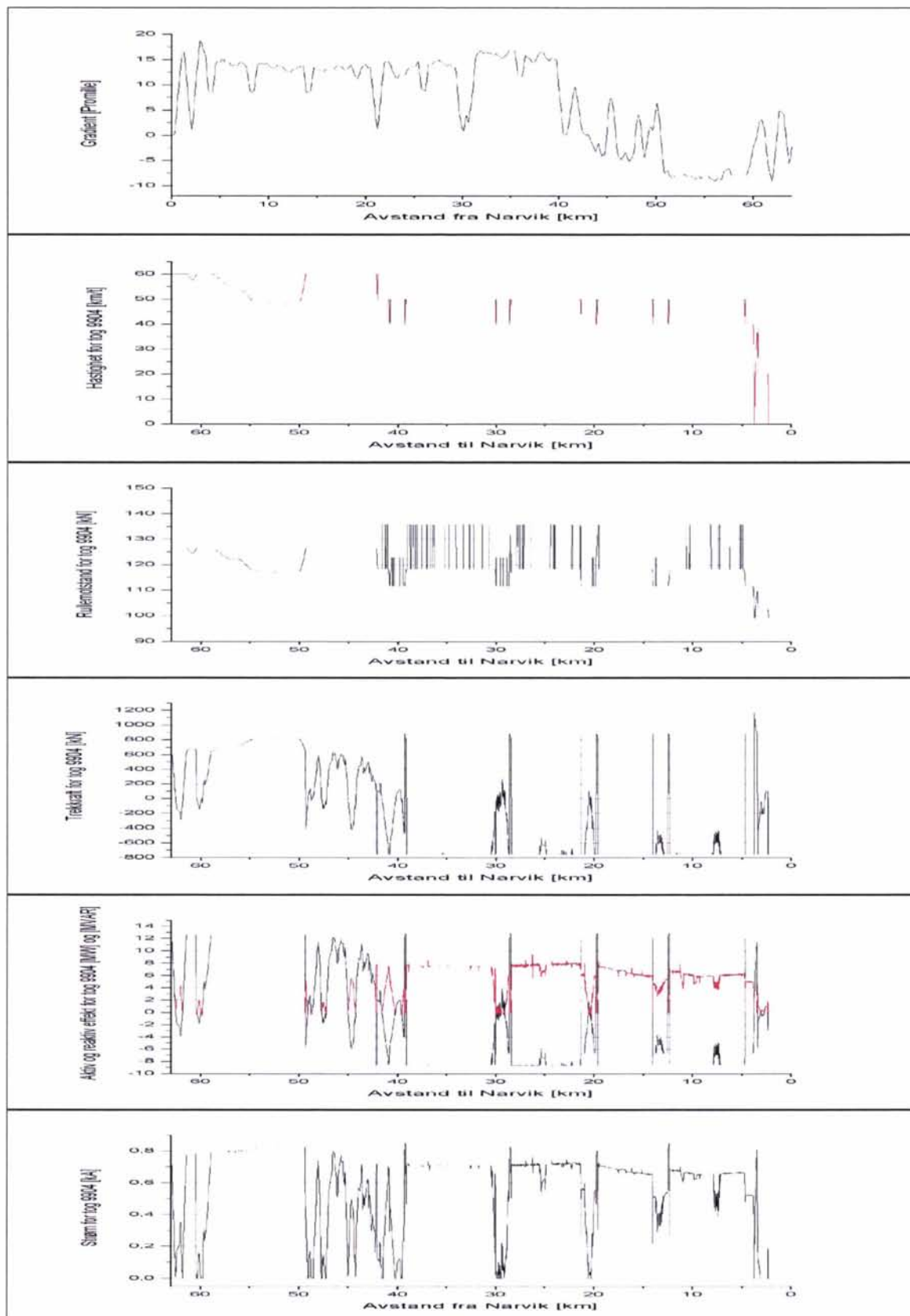
Figur 8-3 Noen utvalgte parametere for godstog 3002 fra Tornehamn til Narvik. Rod strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rød reaktiv effekt.



Figur 8-4 Noen utvalgte parametere for olivintog 9901 fra Narvik til Tornehamn. Rød strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rød reaktiv effekt.



Figur 8-5 Noen utvalgte parametere for tomtog 9903 fra Narvik til Tornehamn. Rød strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rød reaktiv effekt.



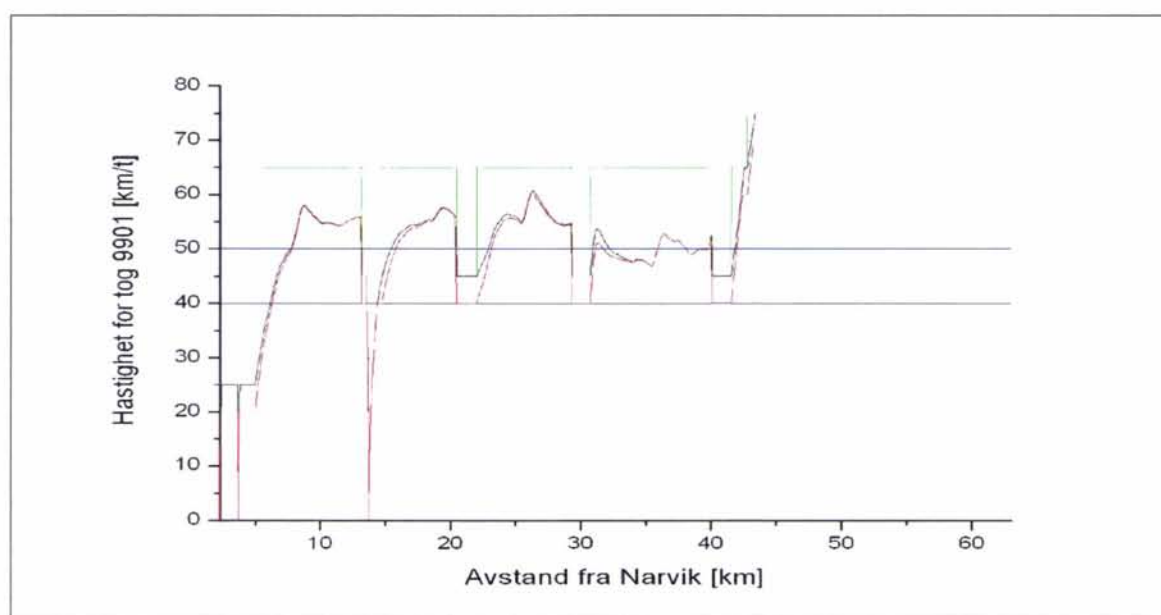
Figur 8-6 Noen utvalgte parametere for malmtog 9904 fra Tornehamn til Narvik. Rød strek for bilde 2 ovenfra er togets hastighet og i bildet for effekt er sort strek aktiv effekt og rød reaktiv effekt.

9 APPENDIKS C – SIMULERINGER DER FORSKJELLIGE PARAMETERE FOR TOG OG BANE ENDRES

En ser på tog 9901 fordi en kan være mest bekymret for at dette toget som trekker mest effekt kan få betydning for dimensjonering av det nye anlegget. Selv om riktignok multiple Rc 4 lokomotiver for tog med 1500 tonn lastvekt har større samlet ytelse (nærmere 20 MW(!)), vil tilgjengelig trekraft være begrensende og disse togene vil ikke være dimensjonerende.

9.1 Simulering med SPEEDM = 5 km/t

Nedenfor viser figur 9-1 hvordan endring av togenes parameter SPEEDM fra 0 til 5 km/t får det tunge østgående malmtog 9901 til å holde en hastighet på 5 km/t under skiltet hastighet. En legger merke til at hastigheten endres like hurtig som før for å oppnå ny hastighet. Endring av denne parameteren virker ikke til å ha noen mening i simuleringene, da en alltid ønsker at togene skal følge skiltet hastighet.

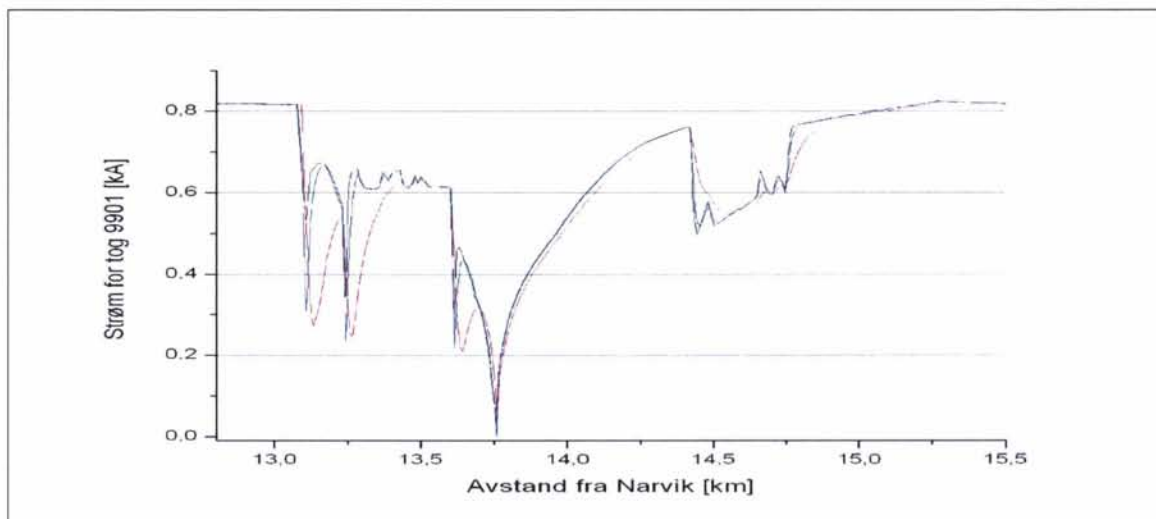


Figur 9-1 Hastigheten for tog 9901 når SPEEDM endres fra 0 til 5 km/t. Simulering 1 med alle andre verdier uforandret.

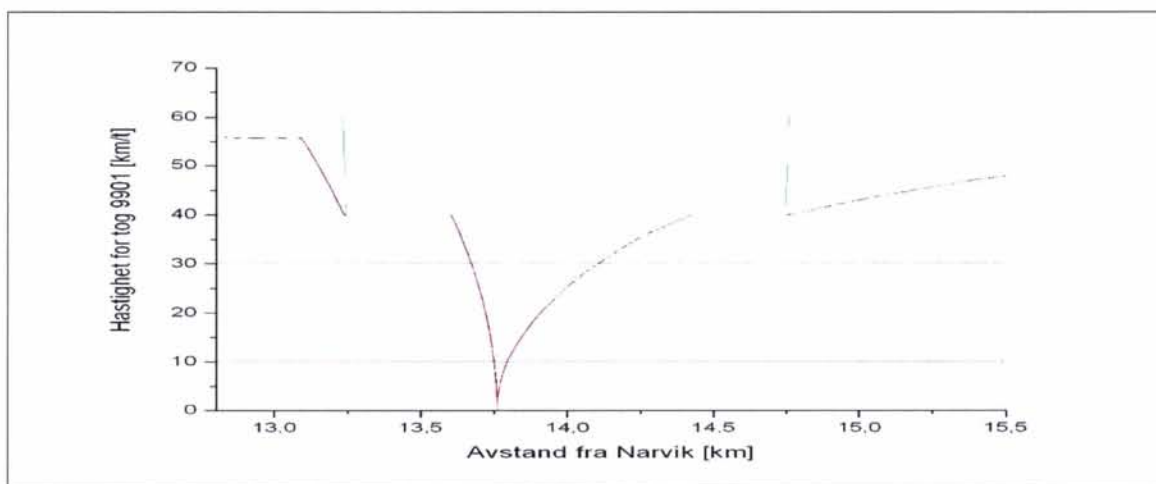
9.2 Simulering der TC endres fra 0,5 til 1 og til 4 sekunder

Parameteren TC er en tidsforsinkelse i et filter for endring av strømvtagers strøm for togene. Vanligvis er denne verdien satt til 0,5 sekunder, men det kan være interessant å se hva som skjer ved en endring av denne verdien. Det kan tenkes at for moderne lokomotiver finnes denne størrelsen som en regulerbar parameter, eller det kan være at en høy verdi av denne representerer en forsiktig lokomotivfører. Figur 9-2 viser strøm på strømvtageren for noen få kilometer toget tilbakelegger ved Katterat stasjon, en liten strekning undersøkes fordi kurven må ha stor oppløsning for at endringen skal bli synlig. En kan se at når denne verdien endres fra TC = 0,5 til 1 sekunder oppnåes knapt noen endring, men ved økning helt opp til 4 sekunder ser strømpådraget ut til å ikke ha de samme hurtige endringene. Imidlertid er oppnådd maksimalstrømmer de samme.

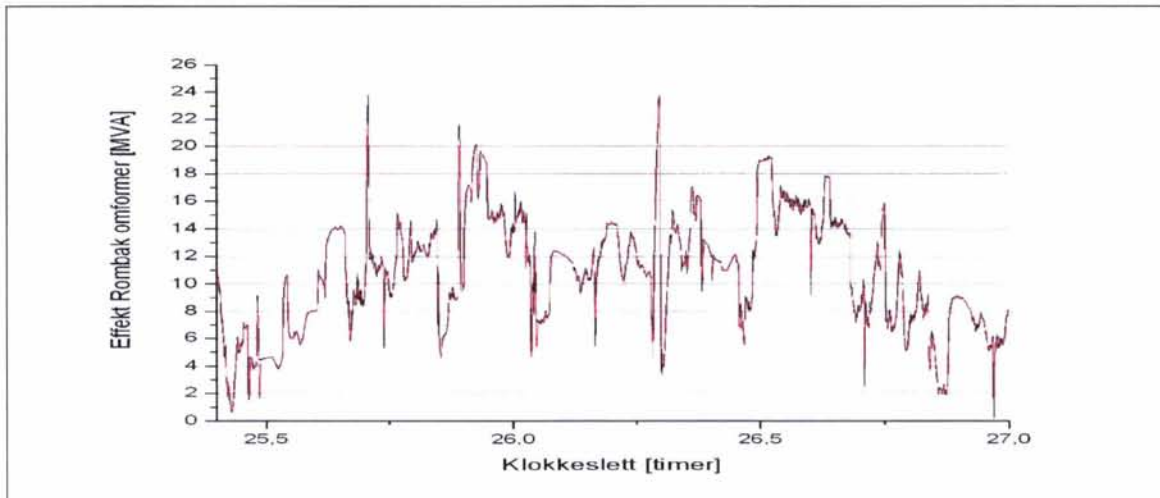
Det er forsøkt å undersøke om det skjer noen hastighetsendringer for lokomotivet, men i figur 9-3 kan en se at det ikke ser ut til å være tilfelle. Videre er levert tilsynelatende effekt fra Rombak omformerstasjon vist i figur 9-4 og det er det samme tidsrommet som når olivintoget 9901 er undersøkt som er fremstilt. Som det kan sees er 2-sekundersverdien påvirket, men i liten grad.



Figur 9-2 Strøm for tog 9901 i simulering 1 med opprinnelig verdi TC=0,5 sekunder (sort strek), med TC = 1 sekund (blå strek) og TC = 4 sekunder (rød strek).



Figur 9-3 Hastighet for tog 9901 i simulering 1 med opprinnelig verdi TC=0,5 sekunder (sort strek), med TC = 1 sekund (blå strek) og TC = 4 sekunder (rød strek). Grønn strek er skiltet hastighet.



Figur 9-4 Tilsynelatende effekt levert fra Rombak omformerstasjon 2-sekunders MEAN-verdi for tilfellet med TC = 0,5 (sort strek) og TC = 4 (rod strek) for alle togene i simulering 1.

9.3 Simulering der adhesjonskoeffisienten endres for banen

Hvordan adhesjonsforholdene på banen spiller inn på effektforbruk, energioptak, kjøretid og lignende har vært gjenstand for diskusjoner i lengre tid, og en simulering der dette endres er utført. Adhesjonskoeffisienten for selve banen er gitt med konstanten ADHCOEFF = 0,161 som visstnok gjelder for forholdene ved dårlig vær, regn og løv på skinnen. Selve formelen for togets adhesjon er som følger:

$$Adhesjon = ADHCOEFF + \frac{ADH1}{v + ADH2}$$

Der ADH1 og ADH2 er konstanter som gjelder for hvert enkelt tog/traksjonsaggregat og i alle simuleringer utført ved Jernbaneverket har disse fått verdiene 7,5 og 44 henholdsvis.

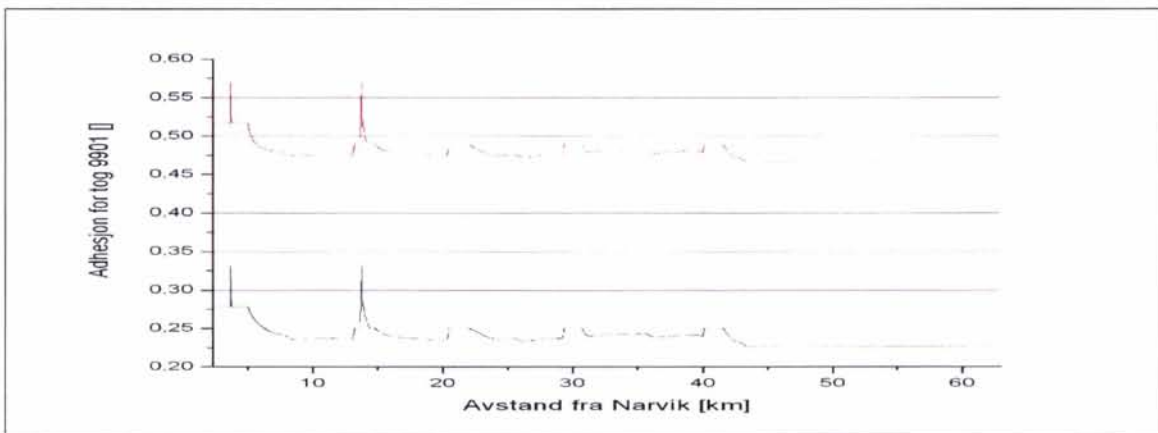
Hastigheten for toget inngår også i formelen med v. Begrunnelsen for å sette adhesjonskoeffisienten så lav er å kompensere for TracFeed sin altfor brutale lokomotivfører. TracFeed sin måte å modellere lokomotivføreren på er at nøyaktig hastighet alltid forsøkes å opprettholdes og fullt pådrag gies for å oppnå dette. Dermed kan simuleringene vise altfor store toppbelastninger enn hva som er tilfelle i praksis.

En vil her forsøke med en adhesjonskoeffisient så høy som praktisk mulig og velger 0,4 som gjelder ved tørt vær og beste kjøreforhold. Dette for å se om det kan være fare for å underdimensjonere anleggene når det taes utgangspunkt i omtrent de verst tenkelige adhesjonsforhold. Simulering 1 er utført med disse nye forholdene og forskjellige forhold er undersøkt for tog 9901, se figur 9-5 til figur 9-9 nedenfor. Som en kan se arbeider lokomotivet på sitt absolutt maksimum av hva det kan yte hva gjelder trekraft og effekt det meste av distansen fra Narvik til Riksgrensen, forbedringen av adhesjonsforholdene får veldig liten betydning. Effekten levert fra Rombak omformerstasjon er undersøkt spesielt når dette toget kjører, se figur 9-10 og figur 9-11. En kan se at 2-sekundersverdien er en del påvirket, men for 6-minuttersverdien er endringene meget små.

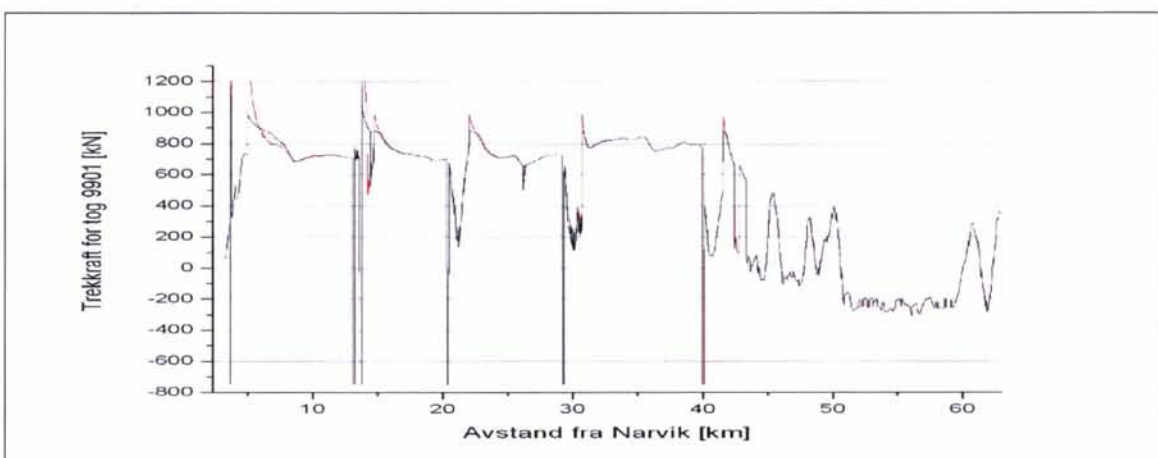
For å undersøke om andre tog som kanskje kan komme til å trekke mer effekt enn ellers er passasjeretog 99 og godstoget 3001 undersøkt, se henholdsvis figur 9-12 og figur 9-14. For

passasjertoget ser det ut til at det oppstår en økning av effektopptak på ca 0,7 MW, mens for godstoget blir det en økning av effekten på ca 3,5 MW. En legger merke til at med større adhesjon fåes et kortvarig større effektopptak, mens det for tilfelle med opprinnelig adhesjon blir et forløp for effekten som varer lenger. Tydeligvis er det ikke olivintoget 9901 som kan få effektopptaket sitt økt betydelig ved større adhesjonen, men de andre togene. Og ser det ut til, er det tog som har forhold mellom lastvekt og lokomotiv slik at lokomotivet har rikselig med trekkraft i forhold til hva det skal yte. Dette ser ut som om energioptaket for hver akselrasjon togene gjør er omtrent den samme. Om en forsøker å sammenligne arealet for effektopptaket før og etter endringen kan en få inntrykk av dette, noe som en for så vidt også skulle forvente.

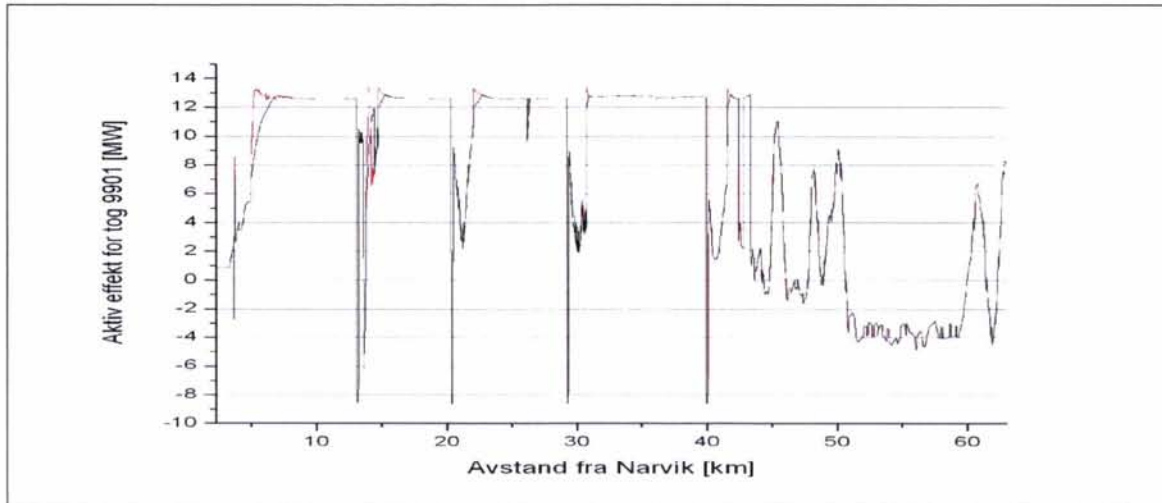
For å undersøke om effekten levert fra Rombak omformerstasjon blir endret av betydning er dette undersøkt spesielt for hele simuleringsperioden, og i tabell 9-1 er maksimalverdiene for de aktuelle tidsperiodene vist. Sammenlignes dette med simulering 1 med opprinnelig adhesjon, se avsnitt 4.1.3, sees det at for 6-minutters- og 1-timesverdi av effekten er endringen minimal, men for 2-sekunders blir økningen ganske stor. Før var 2-sekunders verdien for Rombak 23,8 MVA, mens den nå blir 29,7 eller en økning på 25 %. At dette får betydning for termisk dimensjonering av seriekomponentene ansees som usannsynlig all den tid disse belastningstoppen er så kortvarige.



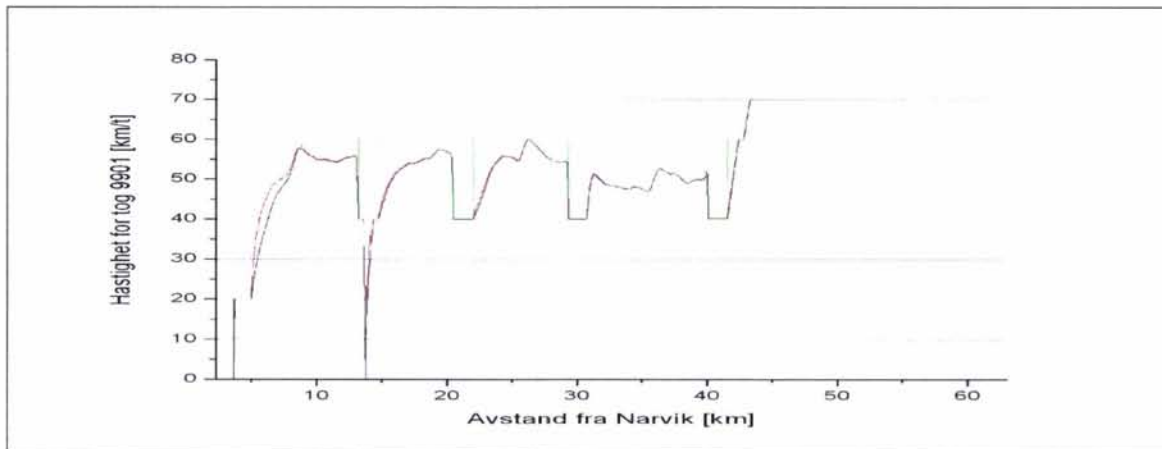
Figur 9-5 Adhesjonen for tog 9901 i simulering 1 med opprinnelig verdi $ADCOEFF = 0,161$ (sort strek) og med $ADCOEFF = 0,4$ (rod strek).



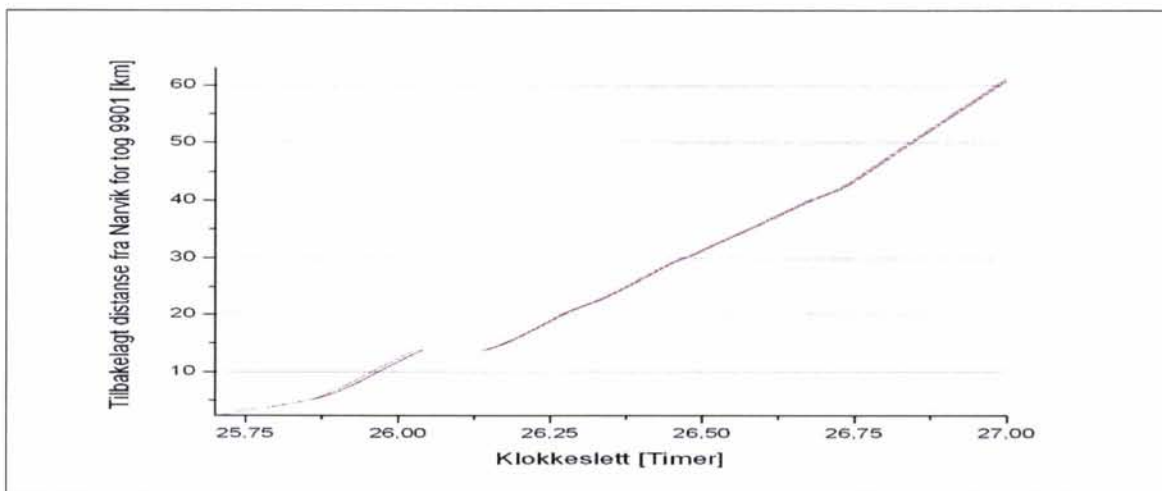
Figur 9-6 Trekkraften for tog 9901 i simulering 1 med økt adhesjon fra $ADCOEFF = 0,161$ (sort strek) til $ADCOEFF = 0,4$ (rod strek).



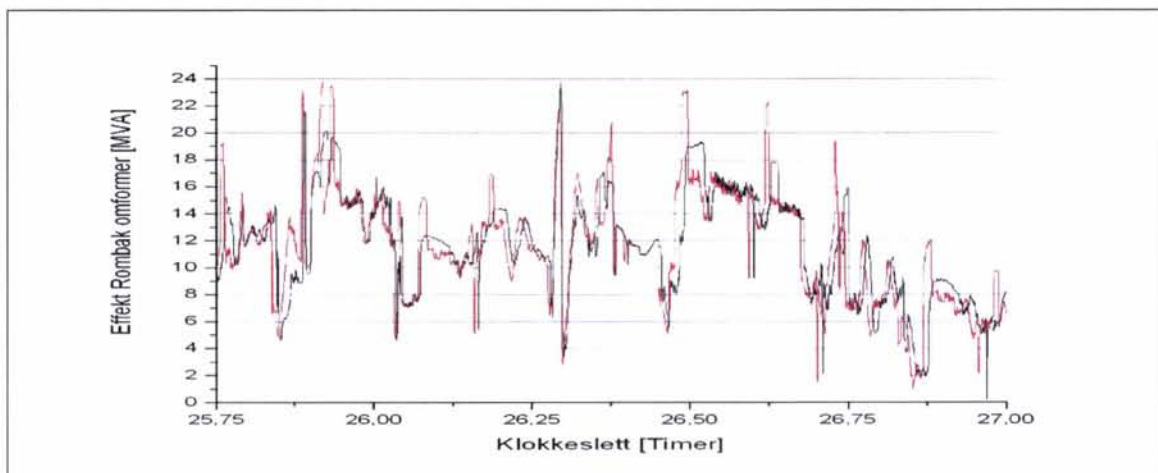
Figur 9-7 Aktiveffekt for tog 9901 i simulering 1 med økt adhesjon fra $ADCOEFF = 0,161$ (sort strek) til $ADCOEFF = 0,4$ (rod strek).



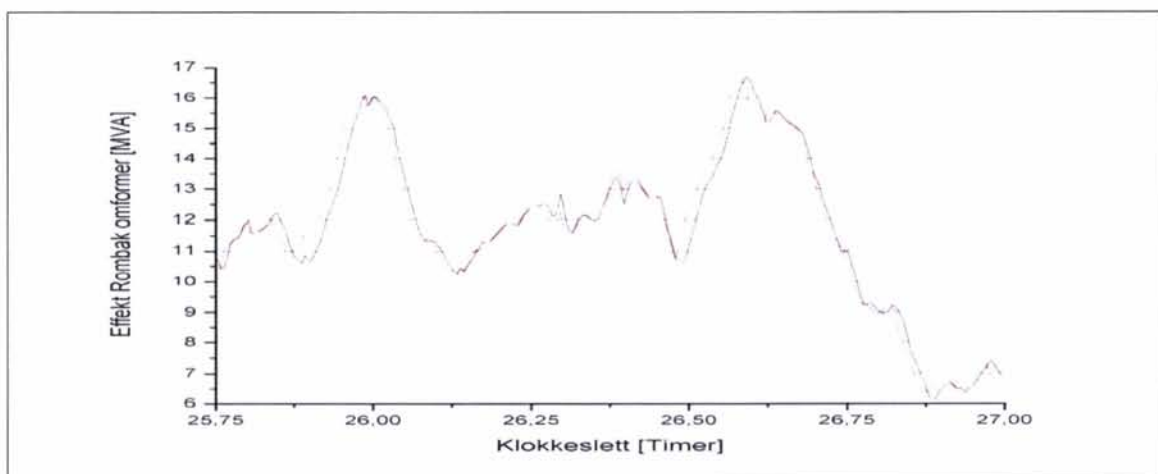
Figur 9-8 Hastighet for tog 9901 i simulering 1 med økt adhesjon fra $ADCOEFF = 0,161$ (sort strek) til $ADCOEFF = 0,4$ (rod strek). Skiltet hastighet med grønn strek.



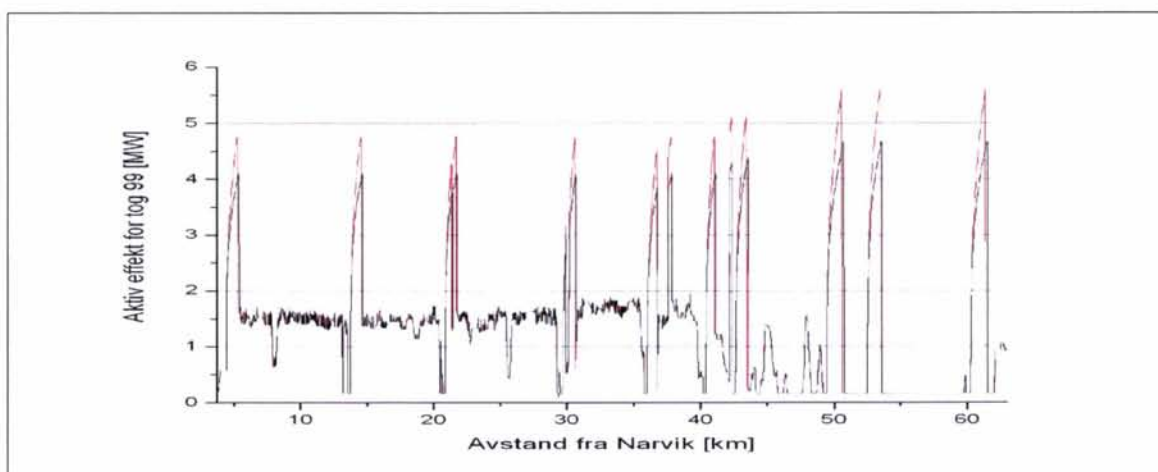
Figur 9-9 Tilbakelagt distanse for tog 9901 i simulering 1 med økt adhesjon fra $ADCOEFF = 0,161$ (sort strek) til $ADCOEFF = 0,4$ (rod strek).



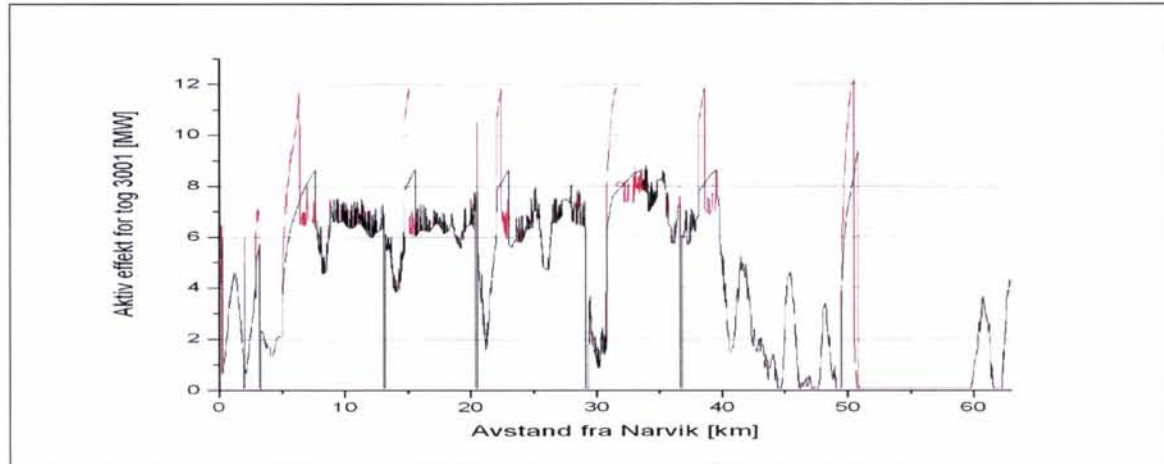
Figur 9-10 MEAN-verdi av 2-sekunders tilsynelatende effekt levert fra Rombak omformerstasjon i simulering 1 med økt adhesjon fra ADCOEFF = 0,161 (sort strek) til ADCOEFF = 0,4 (rod strek).



Figur 9-11 MEAN 6-minuttersverdi tilsynelatende effekt levert fra Rombak omformerstasjon i simulering 1 med økt adhesjon fra ADCOEFF = 0,161 (sort strek) til ADCOEFF = 0,4 (rod strek).



Figur 9-129-13 Aktiveffekt for tog 99 i simulering 1 med økt adhesjon fra ADCOEFF = 0,161 (sort strek) til ADCOEFF = 0,4 (rod strek).



Figur 9-14 Aktiveffekt for tog 3001 i simulering 1 med økt adhesjon fra ADCOEFF = 0,161 (sort strek) til ADCOEFF = 0,4 (rod strek).

Tabell 9-1 Belastning av omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for noen utvalgte tidsperioder. Simulering 1 med økt adhesjon fra ADCOEFF = 0,161 til ADCOEFF = 0,4 for hele banestrekningen.

Simulering 1 med stor adhesjonskoeffisient							
Omformer stasjon	Innsatt ytelse [MVA]	Effekt MEAN					
		2 sek		6 min		1 time	
		[MVA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Rombak	2 x 10 + 5,8	29,737	60	18,856	52	12,850	50
Tornehamn	2 x 10 + 2 x 5,8	28,310	48	16,988	39	8,585	40

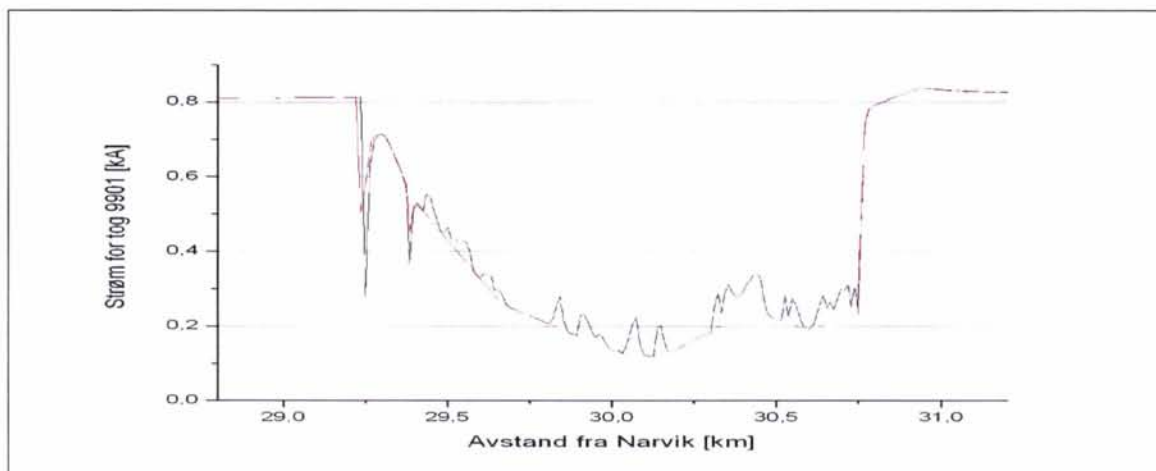
9.4 Simulering uten horisontalkurvatur

En simulering uten horisontalkurvatur og alle andre forhold som i simulering 1 er gjort for å undersøke eventuelle endringer for effektopptaket og energiforbruket over et helt døgn med trafikk. Nedenfor er det i figur 9-15 vist hvordan strømmen for det tunge olivintoget fra Narvik endres uten horisontalkurvatur når det passerer Katterat stasjon. Toget trekker stor strøm nå, men reduserer pådraget når hastigheten settes ned ved passering av stasjonen. Som en kan ser er de største for endringene opptatt strøm omtrent 200 A.

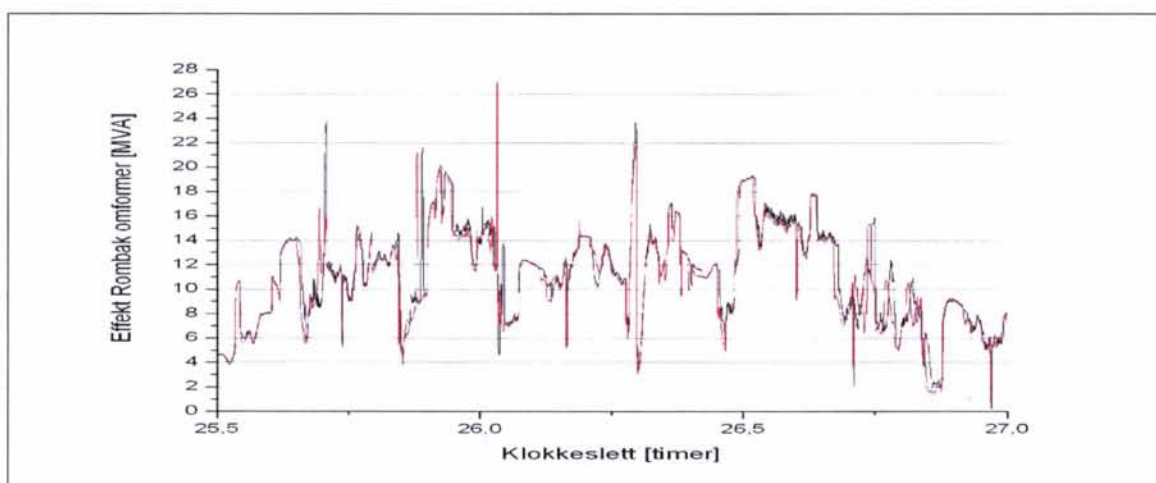
Figur 9-16 viser 6-minuttersverdien for tilsynelatende effekt for hele den perioden når det tunge olivintoget 9901 kjører fra Narvik til Riksgrensen. Også andre tog trafikkerer strekningen samtidig. Som en ser er effekten for store perioder omtrent den samme, men noen få steder er det er det forskjeller.

I tabell 9-2 er levert effekt samt absolutte og relative verdier for energiforbruket vist. Som en ser er de prosentvise forskjellene for tapene forsvinnende små i forhold til simulering 1 med horisontalkurvatur. Det som kan være interessant å se er at togenes totale energiforbruk markert som "Energi inn" (som også inkluderer alle tap i banestrømforsyningen) er redusert fra 90,89 MWh med horisontalkurvatur til 86,48 MWh uten. Samtidig er energien levert ut, merket som "Energi ut" fra omformerstasjonen i de 24 timene som er simulert økt noe fra 11,30 MWh til 11,98 MWh. Dette viser at med en modell som inkluderer horisontalkurvatur skjer det at tog som kjører i stigning trekker større effekt, mens tog som bremses regenerativt avleverer større effekt. Men siden bare malmtogene mater inn effekt ved bremsning er denne

endringen for energi levert ut mindre. Selv om endringen av energioptaket er relativt stor er altså tapene påvirket i beskjeden grad.



Figur 9-15 Strøm over strømavtageren for tog 9901 med horisontalkurvatur (sort strek) og uten (rød strek) ved passering av Katterat stasjon. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen og uten horisontalkurvatur.



Figur 9-16 Avgitt tilsynelatende effekt fra Rombak omformerstasjon med (sort strek) og uten (rød strek) horisontalkurvatur for banestrekningen. 6-minuttersverdi av (MEAN) er vist for det tidspunktet da tog 9901 trafikkerer banen. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen og uten horisontalkurvatur.

Tabell 9-2 Levert effekt til Rombak omformerstasjon, levert og avgitt energi, samt tap for transmisjon og totale tap i omformerstasjon i absolutte og relative verdier. Maksimal 1-minuttsverdi og høyeste 1-timesverdi (MEAN) for aktiv effekt er vist. Simulering 1 med normal driftsituasjon, dimensjonerende ruteplan og konvensjonelt kontaktledningsanlegg uten mateledning, men med forsterkningsledning fra Narvik til Riksgrensen og uten horisontalkurvatur.

Simulering 1 Uten horisontalkurvatur					
Omformer stasjon	Effekt [MW]		Energi inn/ut/sum [MWh]	Tap transmisjon [MWh]/[%]	Totale tap [MWh]/[%]
	Maks	Middel			
Rombak	16,20	10,22	86,48 / -11,98 / 74,49	5,98 / 3,61	24,69 / 13,40

10 REFERANSER

1. Hovedplan og simuleringsrapport; "Hovedplan banestrømforsyning Ofofbanen". Jernbaneverket Ingeniørtjenesten, 1. juli 1999.
2. Utredning "Mer på skinner fram mot 2040, Jernbaneverkets stamnettutredning". Jernbaneverket, Oslo 2007.
3. Utredning; "Vurdering av redundans- og dimensjoneringskriteriet for banestrømforsyning". Jernbaneverket ITPE, 06.12.05.
4. Bok; "Contact Lines for Electric Railways". SIEMENS, Paris, oktober 2001. ISBN 3-89578-152-5.
5. Bok; "Elektroteknisk ledningsberegning" 2. utgave. Universitetsforlaget, Narvik, april 1988.
6. Sak; "Termisk vern for kontaktledning - Endring av verdier som kan brukes for parametrisering av termiske vern for kontaktledning Ofofbanen", Jernbaneverket. Sak 200307697.
7. Rapport; "Utredning av kontaktledningstap", Jernbaneverket Utbygging Prosjekttjenester april 2004.
8. Utredning; "Ofofbanen utviklingsplan" med vedlegg: "Simulering Malmbanan Kapasitetsanalys framtida trafikering Boden - Narvik, PM 1, Trafik 2010", utarbeidet av Banverket pr. 28. mars 2007, Hovedrapporten utarbeidet av Jernbaneverket 2007-04-20 til høring, enda ikke utgitt. Sak 200600726.
9. Rapport; "Utredning av samkjøringen i Oslo-området med hensyn på mulig reduksjon av energitap", Banepartner oktober 2003. Prosjekt nr.: 292368.
10. Rapport; "Systemstudie Kraftforsörjing Gällivare – Riksgrensen", Balfour Beatty Rail / Banverket, Preliminary 04-06-03.
11. SIEMENS på oppdrag fra Bane Energi; "Rombak koblingshus – Innstillinger og selektivitetsplan for vern 15 kV. Koblingsanlegg etter imp.måling", Vedlegg nr 3 til E-115 576. 2003-08-25.
12. Rapport; "Simulering av kontaktledningstap i Oslo-området", Jernbaneverket Utbygging Prosjekttjenester, januar 2004.
13. Bok; "Pålitelighetsanalyse", utgitt av Tapir forlang, Trondheim oktober 1988 Arne T. Holen, Arnljot Høyland og Marvin Rausand.
14. Publikasjon; "Planleggingsbok for kraftnett, bind III", utgitt 1993 oppdatert 2006 Sintef
15. Publikasjon; "FASIT 1998. Feil og avbrudd i høyspennings fordelingsnett t.o.m. 22 kV", ENFO. Publikasjon nr.: 366-1999. ISBN 82-436-0348-4
16. Hovedplan; "Hovedplan banestrømforsyning på Ofofbanen, revisjon", hovedplan, COWI på oppdrag Jernbaneverket, juli 2007.

11 VEDLEGG 1

Beregning av impedansforhold for banestrømforsyningen med hensyn på dagens matesituasjon og for de tre alternativene. Beregningene for dagens situasjon tar hensyn til returstrøm i bakken og magnetisk kobling mellom denne returstrømmen, mateledningen og kontaktledningsanlegget. Arbeidet er en del av undersøkelser for EMC forholdene for alternativene som er undersøkt for Ofofbanen.



**CALCULATION OF THE IMPEDANCE OF THE
RAILWAY LINE AND THE FEEDING LINE
OF OFOTBANEN**

Dr. György Varju
Budapest, February 2007

Amended (v1.0)

SUMMARY

This Report "*Calculation of the impedance of the railway line and the feeding line of Ofofbanen*" has been made in the frame of the "Agreement for consultancy services" between the Jernbaneverket Utbygging (JBV) and the VARJU EMC Bt. (Order no.: K-1438, Project no.: 76 04 77). This work is part of the project aiming at the upgrading the Ofofbanen and in addition improving its EMC performance. The Ofofbanen refers commonly to the railway line between Narvik and Bjornfell (Swedish border) and the high voltage (HV) feeder line serving its feeding.

The line impedances have been calculated for the multiconductor system composed of the conductors of the railway and HV feeder lines by the PLINE program. The results are given for both:

- the multiconductor system, i.e. the self and mutual impedances, per unit length, for the conductors of each line and the mutual impedance between the two lines with earth return. These impedances could be the input to the detailed possible future MULTC calculations.
- for the present-day operational condition, i.e. the equivalent self impedance of the railway line with rail + earth return (simple feeding system), the equivalent self impedance of the HV feeder line composing a loop of the two parallel connected voltage-carrying conductor with earth return and mutual impedance between the two lines with earth return.

When specifying the mutual impedance between the two lines it has been considered that the separation distance between the railway and HV feeding line is ranging from 100 m to 1 km in the majority of the length along the line routes. It means that the value of the separation distances is much larger than the conductor distances of each line. Therefore, it can be assumed that the mutual impedance, with earth return, between any of the railway conductors and any of the HV line conductors is identical with each other in a good degree of approximation.

Consequently, the self-impedances of and the mutual impedances between the conductors of each line can be calculated separately for each line. These self-impedances, per unit length, are uniform along the line lengths of each line. (For the railway line the self-impedance might be different along that sections where strengthening conductor/cable is applied. However, this condition has not been clarified.)

On the contrary, the value of the mutual impedance between the railway and HV feeder lines varies along the length accordingly to the variation of the separation distance.

To get mutual impedance values, which are suitable for practical calculations, the calculated (by DISTURB) results have been conditioned accordingly to the following processes:

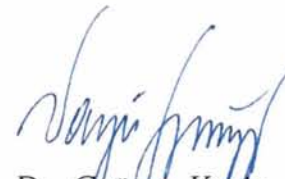
- The mutual impedance obtained vs. the length has been averaged for subsections of 0,5 km.

- The mutual impedance values have been recalculated to identical length coordinate, i.e. related to the length scale measured along the railway line.

In addition to the actual tasks specified in the "Agreement for consultancy services" circuit arrangements and parameter, circuit representation and circuit parameters are given (in the Annex A of the report) to support the simulations by the SIMPOW/SIMTRAC software.

In the frame of intermediate consultancy, the preparation of a site measurement has been consulted and their results have been commented in a written document titled as: "Comments on the report of Measuring of the current in the rails at Horisontalen and Fagerlia". (Not enclosed to this Report.) It is worth mentioning that it has been proven by the measurement that the return current follows the route of the HV feeder line in the earth rather than returning along the railway line.

Budapest, 2007-02-07

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'György Varju', is written above the printed name.

Dr. György Varju



TABLE OF CONTENTS

1. AIMS AND SCOPE OF THE PROJECT	1
2. BASIC LINE ARRANGEMENT AND CONDITIONS	2
a) Line arrangement	2
b) Basic data	2
3. CALCULATION OF THE IMPEDANCES OF THE RAILWAY AND THE HV FEEDER LINES	3
3.1 Applied simulation technique.....	3
3.2 Impedances of the railway line.....	3
3.2.1 Input data of the railway line.....	3
a) Conductor types and data	3
b) Conductor geometry and bundling.....	4
3.2.2 Impedance values of the railway line	5
a) Impedance for two-conductor representation.....	5
b) Impedance for one-conductor representation assuming perfectly earthed rails	6
c) Impedance for one-conductor representation assuming only rail return.....	7
3.3 Impedances of the HV feeder line.....	8
3.3.1 Input data of the HV feeder line.....	8
a) Conductor types and data	8
3.3.2 Impedance values of the HV feeder line	8
a) Impedance for tree-conductor representation with earth reference.....	8
b) Impedance for two-conductor representation with earth return.....	9
c) Impedance for one-conductor representation with earth return	10
c/1) Impedance, pre unit length, related to the HV feeder line co-ordinate ...	10
c/2) Impedance, pre unit length, related to the length co-ordinate of the railway line.....	11
4. CALCULATION OF THE MUTUAL IMPEDANCE BETWEEN THE RAILWAY AND THE HV FEEDER LINES.....	13
4.1 Geometry of the line routes	13
4.2 Values of the mutual impedance vs. the railway co-ordinate.....	15
4.2.1 Mutual impedance for small part sections vs. railway co-ordinate.....	16
4.2.2 Average impedance for supply feed sections.....	18
5. APPLICATION GUIDANCE	21
5.1 Application to the present operational conditions	21
5.1.1 The self-impedance Z_{KK} , of the contact line system	21
5.1.2 The self-impedance Z_{HH} , of the HV feeder line	22
5.1.3 The mutual impedance between the railway and the HV feeder lines	22
5.2 Further application possibilities	23



a)	Impedance for the conductor-to-conductor loop of the HV line.....	23
b)	Impedance for the conductor arrangements of future options	23
6.	REFERENCES	24
A.	CIRCUIT ARRANGEMENTS AND PARAMETERS FOR THE SIMULATIONS BY THE SIMPOW/SIMTRAC	25
a)	Feeding options to be simulated.....	25
b)	Explanations to the impedances used in the circuits.....	26
c)	Explanation to the elimination of the mutual impedance.....	35
d)	Example for the circuit representation of the train moving	36
B.	ESTIMATION OF THE INDUCTIVE COUPLING BETWEEN NON-PARALLEL LINES ACCORDINGLY TO THE ITU-T	39
I.	CO-ORDINATES OF THE RAILWAY AND HV LINE ROUTES	45
II.	DEVELOPMENT OF THE MUTUAL IMPEDANCE FOR PRACTICAL PURPOSE	51

1. Aims and scope of the project

This Report has been made in the frame of the "Agreement for consultancy services" between the Jernbaneverket Utbygging (JBV) and the VARJU EMC Bt. (Order no.: K-1438, Project no.: 76 04 77). This work is part of the project aiming at the upgrading the Ofotbanen and in addition improving its EMC performance. The Ofotbanen refers commonly to the railway line between Narvik and Bjornfell (Swedish border) and the high voltage feeder line serving its feeding.

In the preparation phase of the project the following three basic feeding options has been considered:

- a) Option 1:
 - The railway line is a single conductor system with earth return. The conductor is the equivalent conductor of the contact line system. The rails are merged with the earth.
 - The HV feeder is also a single conductor system with earth return. The conductor is composed of the two conductors of the line. The earth wire is merged with the earth, if present.
- b) Option 2:
 - The railway line is the same as in a).
 - The HV feeder is a balanced conductor-to-conductor loop.
- c) Option 3:
 - The railway line is a three-conductor line system composed of the conductors of the contact line system (PL), the return conductor (NL) and the rail group (RR).
 - The HV feeder is a balanced conductor-to-conductor loop.

The following procedure has been agreed: The JBV will do the power load analyses and other technical considerations (e.g. limitation of the place in tunnel sections) to find the best alternative from the JBV viewpoints. More concrete; traffic simulations for the identifications of the currents and voltage drops will firstly performed by the JBV and then hopefully a technical and economical analyses will point out the best solution. Then the further detailed investigation shall only be done for the one good alternative instead of three options.

Accordingly to the above working procedure the project has been limited to the Part I of the project aiming at the calculation of the series **line impedance values** of the line systems (railway + HV feeder lines) for the current paths of the three feeding options. The impedance values relevant to the present-day operational conditions serve as input data for the Simpow/Simtrac simulations to be performed by the JBV.

The evaluation of the these equivalent line impedances is based on the detailed line impedances of the multiconductor line system (obtained form the PLINE program), which could be, on the other hand, the input to the detailed MULTC calculations. The reduced equivalent line impedance values required to JBV pre-calculations has been developed accordingly to the boundary conditions of the line systems relevant to the present actual feeding option.

2. Basic line arrangement and conditions

a) Line arrangement

The layout and conductor arrangement of the Ofotbanen line are shown in Figure 1. The separation distance between the railway and HV feeding line is ranging from 100 m to 1 km in the majority of the length along the line routes. The separation distances are less than 100 m between the towers of no. 5 to 24 (see Table 21). It means that the value of the separation distances is much larger than the conductor distances of each line. Therefore, it can be assumed that the mutual impedance, with earth return, between any of the railway conductors and any of the HV line conductors is identical with each other in a good degree of approximation. This approximation does not involve more inaccuracy than the uncertainty in the identification of the separation distances between the lines.

Consequently, the self-impedances of and the mutual impedances between the conductors of each line can be calculated separately for each line. These self-impedances, per unit length, are uniform along the line lengths of each line.

On the contrary, the value of the mutual impedance between the railway and HV feeder lines varies along the length accordingly to the variation of the separation distance.

Considering the above conditions the impedance calculation is classified into the following two categories:

- (1) Calculation of the self-, mutual and equivalent impedances for each (railway and HV) line relevant to different operational conditions. These are uniform values along the length.
- (2) Calculation of the mutual impedance between the railway and HV feeder lines (each as a whole). This is a length varying value.

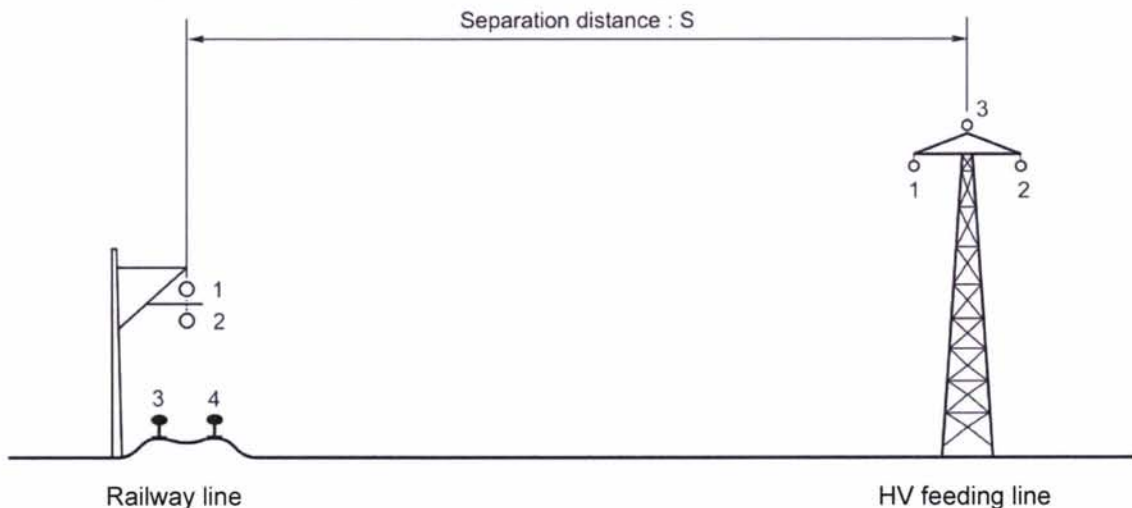


Figure 1 – Layout and conductor arrangement of the Ofotbanen line

b) Basic data

The basic conditions applied in the impedance calculations are listed in Table 1.

Table 1 – General data

Frequency for AC lines: 16.67 Hz
Config No. (latest modified: 3): 3 (AT PL+NL 500MM, 0 kV, AC line)
Temp. of environment (20): 20.0 °C
Atmospheric pressure (standard 101.3): 101.3 kPa
Relative humidity (suggested 77): 77.0 %
Exponent m for air density correction factor (IEC 60): 1.00
Wind: 1.0 m/s Direction (-90 -> 90°; for DC: 90° is at arr. -> +-): 0°
Weather condition: 1 (1: average fair, 2: average rain, 3: average year)
Earth resistivity (0 - 15000): 5000 ohm.m

Regarding the *specific resistivity* ρ the deep earth is taken into consideration. The considered high value of $\rho = 5000 \Omega\text{m}$ is due to the sock and stone composition of the deep layers. It is not significantly affected by seasonal condition (moisture or freezing). However, the iron ore could reduce this high value.

3. Calculation of the impedances of the railway and the HV feeder lines

3.1 Applied simulation technique

The railway feeding system has been simulated as a multiconductor system [1] and the calculations of the short-circuit impedance has been made by the use of the MULTC software capable for solving such system [2]. This technique has already been used in connection with two previous studies of various BT and AT systems in Norway and is described in the concerned reports [3], [5] and [9].

The PLINE software calculates the circuit parameters appearing in the circuit model of the supply feed section on the bases of the conductor data, general data (frequency, earth resistivity) and the geometrical data of the conductor arrangement. The PLINE results, as a first step, are the self- and mutual impedances for all actual conductors (the complete impedance matrix) and, as a further step, for any conditions defined for the conductors, i.e. for conductor bundles created by parallel connection of certain conductors or equivalent impedances with the consideration of the effect of certain earthed conductors.

3.2 Impedances of the railway line

3.2.1 Input data of the railway line

a) Conductor types and data

The types of the applied conductors are:

- contact line Cu 100 mm²
- messenger wire Bz 50mm²
- rail 54 kg/m



The data for these conductors are contained in Table 2.

Table 2 Conductor data

Messenger wire:			
Code: 1	>> Conductor database <<		
Name: BZ II 50	Material: Cu	Info source: Contact line	
Cross Section	Nominal= 50 mm ²	Core = 0 mm ²	Equiv. Cu = 50 mm ²
Diameter	Outer = 9.0 mm	Core = 0.0 mm	
DC resistance	0.5560 ohm/km at 20.5 °C (v = 0.003930 1/°C)		
Measured impedance available (Y/N): Y			
16.7 Hz	R = 0.5700 ohm/km	L int.= 0.0639 mH/km	D = 9.0 mm
Contact wire:			
Code: 2	>> Conductor database <<		
Name: CU 100	Material: Cu	Info source: Contact line	
Cross Section	Nominal= 100 mm ²	Core = 0 mm ²	Equiv. Cu = 100 mm ²
Diameter	Outer = 12.0 mm	Core = 0.0 mm	
DC resistance	0.1790 ohm/km at 20.0 °C (v = 0.003930 1/°C)		
Measured impedance available (Y/N): Y			
16.7 Hz	R = 0.1977 ohm/km	L int.= 0.0796 mH/km	D = 12.0 mm
Rail(s):			
Code: 4	>> Conductor database <<		
Name: RAIL	Material: Fe	Info source: S49 or S54	
Cross Section	Nominal=6930 mm ²	Core = 0 mm ²	Equiv. Cu = 0 mm ²
Diameter	Outer = 172 mm	Core = 0.0 mm	
DC resistance	0.0371 ohm/km at 20.0 °C (v = 0.006570 1/°C)		
Measured impedance available (Y/N): Y			
16.7 Hz	R = 0.0600 ohm/km	L int.= 0.0627 mH/km	D = 440.0 mm

b) Conductor geometry and bundling

The following average heights of the conductors of the contact line system have been considered on the bases of the data shown in Figure 2.

- contact line: 5.3 m
- messenger wire: 6.27 m

The height of the messenger wire can be calculated from the data shown in Figure 2:

$$5.30+0.5+0.37 = 6.17 \text{ m}$$

The 0.37 m. i.e. 1/3-rd of the sag is generally used for conductors with not controlled tensioning. For the messenger wire with controlled tensioning the sag is smaller; hence a higher average height of 6.27 m was considered in the calculation.

It should be noted that the conductor heights are different (smaller) in the tunnel sections [4]. The total length of the tunnel sections is about:

$$11 \times 0.2 \text{ km} + 4 \times 0.6 \text{ km} = 2.2 + 2.4 = 4.6 \text{ km}$$

This is about 11 % of the total length, thus no different value has been calculated for the tunnel sections.

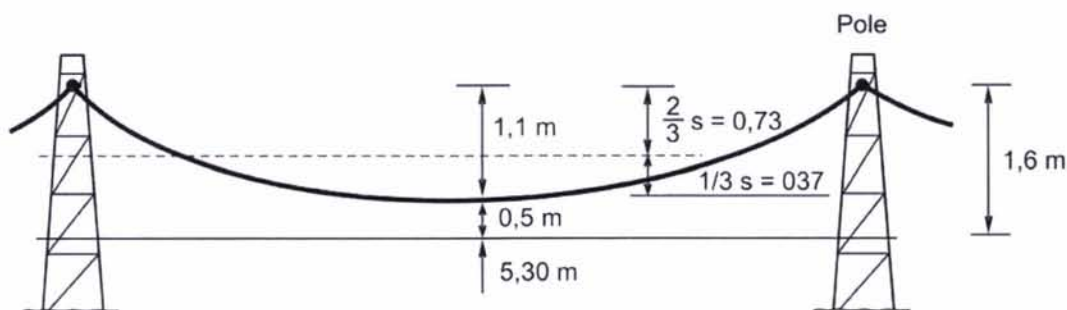


Figure 2 – Conductor height of the contact line system

The configuration of the 4 conductors of the railway line has been given accordingly to the following data:

Table 3 – Conductor Configuration of the railway line

Number of conductors in the model: 4				cond. codes, names:	
Nr	position	code			
	x [m]	y [m]	nr		
1	0.000	6.270	1	1	BZ II 50
2	0.000	5.400	2	2	CU 100
3	-0.750	0.100	3	3	RAIL
4	0.750	0.100	3		

The 2 conductors of the contact line system and also the 2 rails have been bundled thus the railway line has been reduced to a two-conductor system with earth return accordingly to Table 4.

Table 4 – Bundle structure of the railway line conductors

Name: Railway 1w-model		Type (AC,DC): AC	Voltage: 0 kV		
Number of bundles: 2		Sags valid at cond. temperature: 20 °C			
bundle	cond.	position numbers	sag [m]	earthed	dt [°C]
1	1 2		0.00	N	0.0
2	3 4		0.00	Y	0.0

Finally the rail circuit (bundle 2, composed of conductor 3 and 4) was assumed as (perfectly) earthed conductor, thus obtaining a one-conductor system with earth return.

3.2.2 Impedance values of the railway line

a) Impedance for two-conductor representation

The line parameters, per unit length, obtained from the PLINE calculation for the two-conductor representation of the railway line are given:

- for the line parameters R, L, C in Table 5
- for the series impedance components (R and X) and its modulus (Z) and phase angle (ψ) in Table 6.

Table 5 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the two-conductor representation of the railway line

bundle indices	R(i, j)	R(earth) [ohm/km]	= R(total)	Inductance [mH/km]	Capac. [nF/km]
1 1	0.15009	0.01643	0.16653	2.55284	9.51145
1 2	0.00017	0.01643	0.01661	1.52470	1.28344
2 2	0.02998	0.01643	0.04641	2.01069	193.14197

Table 6 – Series impedance, per unit length, for two-conductor representation of the railway line

Conductor indeces	Resistance R [Ω /km]	Reactance X [Ω /km]	Modulus Z [Ω /km]	Phase angle ψ [deg]
1-1	0.16653	0.2673	0.3150	58.08
1-2	0.01661	0.1597	0.1605	84.06
2-2	0.04641	0.2106	0.2156	77.57

These values will be needed as input data for the possible future MULTC calculations of the railway line operated as simple feeding system with earth + rail return, when the railway line is represented as a two-conductor line system.

In the MULTC calculation the value of the rail-to-earth leakage conductance, G is also needed. Due to the high level of uncertainty in the G value it is proposed to make the simulation calculations for different G values, (at least for the G sensitive investigations e.g. rail potential) such as:

- reference value of $G = 0.25$ S/km (proven in the Kiruna region),
- possible low value (frozen bedding): $G=0.05$ S/km,
- possible high value (polluted wet bedding): $G=2.5$ S/km.

b) Impedance for one-conductor representation assuming perfectly earthed rails

The line parameters, per unit length, obtained from the PLINE calculation for the one-conductor representation of the railway line, i.e. when the rails are merged with the earth, are given:

- for the line parameters R, L, C in Table 7
- for the series impedance components (R and X) and its modulus (Z) and phase angle (ψ) in Table 8.

Table 7 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the one-conductor representation of the railway line

bundle indices	R(i, j)	R(earth) [ohm/km]	= R(total)	Inductance [mH/km]	Capac. [nF/km]
1 1	0.15125	0.01643	0.16769	1.41160	10.79489

Table 8 – Series impedance, per unit length, for one-conductor representation of the railway line with perfectly earthed rails

Conductor indices	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
1 – 1	0.16769	0.1478	0.2235	41.40

The impedance value given in Table 8 is the one, which is applicable in the circuit proposed for the calculation by SIMPOW/SIMTRAC. This is marked by Z_{KK} in Annex A. Strictly speaking this is applicable only for that condition when the rails can be considered as perfectly earthed conductors, i.e. for long sections with high G leakage.

c) Impedance for one-conductor representation assuming only rail return

When the supply section between the train and the feeding point is short (compared to the length constant) the majority of the traction current returns through the return rails rather than commonly through the rail(s) and earth. It means that the current loop is composed of the conductors of the contact line system and the rail. The impedance of this loop can be expressed by the impedances relevant to the two-conductor representation (Table 6) by the following expression (see [9] point 5.2.1 and also the explanatory part of Annex A):

$$Z_{loop12} = Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{1-2} \quad (1)$$

Substituting the values given in Table 6, the values given in Table 9 will be obtained for the contact line-rail loop.

Fortunately the difference between the loop impedance for rail + earth return (Table 8) and the impedance for rail return only (Table 9) is small especially in the modulus of the impedance.

Table 9 – Series impedance $Z_{loop,12}$, per unit length, for one-conductor representation of railway line only with rail return,

Conductor indices	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
loop 12	0.1797	0.1585	0.2396	48.59

3.3 Impedances of the HV feeder line

3.3.1 Input data of the HV feeder line

a) Conductor types and data

Conductor type and data (accordingly to datasheet provided by JBV in 17/10/2006):

Table 10 – Type and data for the conductors of the HV feeder line

Conductor		Diameter	d.c. resistance
function	code	mm	Ω/km
Voltage carrying	ACSR 95-26/7	17.24	0.1911
Earth wire	OPGV-CST	10.95	0.902

The overall arrangement of the conductors is shown in Figure 1, while the conductor configuration and positions of the HV feeder line are identified in Table 11.

Table 11 – Conductor configuration and positions of the HV feeder line

Number of conductors in the model: 3				cond. codes, names:	
Nr	position	code			
	x [m] y [m]	nr			
1	-2.500 16.000	4	1	BZ II 50	
2	2.500 16.000	4	2	CU 100	
3	0.000 16.713	5	3	RAIL	
			4	ACSR 95-25	
			5	OPGV-CST	

The impedance calculation has been performed for that case when the two voltage carrying conductors are combined in a bundle and the earth wire is earthed accordingly to Table 12.

Table 12 – Bundle structure of the HV feeder line correspondingly to the present operational condition

bundle	cond. position numbers	sag [m]	earthed	dt [$^{\circ}\text{C}$]
1	1 2	1.20	N	0.0
2	3	1.20	N	0.0

3.3.2 Impedance values of the HV feeder line

a) Impedance for tree-conductor representation with earth reference

The line parameters, per unit length, are obtained from the three-conductor representation of the HV feeder line:

- for the line parameters R, L, C in Table 13
- for the series impedance components (R and X) and its modulus (Z) and phase angle (ψ) in Table 14.

Table 13 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the three-conductor representation of the HV feeder line

bundle indices	R(i, j)	R(earth)	R(total)	Inductance	Capac.
	[ohm/km]	[ohm/km]	[ohm/km]	[mH/km]	[nF/km]
1 1	0.19118	0.01644	0.20762	2.86022	4.62671
1 2	-0.00003	0.01644	0.01641	1.54660	1.12896
1 3	-0.00005	0.01644	0.01639	1.67739	1.86141
2 2	0.19118	0.01644	0.20762	2.86022	4.62671
2 3	-0.00005	0.01644	0.01639	1.67739	1.86141
3 3	0.90207	0.01644	0.91851	2.95144	3.75800

Table 14 – Series impedance, per unit length, for three-conductor representation of the HV feeder line

Conductor indices	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
1-1	0.20762	0.2995	0.3644	55.27
1-2	0.01641	0.1620	0.1628	84.21
1-3	0.01639	0.1757	0.1764	84.67
2-2	0.20762	0.2995	0.3644	55.27
2-3	0.01639	0.1757	0.1764	84.67
3-3	0.91851	0.3091	0.9691	18.60

These values will be needed as input data for the possible future MULTC calculations of the supply system operated other way than the present earth return system.

b) Impedance for two-conductor representation with earth return

In case of the two-conductor representation the two voltage carrying conductors are merged and constitute the conductor bundle 1 and the earth wire constitutes the conductor bundle 2.

The line parameters, per unit length, are obtained from the two-conductor representation of the HV feeder line:

- for the line parameters R, L, C in Table 13
- for the series impedance components (R and X) and its modulus (Z) and phase angle (ψ) in Table 14.

Table 15 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the two-conductor representation of the HV feeder line

bundle indices		R(i, j) +	R(earth)	= R(total)	Inductance	Capac.
			[ohm/km]		[mH/km]	[nF/km]
1	1	0.09557	0.01644	0.11201	2.20341	9.25342
1	2	-0.00005	0.01644	0.01639	1.67739	3.72281
2	2	0.90207	0.01644	0.91851	2.95144	3.75800

Table 16 – Series impedance, per unit length, for two-conductor representation of the HV feeder line

Conductor indices	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
1-1	0.1120	0.2307	0.2565	64.11
1-2	0.0164	0.1757	0.1764	84.67
2-2	0.9185	0.3091	0.9691	18.60

These values will be needed as input data for the MULTC calculations of the HV feeder line to simulate the actual earthing conditions of the earth wire.

c) Impedance for one-conductor representation with earth return

This case corresponds to the present operational condition when:

- The two voltage conductors are connected in parallel, i.e. they are merged constituting the conductor bundle 1
- The earth wire is merged with the earth, i.e. it does not constitute any conductor bundle.

The 2nd condition would be fulfilled only in that case when the earth wire could be perfectly earthed. To approach this condition, the earth wire shall be connected both to the converter station earthing at one end and to the rail system at the other end, and in addition the tower footings should have low earthing resistances. In the actual case the earth wire is earthed at the converter station and the tower earthing resistances are presumably high. To compare the difference between the above two conditions, the impedance values have been calculated both with closed (perfectly earthed) and without closed (open) earth wire circuit conditions.

c/1) Impedance, pre unit length, related to the HV feeder line co-ordinate

The line parameters, per unit length, are obtained from the one-conductor representation of the HV feeder line:

- for the line parameters R, L, C:
 - *with* closed earth wire loop in Table 17
 - *without* closed earth wire loop in Table 18.
- for the series impedance components (R and X) and its modulus (Z) and phase angle (ψ) both for perfectly earthed and open earth wire in Table 19.

Table 17 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the one-conductor representation of the HV feeder line *with* closed earth wire loop

bundle indices	$R(i, j) + R(\text{earth})$ [ohm/km]	=	$R(\text{total})$	Inductance [mH/km]	Capac. [nF/km]
1 1	0.12360		0.14004	2.05349	12.97624

Table 18 – PLINE results (Line parameters R, L, C) for the one-conductor representation of the HV feeder line *without* closed earth wire loop

bundle indices	$R(i, j) + R(\text{earth})$ [ohm/km]	=	$R(\text{total})$	Inductance [mH/km]	Capac. [nF/km]
1 1	0.09557		0.11201	2.20341	11.12358

Table 19 – Series impedance, per unit length, for one-conductor representation of the HV feeder line (the present condition)

Condition of the earth wire	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
Perfectly earthed	0.14004	0.2150	0.2566	56.93
Open (earthed at one end)	0.11201	0.2308	0.2565	64.11

It is worth mentioning that the modulus Z is practically identical for the two conditions, the magnitudes of the R and X components differ in opposite ways.

c/2) Impedance, pre unit length, related to the length co-ordinate of the railway line

In case of the calculations either by the SIMTRAC or the MULTC codes the line parameters should be related to the same length scale which is applicable both for the railway and HV feeder lines. The line lengths are different i.e. they are 41.917 km and 32.332 km for the traction and HV feeder lines, respectively. When deciding the use of the length co-ordinate of the railway line, the impedance, per unit HV feeder line length given in Table 19 shall be recalculated by the ration of 32.332/41.917.

The recalculated values are given in Table 20.

Table 20 – Series impedance, per unit railway line length, for one-conductor representation of the HV feeder line, related to the length co-ordinate of the railway line

Condition of the earth wire	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
Perfectly earthed	0.1008	0.1658	0.1979	56.93
Open (earthed at one end)	0.0864	0.1780	0.1979	64.11

It is worth mentioning that the modulus of Z is practically, of course again, identical for the two conditions, however the magnitudes of the R and X components differ in opposite ways.



The impedance value for the "open" condition could be considered as the relevant applicable value for the present operational condition, as far as the earth wire of the HV feeder line is not connected to the rail at the in-feed locations.

4. Calculation of the mutual impedance between the railway and the HV feeder lines

Under the present operational conditions, when both the railway and the HV feeder line works with earth return, the coupling through the mutual impedance between them is of practical importance.

As it has already been pointed out in the part *a)* of the clause 2, the mutual impedance needs to be considered between the route of the two lines rather than between the conductors of the lines. The layouts of the line routes are quite complex therefore determination of the mutual impedance required the following main actions:

- Identification of the coordinates of the line routes.
- Identification of such mutual impedance, which applicable in both directions.
- Identification of such mutual impedance which are related to a unique length co-ordinate, actually to a length scale measured along the railway line.

4.1 Geometry of the line routes

The co-ordinates of the route of the HV line feeding the Ofotbanen has been basically identified on the bases of the "Oversigtkart: Narvik - Riksgrensen" (M=1:20000, 1899).

The relative distance of the railway line from the HV feeder line has been identified by the use of the map of M=1:2500 up to the first 17 km of the line and by the use of the above referred map along the continuing section.

There were two kinds of difficulties in the accurate enough identification of the line co-ordinates:

- the limited resolution of the M=1:20000 scale map
- Conflicting information between the M=1:20000 and M=1:2500 scaled maps. (There are locations where the M=1:2500 map shows HV feeder line in the opposite side of the railway line than shown in the M=1:20000 map.)

It has been agreed by the JBV colleagues that M=1:20000 map is considered as reference.

Firstly the co-ordinates of the HV feeder line have been identified, by the use of the span distances and the directional angle tower-by-tower. The origin of the co-ordinate system is the Taralosvik end of the HV line.

The layout of the route of railway line has, essentially, been identified on the bases of the distances in relation to the HV feeder line.

The line co-ordinates have been determined where the direction of any of the lines changes significantly and at the locations of the towers of the HV feeder line. The co-ordinates of both line routes are plotted in Appendix I.

The approximate values of the separation distances between the railway and HV feeder lines are plotted for every tower locations in Table 21. The mutual impedance between the lines is essentially linked with these distances.

Table 21 Approximate values of the separation distances between the railway and HV feeder

Tower number ranges									
1 to 35		36 to70		71 to 105		106 to 140		141 to 176	
Tower No.	Approx. distance [m]	Tower No.	Approx. distance [m]	Tower No.	Approx. distance [m]	Tower No.	Approx. distance [m]	Tower No.	Approx. distance [m]
1	0.0	36	194.9	71	189.8	106	874.0	141	232.4
2	119.5	37	241.2	72	179.7	107	1044.2	142	128.2
3	190.7	38	209.0	73	166.9	108	1078.0	143	95.4
4	152.8	39	231.5	74	136.1	109	1057.1	144	120.5
5	81.7	40	231.6	75	117.5	110	1073.7	145	116.2
6	67.6	41	168.0	76	111.4	111	1062.7	146	0.0
7	32.0	42	177.7	77	99.0	112	1012.0	147	22.6
8	67.7	43	133.6	78	86.8	113	951.2	148	135.4
9	88.7	44	81.0	79	95.9	114	795.8	149	193.9
10	57.9	45	143.9	80	105.1	115	684.4	150	226.0
11	28.0	46	206.8	81	40.3	116	674.4	151	272.7
12	18.2	47	192.2	82	24.7	117	608.4	152	509.1
13	19.8	48	143.1	83	135.9	118	415.7	153	617.7
14	91.5	49	98.2	84	237.9	119	229.4	154	509.9
15	66.7	50	134.4	85	306.7	120	181.0	155	350.2
16	46.3	51	170.6	86	164.8	121	137.3	156	407.6
17	35.8	52	201.6	87	161.7	122	199.6	157	378.6
18	22.7	53	293.1	88	218.3	123	199.7	158	330.2
19	26.6	54	366.6	89	218.4	124	154.8	159	368.9
20	45.3	55	429.5	90	221.1	125	120.0	160	443.3
21	102.2	56	487.1	91	362.8	126	199.8	161	497.9
22	106.7	57	396.6	92	498.3	127	74.8	162	640.2
23	54.9	58	368.9	93	655.5	128	80.3	163	725.2
24	95.8	59	358.5	94	677.3	129	95.6	164	714.8
25	172.3	60	403.3	95	773.5	130	127.6	165	502.8
26	109.8	61	481.8	96	808.6	131	140.9	166	256.7
27	122.1	62	509.6	97	716.9	132	39.0	167	465.4
28	144.6	63	308.0	98	458.8	133	710.6	168	462.2
29	104.5	64	152.5	99	49.8	134	898.9	169	292.0
30	117.5	65	117.2	100	131.1	135	584.2	170	323.7
31	129.9	66	148.7	101	279.7	136	401.7	171	352.2
32	90.5	67	186.2	102	489.8	137	309.6	172	436.1
33	66.7	68	182.1	103	699.3	138	250.9	173	517.3
34	112.4	69	189.2	104	786.6	139	209.4	174	526.8
35	103.6	70	216.9	105	830.3	140	227.9	175	463.4
								176	436.3

Routes of the HV feeder and railway lines of the Ofotbanen are printed for demonstrating purposes in Figure 3 by the use of the X-Y co-ordinates described above.

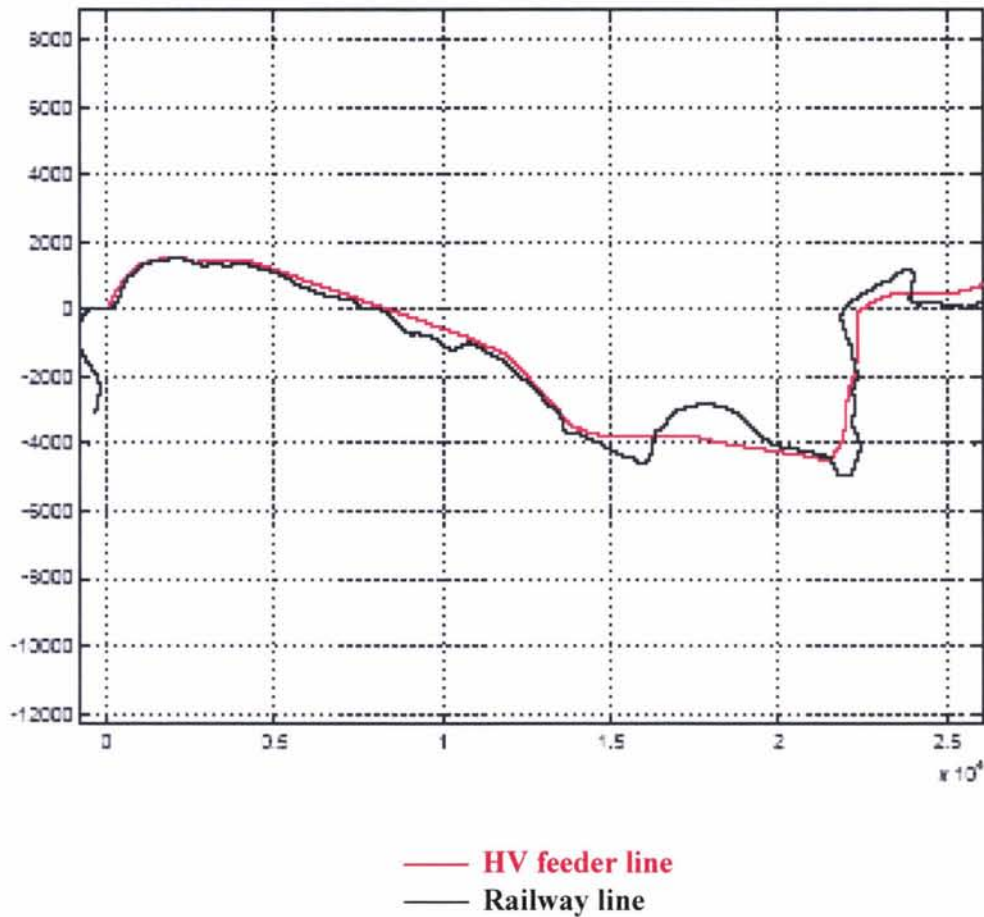


Figure 3 – Demonstration of the routes of the HV feeder and railway line of the Ofotbanen

4.2 Values of the mutual impedance vs. the railway co-ordinate

The mutual impedance between lines with common earth return can be calculated from the separation distance and the specific earth resistivity by the complex image method in general and by the Carson-Clem formula for small separation distance [10].

The referred methods are strictly applicable only for long (in principle infinitive) parallel lines. In case of not parallel lines the mutual impedance is calculated part sections-by-part sections, which are replaced by equivalent parallelism accordingly to the ITU-T specification [10] (reproduced in the Annex B).

In case of an inducing situation the mutual impedance should be calculated only to one direction, i.e. from the inducing line to the induced line. Therefore, the ITU-T method describes the way of calculating the voltage occurring in the induced line with earth return due to the current circulating in the inducing line with earth return. The magnitude, per unit

length, and the phase of the induced voltage, is equal to the magnitude, per unit length, and phase of the mutual impedance, respectively, if assuming 1 A inducing current.

When considering the Ofotbanen situation, the railway and the HV feeder lines are coupled in both directions, i.e. the lines are inducing mutually into each other. Therefore, the mutual impedance has been calculated for both directions, i.e. from the railway to the HV feeder line direction, and also from the HV feeder to the railway line direction.

For this purpose the DISTURB software was applied, which calculates the induced emf from the inducing current and the mutual impedance correspondingly to the technique of the ITU-T Directives. (One improvement is applied, i.e. there is a continuous checking of the gradient of the induced emf and the lengths of the part sections are shortened if needed.) When 1 A inducing current is assumed along the railway line, the value of the emf, per unit length, induced in the HV feeder is equal to the value of the mutual impedance, per unit length, from the railway line to HV feeder direction. Similarly, when 1 A inducing current is assumed along the HV feeder, the value of the emf, per unit length, induced along the railway line route is equal to the value of the mutual impedance, per unit length, from the HV feeder to railway line direction. In principle, the mutual impedance obtained in both directions should be identical. However, the mutual impedances calculated in the two directions are different (see the detailed results in Annex B). This difference is caused by the limited accuracy of the expressions for the mutual impedance due to the finite lengths of the part sections and the not parallel geometry of the lines. In addition the length profile of the mutual impedance (emf) shows locally high values at the locations affected by double injection and low values at the locations, which accordingly to the ITU-T methods, are not affected by induction at all.

4.2.1 *Mutual impedance for small part sections vs. railway co-ordinate*

To get mutual impedance values which are suitable for practical purposes, the DISTURB results have been conditioned accordingly to the following processes (see Appendix II.):

- The mutual impedance obtained for each direction has been averaged for subsections of around 0,5 km. (Process for eliminating the needles.)
- Recalculating the mutual impedance values to identical length co-ordinate, i.e. related to the length scale measured along the railway line.
- Averaging the mutual impedance for both directions. (Process for eliminating the difference for the two directions.)

The mutual impedance values obtained with the above procedure are given:

- numerically in Table 22 and
- graphically in Figure 5, green curve.

Table 22 – Mutual impedance, per unit length, vs. the railway length co-ordinate common for both directions

Railway co-ordinate x [km]	Sub- sections Δl_i [km]	$Z_{HK}(x_j)$		Railway co-ordinate x [km]	Sub- sections Δl_i [km]	$Z_{HK}(x_j)$	
		Modulus [ohm/km]	Angle [degree]			Modulus [ohm/km]	Angle [degree]
0.000		0.000	0.0	21.019		0.039	97.0
0.500	0.500	0.000	0.0	21.484	0.465	0.083	76.8
1.326	0.826	0.001	8.3	22.110	0.625	0.097	76.4
1.436	0.110	0.001	8.0	22.596	0.487	0.088	77.8
2.024	0.588	0.001	7.7	22.961	0.365	0.089	79.9
2.554	0.530	0.001	7.5	23.494	0.533	0.105	80.8
2.849	0.294	0.000	86.9	23.962	0.468	0.122	78.6
3.909	1.060	0.092	80.1	24.479	0.517	0.058	79.9
4.021	0.112	0.101	78.9	24.966	0.487	0.071	74.3
4.501	0.480	0.109	79.7	25.516	0.550	0.087	73.8
4.986	0.485	0.110	80.9	26.012	0.496	0.078	76.3
5.518	0.532	0.114	82.3	26.468	0.456	0.045	79.2
5.958	0.440	0.112	81.9	26.934	0.466	0.031	88.4
6.514	0.556	0.130	82.2	27.503	0.569	0.062	81.2
7.062	0.549	0.115	81.8	27.934	0.430	0.060	82.0
7.615	0.553	0.103	80.8	28.603	0.670	0.085	79.6
8.084	0.469	0.110	80.1	28.993	0.390	0.100	82.1
8.487	0.403	0.074	84.6	29.489	0.495	0.106	80.9
8.916	0.429	0.074	85.6	29.994	0.506	0.029	66.7
9.464	0.549	0.091	81.1	30.300	0.306	0.070	72.3
10.006	0.542	0.111	80.0	31.025	0.725	0.091	73.5
10.528	0.522	0.076	82.0	31.541	0.516	0.074	75.2
11.021	0.494	0.083	83.2	31.942	0.401	0.082	76.0
11.445	0.424	0.065	82.4	32.490	0.548	0.077	77.5
12.018	0.573	0.099	82.3	33.134	0.643	0.092	79.2
12.500	0.482	0.105	81.1	33.574	0.440	0.109	80.4
12.991	0.491	0.056	82.4	33.978	0.405	0.096	82.5
13.504	0.513	0.081	80.8	34.496	0.517	0.088	83.5
13.972	0.468	0.081	76.3	34.928	0.432	0.056	85.0
14.513	0.541	0.088	82.0	35.453	0.526	0.059	81.9
14.995	0.482	0.074	77.9	36.045	0.591	0.078	77.8
15.455	0.461	0.069	78.0	36.485	0.440	0.099	75.1
15.990	0.535	0.100	79.9	37.014	0.530	0.085	76.4
16.453	0.463	0.079	80.2	37.483	0.469	0.078	75.3
16.970	0.517	0.078	81.2	37.977	0.494	0.027	67.5
17.532	0.562	0.073	83.6	38.539	0.562	0.022	47.1
18.033	0.501	0.084	87.1	39.056	0.517	0.015	14.7
18.567	0.534	0.093	84.8	39.500	0.445	0.033	78.5
18.972	0.405	0.093	85.2	40.007	0.506	0.039	87.7
19.533	0.561	0.114	83.3	40.532	0.526	0.041	89.1
20.057	0.523	0.062	82.2	40.976	0.444	0.035	90.1
20.537	0.480	0.013	227.1	41.917	0.941		

4.2.2 Average impedance for supply feed sections

In fact the average value, per unit length, of the mutual impedance is needed for the infeed-to-train sections in the circuit representations given in the figures of Annex A. This average value, in case of a given feeding section, should be calculated for the section between the infeed point and the train accordingly to expression (A-1). The values of $Z_{HK}(x_j)$ and Δl_i appearing in the numerator of the expression and relevant to the investigated infeed-to-train section l_i should be taken from Table 22. Accordingly to this procedure the mutual impedance is averaged for each infeed-to-train section and this is considered as a uniform value for that section. This kind of average value shall be calculated for each infeed-to-train section individually.

For simplification, one average value can be calculated for each supply feed (infeed-to-section boundary) section and this value can be used as uniform mutual impedance applicable to that feeding section. Of course, the use of this kind of average impedance for the whole length of a supply feed section involves a certain degree of approximation.

The average value of the mutual impedance for a supply feed section can also be calculated by formula (A-1), however the averaging should be done for the supply section under study.

The supply sections have been given for the Rombak – Bjornfell line section as shown in Figure 4 in the report for the site measurements [11].

Of course, the average value of the mutual impedance could be calculated as well for the supply feed sections located between the Narvik and Rombak section if the co-ordinates of their section boundaries would be given.

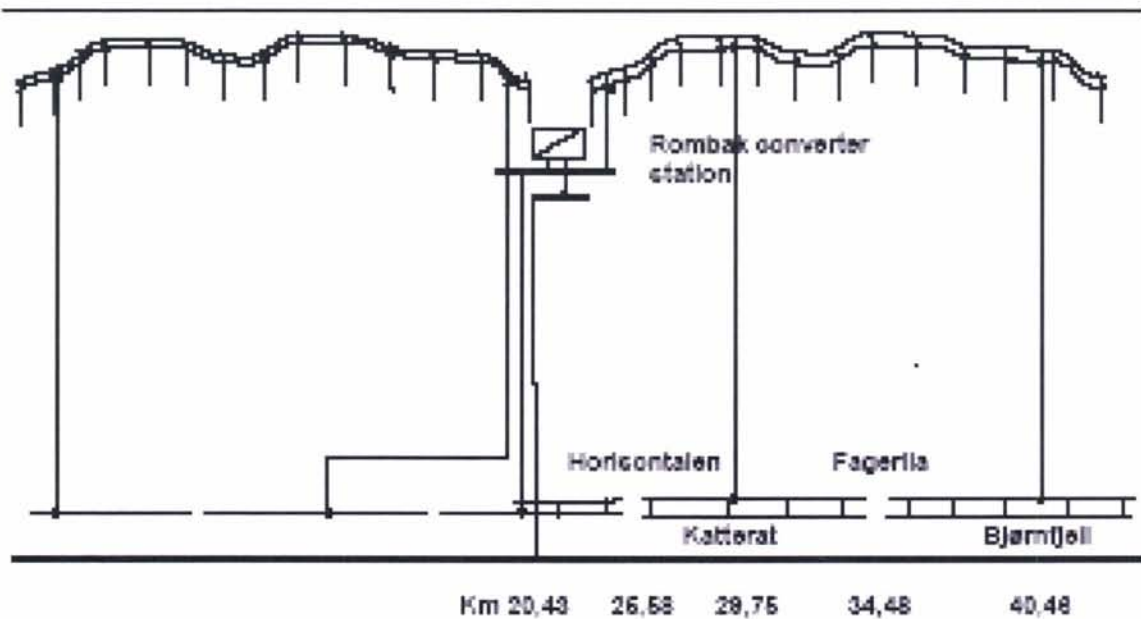


Figure 4 – Circuit diagram of the feeding system at Ofotbanen, km co-ordinates for the in feed points and the separation points for the Rombak – Bjornfell line section

The co-ordinates of the section borders and the mutual impedance, Z_{HK} for the defined sections are given in Table 23.

Table 23 – Mutual impedance, Z_{HK} for supply feed sections

Section co-ordinates measured along the railway line [km]			Mutual impedance, Z_{HK}			
Section borders		Section lengths, l_i	Total for the sections		Average, for the sections per unit length	
origin	end		Modulus	Angle	Modulus	Angle
km	km	km	[ohm]	[degree]	[ohm/km]	[degree]
20.54	25.52	4.979	0.370	79.5	0.0743	79.5
25.52	29.99	4.478	0.319	79.9	0.0713	79.9
29.99	34.50	4.502	0.364	76.9	0.0809	76.9
34.496	40.532	6.037	0.331	76.8	0.0549	76.8
40.532	40.976	0.444	0.018	89.1	0.0414	89.1
40.976	41.917	0.941	0.033	90.1	0.0352	90.1
20.537	40.976	21.380	2.949	80.2	0.0671	78.7
0.000	41.917	41.917	1.434	78.7	0.0703	80.2

The modulus of the mutual impedance, per unit length, related to the railway line co-ordinate, averaged for different subsection lengths are plotted in Figure 5.

It can be seen that, in the most cases, the average value is composed of higher and lower values at the two halves of the supply feed sections. Therefore, the use of the average mutual impedance for a supply feed section can cause for certain intermediate train locations significant inaccuracy compared to the use of average for a section between the infed point and an actual train location.

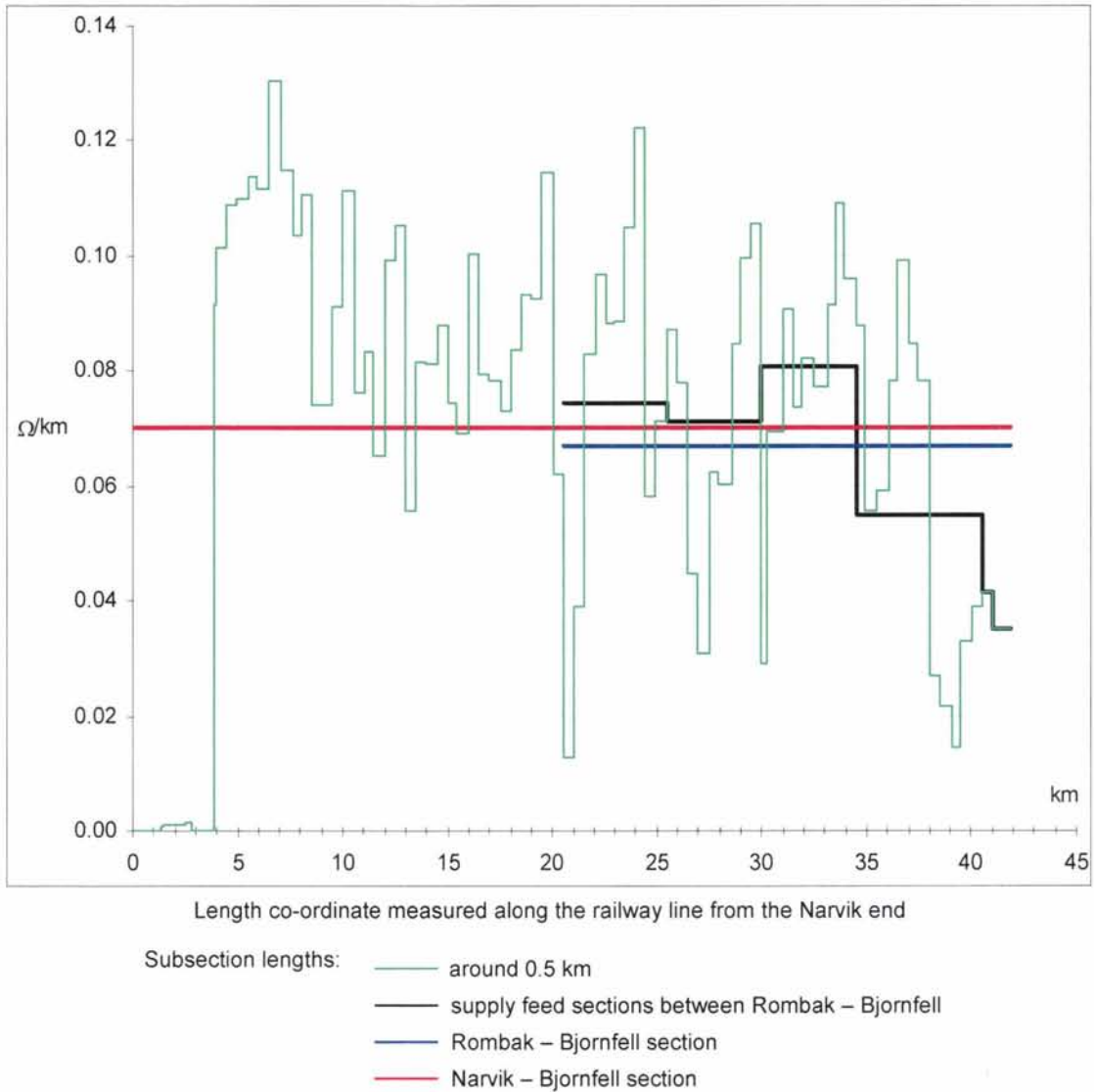


Figure 5 – Mutual impedance, per unit length, related to the railway line co-ordinate, averaged for both directions and averaged for different subsection lengths

5. Application guidance

5.1 Application to the present operational conditions

Accordingly to the present operation the following conditions are assumed:

- (1) The railway line is fed at given points through the HV feeder line. This feeding principle is shown in Figure A-1 of the Annex A.
- (2) The railway line works as a simple feeding system with rail + earth return.
- (3) The HV feeding line is also operated with earth return, i.e. the two parallel-connected voltage-carrying conductors feed the contact line system.
- (4) The earth wire of the HV feeder line connected to earthing system only at the converter station end, but not connected to the rail system at the infeed points. Further high resistance earthings are provided by the tower footings.

In the Annex A of the Report, circuit arrangements and parameters are given which are intended to be used in the simulations by the SIMPOW/SIMTRAC software. The mutual impedance is eliminated in the proposed circuit representations. The eliminating of the mutual impedance for coupled loops with common return (earth) is described in the Explanatory part of this paper.

The following three types of impedances are needed for the proposed circuits:

5.1.1 The self-impedance Z_{KK} , of the contact line system

The self-impedance Z_{KK} , of the contact line system with rail and earth return is given in clause 3.2.2 for two conditions: perfectly earthed rail in point *b*) and rail return only in point *c*). The impedance values for these two cases are given in Table 8 and Table 9, respectively. These values are reproduced in Table 24 together with the value measured on the site.

Table 24 – Series impedance, per unit length, for one-conductor representation of the railway line

Condition for the identification of the value	Resistance R [Ω/km]	Reactance X [Ω/km]	Modulus Z [Ω/km]	Phase angle ψ [deg]
Rail + earth return	0.16769	0.1478	0.2235	41.40
Only rail return	0.1797	0.1585	0.2396	48.59
Measured on site	0.165	0.148	0.222	41.89

The value corresponding to the rail + earth return is applicable to long (compared to the length constant) feeding point to train distances.

Considering that the feeding sections are relatively short, it can be assumed that the value corresponding to the only rail return seems is closer to the one relevant to the actual condition.

The value measured on the site is practically identical with the one calculated for rail + earth return condition. Presumably, the site measurement has been done on long section.

The above given Z_{KK} per unit length value is uniform for the whole length. The Z_{KK} value shall be multiplied by the length appropriate to the given train location under study as indicated in the relevant circuit of the Annex A.

In those places where strengthening conductor is or will be applied its effect can be taken into account by the appropriately modified value of Z_{KK} . This can be calculated on the bases of the actual data with the PLINE program.

5.1.2 The self-impedance Z_{HH} , of the HV feeder line

The self-impedance Z_{HH} , of the HV feeder line with earth return is given in clause 3.3.2. Again the impedance has been calculated for both cases, i.e. when the earth wire is assumed perfectly earthed and when it is earthed only at one end, i.e. its circuit is open.

The values are given for both conditions as per unit length values related to either the length co-ordinate measured along the HV feeder line or measured along the railway line –co-ordinate in Table 19 and Table 20, respectively.

The impedance value for the "open" condition could be considered as the relevant applicable value for the present operational condition, as far as the earth wire of the HV feeder line is not connected to the rail at the in-feed locations.

In the simulation calculations the use of the length co-ordinate measured along the railway line is the practical one.

Therefore the following value of the self-impedance Z_{HH} , of the HV feeder line, per unit length related to the railway co-ordinate, is the appropriate for the simulation calculations (taken from Table 20):

$$Z_{HH} = 0.0864 + j0.1780 = 0.1979, \Omega/\text{km}$$

This unit length value is uniform for the whole length. Its value shall be multiplied by the length appropriate to the given train location under study as indicated in the relevant circuit of the Annex A.

5.1.3 The mutual impedance between the railway and the HV feeder lines

The mutual impedance, per unit length, between the railway and the HV feeder lines is a length varying value due to the variation of the separation distance between these lines.

The value of the Z_{HK} is dealt with in clause 4.2. It is given as an average for about 0.5 km in length and function of the length co-ordinate measured along the railway line:

- » numerical form in Table 22
- » graphically in Figure 5.

In the simulation calculation a value of the mutual impedance shall be given as a value averaged for the length indicated in the circuit given in Annex A for a given train location. The way of calculating the mutual impedance, per unit length, averaged for the train to feeding point length is detailed in connection with the clarification of formula (A - 1) in the Annex A.

It is worth mentioning that the relative importance of the mutual impedance decreases when the lines, or at least the HV feeder line, will work in balanced way instead of earth return.

5.2 Further application possibilities

The impedance calculation has been performed by the PLINE program. Therefore, the primary PLINE results given in this Report provide the necessary impedance input data for the scheduled future feeding options when the line arrangement is the one described in the point 2.

a) Impedance for the conductor-to-conductor loop of the HV line

Among the further feeding options there are cases when the feeding by the HV line is made in balanced way through conductor-to-conductor loop. This is the condition in case of HV feeding through two winging transformer (option 2) or through auto transformer (option 3a).

The impedance Z_{loop} of the conductor-to-conductor loop of the HV line can be calculated by the formula (1) of point 3.2.2 c. The values of Z_{11} , Z_{22} and Z_{12} shall be taken from Table 14. (Note: $Z_{11} = Z_{22}$.)

Series impedance Z_{loop} , per unit length, of the conductor-to-conductor loop of the HV line is plotted in Table 25. The value related to the HV line co-ordinate is the physically real value. The value related to the railway line co-ordinate is obtained by recalculation accordingly to the HV line/Railway line lengths ratio.

Table 25 – Series impedance Z_{loop} , per unit length, of the conductor-to-conductor loop of the HV line

Length co-ordinate to which the impedance is related	Resistance R [Ω /km]	Reactance X [Ω /km]	Modulus Z [Ω /km]	Phase angle ψ [deg]
HV line co-ordinate	0.3824	0.2756	0.4710	35.72
Railway line co-ordinate	0.2950	0.2121	0.3633	35.72

It is worth mentioning that, if the feeding in the HV line is made through conductor-to-conductor loop then the coupling through mutual impedance between the HV line and railway line can be neglected irrespective of the feeding conditions (simple feeding or AT system) of the railway line.

b) Impedance for the conductor arrangements of future options

The impedance calculation shall be newly performed in that case when the conductor structure will be modified, e.g. in case of the use of strengthening conductor or negative feeder. This is a future task after having identified the conductor arrangements relevant to the future options.

6. References

- [1] Sollerkvist F. J. and Varju Gy.: "A general model and numerical method for multiconductor systems in frequency domain". *Proceedings of the IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conference*. Stockholm, Sweden, June 18-22, 1995, pp. 227-232
- [2] Sollerkvist F. J. and Varju Gy.: "Comparison of the AT and BT railway system from an induction point of view, using a multiconductor system", *EMC '98 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, Sept. 14-18, 1998, pp. 34-39
- [3] Gy. Varjú; F. J. Sollerkvist, D. Karlsson and M. Olofsson, "Application of AT and AT/BT traction feeding systems in Norway Preliminary study", *STRI Report S01-238*, March 2001
- [4] F. Kissling, R. Puschmann, A. Schmieder (Editor Siemens AG): "Contact lines for electric railways, Planning, Design, Implementation"; *Publicis 2001*
- [5] Gy. Varjú; F. J. Sollerkvist, "Comparison of the BTRR, BTRC and the AT Traction Feeding Systems in Norway", *STRI Report R02-100*, March 2003
- [6] Gy. Varju; "Simplified method for calculating the equivalent impedance of an AT system", Technical report, Innotech Ltd by the team of the Technical University of Budapest, Department of Electric Power Systems, Budapest, March 1996
- [7] G. Varju; "Method for calculating auto transformer and booster transformer railway supply systems by the two-phase symmetrical components", *Technical Report, INNOTECH Ltd, Budapest, October, 1997*
- [8] Gy. Varju; Minimising the induction of railway lines by the use of optimised negative feeder structure, *Technical Report, Technical University of Budapest Department of Electric Power Systems, Budapest, April 2001*
- [9] Gy. Varju, Further investigation of AT-system for the Norwegian Railway, Part 1, Short-circuit impedance seen by the protection relay; *Technical Report, VARJU EMC Bt., Budapest, October 2005*
- [10] *ITU-T Directives*, Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Volume II – Calculating induced voltages and currents in practical cases. Geneva, 1999 (2nd edition)
- [11] *JBV staff (Martinsen Frank, Johannessen Frode)*, Measuring Report Ofofbanen: "Measuring of the current in the rails at Horisontalen and Fagerlia". Oslo December 2006.

Annexes

A. Circuit arrangements and parameters for the simulations by the SIMPOW/SIMTRAC

The schemes contained in the following figures provide the circuit arrangements and parameters to be used in the simulations by the SIMPOW/SIMTRAC software. The mutual impedance is eliminated in the proposed circuit representations. The eliminating of the mutual impedance for coupled loops with common return (earth) is described in the Annex of this paper.

The purpose of this material is to give the possibility for checking and confirming the applicability of such circuits. If the circuits are applicable for the SIMPOW/SIMTRAC the parameters will be calculated and specified in details.

a) Feeding options to be simulated

The circuit arrangements and parameters proposed in the followings allows for simulating the present line conditions, i.e. when both the railway line and the HV feeder are operated with earth return.

The circuit representation of the entire supply feed section (e.g. Rombak – Narvik section) is given in Figure A-1.

Feeding options covered by the simulation:

- Feeding only through the high voltage feeder (HV) is simulated with open switches;
- Feeding through parallel connected contact line (KL) and the HV feeder is simulated with closed switches

This circuit can provide results in the locations of A, B, C, D and E. *No train* is considered.

The circuit arrangements and parameters for systems with train are given for the following feeding options:

1) *The feeding only through the KL (simple feeding with rail return)*

This feeding option needs only the Z_{KL} the self-impedance of the KL contact line system, per unit length in Ω/km , with earth return. This shall involve the effect of the rails.

The train simulation program changes the line impedance continuously as the train moves. This impedance can easily put into the program as ohm/km values. Therefore there is no need of specifying circuit arrangement for this case.

2) *Feeding of the sectioned KL only through the HV feeder*

The relevant circuit arrangements and parameters are given for trains assumed in different line sections in the figures from A-1 to A-4.

3) *Feeding in parallel through the HV feeder and KL*

The relevant circuit arrangements and parameters are given for trains assumed in different line sections in the figures from A-5 to A-8.

b) Explanations to the impedances used in the circuits

- Z_{HH} is the self-impedance, per unit length in Ω/km , of the HV feeder line, with earth return. This involves the effect of the earth wire if it is effectively earthed.
- Z_{KK} is the self-impedance, per unit length in Ω/km , of the KL contact line system, with earth return. This involves the effect of the rails.
- Z_{HK}^{li} is the mutual impedance for a given section l_i , normalized by the length l_i , in Ω/km . This is calculated accordingly to the following expression:

$$Z_{HK}^{li} = \frac{\sum^{li} Z_{HK}(x_j) \Delta l_j}{l_i} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (\text{A-1})$$

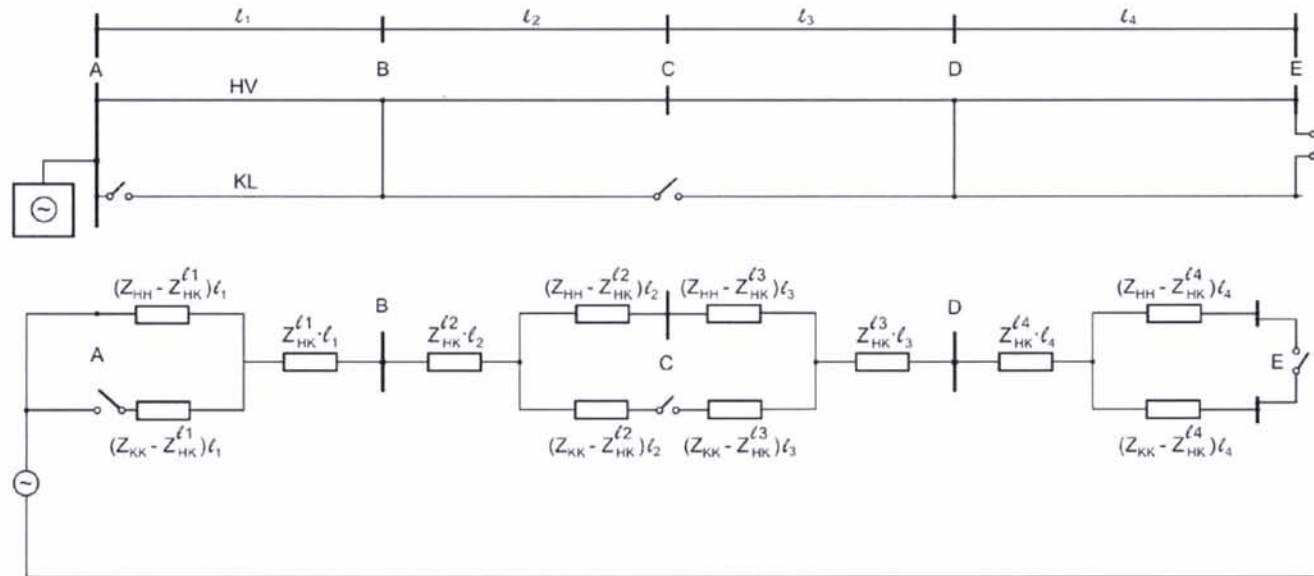
where:

- $Z_{HK}(X_j)$ is the average value, per unit length, of the mutual impedance between the HV feeder and the contact line along the j -th section located at the X_j length co-ordinate. The value of Z_{HK} varies along the line-length and should be given in form of a step-like function that is to be calculated by the PLINE+MULTC.
- Δl_j is the length of the j -th part section, where $Z_{HK}(X_j)$ has uniform value;
- l_i is the length of the i th part section with train of the supply feed section as shown in the line configuration figures.

In the circuits given in the following figures:

- there is not any mutual impedance, its value appears as a data identifying the values of the circuit parameters
- the circuits are composed of lumped elements. However, these lumped elements can also be represented as distributed line sections having the unit length impedances and lengths shown in the circuit arrangements and parameters.

The converter station is represented by an ideal voltage source U (e.g. 16500 V), while the train is simulated by a current source, the value of which shall be equal to the current taken by the train at a given train location. The train location can be varied by the change of the length coordinate of the train location, e.g. changing the value of l_{1a} and l_{1b} when the train is moving along the A-B section of length l_l .

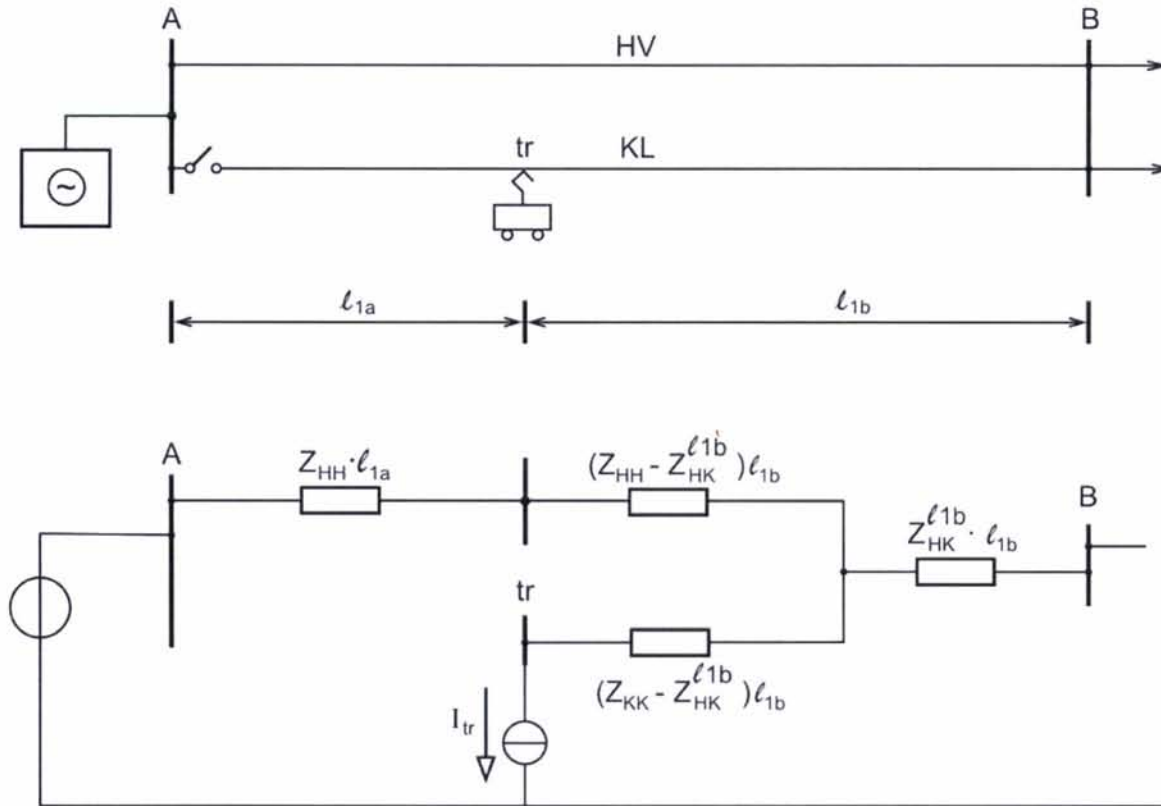


a) Line configuration

b) Circuit arrangement and parameters

- Notes: 1. No train on the line, the representation is related to the locations A, B, C, D and E.
 2. Feeding options covered by the simulation:
- Feeding only through the high voltage feeder (HV) is simulated with open switches;
 - Feeding through parallel connected contact line (KL) and the HV feeder is simulated with closed switches

Figure A—1 – Representation of a whole supply feed section (e.g. Rombak – Narvik section)

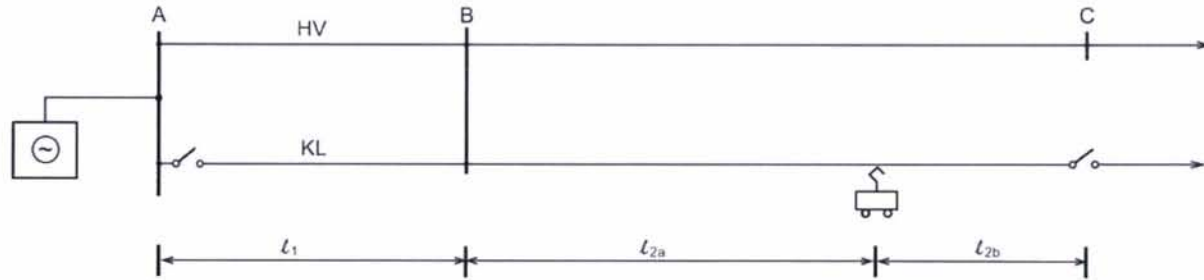


a) Line configuration

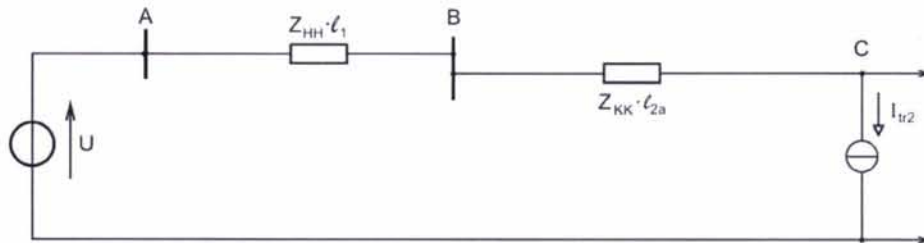
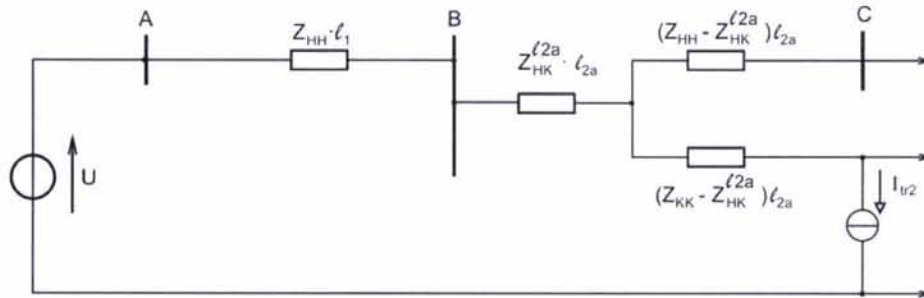
b) Circuit arrangement and parameters

Figure A—2 – Feeding only through the HV feeder, train on the section 1 with length l_1





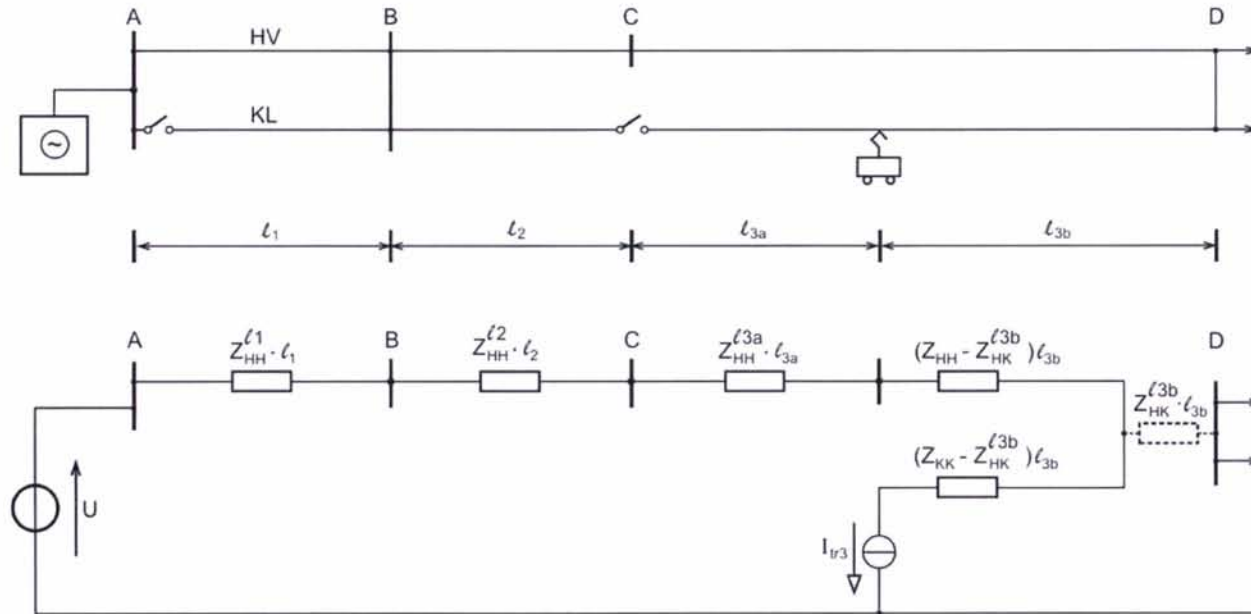
a) Line configuration



b) Circuit arrangement and parameters

Figure A—3 – Feeding only through the HV feeder, train on the section 2 with length l_2



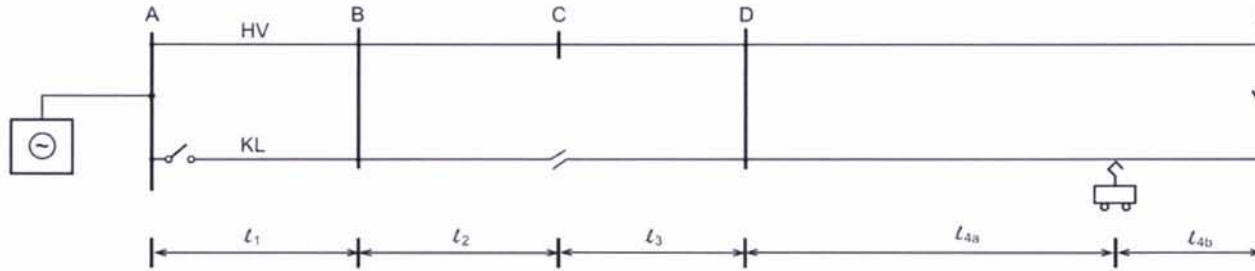


a) Line configuration

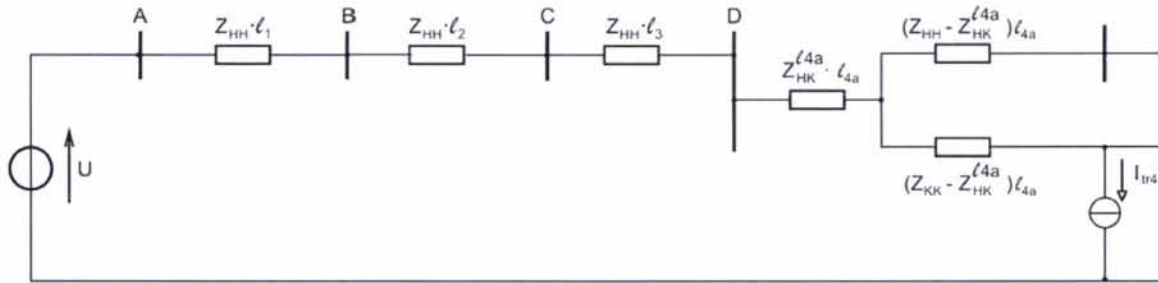
b) Circuit arrangement and parameters

Figure A—4 - Feeding only through the HV feeder, train on the section 3 with length l_3

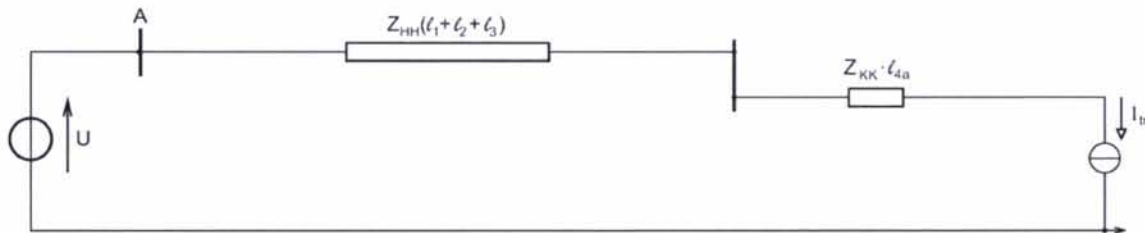




a) Line configuration



b) Circuit arrangement and parameters



c) Circuit with merged elements and parameters

Figure A—5 - Feeding only through the HV feeder, train on the section 4 with length l_4



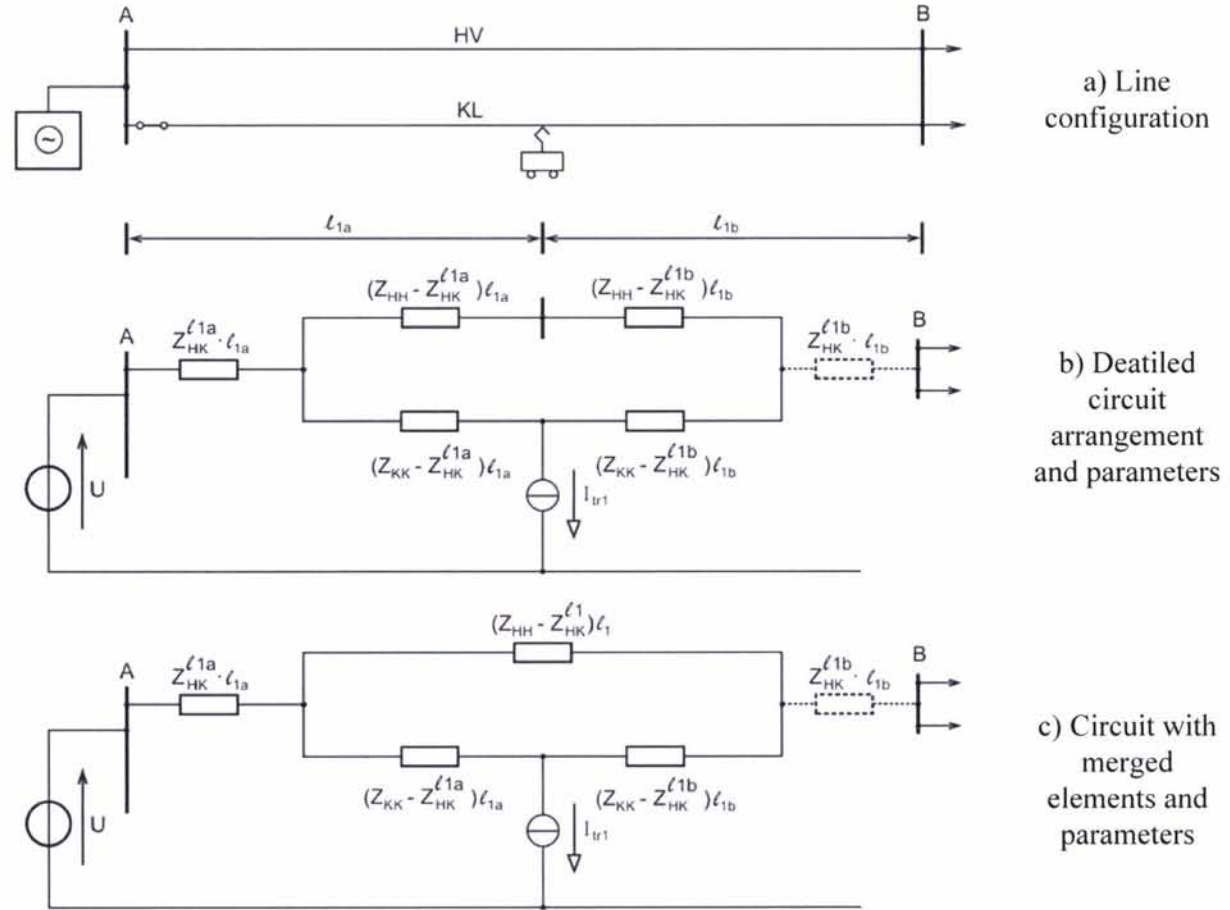


Figure A—6 - Feeding in parallel through the HV feeder and KL, train on the section 1 with length l_1



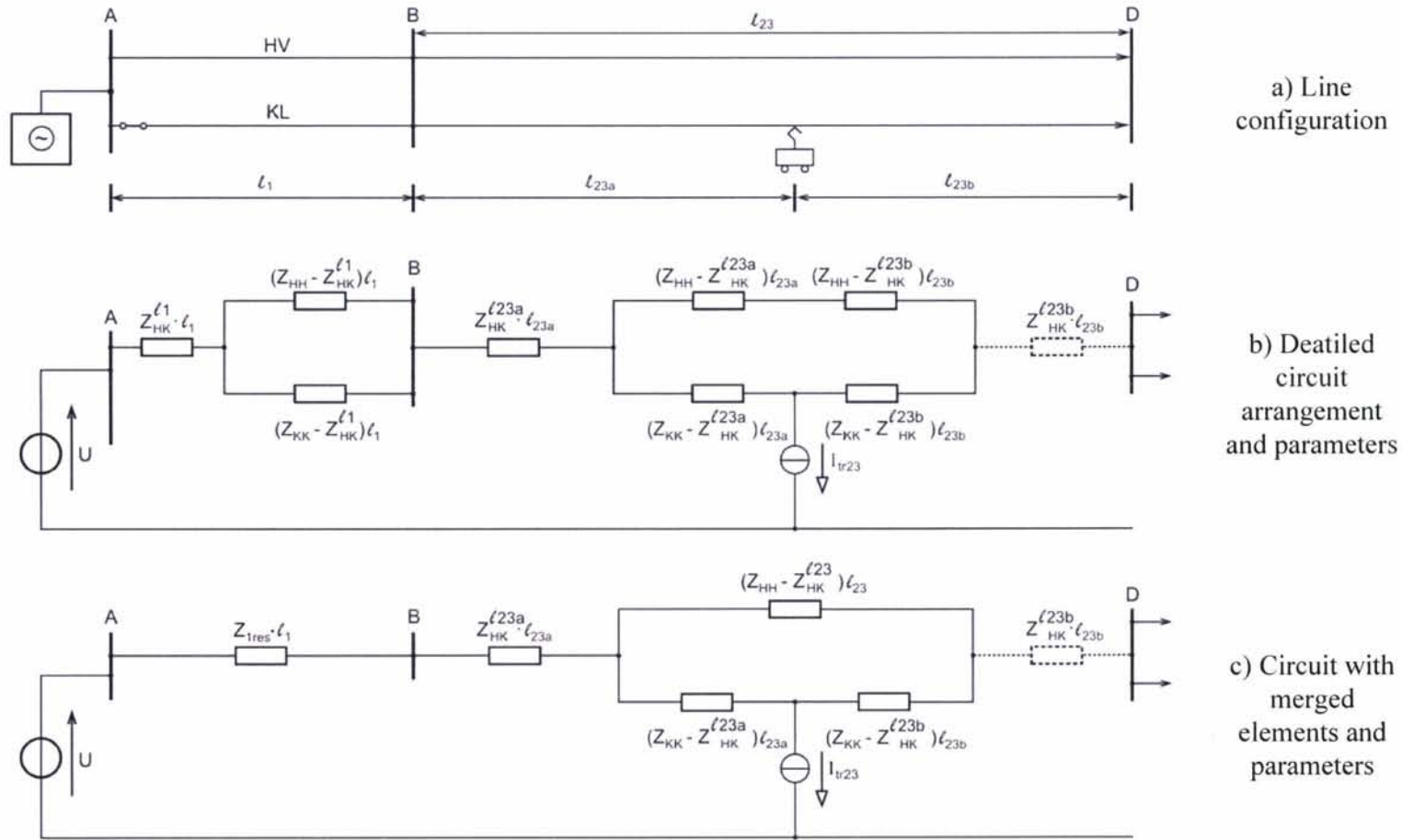


Figure A—7 – Feeding in parallel through the HV feeder and KL, train on the combined section 2 and 3 with length l_{23}

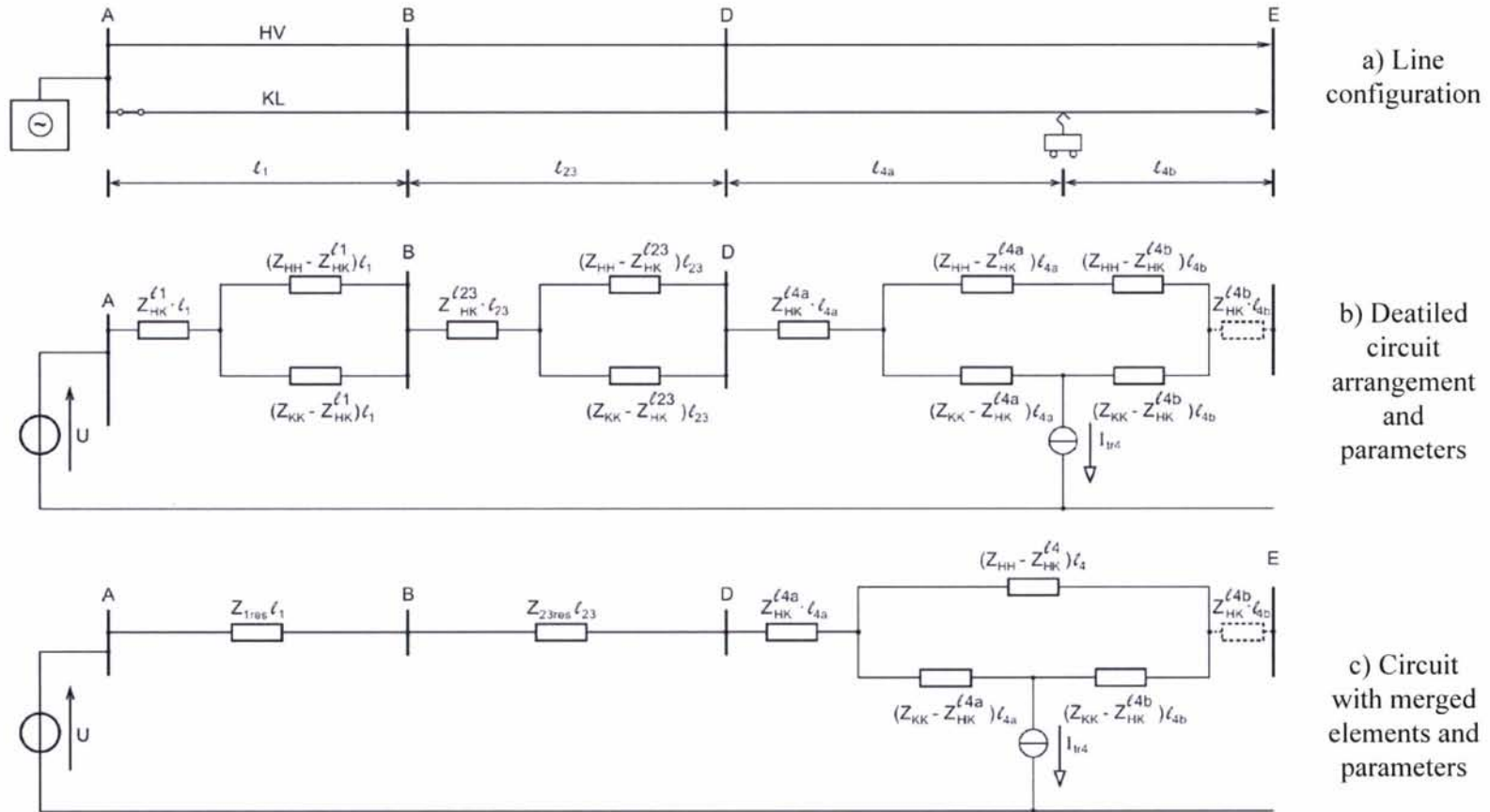
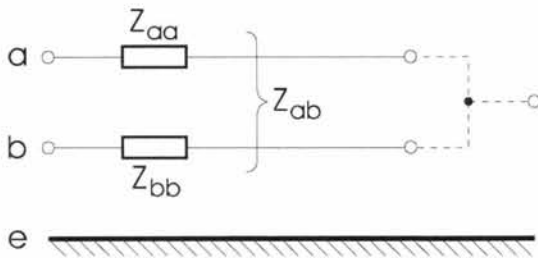


Figure A—8 - Feeding in parallel through the HV feeder and KL, train on the section 4 with length l_4

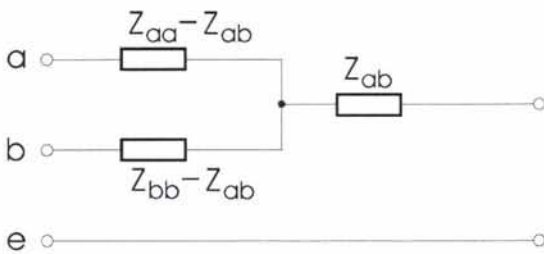
c) Explanation to the elimination of the mutual impedance

“Eliminating” of the Z_{ab} mutual impedance from the impedances for coupled loops a and b with common return (earth)

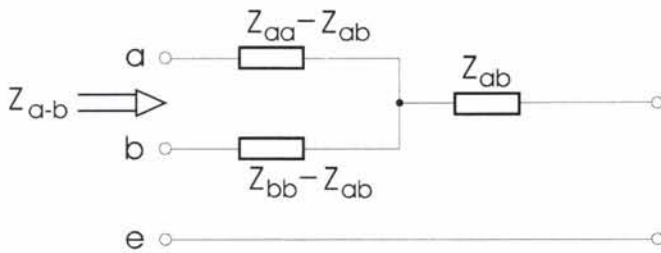


Z_{aa} and Z_{bb} are the self impedance with e (earth) return
 Z_{ab} is the mutual impedance with common (earth) return

a.) circuit parameters



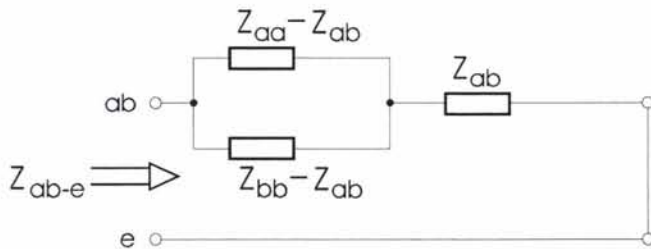
b.) equivalent circuit



$$Z_{a-b} = Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}$$

if $Z_{aa} = Z_{bb}$, then $Z_{a-b} = 2(Z_{aa} - Z_{ab})$
 c.) impedance of $a-b$ loop

c.) impedance of $a-b$ loop



$$Z_{ab-e} = \frac{(Z_{aa} - Z_{ab})(Z_{bb} - Z_{ab})}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} + Z_{ab} = \frac{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}^2}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}}$$

if $Z_{aa} = Z_{bb}$, then $Z_{ab-e} = \frac{Z_{aa} + Z_{ab}}{2}$

d.) impedance of parallel connected a and b with return (earth)

d) **Example for the circuit representation of the train moving**

Applying the principles described in sections A.1 and A.2 examples are given for the circuit representation of the moving train. The present feeding system is assumed, i.e. the railway line is operated as simple feeding system with earth return and the HV line works with earth return.

The example is related to the feeding arrangement demonstrated in Figure A-9, i.e. the Rombak – Fagerlia section.

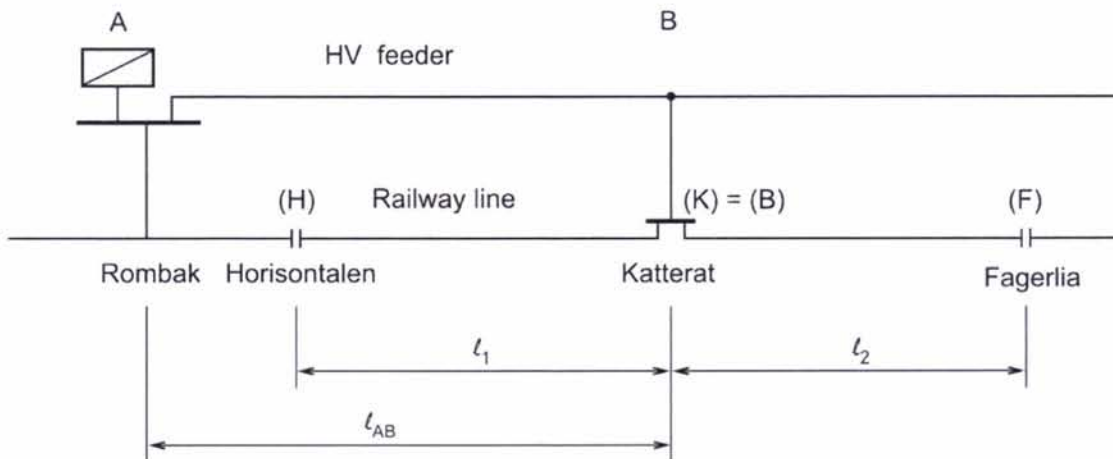


Figure A—9 – The represented feeding arrangement

Firstly, it is assumed that the train is moving from Horisontalen to Katterat with length steps of Δl_1 , Δl_2 etc. The circuit representation relevant to each train location can be derived on the bases of the circuit scheme given in Figure A-2. To get as simple scheme as possible the impedances of the two branches in Figure A-2, i.e. $(Z_{HH} - Z_{HK})$ and $(Z_{KK} - Z_{HK})$, both multiplied by the appropriate length, are combined into one $(Z_{HH} + Z_{KK} - 2Z_{HK})$ also multiplied by the appropriate length. The circuit scheme for train locations between Horisontalen and Katterat is shown in Figure A-10.

The circuit scheme for train locations between Katterat and Fagerlia can be derived in similar way from the circuit given in Figure A-3. This is shown in Figure A-11.

Circuit scheme can, of course, constituted in the same way for the other supply feed sections, e.g. for the sections fed from Bjørnfjell. In this case the distance l_{AB} is equal to the distanced between Rombak and Bjørnfjell.

It is worth to develop auxiliary software for the calculation of the circuit parameters relevant to each train location especially for the calculation of the mutual impedance Z_{HK} , the unit length value of which varies with the locations as well. This kind of complication can be avoided with the use of a uniform average value for each supply feed section (see section 4.2.2).

The schemes can be applied for the feeding condition when the HV line is operated in a balanced way (e.g. option 3b). In this case the impedance Z_{HH} of the HV line is equal to its loop impedance (see paragraph 5.2 a) and the mutual impedance Z_{HK} is equal to zero. This later condition significantly simplifies the determination of the circuit parameters.

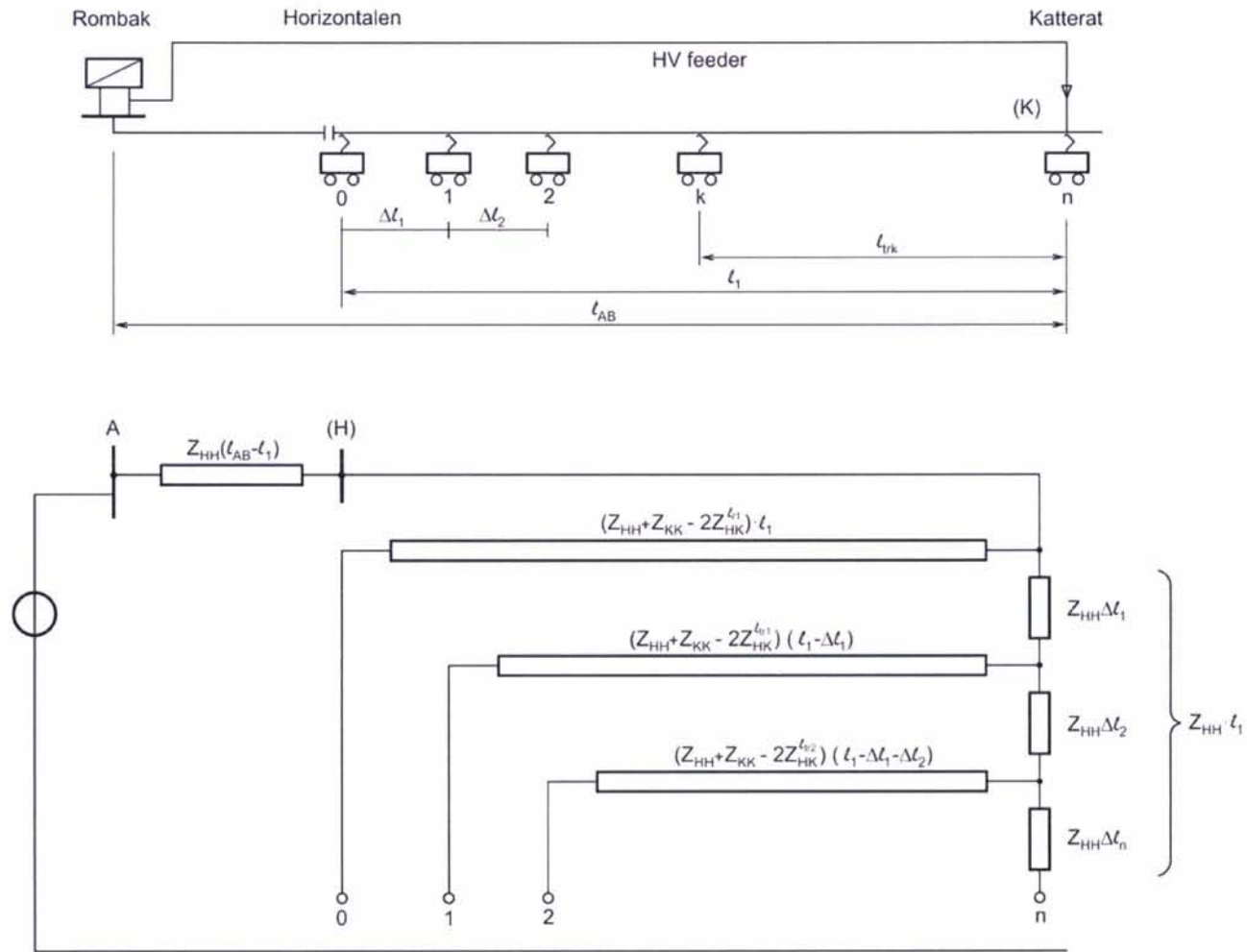


Figure A—10 – Circuit scheme for train locations between Horisontalen and Katterrat

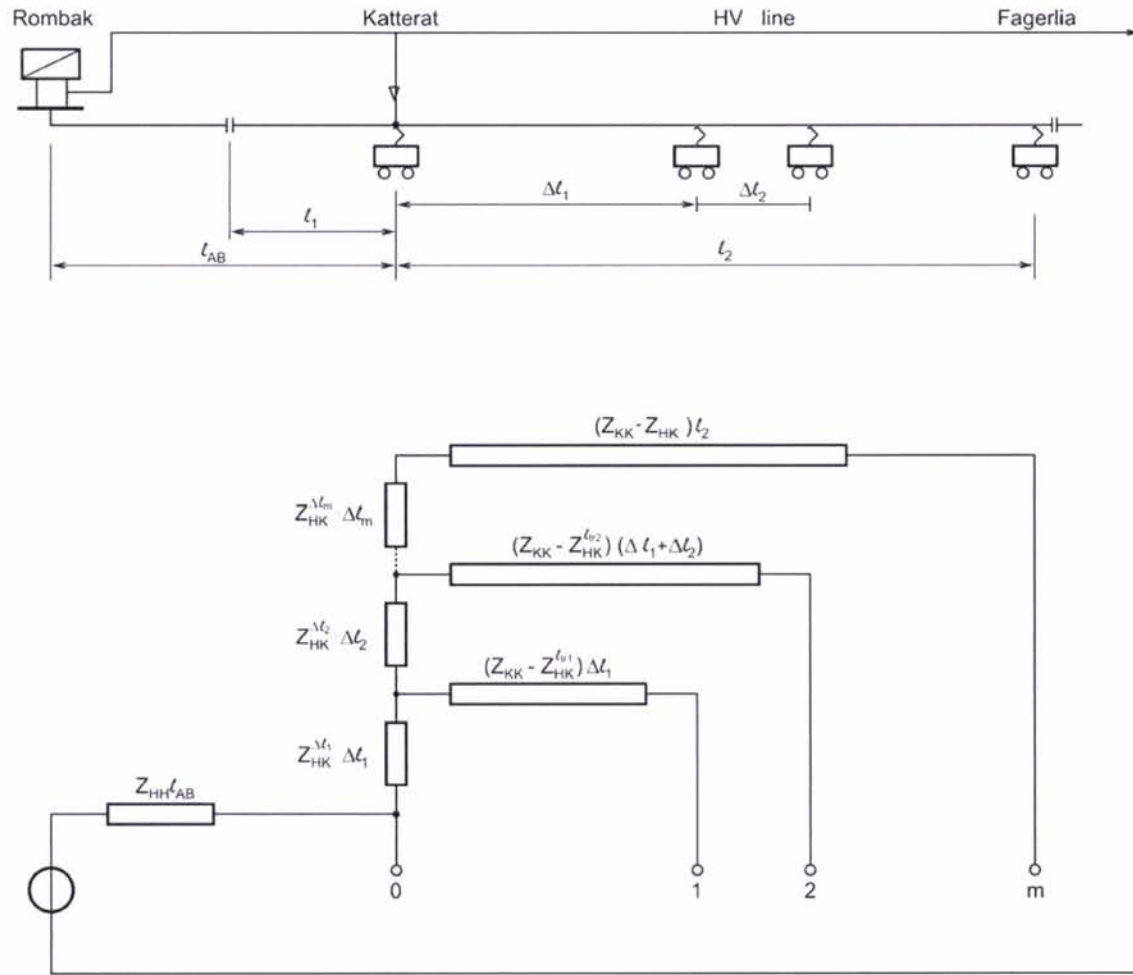


Figure A—11 – Circuit scheme for train locations between Katterat and Fagerlia

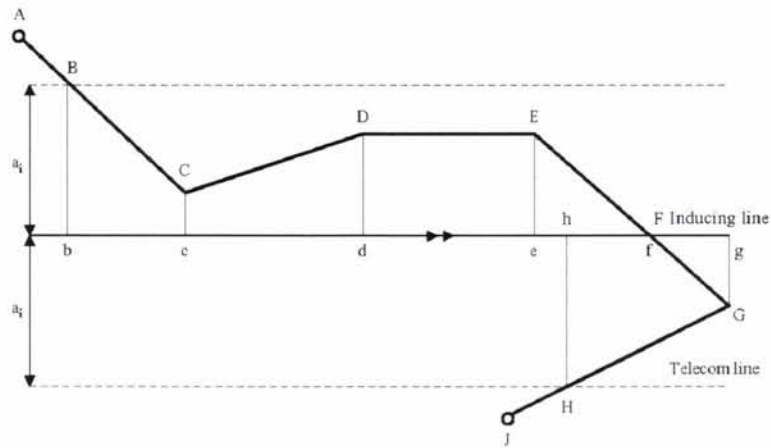


B. Estimation of the inductive coupling between non-parallel lines accordingly to the ITU-T

In this Annex the method for the estimation of the inductive coupling between non-parallel lines is demonstrated accordingly to method of the ITU-T Directives [10]. In the shown examples the coupling is considered from the inducing (railway) to the induced (telecom) line. It is easy to see that the coupling differs when it is considered in the opposite direction, due to the different composition of the subsections.

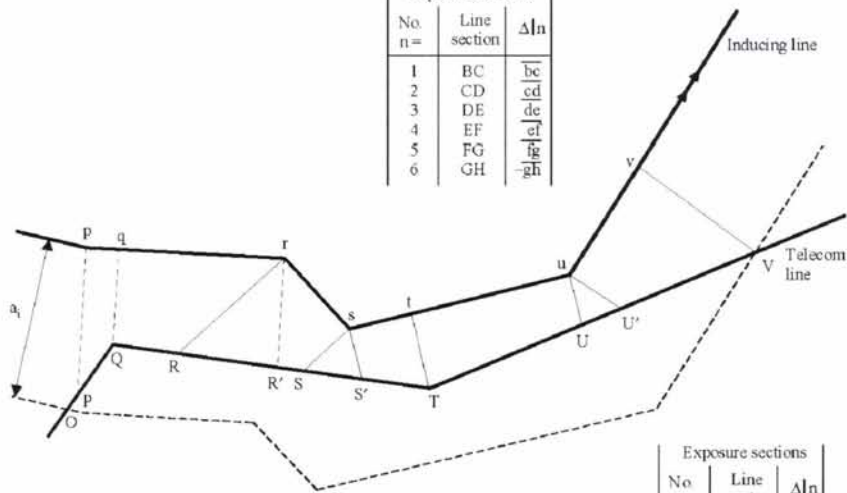
The following information is contained in the reproduced parts of the Volume II of the ITU-T Directives:

- Figure B-1 – Ways of creating exposure sections in case of straight and any trace of inducing line
- Figure B-2 – Rule of subdivision and calculating the equivalent separation distance (d)
- Conditions of the induction from ac. electrified railway line in the demonstration example.
- Figure B-3– Geometrical layout of an induction situations and subdivision for calculation sections
- Table B-1 – Table survey of estimating the emf induced by electrified railway



a) Straight inducing line

Exposure sections		
No. n =	Line section	ΔI_n
1	BC	\overline{bc}
2	CD	\overline{cd}
3	DE	\overline{de}
4	EF	\overline{ef}
5	FG	\overline{fg}
6	GH	\overline{gh}



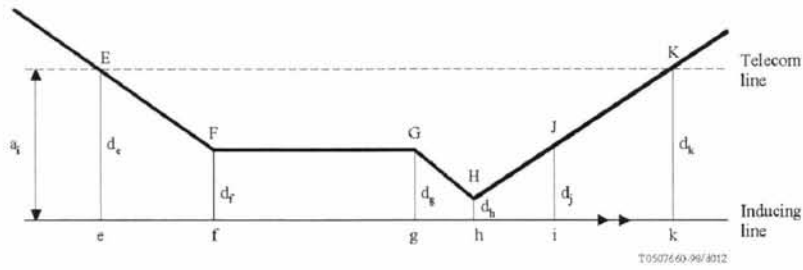
b) Any trace of inducing line

Exposure sections		
No. n =	Line section	ΔI_n
1	PQ	\overline{pq}
2	QR	\overline{qr}
3	RS	\overline{rs}
4	ST	\overline{st}
5	TU	\overline{tu}
6	UV	\overline{uv}

T0507690-99/4011

FIGURE 7/2
Lengths of exposure sections ΔI_n

Figure B-1 – Ways of creating exposure sections in case of straight and any trace of inducing line



No. n =	Line section	$d_{max} =$	$d_{min} =$	$d_n =$	$\Delta l_n =$
1	EF	d_e	d_f	$\sqrt{d_e d_f}$	\overline{ef}
2	FG	$d_f = d_g$	$d_f = d_g$	$d_f = d_g$	\overline{fg}
3	GH	d_g	d_h	$\sqrt{d_g d_h}$	\overline{gh}
4	HJ	d_h	d_i	$\sqrt{d_h d_i}$	\overline{hi}
5	JK	d_j	d_k	$\sqrt{d_j d_k}$	\overline{jk}

FIGURE 8/2
Subdivision of an exposure into exposure sections
 (condition: $\frac{d_{max}}{d_{min}} \leq 3$)

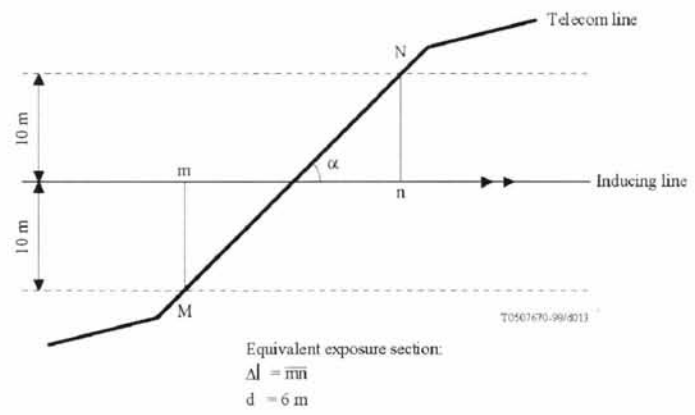


FIGURE 9/2
Consideration of crossings in the case of inductive coupling

Figure B-2 – Rule of subdivision and calculating the equivalent separation distance (d)

Conditions of the induction from ac. electrified railway line

In the case of normal operation, it is assumed that the most unfavourable condition exists if one locomotive is located at the position L while other loads exist beyond the exposure in the direction of B (see also § 2.3.1.3).

For the induction caused by the short-circuit current it is assumed, for the most unfavourable case, that the short-circuit is at the position D (see also § 2.3.1.4).

a) Parameters used for estimating the induced e.m.f.:

- frequency $f = 16.67 \text{ Hz}$
- operational current $I_{op} = 850 \text{ A}$ for all sections up to point L
 $I_{op} = 590 \text{ A}$ for all sections from point L onwards
- short-circuit current $I_{sc} = 5.8 \text{ kA}$ (all values for I_{op} and I_{sc} are furnished by the operator or the railway line)
- screening factor of the electrified railway line $k_f = 0.44$ (value taken from Table 6/2)
- screening factor of the telecommunication cable $k_c = 0.65$ (as indicated by the manufacturer)
- soil-resistivity $\rho = 50 \text{ }\Omega\text{m}$ (taken from relevant measurement)
- geometrical quantities $d_n, \Delta l_n$ (to be taken from the exposure plan as given in Figure 15/2 (see also § 2.2.2 - § 2.2.4))

b) Calculating the coupling impedance Z_n (see § 2.3.2):

Since the calculation of the induced longitudinal e.m.f. can be carried out easily by means of calculators Z_n it need not be calculated explicitly. Therefore, the coupling impedance is not shown in Table 11/2.

c) Estimating the total induced longitudinal e.m.f. (see Table 7/2):

Results are given in Table 11/2. The total induced e.m.f. amounts to

- in the case of normal operation:

$$\underline{E_{tot,op} = 11 \text{ V}}$$

- in the case of short-circuit:

$$\underline{E_{tot,sc} = 87 \text{ V}}$$

d) Inference from the results:

The total induced longitudinal e.m.f. is well below the voltage limit as given in Table 8/2. Therefore, there is no need for any protective measures or safety precautions against danger to personal or to the installation.

The screening factor of the induced telecommunication cable is not only reason for the very small induced e.m.f. Even in the case of an open wire line ($k_c = 1$) the induced longitudinal e.m.f. would not exceed the limiting values. In this case the calculation would result in

$$E_{tot,op} = 17 \text{ V and}$$

$$E_{tot,sc} = 135 \text{ V.}$$

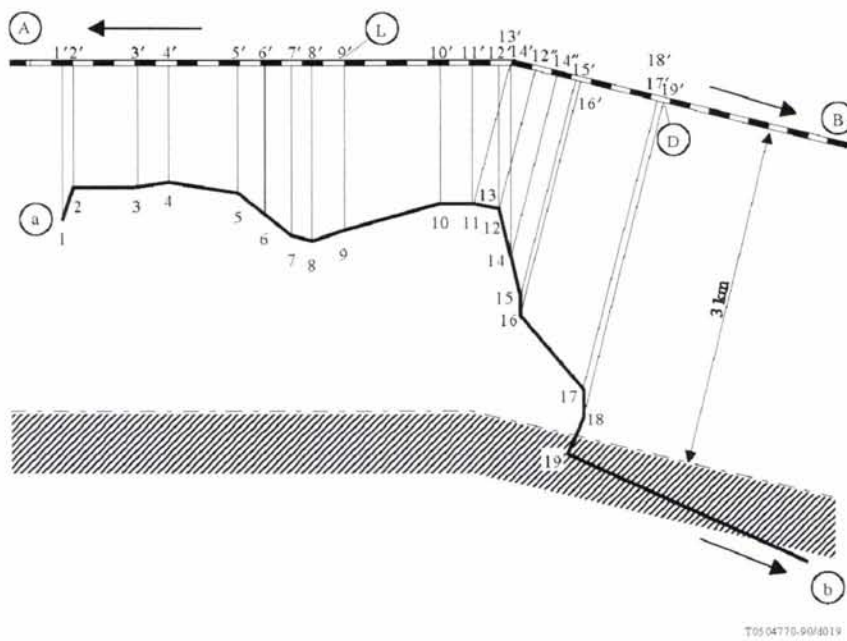


FIGURE 15/2
 Geometrical configuration of the inducing electrified railway line
 and the induced telecommunication cable

**Figure B-3– Geometrical layout of an induction situations and
 subdivision for calculation sections**

Table B-1 – Table survey of estimating the emf induced by electrified railway

TABLE 11/2

Estimating the total induced longitudinal voltage

Exposure section	d ₁ m	d ₂ m	I _n km	I _{op} A	I _{sc} kA	E _{n,op} V	E _{n,sc} V
1-2	1200	940	0.070	850	5.8	0.19	1.33
2-3	940	940	0.440			1.40	9.59
3-4	940	850	0.330			1.11	7.59
4-5	850	990	0.650			2.13	14.55
5-6	990	1165	0.180			0.49	3.38
6-7	1165	1350	0.280			0.63	4.34
7-8	1350	1400	0.220			0.44	3.01
8-9	1400	1270	0.270			0.58	3.85
9-10	1270	1010	0.850	590		1.52	14.98
10-11	1010	1000	0.300			0.61	6.08
11-12	1000	1100	0.250			0.49	4.82
12-13	1100	1120	0.120			0.22	2.16
12-14	1100	1575	0.150			0.22	2.18
12-14	1200	1540	0.240			0.33	3.33
14-15	1540	1860	0.160			0.16	1.60
15-16	1860	2090	0.040			0.03	0.30
16-17	2090	2600	0.740			0.42	4.13
17-18	2600	2780	0.040			0.01	0.16

$$E_{tot,op} = E_{n,op} = 11.03 \text{ V}$$

$$E_{tot,sc} = E_{n,sc} = 87.46 \text{ V}$$

NOTE 1 – Section 11-12 has two possible projections on the inducing line, which presents a converging angle at this point. This part of the induced line will therefore receive two inductions:

- one throughout its length from Section 11'-12' of the railway line,
- the other over its portion 13-12 from the portion 13'-12" of the inducing line.

The resultant induced e.m.f. will therefore be added together.

NOTE 2 – Section 12-14 will also receive two inductions:

- one throughout its length from the portion 12'-14' of the induced line,
- another, also throughout its length from the portion 12"-14" of the railway line.

Here again, the resultant induced e.m.f. will be added.

NOTE 3 – Since the Section 18-19 is perpendicular to the inducing line, it will not be subject to any induction.

Appendices

I. Co-ordinates of the railway and HV line routes

Railway [km]			Power line [km]			
x	y	length	x	y	length	Tower Nr.
-0.3240	-3.0806	0.000				
-0.2175	-2.4680	0.622				
-0.2086	-2.2283	0.862				
-0.2308	-2.0730	1.019				
-0.5460	-1.6024	1.585				
-0.7369	-1.2606	1.976				
-0.7812	-1.1097	2.134				
-0.7812	-0.8967	2.347				
-0.8301	-0.6392	2.609				
-0.7502	-0.2974	2.960				
-0.6836	-0.1154	3.154				
-0.5904	-0.0178	3.289				
-0.4439	0.0621	3.455				
-0.2752	0.0577	3.624				
-0.1021	0.0000	3.807				
0.0000	0.0000	3.909	0.0000	0.0000	0.000	1
0.1978	0.1049	4.133	0.0957	0.1670	0.193	2
0.3732	0.2693	4.373	0.2001	0.3492	0.403	3
0.4282	0.4406	4.553	0.2906	0.5071	0.584	4
0.4814	0.6774	4.796	0.4059	0.7085	0.817	5
0.5610	0.8441	4.980	0.4989	0.8707	1.004	6
0.6585	0.9719	5.141	0.6408	0.9986	1.195	7
0.7833	1.0373	5.282	0.7478	1.0950	1.339	8
0.9971	1.2007	5.551	0.9439	1.2717	1.603	9
1.0619	1.3012	5.671	1.0308	1.3500	1.720	10
1.1109	1.3433	5.735	1.1021	1.3699	1.793	11
1.3217	1.4124	5.957	1.3173	1.4301	2.017	12
1.4677	1.4520	6.108	1.4589	1.4697	2.164	13
1.7811	1.4648	6.422	1.7589	1.5536	2.476	14
1.8693	1.4973	6.516	1.8649	1.5639	2.582	15
2.0818	1.5259	6.731	2.0685	1.5703	2.786	16



Railway [km]			Power line [km]			Tower Nr.
x	y	length	x	y	length	
2.1821	1.5383	6.832	2.1777	1.5738	2.895	17
2.4136	1.4652	7.074	2.4091	1.4874	3.142	18
2.5543	1.4066	7.227	2.5543	1.4332	3.297	19
2.6288	1.3577	7.316	2.6377	1.4021	3.386	20
2.9248	1.3142	7.615	2.9204	1.4163	3.669	21
3.0343	1.3184	7.725	3.0033	1.4205	3.752	22
3.1264	1.3727	7.832	3.1131	1.4260	3.862	23
3.3950	1.3458	8.101	3.3728	1.4390	4.122	24
3.5861	1.2793	8.304	3.5506	1.4479	4.300	25
3.7360	1.3494	8.469	3.7094	1.4559	4.459	26
3.9703	1.3704	8.705	3.9304	1.4858	4.682	27
4.0887	1.3636	8.823	4.0443	1.5012	4.797	28
4.3564	1.2954	9.099	4.3786	1.3975	5.147	29
4.5379	1.2257	9.294	4.5601	1.3411	5.337	30
4.6970	1.1644	9.464	4.7148	1.2931	5.499	31
4.8481	1.1516	9.616	4.8658	1.2404	5.659	32
5.0710	1.1006	9.845	5.0754	1.1672	5.881	33
5.2219	0.9989	10.027	5.2397	1.1099	6.055	34
5.4466	0.9293	10.262	5.4644	1.0314	6.293	35
5.5868	0.7839	10.464	5.6268	0.9747	6.465	36
5.8322	0.6492	10.744	5.8855	0.8844	6.739	37
6.0611	0.6034	10.977	6.1055	0.8076	6.972	38
6.2969	0.4974	11.236	6.3457	0.7237	7.226	39
6.4683	0.4375	11.417	6.5171	0.6639	7.408	40
6.7280	0.4137	11.678	6.7635	0.5779	7.669	41
6.8665	0.3570	11.828	6.8929	0.5327	7.806	42
7.0956	0.3225	12.059	7.1176	0.4543	8.044	43
7.2888	0.3093	12.253	7.3064	0.3884	8.244	44
7.4081	0.2015	12.414	7.4388	0.3421	8.384	45
7.6064	0.0662	12.654	7.6503	0.2683	8.608	46
7.8134	0.0101	12.868	7.8486	0.1991	8.818	47
7.9355	0.0189	12.991	7.9619	0.1595	8.938	48
8.1520	-0.0096	13.209	8.1696	0.0870	9.158	49
8.3283	-0.1094	13.412	8.3546	0.0224	9.354	50
8.3988	-0.1722	13.506	8.4340	-0.0053	9.438	51
8.4133	-0.2096	13.546	8.4528	-0.0119	9.458	52
8.5691	-0.3611	13.764	8.6350	-0.0755	9.651	53
8.7284	-0.4947	13.972	8.8163	-0.1388	9.843	54
8.8861	-0.6158	14.170	8.9872	-0.1984	10.024	55



Railway [km]			Power line [km]			Tower Nr.
x	y	length	x	y	length	
9.0482	-0.7326	14.370	9.1581	-0.2581	10.205	56
9.2387	-0.7036	14.563	9.3266	-0.3169	10.384	57
9.4481	-0.7472	14.777	9.5272	-0.3869	10.596	58
9.6571	-0.8083	14.994	9.7274	-0.4568	10.808	59
9.9315	-0.9512	15.304	10.0106	-0.5557	11.108	60
10.0254	-1.0696	15.455	10.1485	-0.6038	11.254	61
10.3127	-1.1976	15.770	10.4270	-0.7010	11.549	62
10.5411	-1.0658	16.033	10.6158	-0.7670	11.749	63
10.7474	-0.9731	16.259	10.7782	-0.8237	11.921	64
10.9345	-1.0240	16.453	10.9609	-0.9098	12.123	65
11.1161	-1.1464	16.672	11.1644	-1.0058	12.348	66
11.3670	-1.3060	16.970	11.4285	-1.1303	12.640	67
11.5217	-1.3746	17.139	11.5832	-1.2032	12.811	68
11.6920	-1.4634	17.331	11.7623	-1.2877	13.009	69
11.8832	-1.5830	17.556	11.9531	-1.3777	13.220	70
11.9360	-1.6373	17.632	12.0540	-1.4887	13.370	71
12.1028	-1.8077	17.871	12.2208	-1.6722	13.618	72
12.2258	-1.9257	18.041	12.3438	-1.8077	13.801	73
12.3825	-2.0527	18.243	12.4830	-1.9609	14.008	74
12.5214	-2.1771	18.429	12.6000	-2.0897	14.182	75
12.6259	-2.2830	18.578	12.7002	-2.2000	14.331	76
12.7322	-2.3816	18.723	12.7977	-2.3073	14.476	77
12.8606	-2.5046	18.901	12.9174	-2.4390	14.654	78
12.9880	-2.6593	19.101	13.0580	-2.5937	14.863	79
13.1276	-2.8264	19.319	13.2019	-2.7521	15.077	80
13.3485	-2.9729	19.584	13.3747	-2.9423	15.334	81
13.4903	-3.1064	19.779	13.5078	-3.0889	15.532	82
13.5845	-3.3752	20.064	13.6806	-3.2791	15.789	83
13.5516	-3.4902	20.183	13.7176	-3.3198	15.844	84
13.6578	-3.7069	20.425	13.8588	-3.4752	16.054	85
14.0233	-3.7137	20.790	14.0845	-3.5607	16.296	86
14.2429	-3.7935	21.024	14.2954	-3.6406	16.521	87
14.4748	-3.9225	21.289	14.5491	-3.7172	16.786	88
14.6500	-3.9754	21.472	14.7243	-3.7700	16.969	89
14.7597	-4.0116	21.588	14.8296	-3.8018	17.079	90
14.9508	-4.1618	21.831	14.9596	-3.7991	17.209	91
15.1973	-4.2921	22.109	15.2060	-3.7939	17.456	92
15.6609	-4.4398	22.596	15.6609	-3.7843	17.911	93
15.6758	-4.4614	22.622	15.6714	-3.7841	17.921	94



Railway [km]			Power line [km]			
x	y	length	x	y	length	Tower Nr.
15.7997	-4.5550	22.778	15.7954	-3.7815	18.045	95
15.9803	-4.5864	22.961	15.9628	-3.7780	18.213	96
16.1503	-4.4911	23.156	16.1328	-3.7744	18.383	97
16.2288	-4.2312	23.427	16.2288	-3.7724	18.479	98
16.2959	-3.7232	23.940	16.2828	-3.7712	18.533	99
16.3727	-3.6382	24.054	16.3727	-3.7693	18.623	100
16.5653	-3.4855	24.300	16.5697	-3.7652	18.820	101
16.7252	-3.2721	24.567	16.7427	-3.7616	18.993	102
16.9039	-3.0588	24.845	16.9126	-3.7580	19.163	103
17.1102	-2.9671	25.071	17.1146	-3.7537	19.365	104
17.2895	-2.9197	25.256	17.2895	-3.7500	19.540	105
17.4111	-2.8734	25.386	17.4155	-3.7474	19.666	106
17.8222	-2.7787	25.808	17.5906	-3.7969	19.848	107
18.0245	-2.8004	26.012	17.7754	-3.8492	20.040	108
18.2124	-2.8743	26.214	17.9284	-3.8925	20.199	109
18.3545	-2.8981	26.358	18.1054	-3.9425	20.383	110
18.3990	-2.9148	26.405	18.2941	-3.9723	20.574	111
18.6146	-2.9991	26.637	18.4966	-4.0042	20.779	112
18.7210	-3.0796	26.770	18.6467	-4.0279	20.931	113
19.0048	-3.2796	27.117	18.9174	-4.0706	21.205	114
19.1514	-3.4161	27.318	19.0903	-4.0978	21.380	115
19.1666	-3.4438	27.349	19.2103	-4.1168	21.501	116
19.2686	-3.5594	27.503	19.4172	-4.1494	21.711	117
19.4405	-3.7604	27.768	19.5279	-4.1668	21.823	118
19.7451	-3.9690	28.137	19.7145	-4.1963	22.012	119
19.9173	-4.0450	28.325	19.8911	-4.2241	22.190	120
20.1877	-4.1413	28.612	20.1696	-4.2774	22.474	121
20.2898	-4.0860	28.728	20.2853	-4.2855	22.590	122
20.4350	-4.0959	28.874	20.4259	-4.2954	22.731	123
20.5453	-4.1487	28.996	20.5317	-4.3029	22.837	124
20.7361	-4.2244	29.202	20.7135	-4.3423	23.023	125
21.0221	-4.2487	29.489	20.8679	-4.3757	23.181	126
21.0869	-4.3467	29.606	21.0687	-4.4193	23.386	127
21.1486	-4.3546	29.668	21.1259	-4.4316	23.445	128
21.2210	-4.3551	29.741	21.2119	-4.4503	23.533	129
21.3540	-4.3512	29.874	21.3404	-4.4781	23.664	130
21.5137	-4.3731	30.035	21.5046	-4.5137	23.832	131
21.5643	-4.4237	30.106	21.5870	-4.3920	23.979	132
21.7815	-4.9616	30.687	21.6772	-4.2587	24.140	133





Railway [km]			Power line [km]			Tower Nr.
x	y	length	x	y	length	
22.1546	-4.9259	31.061	21.7781	-4.1096	24.320	134
22.4693	-4.0669	31.976	21.9432	-3.8129	24.660	135
22.3499	-3.7731	32.293	21.9508	-3.7278	24.745	136
22.2736	-3.5916	32.490	21.9652	-3.5644	24.909	137
22.2246	-3.4796	32.612	21.9752	-3.4524	25.022	138
22.2005	-3.3008	32.793	21.9919	-3.2827	25.192	139
22.2523	-2.9640	33.134	22.0255	-2.9413	25.535	140
22.2767	-2.7625	33.337	22.0454	-2.7398	25.738	141
22.2161	-2.5103	33.596	22.0892	-2.4921	25.989	142
22.2119	-2.4124	33.694	22.1257	-2.3716	26.115	143
22.3052	-2.1557	33.967	22.1918	-2.1149	26.380	144
22.3555	-1.9427	34.186	22.2467	-1.9019	26.600	145
22.2911	-1.7295	34.409	22.2911	-1.7295	26.778	146
22.2900	-1.6424	34.496	22.3081	-1.6560	26.854	147
22.1944	-1.4212	34.737	22.3260	-1.4529	27.058	148
22.1664	-1.2322	34.928	22.3569	-1.2685	27.245	149
22.1408	-1.0028	35.159	22.3631	-1.0436	27.470	150
22.0745	-0.8814	35.297	22.3466	-0.8995	27.615	151
21.8865	-0.4213	35.794	22.3446	-0.6435	27.871	152
21.8588	-0.1722	36.045	22.3486	-0.5486	27.966	153
21.9590	-0.0094	36.236	22.3581	-0.3268	28.188	154
22.1057	0.1542	36.456	22.3687	-0.0771	28.438	155
22.3850	0.4079	36.833	22.5301	0.0270	28.630	156
22.5522	0.4784	37.014	22.6747	0.1202	28.802	157
22.7593	0.5591	37.237	22.8773	0.2507	29.043	158
23.0088	0.7650	37.560	23.1403	0.4203	29.356	159
23.3212	0.8724	37.890	23.2667	0.4325	29.483	160
23.3834	0.9324	37.977	23.3245	0.4380	29.541	161
23.5584	1.0877	38.211	23.4768	0.4527	29.694	162
23.7450	1.1923	38.425	23.6679	0.4712	29.886	163
23.9006	1.1995	38.580	23.8371	0.4875	30.056	164
24.0499	1.0007	38.829	23.9864	0.5019	30.206	165
23.8966	0.3610	39.487	24.1143	0.4970	30.334	166
23.9248	0.2046	39.646	24.2922	0.4903	30.512	167
24.1869	0.1685	39.910	24.5270	0.4815	30.747	168
24.5973	0.2581	40.330	24.7968	0.4713	31.017	169
24.8877	0.1480	40.641	24.9512	0.4654	31.171	170
25.0485	0.1144	40.805	25.1211	0.4590	31.341	171
25.3847	0.0881	41.142	25.3575	0.5234	31.586	172



Railway [km]			Power line [km]			
x	y	length	x	y	length	<i>Tower Nr.</i>
25.6091	0.0700	41.368	25.5910	0.5870	31.828	173
25.8343	0.1198	41.598	25.8071	0.6459	32.052	174
25.9597	0.2175	41.757	25.9325	0.6801	32.182	175
26.1045	0.2841	41.917	26.0772	0.7195	32.332	176

II. Development of the mutual impedance for practical purpose

The way of developing the mutual impedance for practical purposes is described in section 4.2 of the main part of the report. This Appendix contains the detailed values for short sections obtained from the DISTURB calculations, the average values for subsections of 0.5 km. These are given numerically in tables for short sections in electronic form or for 0.5 km average in printed form and graphically in figures for both line directions.

Direction of the identification of the mutual impedance	Tabled values		Modulus vs. length curves	
	For short sections	Average for 0.5 km	Both for short sections and average for 0.5 km	Comparison of 0.5 km average
	Electronic*	Printed		
From railway line to HV line	 Zm_rw-to-HV_detail.doc	Table II-1	Figure II-1	Figure II-3
From HV line to railway	 Zm_HV-to-rw_detail.doc	Table II-2	Figure II-2	

*The document can be opened by double click on the icon.

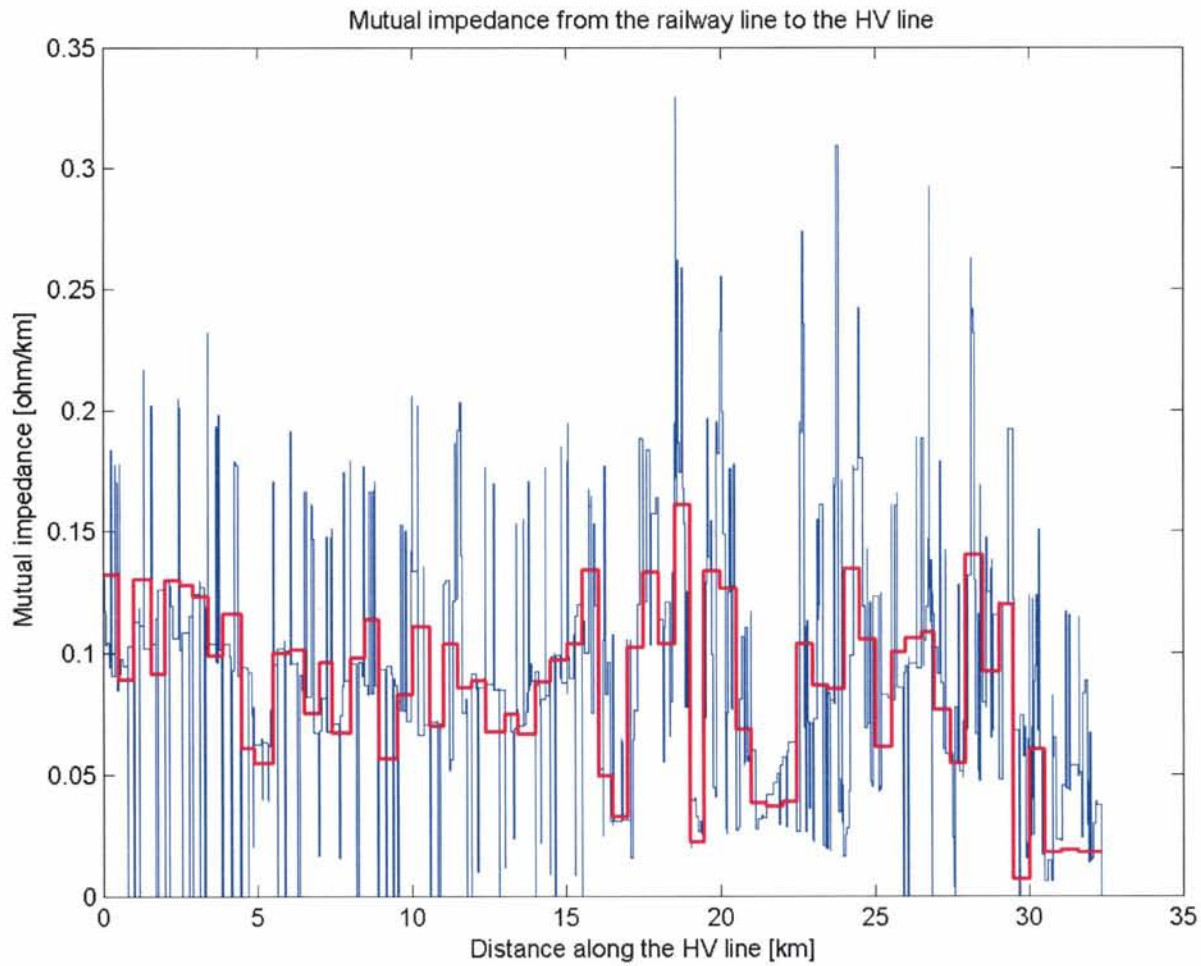


Figure II-1 – Mutual impedance from the railway line to the HV line for short subsections (—) and averaged for subsections of 0.5 km (—)

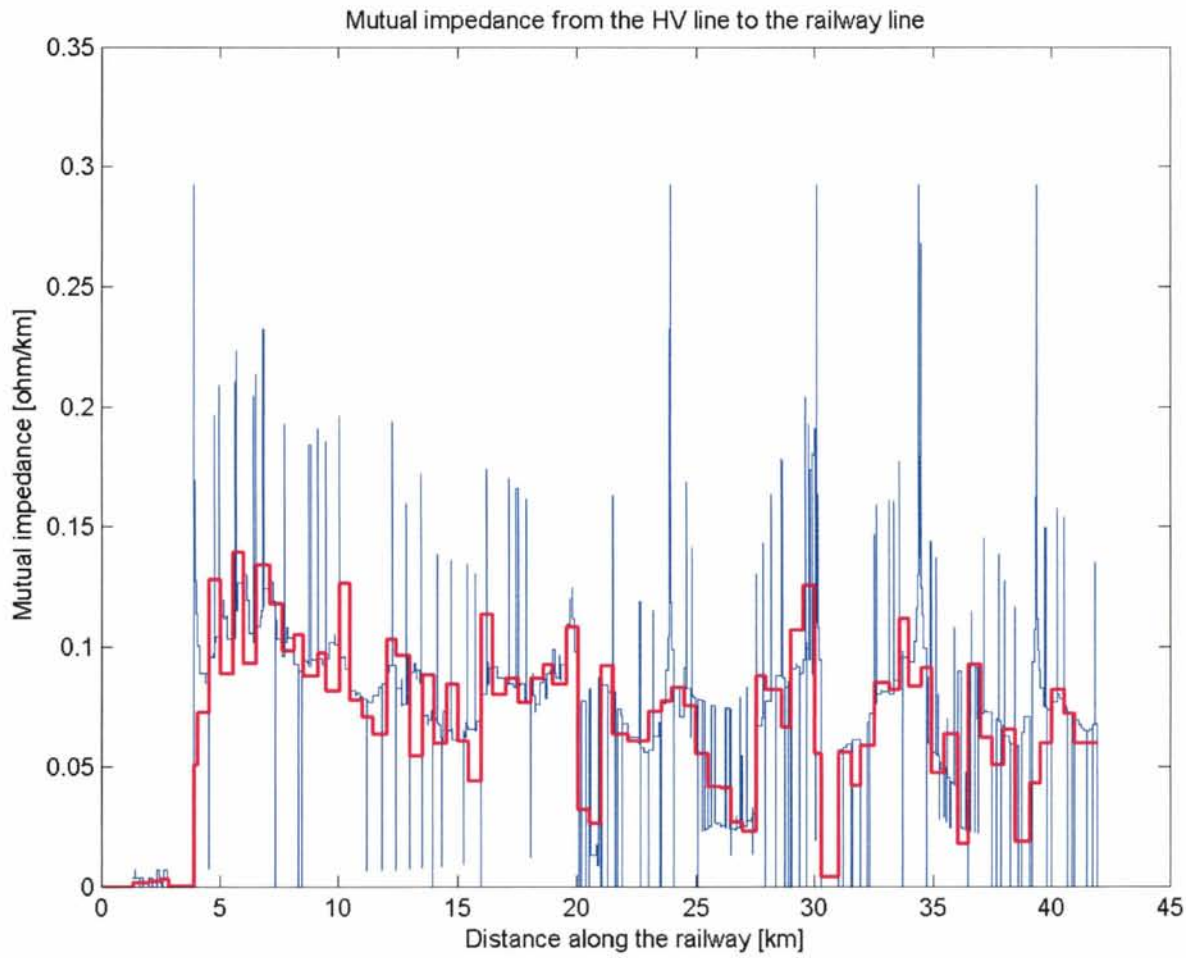


Figure II-2 – Mutual impedance from the HV line to the railway line for short subsections (—) and averaged for subsections of 0.5 km (—)



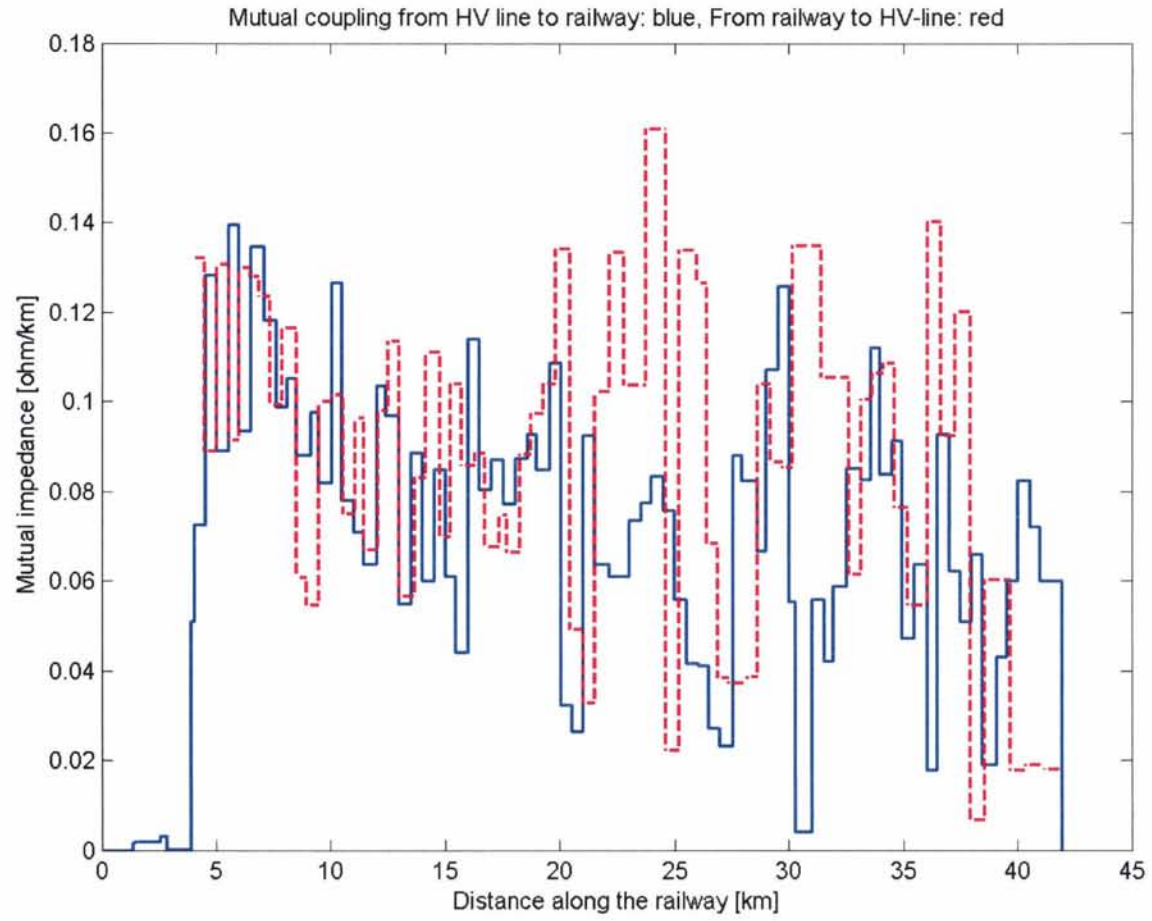


Figure II-3 – Comparisons of the mutual impedance for both direction averaged for subsections of 0.5 km



Table II-1 Mutual impedance from the railway line to the HV line averaged for subsections of 0.5 km

Range of railway position [km]							
0.0000 to 15.5315				16.0542 to 32.3321			
Railway	Z _{mutual}		HV-line	Railway	Z _{mutual}		HV-line
x[km]	[ohm/km]	[deg]	x[km]	x[km]	[ohm/km]	[deg]	x[km]
0.0000	0.13232	79.4	3.9088	16.0542	0.04932	245.6	20.4245
0.5061	0.08899	79.9	4.4764	16.5211	0.03272	209.7	21.0238
1.0035	0.13076	81.5	4.9804	16.9691	0.10219	76.7	21.4721
1.5706	0.09146	82.4	5.5177	17.4901	0.13355	76.9	22.1299
2.0156	0.13014	82.1	5.9558	18.0027	0.10378	82.1	22.7441
2.4941	0.12804	82.2	6.4383	18.5090	0.16100	79.3	23.7258
2.9099	0.12361	82.0	6.8454	18.9926	0.02226	126.9	24.5667
3.4115	0.09922	81.0	7.3407	19.4619	0.13389	74.6	25.1792
3.8807	0.11648	80.1	7.8487	19.9710	0.12660	74.1	25.9535
4.4760	0.06067	90.8	8.4869	20.5023	0.06847	75.5	26.3764
4.9072	0.05455	94.6	8.9156	20.9938	0.03854	88.1	26.8358
5.4990	0.10008	81.2	9.4644	21.5011	0.03716	90.5	27.3492
6.0550	0.10164	80.0	10.0267	22.0115	0.03878	86.4	28.1370
6.5226	0.07510	82.5	10.5276	22.4738	0.10389	79.7	28.6123
7.0154	0.09628	83.4	11.0213	23.0001	0.08649	87.5	29.1666
7.4366	0.06699	81.2	11.4453	23.4675	0.08530	78.2	29.6894
8.0306	0.09812	80.1	12.0471	23.9901	0.13497	72.2	30.1312
8.4619	0.11365	79.6	12.5003	24.4742	0.10558	75.2	31.3797
8.9383	0.05654	80.1	12.9908	25.0218	0.06143	76.3	32.6124
9.5300	0.08302	77.8	13.6559	25.5353	0.10047	79.3	33.1335
10.0016	0.11104	76.6	14.1457	25.9893	0.10637	80.4	33.5959
10.5922	0.06988	76.8	14.7727	26.5178	0.10877	82.9	34.0992
11.0177	0.10394	78.7	15.2102	26.9439	0.07647	83.2	34.6033
11.4867	0.08582	78.4	15.6969	27.4696	0.05467	82.0	35.1586
11.9310	0.08854	82.3	16.2704	27.9656	0.14043	80.6	36.0445
12.3873	0.06772	79.3	16.7118	28.5264	0.09254	76.6	36.6320
13.0093	0.07477	91.2	17.3309	29.0426	0.12010	75.1	37.2365
13.4248	0.06643	82.6	17.6721	29.4979	0.00681	352.7	37.9169
13.9946	0.08821	87.4	18.2285	30.0011	0.06020	56.5	38.5388
14.4804	0.09730	83.0	18.7271	30.5116	0.01782	223.9	39.6458
15.0411	0.10389	85.6	19.2817	31.0166	0.01892	139.6	40.3303
15.5315	0.13426	81.6	19.7781	31.5861	0.01806	124.6	41.1424
				32.3321			41.9165

Table II-2. Mutual impedance from the HV line to the railway line averaged for subsections of 0.5 km

Range of railway position [km]							
0.0000 to 15.9903				21.0187 to 37.0143			
Railway	Z_{mutual}		(HV-line)	Railway	Z_{mutual}		(HV-line)
x[km]	[ohm/km]	[deg]	x[km]	x[km]	[ohm/km]	[deg]	x[km]
0.0000	0.00000	0.0	0.0000	21.0187	0.09240	79.0	16.5158
0.5000	0.00000	0.0	0.0000	21.4840	0.06374	77.1	16.9813
1.3263	0.00154	8.3	0.0000	22.1095	0.06099	75.4	17.4556
1.4361	0.00189	8.0	0.0000	22.5961	0.06109	74.1	17.9106
2.0244	0.00192	7.7	0.0000	22.9609	0.07345	76.7	18.2126
2.5542	0.00295	7.5	0.0000	23.4940	0.07755	81.6	18.4794
2.8486	0.00018	86.9	0.0000	23.9622	0.08332	77.1	18.5479
3.9088	0.05093	82.0	0.0000	24.4791	0.07579	70.0	18.9405
4.0207	0.07259	78.0	0.0992	24.9657	0.05582	66.6	19.2661
4.5008	0.12840	79.5	0.5314	25.5160	0.04172	71.3	19.7371
4.9860	0.08904	80.0	1.0099	26.0117	0.04107	82.1	20.0396
5.5511	0.13956	82.4	1.6024	26.4680	0.02721	84.1	20.7292
5.9577	0.09346	81.7	2.0175	26.9339	0.02319	88.0	21.1270
6.5137	0.13458	82.2	2.5794	27.5034	0.08798	77.3	21.7106
7.0623	0.11832	82.0	3.1300	27.9337	0.08229	79.4	21.8922
7.6151	0.09883	81.1	3.6691	28.6034	0.06671	79.3	22.4650
8.0838	0.10524	80.2	4.1064	28.9934	0.10713	80.1	22.8342
8.4693	0.08799	80.3	4.4590	29.4885	0.12593	80.2	23.1808
9.0903	0.09763	80.4	5.1364	29.9940	0.05541	262.1	23.7702
9.4643	0.08197	81.1	5.4989	30.3000	0.00415	74.1	24.1907
10.0061	0.12665	79.8	6.0345	31.0250	0.05595	74.4	24.2965
10.4638	0.07785	81.2	6.4649	31.5405	0.04209	75.1	24.5569
10.9772	0.07085	82.9	6.9720	31.9419	0.05881	77.5	24.6551
11.4173	0.06371	83.7	7.4080	32.4902	0.08503	78.8	24.9094
12.0180	0.10356	84.5	7.9996	33.1336	0.08261	79.1	25.5354
12.4138	0.09679	82.8	8.3842	33.5735	0.11203	80.4	25.9627
12.9908	0.05484	84.7	8.9383	33.9783	0.08383	82.7	26.3913
13.5038	0.08845	82.8	9.4368	34.4957	0.09131	83.8	26.8538
13.9715	0.06011	75.4	9.8433	34.9278	0.04736	88.3	27.2447
14.5126	0.08478	87.8	10.3360	35.4534	0.06366	81.8	27.7390
14.9945	0.06100	77.8	10.8083	36.0446	0.01787	55.5	27.9657
15.4550	0.04408	76.8	11.2543	36.4847	0.09274	71.6	28.4596
15.9903	0.11401	79.8	11.7192	37.0143	0.06237	77.5	28.8016

Jernbanelibet
Biblioteket

JBV



09TU10479

100758