

Sindre J. Breimo, Viktor Myrvang og Malin Johanne Olsen

Bacheloroppgave



Alternative løsninger for  
sammenkobling av  
kontaktledningsanleggene på  
Dovre- og Nordlandsbanen

NTNU  
Norges teknisk-naturvitenskapelige  
universitet  
Fakultet for teknologi  
Institutt for elektrofag og fornybar energi

---

---

## Bacheloroppgave

<b>Oppgavens tittel:</b> Alternative løsninger for sammenkobling av kontaktledningsanleggene på Dovre- og Nordlandsbanen	<b>Gitt dato:</b> 13.01.16
<b>Project title:</b> Alternative solutions for interconnection between the catenary systems on the Dovre line and the Nordland line	<b>Innleavingsdato:</b> 24.05.16
	<b>Antall sider/bilag:</b> 55/5
<b>Gruppetakere:</b> Sindre Jenssen Breimo Viktor Myrvang Malin Johanne Olsen	<b>Veileder:</b> Pål Glimen <a href="mailto:pal.glimen@ntnu.no">pal.glimen@ntnu.no</a> 73559586
<b>Studieretning:</b> Elkraftteknikk	<b>Prosjektnummer:</b> E1615
<b>Oppdragsgiver:</b> Jernbaneverket	<b>Kontaktperson hos oppdragsgiver:</b> Brede Nerموen <a href="mailto:nerbre@jbv.no">nerbre@jbv.no</a> Bente Roheim <a href="mailto:bl@jbv.no">bl@jbv.no</a>

Fritt tilgjengelig

Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver

Rapporten frigitt etter

## Forord

Denne bacheloroppgaven er utført av tre studenter ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven er gjennomført i samarbeid med Jernbaneverket, og er ment som et bidrag til deres prosjekt om å elektrifisere Trønder- og Meråkerbanen. Oppgaven kan også brukes som en enkel innføring i jernbanens banestrømforsyning. For en mer detaljert beskrivelse av banestrømforsyning henvises det til hovedsiden for lærebøker i jernbaneteknikk, [www.jernbanekompetanse.no](http://www.jernbanekompetanse.no). Hensikten med prosjektet har vært å finne mulige løsninger til prosjektering av banestrømforsyning, og sammenkobling av nytt og gammel kontaktledningsanlegg.

Vi som elkraftstudenter har fått muligheten til å fordype oss i jernbaneteknikk og øke vår fagkompetanse innen elkraftteknikk. Det har vært mye nytt stoff å sette seg inn i siden jernbaneteknikk ikke er pensum på universitetet. Dette har vært tidkrevende. Vi har fått stort utbytte av å delta på seminar arrangert av Jernbaneverket, og befaring på både Stavne omformerstasjon og driftsbasen på Marienborg i Trondheim.

Vi vil gjerne takke alle som har bidratt til vårt prosjekt: Ansatte ved Jernbaneverket, Bente Roheim, Brede Nerموen, Frank Martinsen, Johan Anton Wikander, Bjørn Leirfjord, ansatte ved Stavne omformerstasjon og vår veileder ved universitetet, Pål Glimen.

Trondheim 24.05.2016

---

Sindre Jenssen Breimo

---

Viktor Myrvang

---

Malin Johanne Olsen

## Sammendrag

Det er i Trøndelag planlagt å elektrifisere Trønder- og Meråkerbanen. Her går det i dag bare dieseltog. Elektriske tog er mer moderne og miljøvennlig enn dieseltog. Ved å elektrifisere jernbanen vil infrastrukturen bli løftet da togene får større kapasitet både på person- og godstrafikk. Dovrebanen er i dag elektrifisert frem til Trondheim, og det er på denne strekningen benyttet konvensjonelt kontaktledningsanlegg med sugertransformatorsystem. Siden det ved dette systemet er store effekttap og relativt lav overføringskapasitet, skal Trønder- og Meråkerbanen elektrifiseres med nytt kontaktledningsanlegg med autotransformatorsystem. Da det i første omgang ikke er tenkt å bygge autotransformatorsystem på Dovrebanen, må disse to systemene kobles sammen.

I rapporten er det sett på hvilken type systemløsning som bør velges på strekningene Dovrebanen fra Stavne til Trondheim S, Trønderbanen fra Trondheim S til Leangen og Stavne-Leangenbanen. Dette resulterte i seks forskjellige hovedalternativer, hvor hvert alternativ har blitt vurdert ut i fra elektrotekniske og delvis økonomiske kriterier. På bakgrunn av disse vurderingene ble det konkludert at å ha autotransformatorsystem på Stavne-Leangenbanen er det mest fordelaktige. Alternativene som hadde sugertransformatorsystem på Stavne-Leangenbanen ble dermed forkastet, og det gjensto da tre hovedalternativer.

For å vise hvordan de elektriske systemene kan kobles sammen, ble det tegnet enlinjeskjemaer for de tre gjenstående alternativene. Etter videre vurdering, har det i rapporten blitt konkludert at det beste alternativet er å ha autotransformatorsystem på alle de aktuelle strekningene, uten å isolere noen strekninger fra hverandre. Begrunnelsen til dette er at sammenkoblingen mellom kontaktledningsanleggene vil skje på Stavne der det er god plass, det vil skape god redundans i anlegget og det er det mest fremtidsrettede alternativet.

## Summary

It is in Trøndelag planned to electrify the Trønder and Meråker line. Today there are only diesel trains running on these lines. Electric trains are more modern and environmentally friendly than diesel trains. By electrifying the railway, the infrastructure will be improved by the increased capacity of the passenger- and freight train traffic. The Dovre line is today electrified to Trondheim with the conventional catenary system with booster transformers. Because of this system's great power losses and relatively low energy transfer capacity, the Trønder and Meråker line will be electrified with an autotransformer system. It is not yet planned to upgrade the Dovre line with an autotransformer system, and because of this the two different catenary systems must be connected.

In this thesis it has been considered which kind of catenary systems that should be installed on the Dovre line from Stavne to Trondheim S, The Trønder line from Trondheim S to Leangen and on the Stavne-Leangen line. This resulted in six main alternatives, where each alternative was considered based on electrotechnical, and partial economical criteria. Based on these considerations, the conclusion was that installing an autotransformer system on the Stavne-Leangen line would be the most beneficial alternative. Thus the alternatives with booster transformer system on the Stavne-Leangen line was discarded, and three alternatives remained.

To show how the electrical systems can be connected, one-line diagrams were created for the three remaining alternatives. After further consideration it was concluded that installing an autotransformer system on all of the lines in question, without isolating between any of the lines, would be the best alternative. The grounds for this conclusion is that the interconnection between the catenary systems will be placed at Stavne where there is no lack of space, it creates a good redundancy in the system and that it is the alternative which is best adapted for future needs.

# Innholdsfortegnelse

FIGURLISTE .....	VII
TABELLISTE .....	VII
FAGUTTRYKK .....	VIII
<b>1 INNLEDNING .....</b>	<b>1</b>
1.1 BAKGRUNN .....	1
1.2 MÅLSETTING .....	1
1.3 AVGRENSNINGER .....	1
1.4 FORUTSETNINGER .....	2
<b>2 INNFORING I BANESTRØMFORSYNING .....</b>	<b>3</b>
2.1 ELEKTRIFISERING AV JERNBANEN .....	3
2.1.1 <i>Norge</i> .....	4
2.2 BANESTRØMFORSYNING .....	5
2.2.1 <i>Mate- og omformerstasjoner</i> .....	7
2.2.2 <i>Kontaktledningsanlegg</i> .....	12
2.3 SUGETRANSFORMATORSYSTEM .....	14
2.3.1 <i>Prinsipp</i> .....	14
2.3.2 <i>Sugetransformatoren</i> .....	15
2.3.3 <i>Systemer</i> .....	17
2.4 AUTOTRANSFORMATORSYSTEM .....	20
2.4.1 <i>Prinsipp</i> .....	20
2.4.2 <i>Historie</i> .....	20
2.4.3 <i>Systemer</i> .....	21
2.5 FORDELER OG ULEMPER MED AT- OG BT-SYSTEM .....	25
<b>3 TEKNISK .....</b>	<b>26</b>
3.1 DAGENS SITUASJON .....	26
3.2 METODE .....	27
3.3 ALTERNATIVER .....	28
3.3.1 <i>Hovedalternativ 1</i> .....	28
3.3.2 <i>Hovedalternativ 2</i> .....	29
3.3.3 <i>Hovedalternativ 3</i> .....	29
3.3.4 <i>Hovedalternativ 4</i> .....	30

3.3.5	<i>Hovedalternativ 5</i> .....	30
3.3.6	<i>Hovedalternativ 6</i> .....	31
3.4	VURDERING .....	32
3.4.1	<i>Hovedalternativ 1</i> .....	33
3.4.2	<i>Hovedalternativ 2</i> .....	35
3.4.3	<i>Hovedalternativ 3</i> .....	36
3.5	ELEKTRISK SAMMENKOBLING .....	37
3.5.1	<i>Alternativ 1 c)</i> .....	37
3.5.2	<i>Alternativ 2 b)</i> .....	38
3.5.3	<i>Alternativ 3 c)</i> .....	38
<b>4</b>	<b>KONKLUSJON OG ANBEFALING</b> .....	<b>39</b>
4.1	VIDERE ARBEID – OPPFØLGINGSPUNKTER .....	39

**VEDLEGG A: KOBLINGSSKJEMA ALTERNATIV 1C**

**VEDLEGG B: KOBLINGSSKJEMA ALTERNATIV 2B**

**VEDLEGG C: KOBLINGSSKJEMA ALTERNATIV 3C**

**VEDLEGG D: STAVNE-LEANGENBANEN**

**VEDLEGG E: POSTER**

## Figurliste

FIGUR 2-1. JERNBANEVERKETS INFRASTRUKTUR [8].....	5
FIGUR 2-2. STRØMMENS VEI FRA KRAFTVERK TIL TOG [7] .....	6
FIGUR 2-3. PRINSIPP FOR ROTERENDE OMFORMER, TREFASE TIL ENFASE [14] .....	8
FIGUR 2-4. OMFORMER MED MELLOMLEDD [6].....	10
FIGUR 2-5. KURVEFORLØP FRA EN OMFORMER MED MELLOMLEDD [6] .....	11
FIGUR 2-2-6. KONTAKTLEDNINGSANLEGG MED SUGETRANSFORMATORSYSTEM [8] .....	12
FIGUR 2-7. KOBLINGSBILDE AV KONTAKTLEDNINGSANLEGGET [6] .....	13
FIGUR 2-8. SKISSE OVER STRØMVEI .....	14
FIGUR 2-9. Plassering av sugetransformator .....	15
FIGUR 2-10. PRINSIPP FOR RETURSTRØM, SYSTEM A.....	17
FIGUR 2-11. PRINSIPP FOR RETURSTRØM, SYSTEM B.....	17
FIGUR 2-12. PRINSIPP FOR RETURSTRØM, SYSTEM C.....	18
FIGUR 2-13. PRINSIPP FOR RETURSTRØM, SYSTEM D.....	18
FIGUR 2-14. AT-SYSTEM MED ENKEL AT .....	21
FIGUR 2-15. AT-SYSTEM MED DOBBEL NL.....	22
FIGUR 2-16. AT-SYSTEM MED CUS.....	23
FIGUR 2-17. AT-SYSTEM MED NEGATIV- OG POSITIV LEDER OG SEKSJONERT KL-ANLEGG .....	23
FIGUR 3-1. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 1 .....	28
FIGUR 3-2. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 2 .....	29
FIGUR 3-3. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 3 .....	29
FIGUR 3-4. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 4 .....	30
FIGUR 3-5. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 5 .....	30
FIGUR 3-6. FORENKLET SKISSE AV HOVEDALTERNATIV 6 .....	31

## Tabelliste

TABELL 1. ORDFORKLARING AV FAGUTTRYKK.....	VIII
TABELL 2. VURDERING AV HOVEDALTERNATIV 1.....	34
TABELL 3. VURDERING AV HOVEDALTERNATIV 2.....	35
TABELL 4. VURDERING AV HOVEDALTERNATIV 3.....	36



# Faguttrykk

Tabell 1. Ordforklaring av faguttrykk

Begreper	Forkortelse	Forklaring
<b>Autotransformator-system</b>	AT-system	Et type kl-anlegg som overfører strøm med spenning 30 kV, der autotransformatorer transformerer spenningen ned til 15 kV for kontaktledningen (i Norge).
<b>Autotransformator</b>	AT	Transformator der primær- og sekundærvikling er galvanisk sammenkoblet. Autotransformatorene som benyttes for autotransformatorsystem er tofasede med omsetning +/-15 kV.
<b>Banestrøm</b>		Den elektriske strøm som brukes til fremdrift og oppvarming av tog.
<b>Beskyttelsesjord</b>		Varig ledende forbindelse fra utsatte anleggsdeler til jord eller andre ledende gjenstander som i seg selv har god jordforbindelse. Beskyttelsesjordnettet skal sikre beskyttelse av mennesker mot fare som kan oppstå ved berøring av spenningsførende anleggsdeler eller anleggsdeler som kan bli spenningsførende som følge av feil.
<b>Bæreline</b>		En line av elektrolyttkopper som ”bærer” hengetråd og kontakttråd.
<b>Current unbalance suppression</b>	CUS	Benyttes i utredninger fra Varju EMC som betegnelse på sugetransformator i PL og NL.
<b>Dødseksjon</b>	DS	En kort seksjon som utkoblet hindrer strømvaktaker i å sammenkoble to matestasjoner.

<b>Elektro-magnetisk sameksistens</b>	EMC	Utstyrs evne til å fungere tilfredsstillende i sin sone, uten å forårsake utålelig elektromagnetisk forstyrrelse på annet utstyr innenfor samme sone.
<b>Filter</b>		Fellesbetegnelse for filterimpedans, impedansspole eller annet filter som høyohmig for sporfeltstrømmen og lavohmig for $16 \frac{2}{3}$ Hz. Det skal være i stand til å, i en nærmere spesifisert tid, føre strømmer under unormale forhold.
<b>Filterimpedans, impedansspole</b>		Filter som sperrer for signalstrøm og slipper banestrøm igjennom.
<b>Fjernledning</b>	fjl	En $16 \frac{2}{3}$ Hz 2-fase linjeføring fra omformerstasjon eller kraftstasjon med spenningsnivå på eks: 55, 66 eller 132 kV til transformatorstasjon. Kan fremføres på egen trasé og nye forlengede kontaktledningsmaster.
<b>Forbigangsledning</b>	fl	Ledning som fører banestrøm forbi en stasjon eller en seksjon.
<b>Hengetråd</b>		En elektrolyttkoppertråd, festet i Bærelinen, som bærer kontaktråden.
<b>Impedansspole</b>		Se filterimpedans.
<b>Isolasjonspunkt</b>		Sted et kontaktledningsanlegg isoleres fra et annet.
<b>Isolert skjøt</b>		Skinneskjøt som gir elektrisk isolering fra en skinne til den tilstøtende skinne.
<b>Koblingsanlegg</b>		Bryterarrangement med vern, for mateledning. Anlegget er plassert i omformerstasjon eller koblingshus.
<b>Koblingshus</b>		Benyttes som matepunkt (se koblingsanlegg), eller for sammenkobling av kontaktledningsanlegget.

<b>Kontaktledning</b>	kl	Bæreline, hengetråder og kontakttråd.
<b>Kontaktledningsanlegg</b>	kl-anlegg	Komplette ledningsanlegg med fundamenter, ledninger, kabler, master, utliggere, åk, fester, brytere, sugetransformatorer, impedansspoler, skinneforbindere og jordinger etc.
<b>Kontaktledningsbryter</b>		Skillekniv i kontaktledningsanlegget.
<b>Kontakttråd</b>	kt	Tråd som er opphengt over sporet, og som strømvaktakerens kontaktstykker glir mot.
<b>Likeretter</b>		Et apparat som omformer vekselspanning til likespenning.
<b>Mateledning</b>	ml	En ledning eller kabel som fører strøm fra matestasjon til kontaktledning.
<b>Matepunkt</b>		Tilkoblingspunkt for matekabel eller mateledning til kontaktledning.
<b>Matestasjon</b>	mst	En felles betegnelse for krafttransformator, kraftverk, omformerstasjon eller koblingshus som forsyner kontaktledningsanlegg med banestrøm.
<b>Nedføring</b>		Sammenkobling mellom returledningen og skinnene i et sugetransformatorsystem.
<b>Negativleder</b>	NL	En leder med -15 kV relativt til skinnegang/jord, 30 kV mot PL.
<b>Nordre tilsving</b>		Den nordligste svingen som går mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen.
<b>Nullfelt</b>		Kort, elektrisk seksjonert del av kjøreskinne som kan ha forbindelse til returkretsen via midtuttaket på en sugetransformator.

<b>Nullskinne</b>		Skinnen som ligger i nullfeltet mellom de isolerte skjøtene.
<b>Omformerstasjon</b>		En installasjon som omformer frekvensen fra 50 Hz til 16 $\frac{2}{3}$ Hz.
<b>Omkoblingspunkt</b>		Sted hvor det kobles om mellom AT- og sugetransformatorsystem.
<b>Overgangsimpedans</b>		Sammensettingen av impedansen mellom skinner og ballast, mellom ballast og jord og resistiviteten til jordsmonnet.
<b>Overføringsspenning</b>		Spenningen i energioverføringen mellom omformerstasjonene og kontaktledningsanlegget.
<b>Positivleder</b>	PL	En leder med +15 kV relativt til skinnegang/jord, 30 kV mot NL.
<b>Returledning</b>	rl	Ledning som er parallellkoblet skinne for å redusere banestrømmen i den.
<b>Returstrømkrets</b>		Strømkretsen som banestrømmen gjennomløper fra forbruker til matestasjon.
<b>Roterende omformer</b>		Konvensjonell frekvensomformerstasjon, som i de fleste tilfeller er transportable. Omformer frekvensen fra 50 Hz til 16 $\frac{2}{3}$ Hz vha. en motor tilkoblet en generator via en felles aksel.
<b>Seksjon</b>		Del av kontaktledning som ved hjelp av bryter kan skape et elektrisk skille mellom to deler av kontaktledningen.
<b>Seksjonering</b>		Elektrisk oppdeling av kontaktledningen.

<b>Signalanlegg</b>		Samlebetegnelse for sikringsanlegg, linjeblokk, veisikringsanlegg, fjernstyringsanlegg, skiftestillverk, m.m.
<b>Signalkabler</b>		Kabler benyttet i signalanleggene, spenning opp til 230 V med strøm/sikring mindre enn 10 A.
<b>Skinnebryter</b>		Bryter for kortslutning av en sugetransformators sekundærvikling.
<b>Sonegrensebryter</b>		Automatisk virkende 3-polet effektbryter for dødseksjon mellom to matestasjoner. Benyttes for automatisk seksjonering.
<b>Sporfelt</b>		En elektrisk krets hvor skinnene i en seksjon av sporet er en del av kretsen.
<b>Statisk omformerstasjon</b>		Stasjonær frekvensomformerstasjon (50 Hz til 16 2/3 Hz) basert på moderne kraftelektronikk. Hovedkomponentene er likerettere koblet i serie med vekselrettere.
<b>Strømvaktaker</b>		Innretning på elektrisk materiell som fører strømmen fra kontakttråden til trekraftenhet.
<b>Sugetransformator</b>		En strømtransformator med omsetningsforhold 1:1 med primærvikling for kontaktledningsstrømmen og sekundærvikling for returstrømmen. Sugetransformatoren bidrar til å styre returstrømmen til å følge jernbanetraséen.
<b>Sugertransformator-system</b>	BT-system	Et type kl-anlegg der sugetransformatorer sørger for å unngå at returstrømmen lekker ut av skinnene og ned i jordsmonnet.
<b>Søndre tilsving</b>		Den sørligste svingen som går mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen.

<b>Tosidig mating</b>		Her: Mating av energi til et punkt fra både Dovrebanen og Nordlandsbanen. Dette for å oppnå redundans.
<b>Transformatorstasjon</b>		(Her: I forbindelse med en Fjernledning) En transformatorstasjon som forsyner kontaktledningsnettet med energi. Transformatorstasjonen forsynes selv med energi fra en omformerstasjon eller en kraftstasjon via en fjernledning.
<b>Vekselretter</b>		Et apparat som bruker styrte halvledere, krafttransistorer eller slukkbare tyristorer for å produsere vekselspanning fra en likespenning.
<b>Utligger</b>	utl	Konstruksjon som bærer kontaktledningen og som er isolert fra festepunktene.
<b>Åk</b>		Konstruksjon av stål med mast i hver ende for opphenging av kontaktledning.

[1]

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Regjeringen med daværende samferdselsminister Marit Arnstad besluttet i april 2013 at Meråker- og Trønderbanen skulle elektrifiseres. Trønderbanen er den delen av Nordlandsbanen som går fra Trondheim til Steinkjer. Dette er det første elektrifiseringsprosjektet av Jernbaneverkets ”hovedlinjer” siden 1972. Det skal bygges om lag 200 km med kontaktledningsanlegg, og nye omformerstasjoner på Hell og Steinkjer. Prosjektet er antatt å koste ca. tre milliarder kroner. Byggingen skal foregå i tre etapper og har byggestart i 2017. Trønderbanens strekning Trondheim-Stjørdal, inkludert Stavne-Leangenbanen, skal elektrifiseres først. Etter det skal Stjørdal-Steinkjer elektrifiseres, og til slutt Meråkerbanen fra Hell-Storlien. En forutsetning for prosjektet er at det skal bygges kontaktledningsanlegg med autotransformatorsystem på Nordlandsbanen. Prosjektet skal avsluttes innen 2023 [2]. Med økt behov for infrastruktur i Trøndelag, er dette et viktig og samfunnsnyttig prosjekt. Jernbanestrekningen som kommer sørfra og inn til Trondheim er allerede elektrifisert. Denne strekningen heter Dovrebanen og benytter konvensjonelt kontaktledningsanlegg med sugetransformatorsystem.

## 1.2 Målsetting

Rapporten skal gi underlag for valg av beste alternativ for sammenkobling av kontaktledningsanlegg med autotransformator- og sugetransformatorsystem. Den skal anbefale hvilket type kontaktledningsanlegg som bør velges på de forskjellige strekningene. Det er forutsatt at det på Dovrebanen inntil videre er sugetransformatorsystem, og at det skal bygges autotransformatorsystem på Nordlandsbanen. I tillegg skal rapporten være en enkel innføring i jernbanens banestrømforsyning ved å forklare hvordan deler av det elektrotekniske fungerer.

## 1.3 Avgrensninger

Det vil legges vekt på det elektrotekniske fremfor økonomiske utgifter, areal og mekaniske problemstillinger på strekningene. Strekningene som er tatt med i vurderingen er Stavne-Leangenbanen, Dovrebanen fra Stavne til Trondheim S og Nordlandsbanen fra Trondheim S

til Leangen. Eventuell elektrisk løsning for sammenkobling av systemer vil ikke tegnes i skala eller simuleres.

## 1.4 Forutsetninger

For å gjøre de nødvendige vurderingene, er det punktvis oppsummert forutsetninger nedenfor:

- Teknisk regelverk for banestrømforsyning og prosjektering av autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning skal følges [3] [4].
- Nytt kontaktledningsanlegg på Trønder- og Meråkerbanen skal benytte autotransformatorsystem.
- Eksisterende kontaktledningsanlegg på Dovrebanen benytter sugetransformatorsystem.
- Redundans mellom omformerstasjonene for å oppnå best mulig effektflyt.
- Færrest mulig omkoblingspunkter for mindre vedlikehold og eventuelle feilkilder.
- Samme antall spor som i dag.



## 2 Innføring i banestrømforsyning

### 2.1 Elektrifisering av jernbanen

Det første elektriske lokomotiv for bruk ved persontransport, ble vist allerede i 1835 på en utstilling i Springfield, Massachusetts. Lokomotivet var konstruert av Thomas Davenport, og nyttet galvaniske elementer for elektrisk kraft. Men grunnlaget for elektrisk jernbanedrift kom først etter oppfinnelsen av dynamomaskinen. I Berlin 31.mai 1879 presenterte Werner von Siemens et elektrisk lokomotiv som benyttet 150 V likestrøm [5].

Under den XIII Internasjonale Jernbane Kongress i Bern i 1910 ble det diskutert hvilket type system som var best egnet til elektrifisering av jernbane. Det ble ingen enighet, noe som førte til at de ulike landene valgte sine egne systemer. Tyskland besluttet i 1912 å benytte enfase vekselstrøm 15 kV og  $16 \frac{2}{3}$  Hz. Årsaken til den lave frekvensen var at det i starten var traksjonsmotorens driftsstabilitet som var utslagsgivende for valg av system for overføring av elektrisk kraft. På den tiden ble motorutstyret for plasskrevende ved høyere frekvenser. For å gi lokomotivet de riktige trekkegenskapene, var enfase seriekommutatormotoren velegnet. Denne motortypen var imidlertid vanskelig å få til å kommutere tilfredsstillende over hele hastighetsområde når frekvensen er 50 Hz. Motoren fikk lett store gnistdannelser på kommutatorene og store skader til følge. Disse problemer var vesentlig lettere å håndtere ved  $16 \frac{2}{3}$  Hz [5].

Frankrike begynte med utbygging av enfase 20 kV og 50 Hz etter andre verdenskrig. Elektrifiseringen med 50 Hz ble vellykket og på den XVI Internasjonale Jernbane Kongress i London i 1954 ble konklusjonen at fordelene med vekselstrøm var klare. Tyskland valgte å fortsette med  $16 \frac{2}{3}$  Hz enfase 15 kV på grunn av tidligere inngåtte avtaler, mens Storbritannia bestemte seg for at fremtidig elektrifisering skulle skje ved 50 Hz enfase 25 kV. Dette systemet ble også brukt av landene som elektrifiserte i etterkant av denne kongressen [5].

### 2.1.1 Norge

Oslo fikk elektrisk sporvei i 1894, Bergen i 1897 og Trondheim i 1902. Den første jernbane for elektrisk drift i Norge var den privateide Thamshavnbanen som ble åpnet i 1908. Det ble benyttet enfase vekselstrøm med 6,6 kV og 25 Hz. Andre vekselstrømbaner på den tiden valgte 16  $\frac{2}{3}$  Hz [5].

Den første banen som NSB elektrifiserte var Drammensbanen i 1922. De valgte å bruke enfase vekselstrøm med 16  $\frac{2}{3}$  Hz, og spenning på 15 kV. Det var i starten ikke mulig å ha frekvensomformere direkte mellom trefasenettet og kontaktledningsnettet, grunnet store spenningsvariasjoner og lastspenninger i trefasenettet. Kraften til Drammensbanen måtte produseres i eget kraftverk, Hakavik. I senere tid har koblinger av omformeraggregater til regionalnettet (50 Hz) blitt brukt fremfor bygging av egne kraftstasjoner for 16  $\frac{2}{3}$  Hz. Dette er et teknisk aspekt som skiller norsk jernbane fra resten av verden [6].

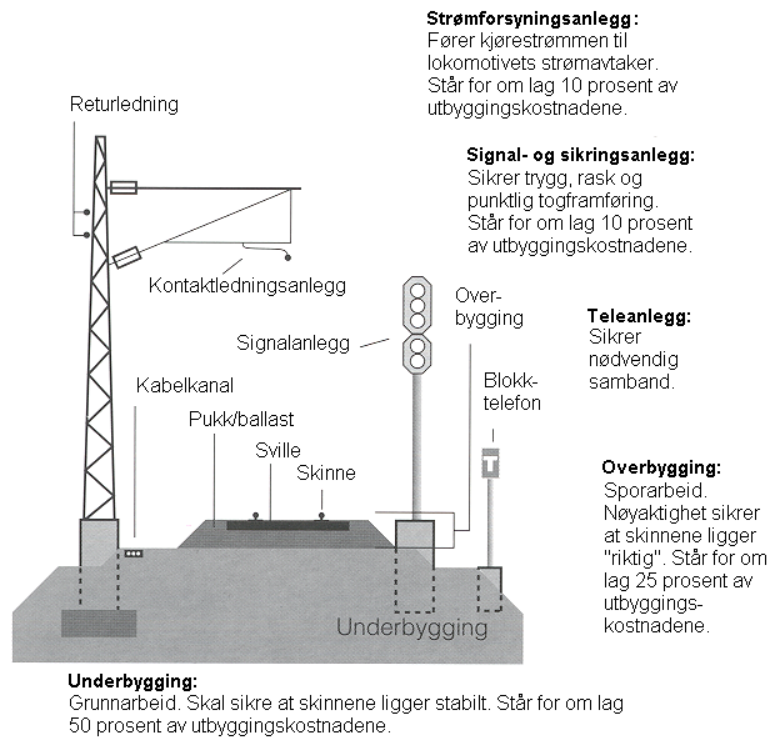
Strømsystemet til jernbanen som benyttes i Norge i dag er fremdeles enfase vekselstrøm med 15 kV og 16  $\frac{2}{3}$  Hz. Tyskland, Østerrike, Sveits og Sverige begynte også å elektrifisere Jernbanen tidlig på 1900-tallet, og benytter fortsatt samme spenning og frekvens som Norge. Land som begynte elektrifiseringen senere, som for eksempel England, Danmark, Finland og deler av Frankrike, benytter 25kV og 50 Hz. Ved elektrifisering av hovedbaner i andre land blir det i hovedsak benyttet enfase vekselspenning med frekvens 50 Hz. Siden dette er den samme frekvensen som de lokale kraftverkene leverer, gir det en enklere og billigere strømforsyning. Med nye krav til høyhastighetstog er det også behov for mer effekt. Ved å øke spenningen og gå over til vekselstrømforsyning, kan effektkravet tilfredsstilles uten å øke strømmene for mye. Valg av 16  $\frac{2}{3}$  Hz er ikke lenger aktuelt både fordi det krever et eget forsyningssystem, og fordi utviklingen innenfor kraftelektronikken gjør at en lav frekvens ikke lenger er nødvendig av hensyn til trekkmateriellet. Det er utført et studie for å se om det ville lønne seg å bytte til 50 Hz enfase 25 kV i Norge, men dette var ikke lønnsomt i henhold til nytte-kostnadsanalyser som ble utført. Etter dette studiet ble det besluttet at det i Norge fortsatt skulle benyttes 16  $\frac{2}{3}$  Hz enfase 15 kV system for banestrømforsyningen [6].

## 2.2 Banestrømforsyning

Det er i Norge 2500 km av det statlige jernbanenettet som er elektrifisert. Om lag 80 prosent av jernbanetrafikken skjer med elektriske tog [7].

Jernbaneverkets infrastruktur kan deles inn i følgende områder [8]:

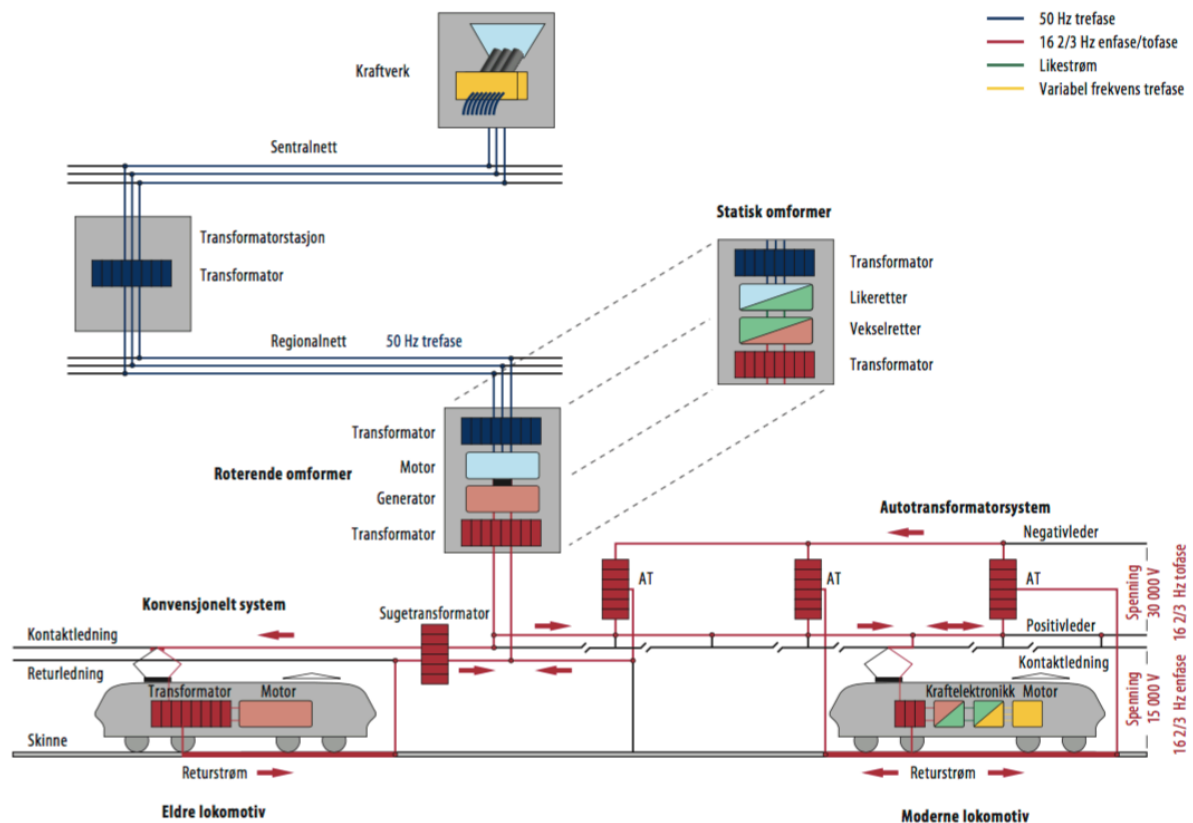
- Strømforsyningsanlegg
- Signal- og sikringsanlegg
- Teleanlegg
- Spor –geoteknikk, under- og overbygning



Figur 2-1. Jernbaneverkets infrastruktur [8]

Strømforsyning kan deles inn i:

- Mate- og omformerstasjoner
- Kontaktledningsanlegg
- Lavspenningsanlegg



Figur 2-2. Strømmens vei fra kraftverk til tog [7]

Kontaktledningsanlegget, heretter kalt kl-anlegg, er i denne inndelingen en del av strømforsyningen. Banestrømforsyning består av mate- og omformerstasjoner, kl-anlegg og lavspenningsanlegg. Lavspenningsanlegg omfatter blant annet, lys, varme og signalanlegg, togvarme, sporvekselvarme og fjernkontroll for styring av brytere. Det benyttes elkraftsentraler for å overvåke matestasjonene og kl-anlegget. Disse sentralene kobler også ut og inn brytere slik at strømforsyningsanleggene kan vedlikeholdes uten å forstyrre togtrafikken. I dag finnes disse sentralene i Oslo, Drammen, Kristiansand, Bergen, Fron og Trondheim [7].

### 2.2.1 Mate- og omformerstasjoner

En matestasjon er et tilkoblingspunkt til kl-anlegget hvor det blir tilført effekt. Den elektriske energien mates til kl-anlegget via tre ulike typer matestasjoner [7]:

- Kraftverk
- Omformerstasjoner
- Transformatorstasjoner

Det er i Norge to spesialbygde vannkraftverk (Kjosfoss i Aurland kommune og Hakavik i Øvre Eiker kommune) som leverer  $16 \frac{2}{3}$  Hz direkte inn på kl-anlegget. Det resterende energibehovet blir dekket av omformerstasjoner som omformer kraftnettets 50 Hz til  $16 \frac{2}{3}$  Hz. Omformerstasjonene og kraftstasjonene kan mate inn på kl-anlegget ved hjelp av koblingshus, eller inn på høyspente fjernledninger med spenningsnivå 55 kV. Disse fjernledningene er tilkoblet kl-anlegget ved hjelp av transformatorstasjoner. Matestasjonene leverer normalt ut en spenning på 16,5 kV. Det er høyere enn den nominelle spenningen, og gjøres for å kompensere for deler av spenningsfallet som kan oppstå mellom matestasjon og tog. Totalt eier Jernbaneverket Bane Energi 34 omformere, fem transformatorstasjoner og ett kraftverk (Kjosfoss) som forsyner jernbanenettet med  $16 \frac{2}{3}$  Hz. I tillegg eier Statnett Hakavik kraftverk [6].

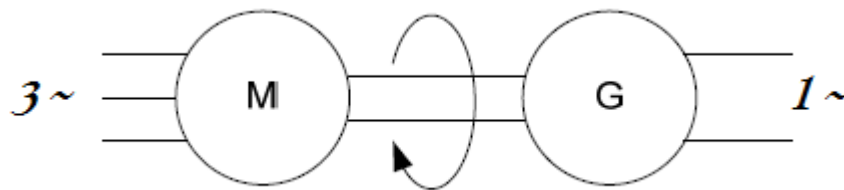
Avstand mellom matestasjoner varierer fra type kl-anlegg. Vanlig avstand med sugetransformatorsystem er 20 til 80 km, mens det med autotransformatorsystem er tatt utgangspunkt i 120 km for å få en akseptabel spenning. Effektbehovet bestemmes av antall tog som trafikkerer banestrekningen, togets hastighet og tyngde i tillegg til banens stigning og fall [3].

En omformerstasjon består ofte av to til tre omformeraggregater som kan startes og stoppes for å oppnå best mulig driftssikkerhet og energiøkonomi. Rundt to tredjedeler av omformeraggregatene er plassert på jernbanevogner slik at kapasiteten kan tilpasses endringer i effektbehovet. Ved å bytte et omformeraggregat med et reserveaggregat, reduseres også tiden omformerstasjonen har redusert kapasitet ved større reparasjoner og revisjoner. En transportabel omformer består av en omformervogn, en apparatvogn med styreutrustning og gjerne en transformatorvogn for tilkobling til det lokale elektrisitetsverket.

Det finnes både roterende og statiske omformerstasjoner. Innkommende spenning til omformerstasjonene kan være fra 11 til 130 kV, men er vanligvis enten 47 eller 60 kV. Det finnes to ulike prinsipper for omforming av frekvens som brukes i Jernbaneverket i dag. Den eldste typen er betegnet som roterende, og den nye som statisk. Statiske omformere baserer seg på kraftelektronikk. Kraftelektronikkens oppgave er å likerette og vekselrette spenningen slik at det blir ønsket frekvens på utgangssignalet. Omformerstasjonene har i tillegg til selve omformerene en krafttransformatorer, filter og bryteranlegg for både enfase- og trefasesiden, med batterianlegg og kontrollutstyr [6].

### 2.2.1.1 Roterende omformere

En roterende omformer brukes for å endre frekvensen på en vekselspenning. Den består i hovedsak av en generator og en motor som er koblet på samme aksling, se figur 2-3. Motoren drives av en nettspenning med en gitt frekvens, og drar så rundt generatoren som genererer en ny vekselspenning. Siden motor og generator er koblet på samme aksling, har de samme turtall. Ved å ha forskjellig antall polpar på motor og generator, vil dermed frekvensen på vekselspenningen endre seg. Se formel 1 og 2.



Figur 2-3. Prinsipp for roterende omformer, trefase til enfase [14]

Turtallet til en motor eller generator er gitt av formelen:

$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (1)$$

Der:                f=frekvensen  
                       n=nominelt turtall  
                       p=antall polpar

Forholdet mellom frekvensen på spenningen ut av generator og frekvensen på spenning inn på motor er gitt av formelen:

$$f_{gen} = \frac{f_{mot}}{(p_{mot}/p_{gen})} \quad (2)$$

Der:  $f_{gen}$ =frekvensen på spenning ut fra generator  
 $f_{mot}$ =frekvensen på spenning inn på motor  
 $p_{gen}$ = polpar generator  
 $p_{mot}$ =polpar motor

De roterende omformerene Jernbaneverket bruker i dag er av typen vist ovenfor. En transformator transformerer ned nettspenningen til 6,3 kV som så går inn på en trefase motor med 6 polpar. Trefasemotoren er videre koblet på samme aksling som en enfase generator med 2 polpar. Dette polforholdet gjør at frekvensen blir gjort om fra nettspenningen på 50 Hz, til  $16 \frac{2}{3}$  Hz (se formel 2) som jernbanen bruker på kl-anlegget. Enfasespenningen som kommer fra generatoren transformeres så opp til omentrent 16,5 kV, før den går via et koblingsanlegg og ut på kl-anlegget.

Ved start av omformeren anvendes en såkalt asynkron start. Motoren har massive rotorpoler hvor virvelstrøm genereres under oppstart. Disse virvelstrømmene gir opphav til det vridende momentet som kreves for å starte. Når rotoren etter akselerasjonsforløpet, ca. ett minutt, kommer i nærheten av synkronturtall, rykker motoren automatisk inn i synkron drift.

Det finnes flere størrelser av de roterende omformerne. Noen er transportable, mens andre er stasjonære. Hver transportabel omformerutrustning består av tre vogner; omformer-, apparat- og transformatorvogn. I de fleste av omformerstasjonene står det to aggregater. Dette er ikke bare fordi energibehovet nødvendigvis er så stort at det trengs to, men også på grunn av krav til redundans i systemet. Når en generator er i paralleldrift må det hindres at ett av aggregatene tar på seg for stor andel av lasten i omformerstasjonen. Derfor blir aggregatene regulert ved hjelp av spenningsregulatorer. Imidlertid, kan omformere kortvarig sterkt overbelastes. Roterende omformere kan i kortere perioder overbelastes til 150-200% av

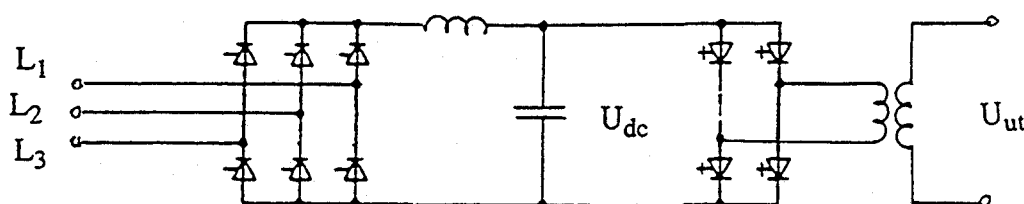
nominell ytelse for å forsyne varierende behov i banestrømforsyningen. Eksempelvis kan det nevnes at 10 MVA omformere kan belastes med 19 MVA i ett minutt.

Hele Jernbaneverkets kontaktledningsnett er sammenkoblet på enfasesiden. Resistivt og reaktivt spenningsfall i kl-anlegget gjør det mulig å drive stasjonene med samkjøring. Det foregår også samkjøring mellom Norge og Sverige [6].

### 2.2.1.2 Statistiske omformere

Det finnes to typer statiske frekvensomformere. Mellomleddsomformere og direkteomformere. I Norge er det bare bygget mellomleddsomformere, og av den grunn er ikke direkteomformere nærmere beskrevet.

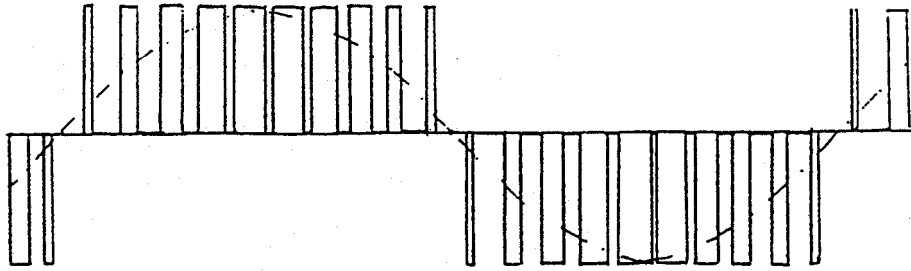
Mellomleddsomformer kalles også pulsomformer (PWM). Med pulsomformer likerettes først trefase spenningen om til en likespenning (mellomleddet), og deretter til vekselspanning. En ulempe med denne omformertypen er at den er følsom for overstrømmer, og dermed vanskelig å verne. Trefasenettet og enfasenettet blir skilt fra hverandre ved hjelp av et mellomliggende likespenningssystem. Dette gir fordeler blant annet når det gjelder tilbakevirkning på trefasenettet og overharmoniske strømmer. Det er et filter i mellomleddet i tillegg til et på en- og trefasesiden for å redusere disse strømmene. For å kunne mate tilbake på trefasenettet må denne omformeren ha en vekselretter på trefasesiden. For denne type omformer benyttes i dag GTO-tyristorer (slukkbare tyristorer). Denne halvlederen tåler begrenset spenningspåkjenning, og det benyttes derfor transformatorer på både en- og trefasesiden for å begrense spenningsnivået. For å klare å overføre ønsket effekt med de tilgjengelige GTO-tyristorene, må vekselretteren parallellkobles. Det utnyttes også for å bedre kurveformen på enfasesiden.



Figur 2-4. Omformer med mellomledd [6]



Med en pulsomformer blir strømmen på enfasesiden helt uavhengig av trefasestrømmen. Det kommer frem i figur 2-5 hvordan sinusen blir bygget opp av firkantpulser med ulik varighet. Spenningsnivået på toppen i firkantspenningen er gitt av spenningen på mellomledet.

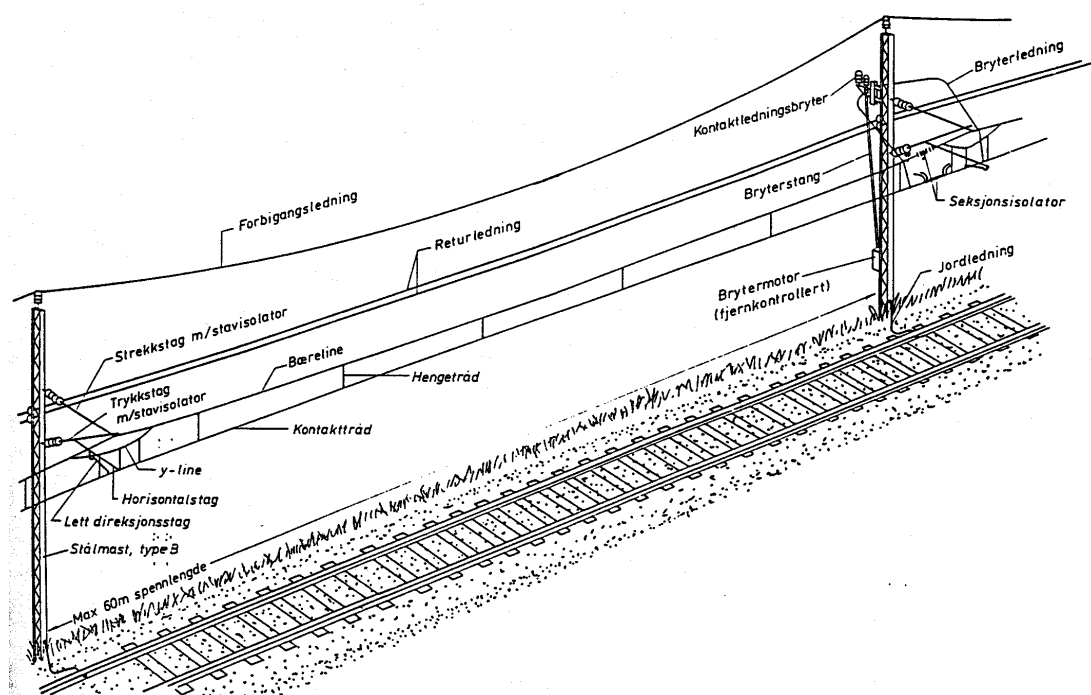


**Figur 2-5. Kurveforløp fra en omformer med mellomledd [6]**

### 2.2.1.3 Transformatorstasjoner

Transformatorstasjonene står mellom fjernledninger med  $16 \frac{2}{3}$  Hz, og en høyere spenning enn 15 kV. Disse transformerer spenningen til 15 kV, og mater ut på kontaktledningen som forsyner toget. Formålet med fjernledninger og transformatorstasjoner er å kunne overføre større effekter over lengre strekninger uten for store tap [6].

## 2.2.2 Kontaktledningsanlegg



Figur 2-2-6. Kontaktledningsanlegg med sugetransformatorsystem [8]

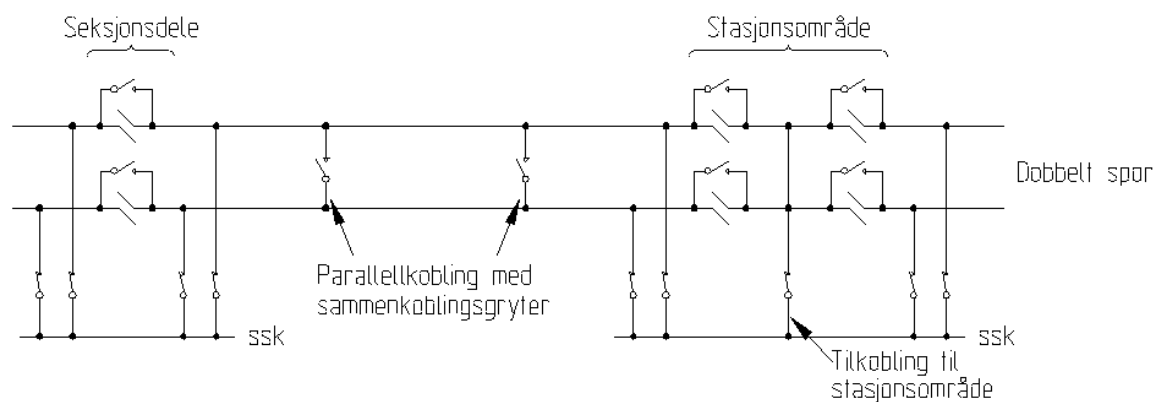
Kl-anlegget har som oppgave å sørge for overføring av energi fra stedet hvor omformerstasjonen er tilkoblet kl-anlegget, frem til forbruker, og tilbake til omformerstasjonen. Det stilles store krav om jevn og ubrutt effektlyt til kl-anlegget. I grensesnittet mellom forbruker og kl-anlegg er det strømvokterens samarbeid med ledningen som sikrer en god energioverføring. Kl-anlegget er fellesbetegnelsen på komponentene som er nødvendige for å få energioverføring fra matepunkt til forbruker. Komponentene består i grove trekk av forskjellige ledninger, elektriske komponenter, master og mastefundamenter, utliggere og åk [8].

For å unngå skade på det elektriske anlegget ved eventuelle feil og kortslutning, overvåkes det kontinuerlig av automatiske vernreléer. På vernutrustningens utløsningssignal kan kraftige effektbrytere i løpet av et tiendedels sekund bryte en kortslutningsstrøm og gjøre anlegget spenningsløst.

Utdypende informasjon om de to forskjellige typene kl-anlegg, sugetransformatorsystem og autotransformatorsystem, som blir benyttet i Norge er beskrevet henholdsvis i 2.3 og 2.4.

### 2.2.2.1 Seksjonering av kontaktledningsanlegget

På jernbanen opereres det ofte med seksjonerte anlegg. Med seksjonering menes det å dele opp kontaktledningen i flere seksjoner. Det er flere fordeler med å seksjonere kl-anleggene. I kapittel 2.4 blir fordelene med seksjonert kl-anlegg i autotransformatorsystem nærmere forklart. Seksjonering er også bra for vedlikehold av kl-anlegget. Det seksjoneres for at strømmen skal kobles ut på så korte strekninger som mulig, som gjør at toggangen blir minst mulig berørt. Når folk arbeider ute på linjen blir det også små muligheter for at de kommer i farlig nærhet av spenningsførende ledninger.



Figur 2-7. Koblingsbilde av kontaktledningsanlegget [6]

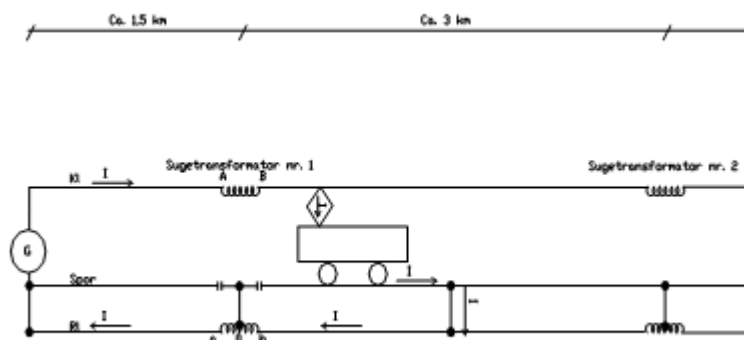
Figur 2-7 viser hvordan kl-anlegget er samkjørt. Samleskinnene, SSK i figuren, inngår i koblingsanlegg i enten koblingshus eller matestasjoner. I vanlig drift når anleggene samkjørt. Da er kontaktledningsbryterne, bryterne utenfor seksjonsdelene, koblet ut. Dette gjør at anlegget er elektrisk sammenkoblet over samleskinnene. Det samme gjelder for stasjonsområder med koblingsanlegg. Dersom koblingsanlegget er ute av drift, kan strekningen sammenkobles via kontaktledningsbrytere som legges inn. Utenfor noen koblingsanlegg, særlig de i omformerstasjoner, er det ofte en dødseksjon mellom tilkoblingene fra samleskinnen. På stasjonsområder uten koblingsanlegg går det ofte en forbigangsledning fra den ene siden av seksjonsdele til den andre. Denne er koblet til kl-anlegget med kontaktledningsbrytere. Dette gjøres for å kunne ha trafikk på strekningen selv om stasjonsområdet er spenningsløst. Parallellkoblingen av dobbeltspor foretas der hvor det er langt mellom matestasjonene. Dette gir en tettere elektrisk sammenkobling av sporene. Mellom flere av omformerstasjonene er det sonegrensebrytere. Disse gir en mulighet for å dele opp nettet og kunne kjøre omformerstasjonene uten samkjøring [9].

## 2.3 Sugetransformatorsystem

Alle bilder, og mye av stoffet i kapittel 2.3 er hentet fra Jernbanekompetanse.no [8] [10]. Dette stoffet blir ikke referert til noe nærmere, da det gjøres her. Er stoffet hentet fra andre steder, blir det referert til som vanlig.

### 2.3.1 Prinsipp

Sugetransformatorsystem, heretter kalt BT-system, er et type kl-anlegg som brukes for å forsyne tog med elektrisk energi via kontaktledning. I et BT-system går tilbakeføring av returstrøm til omformer først og fremst i skinnene ved hjelp av sugetransformatorer og impedansspoler. Sugetransformatoren er nærmere beskrevet i kapittel 2.3.2. For å få en kontrollert tilbakeføring av returstrømmen, blir togskinnene parallellkoblet med to langsgående returledninger. Der det forekommer store banestrømmer kan ledningsevnen i skinnen bli for liten. Dette gjør at returstrømmen søker til andre mulige ledende forbindelser. Dette kan være kabler tilhørende elkraftforsyning eller televerket. Returstrømmen kan påføre disse ledende forbindelsene store forstyrrelser og skader.



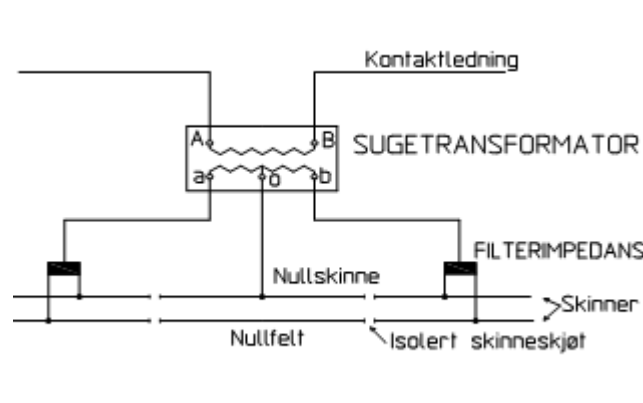
Figur 2-8. Skisse over strømvei

I figur 2-8 er det vist hvordan strømkretsen i BT-systemet er med returledning. Returstrømmen går i skinnene der det er delvis, eller ingen returledning. Prinsippet blir fortsatt det samme. I realiteten vil det være lekkstrømmer i tillegg. Disse er ikke tegnet inn i skissen, men blir nærmere forklart i 2.3.2 og 2.3.3.

Oppgaven til returkretsen er å frakte strømmen som forsyner toget via kontaktledningen, tilbake til matepunktet den kom fra. Da returkretsen skal føre omtrent like stor strøm som

kontaktledningen, er det viktig at den har like stor strømføringsevne som kontaktledningen. Dette er viktig fordi om returkretsen brytes kan det få store konsekvenser. Strømmen vil gå via jord og vil kunne gå i for eks. vannrør eller gjerder, samt ødelegge signalkabler og lignende. Det er brannfare i returledningen om den er dimensjonert for liten, og i eventuelle ledninger som strømmen vil gå gjennom via jord. Om det skulle være dyr eller mennesker i nærheten, kan deres liv være i fare om returkretsen brytes. Med tanke på dette forbyr Teknisk regelverk å ha brytere eller sikringer i returkretsen da disse vil bryte kretsen om de blir aktivert.

### 2.3.2 Sugetransformatoren



**Figur 2-9. Plassering av sugetransformator**

”Sugetransformatoren benyttes i kl-anlegget for å redusere den delen av returstrømmen som går i jord og til å tvinge strømmen inn mot sporet og dermed bidrar til å holde spenningen oppe” [11]. Sugetransformatorens oppgave er å styre returstrømmen til å følge skinnegangen ved å ”suge” jordstrømmene opp til skinnene.

Sugetransformatorene som brukes av Jernbaneverket er strømtransformatorer med omsetningsforhold 1:1 der primærsiden kobles i serie med kontaktledningen, og sekundærsiden kobles i serie med returledningen. Transformatorens magnetiske felt brukes til å styre skinnestrømmen til å bli mest mulig lik kontaktledningsstrømmen der sugetransformatoren står. Berøringsspenningen blir halvert ved å koble til sekundærsiden av sugetransformatorene til utsiden av de isolerte skjøtene som blir lagt inn i skinnestrengen ved hver sugetransformator. Midtuttaket på sugetransformatoren kobles til nullskinnen, som er

skinnen som ligger i nullfeltet mellom de isolerte skjøtene. Sekundærspenningen blir da delt over de to isolerte skjøtene.

Kontaktledningsstrømmen i sugetransformatoren gjør at det blir satt opp fluks i primærviklingen. Mesteparten av fluksen blir omsluttet av sekundærsiden av transformatoren, og en spenning som driver strøm  $I_2$  på sekundærsiden blir generert. Denne sekundærstrømmen skaper en motfluks for å kompensere for påvirkningen av fluksen fra primærviklingen. Da forholdet mellom primær- og sekundærsiden i sugetransformatoren skal være 1:1, må sekundærstrømmen  $I_2$  være like stor som primærstrømmen  $I_1$  for å oppnå full kompensasjon. Det at sekundærviklingen trenger mer strøm for å oppnå full kompensasjon, gjør at den suger opp returstrømmen.

Impedansen i returkretsen gjør at det oppstår spenningsfall mellom belastnings- og matepunkt. Dette er uheldig da skinnene skal fungere som beskyttelsesjord for alle de ledende anleggsdelene i nærheten av sporet, i tillegg til å være returforbindelsen for banestrømmen. Om det er spenningsforskjell mellom skinnene og jord, kan det være berøringsfare. Dette gjelder både ved berøring av skinnene og andre deler som er jordet i skinnene. Spenningsfallet i sugetransformatorens sekundærside kompenserer for spenningsfallet mellom belastning- og matepunktet med at det har motsatt fortegn. ”Sugetransformatoren må dimensjoneres i samsvar med forventet strømbelastning på strekningen der den plasseres slik at normale laststrømmer ikke forårsaker metning eller for stort spenningsfall i viklingene.” [11]

Sugetransformatorene er plassert med en avstand slik at en transformator kan tas ut av bruk for vedlikehold, uten å redusere kapasiteten i anlegget. Det er vanlig med rundt 3 km avstand mellom hver sugetransformator. Ved et matepunkt plasseres de 1,5 km unna på hver side av matepunktet. Dette for å ikke overbelaste transformatorene. Jernbaneverket har spesifisert følgende krav for sugetransformatoren [11]:

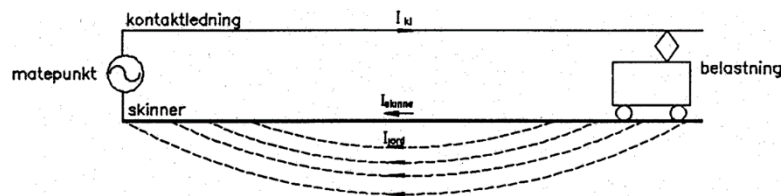
- Transformatorene skal benyttes for enfase vekselstrøm  $16 \frac{2}{3}$  Hz
- Omsetningsforholdet mellom primær- og sekundærvikling skal være 1:1
- Primærviklingen kobles i serie med kontaktledningen, og vil normalt stå under en spenning på 15 kV, maksimalt 17,5 kV
- Sekundærviklingen er seriekoblet med returstrømkretsen, og vil stå under en variabel spenning på 1000 V i forhold til jord

- Størrelsen kan variere noe avhengig av strømbelastningen på strekningen. Normalt vil dagens transformator ha en kapasitet til å overføre 600A til 800A kontinuerlig strøm. Ytelsen kan også uttrykkes i kVA. For eksempel typiske verdier på 55 og 95 kVA.

### 2.3.3 Systemer

Ved Jernbaneanverket er det fire forskjellige systemer for returstrømmens krets som kan utnyttes. Disse har fått betegnelsen system A, B, C og D.

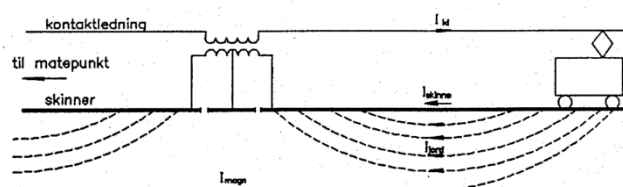
#### 2.3.3.1 System A



Figur 2-10. Prinsipp for returstrøm, System A

I *System A* går returstrømmen gjennom skinner og jord. Deler av strømmen vil avledes fra skinnene og til jord på strekningen mellom belastnings- og matepunktet. Mengden strøm som avledes til jord avhenger av lengden fra belastnings- til matepunktet, og overgangsimpedansen mellom skinnene og jord. I Norge er det bare på Ofotbanen og deler av Bergensbanen at *System A* benyttes. Dette fordi *System A* bare kan brukes på steder der det er god ledningsevne i jorden. Norge har generelt høy resistivitet, som gir lav ledningsevne. Det oppstår dermed høy spredning av jordstrøm, som potensielt kan ødelegge eller forstyrre andre elektriske kabler og systemer i nærheten.

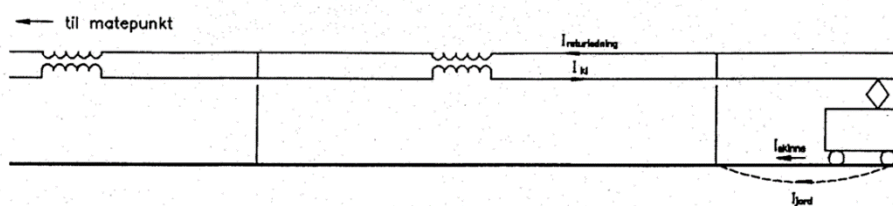
#### 2.3.3.2 System B



Figur 2-11. Prinsipp for returstrøm, System B

Returretsen består av skinner, jord og sugetransformator. Det er lagt isolerte skjøter i skinnestrengen ved hver sugetransformator. På utsiden av de isolerte skjøtene kobles primærviklingen på sugetransformatoren i serie med kontaktledningen. Sekundærviklingen kobles i serie med skinnegangen. Magnetiseringsstrømmen kan ikke gå i sekundærviklingen på sugetransformatoren og vil derfor gå i jorden. Denne jordstrømmen blir ”sugd” opp til skinnene igjen av sugetransformatoren. *System B* er systemet for returrets som er mest brukt på jernbanen i Norge.

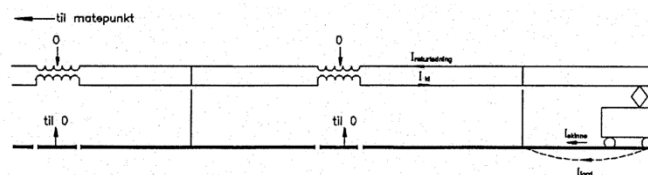
### 2.3.3.3 System C



Figur 2-12. Prinsipp for returstrøm, System C

Både returledning, skinner og jord brukes i returretsen. Returledningen og skinnene er koblet sammen midt mellom hver sugetransformator. Denne sammenkoblingen kalles for nedføring. Strømmen vil gå via returledningen med mindre det går et tog i nærheten. Om det går et tog mellom to nedføringer, vil strømmen gå via skinner og jord frem til nærmeste nedføring. Her går strømmen inn i returledningen tilbake til matepunktet. Den eneste strømmen som vil gå i skinner og jord på et område der det ikke går tog, er magnetiseringsstrøm og industert strøm. Dette systemet er ikke mye brukt i Norge, men det brukes på Gardermobanen.

### 2.3.3.4 System D



Figur 2-13. Prinsipp for returstrøm, system D

*System D* er som en blanding mellom *System B* og *C*. Systemet har isolerte skjøter på skinnene ved hver sugetransformator, som i *System B*, og det benytter returledning, som *System C*. Returledningen er koblet direkte til skinnene midt mellom hver sugetransformator.



”For *System D* vil magnetiseringsstrømmen gå i jorden. Dette systemet benyttes på strekninger med dobbeltisolerte, konvensjonelle sporfelt. Det vil si 95/ 105 Hz sporfelter som har isolerte skjøter mellom hvert sporfelt”.

På norsk jernbane brukes *System B* og *D* mest, men det blir mindre og mindre av *System B*, da Teknisk regelverk krever at det skal være returledning på alle nye anlegg. Som nevnt ovenfor har ikke *System B* returledning, i motsetning til *System C* og *D*. *System C* har færre komponenter enn *System D* og er dermed et enklere system. Problemet med dette systemet oppstår når vi ser på signalanlegget ved jernbanen. Signalanlegget benytter også skinnene som strømvei, og systemene i kontaktledning og signal må derfor velges slik at de kan samkjøres effektivt. Ved valg av *System C* økes dermed risikoen for å få forstyrrelser på indikeringen av skinnebrudd. Det er denne grunnen som gjør at *System D* ofte blir foretrukket foran *System C* [12].

## 2.4 Autotransformatorsystem

Mye av stoffet, samt alle bildene, i kapittel 2.4 er hentet fra Jernbanekompetanse.no [13]. Dette stoffet blir ikke referert til noe nærmere, da det gjøres her. Er stoffet hentet fra andre steder, blir det referert til som vanlig.

### 2.4.1 Prinsipp

Prinsippet med et autotransformatorsystem, heretter kalt AT-system, er at spenningen overføres på et høyere nivå enn hva togene forsynes med. Det kobles autotransformatorer med midtpunktet tilkoblet skinnejord. Dette gjør at de to 15 kV-lederne som er koblet til autotransformatoren blir i motfase med hverandre. Peak-to-peak-verdien mellom lederne blir dermed 30 kV [14]. Togene forsynes enten direkte via en av 15 kV lederne, eller via en kontaktledning som er tilkoblet en av 15 kV lederne. Det blir dermed en overføringsspenning (30 kV) som er doblet så stor som forsyningspenningen til togene (15 kV). Ved å doble overføringsspenningen vil strømmen som går i lederne halveres. De elektriske tapene i overføringen er proporsjonal med endringen av strømmen i andre potens.

$$P_{tap} = I^2 R \quad (3)$$

Dette vil si at med et AT-system vil de elektriske tapene bli en fjerdedel av hva de blir med et konvensjonelt BT-system. Autotransformatorene bidrar også til å ”løfte” spenningen til kontaktledningen slik at det oppstår en bedre og mer stabil spenningsforsyning til toget.

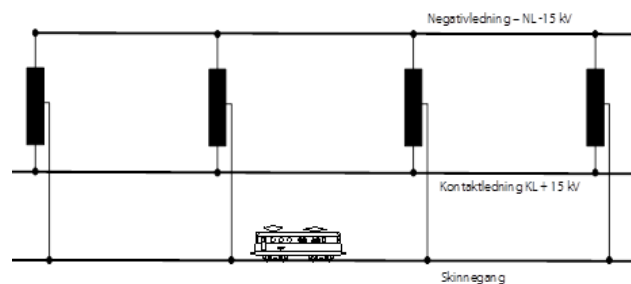
### 2.4.2 Historie

AT-systemet ble anvendt for første gang tidlig på 1900-tallet i USA. Det var strekningen New York, New Haven og Hartford-banen som ble forsterket fordi det var behov for høyere overføringskapasitet og bedre EMC-egenskaper. Etter hvert ble også Detroit, Toledo og Iron-ton-banen og Virginia-banen bygget med AT-system. Alle tre banene benyttet 11 kV til å forsyne lokomotivene, og 22 kV som overføringsspenning [15].

AT-system ble i årene fremover lite benyttet, men i 1972 bygget de i Japan Sanyo Shinkansen med et 25 kV AT-system for høyhastighetstog. Etter dette ble det bygget et lignende system i Frankrike på TGV-strekningen Paris-Lyon. På den franske varianten ble hver autotransformator bygget med full bryter-, vern,- og kontrollutrustning, og ble dermed veldig komplekst og kostbart. Man klarte så i Ungarn å bygge et veldig forenklet system, der hver AT var koblet enten direkte eller via enkle lastskillebrytere til kl-anlegget. Det er dette systemet det tyske, det svenske og delvis det norske bygger på. Begrunnelsen for å benytte AT-system har alltid vært høyt effektuttak, lange avstander mellom matestasjoner og redusert støy i nærliggende installasjoner.

### 2.4.3 Systemer

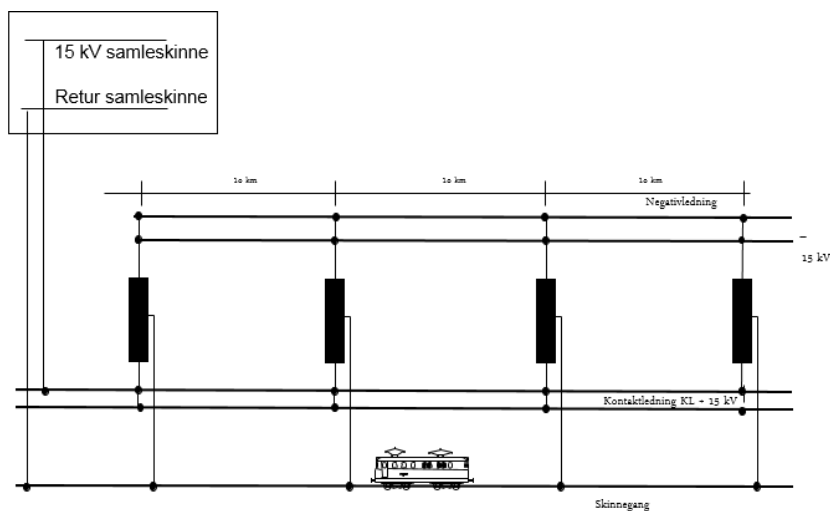
#### 2.4.3.1 AT-system med enkel NL



**Figur 2-14. AT-system med enkel AT**

Den enkleste varianten av AT-system er vist i figur 14. Her er det kun en ekstra leder i forhold til vanlig BT-system. Denne lederen kalles ”negativleder”, forkortet NL. Den kalles negativleder fordi den er faseforskjøvet 180 grader i forhold til kontaktledningen(kl). Spenningen mellom kl og skinnegangen er her 15 kV, mens spenningen mellom NL og kl er 30 kV. Det er systemet vist i figur 2-14 som er mest utbredt i Europa. Dette systemet ble omtalt i en landsdekkende kraftsystemplan Jernbaneverket Bane Energi fikk utarbeidet i 1999, og her presentert som et godt alternativ der det var behov for økt overføringskapasitet. Senere ble det utført en EMC-studie for systemet, som kom fram til følgende: ”..AT-system med enkel NL ga for store strømmer i jord og fare for stor påvirkning av langsgående kabler” [13]. Dette systemet ble dermed vurdert som for dårlig, da det gir betydelig verre EMC-egenskaper enn hva dagens kl-anlegg med sugetransformator gir.

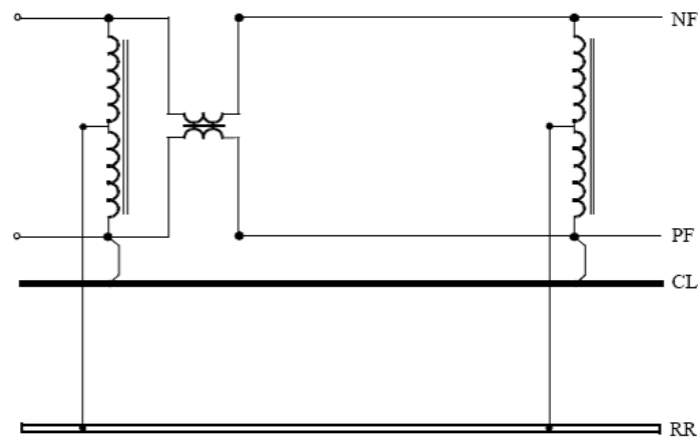
### 2.4.3.2 AT-system med dobbel NL



**Figur 2-15. AT-system med dobbel NL**

Etter studien som viste at det enkle AT-systemet ikke var bra nok for norske forhold, ble flere andre systemer vurdert. Et av de mest som var mest aktuelt, var det som brukes i Sverige i dag, ”AT-system med dobbel negativleder”, vist i figur 2-15. Dette systemet har to negativledere, én positivleder og kontaktledningen. Systemet løser problemene med strømmer i jord og skinner ved at lederne er nøye dimensjonert med tanke på tverrsnitt, og hengt opp i en gjennomtenkt konfigurasjon. Dette gjør at impedansene i NL-kretsene med retur i spor og kontaktledning med retur i spor er tilnærmet like. Dermed blir strømmen i sporet der toget ikke oppholder seg veldig liten. Hvis det derimot er behov for å vike fra den optimale konfigurasjonen, med tanke på plassering av lederne i forhold til hverandre, vil EMC-egenskapene til systemet forverres kraftig. I Norge har vi mange tunneller, trange skjæringer og generelt upraktisk geografi. Det vil derfor være umulig å holde seg til den optimale konfigurasjonen overalt, og siden det var foretrukket å ha ett system for hele jernbanenettet, ble dette systemet utelukket.

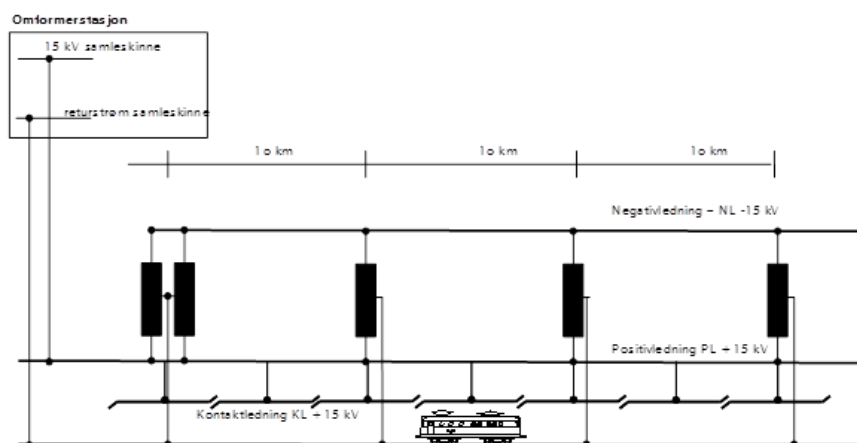
### 2.4.3.3 AT-system med CUS



**Figur 2-16. AT-system med CUS**

Et annet system som ble vurdert, var et system med en positivleder, en negativleder, kontaktledning og en såkalt CUS (Current unbalance suppression unit), vist i figur 2-16. Fordelen med en CUS, er at den løser problemene med uønskede strømmer i kontaktledning og dårlige EMC-egenskaper. Ved et slikt system slipper man i tillegg problematikken med at lederne må henge i en bestemt konfigurasjon. Det store minuset er at en CUS ville måtte plasseres ved hver AT, og kostnaden ved å bygge en slikt system ville dermed vært høye.

### 2.4.3.4 AT-system med negativ- og positivleder og seksjonert kl-anlegg



**Figur 2-17. AT-system med negativ- og positiv leder og seksjonert kl-anlegg**

I Norge har man kommet fram til et system som kalles ”AT-system med negativ- og positivleder og seksjonert kl-anlegg”. Den store forskjellen med dette systemet fra andre AT-system, er at kl-anlegget er seksjonert. Fordelen med å seksjonere kl-anlegget, er at det går

veldig lite strøm i de seksjonene toget *ikke* oppholder seg i. Du får dermed samme funksjon som AT-system med CUS, men den ekstra enheten ved hver AT kan sløyfes. Systemets kompleksitet og kostnad er dermed mindre enn AT-systemer som benytter CUS. Både problematikken med at lederne må henges opp i en bestemt konfigurasjon og problemet angående kronglete geografi blir løst med dette systemet. En annen fordel er at siden lederne ikke trenger å henge i en bestemt konfigurasjon, kan PL og NL være et stykke unna kontaktledningen hvis ønskelig. Det er dermed funnet ut at hvis PL/NL henges to meter over kontaktledningen, vil det være mulig å gjøre vedlikeholdsarbeid på den med PL og NL spenningsatt. Dette er tenkt i situasjoner hvor vedlikeholdsarbeid trengs på en seksjon av kontaktledningen mens trafikken fortsatt skal gå i en annen seksjon. Siden det er PL og NL som står for energioverføringen, må disse være spenningsatt for at toget skal kunne forsynes.

Ved fremtidige forsterkninger av banestrømforsyning i Norge, er det i hovedsak dette systemet som kommer til å bli benyttet. Hver 10.-12. km plasseres det en AT for å ta ut 15 kV fra PL og NL til kontaktledningen (som så forsyner toget). Mellomrommet mellom hver AT kalles et AT-vindu. Autotransformatorene løfter spenningen opp, slik at den blir mer stabil enn ved konvensjonelt BT-system. Dette gjør at det kan være lengre avstander mellom hvert matestasjon.

#### *2.4.3.5 Fjernledningssystem med AT-innmating*

Fjernledningssystem med AT-innmating er et type AT-system der AT-lederne henger på egne frittstående master, i motsetning til hvor de henger på toppen av kontaktledningsmastene. AT-lederne henger gjerne noen hundre meter unna selve kl-anlegget, og unngår dermed EMC-problematikken som finnes ved noen av de andre AT-systemene. Dette gjør at det ikke er nødvendig med både CUS og seksjonering av kontaktledningen. Fjernledningssystem med AT-innmating ble i 2011 bygget på Ofotbanen, og utgjør sammen med AT-system med positiv- og negativleder og seksjonert kl-anlegg de to AT-systemene er i bruk i Norge.

## 2.5 Fordeler og ulemper med AT- og BT-system

Hovedgrunnen til at det ønskes å bygge AT-system fremfor BT-system, er økningen i overføringskapasiteten til banestrømforsyningen. Med dagens BT-system faller spenningen i kontaktledningen mye når man kommer langt unna omformerstasjonene. Med et AT-system som har plassert AT-er hver 10 km, blir det en mye stivere og mer stabil spenning på kontaktledningen. Det kan dermed spares mye penger med å øke avstanden mellom hver omformerstasjon. Med økt overføringskapasitet er det også mulighet for å ha mer og tyngre trafikk på linjen enn i dag. En annen fordel er, som tidligere nevnt, at effekttapene ved bruk av AT-system er betraktelig mindre enn ved konvensjonelt BT-system. Ulempene med AT-systemet er blant annet at det er mer komplekst enn dagens BT-system. Det har flere ledere, og et mer komplisert bryterarrangement tilknyttet systemet. En AT krever mer vern, og mer plass, enn hva en BT gjør. AT-er trengs bare hver 10. km, mens BT-er må plasseres omtrent hver 3. km. Alt i alt koster det ca. det samme å bygge et AT-system som å bygge et BT-system på en ikke-elektrifisert strekning. Dette fordi man må ha flere transformatorer pr. km med BT-system enn AT-system, men transformatorene i AT-system er dyrere pr. stykk. Utrustningen i AT-system er også dyrere da det må installeres PL og NL i tillegg til kontaktledningen. Men som tidligere nevnt kan man kanskje spare seg for noen omformerstasjoner, som er svært kostbare, og man får mye mindre effekttap ved bruk av AT-system.

## 3 Teknisk

### 3.1 Dagens situasjon

Det er i dag bare elektrifisert jernbane frem til Nidelv bru i Trondheim. Dette kl-anlegget er med BT-system. De nærmeste omformerstasjonene som forsyner anlegget er på Stavne (2x6 MVA), Lundamo (2x7 MVA) og Oppdal (2x5,8 MVA). Nordlandsbanen inklusiv Stavne-Leangenbanen står uten kl-anlegg. Det benyttes derfor i dag dieseltog på Nordlands- og Meråkerbanen. Ved å elektrifisere jernbanen og bytte til elektriske tog får man tog som er sterkere, akselerer bedre og er rimeligere å drifte og vedlikeholde. Miljømessig gir de bedre lokal luftkvalitet og de har et totalt lavere energiforbruk enn dieseldrevne tog. Elektriske tog gir i tillegg mindre støy, og slipper ut mindre klimagasser enn dieseldrevne tog. Elektrifisering vil derfor også ha positive effekter for miljøet i omgivelsene nær jernbanen. Mange av tiltakene som reduserer energibruken ved kjøring av tog ligger hos selskapene som eier og drifter togene [16].

Det er planlagt å bygge nytt kl-anlegg av typen ”AT-system med NL og PL og seksjonert kl-anlegg” på Trønder- og Meråkerbanen. Trønderbanen er den delen av Nordlandsbanen som går fra Trondheim til Steinkjer. Meråkerbanen går fra Trondheim til Storlien. For å forsyne strekningene skal det bygges to nye omformerstasjoner, en på Hell og en på Steinkjer. Stavne omformerstasjon, som ligger ved Marienborg i Trondheim, vurderes å legges ned. For å sikre strømforsyning mellom Dovre- og Nordlandsbanen er det foretrukket å sammenkoble eksisterende og nytt anlegg.



## 3.2 Metode

Vurderinger gjort i denne rapporten er utført av forfatterne på grunnlag av teori og informasjon anskaffet i prosjektperioden. For å håndtere vurderingen av systemløsning på en effektiv og oversiktlig måte er prosessen gjort i fire faser:

### Fase 1:

Finne aktuelle systemløsninger for strekningene Stavne-Trondheim S, Stavne-Leangen og Trondheim S-Leangen.

### Fase 2:

Finne nødvendige koblingssteder til aktuelle systemløsninger som sikrer strømforsyning til kl-anlegget og gir god redundans. Koblingsmulighetene som er tatt med i rapporten er omkoblingspunkt direkte mellom systemene, eller koblingsanlegg i matestasjon eller koblingshus. Det er i tillegg vurdert om det skal isoleres mellom kl-anleggene for å slippe flere omkoblingspunkt enn nødvendig.

### Fase 3:

Lage enlinjeskjema som viser elektrisk sammenkobling for de mest aktuelle alternativene.

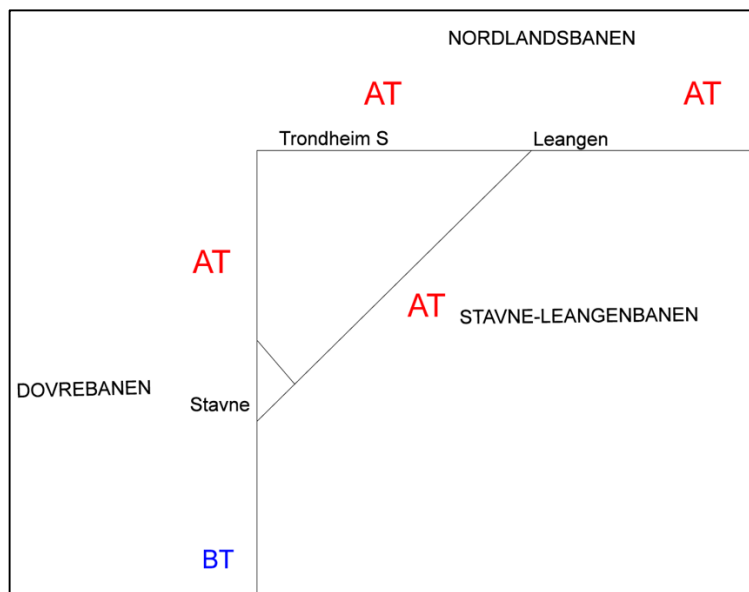
### Fase 4:

Vurdere alternativene opp mot hverandre for å finne best mulig løsning.

### 3.3 Alternativer

Det er tatt utgangspunkt i seks forskjellige hovedalternativer til systemløsning. Disse er delt inn i underalternativer for å vurdere hvordan sammenkobling kan gjennomføres på en best mulig måte.

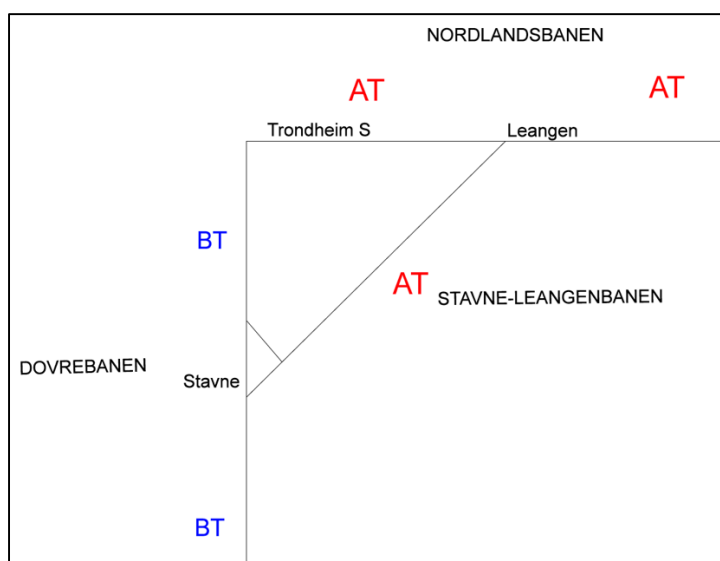
#### 3.3.1 Hovedalternativ 1



**Figur 3-1. Forenklet skisse av hovedalternativ 1**

Nytt AT-system både fra Stavne til Trondheim S, Trondheim S til Leangen og på Stavne-Leangenbanen. Eksisterende BT-system stopper ved Stavne.

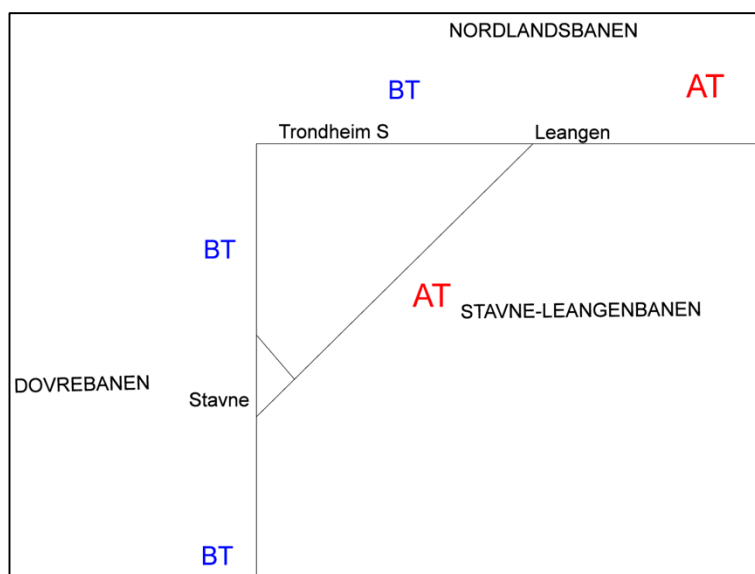
### 3.3.2 Hovedalternativ 2



**Figur 3-2. Forenklet skisse av hovedalternativ 2**

Eksisterende BT-system på Dovrebanen frem til Trondheim S, bygge nytt AT-system fra både Trondheim S og videre oppover Nordlandsbanen, og AT-system på Stavne-Leangenbanen.

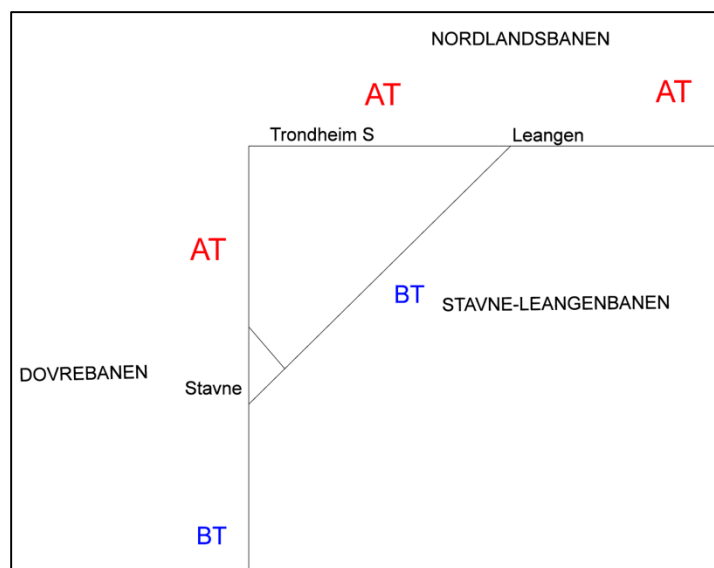
### 3.3.3 Hovedalternativ 3



**Figur 3-3. Forenklet skisse av hovedalternativ 3**

Bruke dagens eksisterende BT-systemet til Trondheim S, og trekke det videre til Leangen. Installere nytt AT-system på Stavne-Leangenbanen.

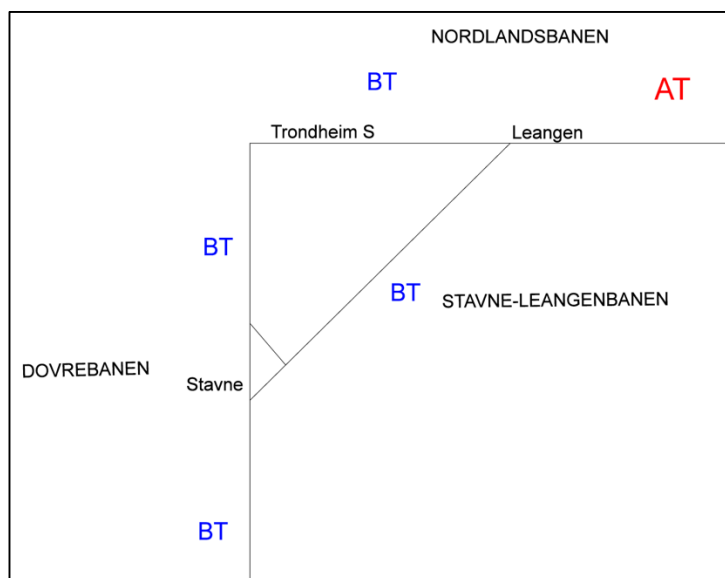
### 3.3.4 Hovedalternativ 4



**Figur 3-4. Forenklet skisse av hovedalternativ 4**

AT-system fra Stavne til Trondheim S og videre på Nordlandsbanen. Installere BT-system på Stavne-Leangenbanen.

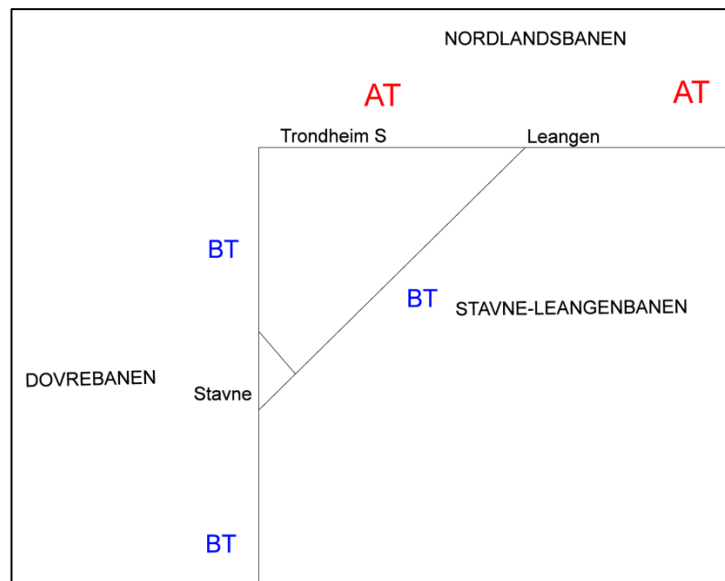
### 3.3.5 Hovedalternativ 5



**Figur 3-5. Forenklet skisse av hovedalternativ 5**

Bruke eksisterende anlegg inn til Trondheim S, og trekke det videre til Leangen. Bygge nytt BT-system på Stavne-Leangenbanen.

### 3.3.6 Hovedalternativ 6



**Figur 3-6. Forenklet skisse av hovedalternativ 6**

Eksisterende BT-system frem til Trondheim S. Nytt BT-system på Stavne-Leangenbanen, og AT-system fra Trondheim S til Nordlandsbanen.

### 3.4 Vurdering

For å få klart frem fordelene og ulempene med de forskjellige underalternativene er de nærmere beskrevet i tabellene under. I valget av systemløsning er det viktig å finne en løsning som er effektiv, stabil og bra for både dagens og fremtidens togtrafikk. Faktorene som vil utgjøre den største forskjellen er hvilket system som blir installert på hvilke strekninger, hvordan omkoblingen gjøres og plasseres og hvor eventuelle isolasjonspunkt skal være. Beliggenheten av omkoblings- og isolasjonspunkt er viktig da det er avgjørende for om det blir tosidig mating på jernbanen. Dette er viktig for å sikre at det blir tilført effekt fra andre steder om noe går galt på linjen. Det gjør det mulig å koble ut deler av linjen for vedlikehold, uten at forsyningen til resten av togtrafikken påvirkes. Med tanke på dette kan det maksimalt isoleres på ett punkt for å oppnå tosidig mating. Å koble om fra et system til et annet vil være kostbart da det medfører flere deler, arbeidskraft for montering og vedlikehold, samt at det kan være en feilkilde. Alle omkoblingspunkt vil være et endepunkt på et AT-system, og hvert endepunkt kan bli kostbart siden det ifølge Teknisk regelverk må være minst én autotransformator på start- og sluttspunkt av hvert AT-system [3]. Trondheim S er et travelt sted, med mange bygninger og skinner. Dette gjør at det kan bli vanskelig å ha omkobling der både på grunn av plassmangel, montering og vedlikehold. Fordelene ved å ha AT-system på strekningen mellom Stavne og Trondheim S må veies opp mot de ekstra kostnadene det vil medføre å fornye det eksisterende BT-systemet til et AT-system.

AT-systemet har bedre overføringskapasitet enn BT-systemet, og legger dermed til rette for større og tyngre togtrafikk. Det er derfor fordelaktig å velge AT-system fremfor BT-system ved elektrifisering av jernbane. I fremtiden er det tenkt at godstrafikk skal ha mulighet til å bruke Stavne-Leangenbanen for å slippe å kjøre innom Trondheim S. Dermed er det hensiktsmessig å installere AT-system når Stavne-Leangenbanen skal elektrifiseres. På bakgrunn av dette, er det valgt å forkaste alternativene med BT-system på Stavne-Leangenbanen, dvs. hovedalternativ 4,5 og 6.

### 3.4.1 Hovedalternativ 1

Hovedalternativ 1 legger til rette for at det skal fornyes kl-anlegg med AT-system på Dovrebanen i framtiden. Dette er derfor det mest fremtidsrettede alternativet som vurderes i denne rapporten. Ved dette hovedalternativet trengs det kun ett omkoblingspunkt, uavhengig om det velges å isolere eller ikke. Omkoblingspunktet blir på Stavne. Det er da mulighet for omkobling ved bruk av koblingsanlegget på Stavne omformerstasjon eller å koble systemene direkte sammen. Eksisterende BT-system inn til Trondheim S må bygges om til AT-system fra Stavne til Trondheim S. Om det bygges AT-system på Stavne-Leangenbanen er dette i følge Simuleringsrapport for hovedplan, til prosjektet Elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen [17], vurdert som unødvendig før fornyelse av kl-anlegg på Dovrebanen. Siden det i denne oppgaven er valgt å se på elektrotekniske fordeler fremfor økonomiske kostander vurderes likevel hovedalternativ 1 som et aktuelt alternativ. Dette fordi Stavne ses på som en bedre lokasjon for omkoblingspunkt enn Trondheim S av samme grunner som nevnt i kapittel 3.4. Strekningen Stavne-Trondheim S er en relativt kort strekning, og fordelene ved AT-system ses på som større enn ulempene ved å fornye eksisterende kl-anlegget. Om dette hovedalternativet skal benyttes i prosjektering vurderes underalternativ 1 c) som det mest aktuelle.

**Tabell 2. Vurdering av hovedalternativ 1**

<b>Alternativ</b>	<b>Omkoblingspunkt</b>	<b>Isolasjonspunkt</b>	<b>Forklaring</b>
<b>1 a)</b>	Stavne	På Stavne, mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen.	På Leangen kobles AT-systemet fra Trondheim og Stavne-Leangenbanen rett på Nordlandsbanens kommende AT-system.
<b>1 b)</b>	Stavne	På Stavne, mellom Dovrebanen og Trondheim S.	På Leangen kobles AT-systemet fra Trondheim og Stavne-Leangenbanen rett på Nordlandsbanens kommende AT-system.
<b>1 c)</b>	Stavne	Ingen isolasjon	Ved Leangen kobles Stavne-Leangenbanen og linja til Trondheim S rett på Nordlandsbanen. Ved Stavne blir det et omkoblingspunkt for å forsyne både Trondheim S og Stavne-Leangenbanen.



### 3.4.2 Hovedalternativ 2

Hovedalternativ 2 har to endepunkter på AT-systemet. Ett ved Trondheim S, og ett ved Stavne. Dette betyr at kl-anlegget må ha minst én AT både på Stavne og Trondheim S. Som vist i tabellen under er det tre muligheter for hvor systemene kan kobles sammen. Ved å benytte seg av 2 a) eller 2 b) vil det være nødvendig med isolasjonspunkt. Ved underalternativ 2 c) blir det ingen isolasjon, men systemene må kobles sammen to steder. Da det er usikkert hvor stor plass det er behov for til omkobling, vurderes det som mer aktuelt å utføre dette et annet sted enn Trondheim S. Stavne er dermed et bedre alternativ for omkobling, og underalternativ 2 a) og 2 c) anbefales ikke. Det er på Stavne mulighet for omkobling både ved bruk av matestasjon, koblingshus, eller direkte omkobling mellom systemene. Om dette hovedalternativet skal benyttes i prosjektering vurderes underalternativ 2 b) som det mest aktuelle.

**Tabell 3. Vurdering av hovedalternativ 2**

<b>Alternativ</b>	<b>Omkoblingspunkt</b>	<b>Isolasjonspunkt</b>	<b>Forklaring</b>
<b>2 a)</b>	Trondheim S	På Stavne, mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen.	På Leangen kobles AT-systemet fra Trondheim S, og fra Stavne-Leangenbanen rett på Nordlandsbanens kommende AT-system.
<b>2 b)</b>	Stavne	Trondheim S	Dovrebanen og Nordlandsbanen er isolert fra hverandre på Trondheim S, men koblet samme via Stavne-Leangenbanen.
<b>2 c)</b>	Stavne og Trondheim S	Ingen isolasjon	Ved Leangen kobles Stavne-Leangenbanen og linja til Trondheim S rett på Nordlandsbanen. Ved Stavne blir det et omkoblingspunkt for å kunne forsyne Stavne-Leangenbanen fra Stavne. På Trondheim S blir det også et omkoblingspunkt.

### 3.4.3 Hovedalternativ 3

Fordelen med hovedalternativ 3 er at det bare blir ett endepunkt på AT-systemet, noe som medfører færre AT-er. AT-systemet starter på Stavne og går videre til Nordlandsbanen via Stavne-Leangenbanen. For å unngå mer enn ett omkoblingspunkt må det isoleres på Leangen, mellom Trondheim S og Nordlandsbanen, eller mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen. Eksisterende BT-system på Dovrebanen vil bli beholdt. Omkoblingspunktene i underalternativ 3 c) vil være på Stavne og Leangen der det ikke er noen plassmangel. Denne plasseringen gjør at fordelene ved å ikke isolere systemene fra hverandre, er større enn ulempene ved å ha to omkoblingspunkt. Om dette hovedalternativet skal benyttes i prosjektering vurderes dermed underalternativ 3 c) som det mest aktuelle.

**Tabell 4. Vurdering av hovedalternativ 3**

<b>Alternativ</b>	<b>Omkoblingspunkt</b>	<b>Isolasjonspunkt</b>	<b>Forklaring</b>
<b>3 a)</b>	Stavne	På Leangen, mellom Trondheim S og Nordlandsbanen.	AT-systemet går via Stavne-Leangenbanen og videre langs Nordlandsbanen.
<b>3 b)</b>	Leangen	På Stavne, mellom Dovrebanen og Stavne-Leangenbanen.	På Leangen kobles AT-systemet fra Stavne-Leangenbanen rett på Nordlandsbanens kommende AT-system.
<b>3 c)</b>	Stavne og Leangen	Ingen isolasjon	Ved Leangen kobles Stavne-Leangenbanen rett på Nordlandsbanen, og kobler om for å forsyne BT-systemet inn til Trondheim S. Ved Stavne blir det et omkoblingspunkt for å forsyne Stavne-Leangenbanen.

### 3.5 Elektrisk sammenkobling

For å vise hvordan sammenkobling av Dovre- og Nordlandsbanen kan gjennomføres, er det laget tre enlinjeskjemaer med utgangspunkt i alternativ 1 c), 2 b) og 3 c). Skjemaene er ment som skisser for å vise hvordan sammenkoblingen kan gjøres på et overordnet nivå, og er dermed ikke tegnet i skala. De er ikke ment som tegninger som kan brukes direkte i prosjektet. Dermed er det flere ting som ikke er tatt hensyn til ved tegning av skjemaene. Et eksempel er der Teknisk regelverk sier: "...Ved bygging av AT-systemet på deler av en matestrekning skal det undersøkes om det er behov for to eller flere autotransformatorer i overgangen mellom AT- og BT-system...". [3] Grunnen til at dette ikke er tatt hensyn til er at det ikke har vært anledning til å gjøre nødvendige beregninger og simuleringer. Vern til autotransformatorene og lignende er heller ikke tatt med, da det ikke er nødvendig for forståelsens skyld. Stavne omformerstasjon mater i dag ut på det eksisterende BT-systemet på Dovrebanen. Dette er en stasjon som vurderes nedlagt av Jernbaneverket. Siden den inntil videre vil være i drift er det valgt å la omformerstasjonen mate anlegget slik den gjør i dag. Det er en mulighet å bruke Stavne omformerstasjon til omkobling ved å benytte det eksisterende koblingsanlegget. Om Stavne omformerstasjon blir tatt ut av drift kan stasjonen benyttes som et koblingshus for å oppnå fleksibel seksjonering og bedre vern. Det er likevel vurdert her som godt nok å ha omkobling direkte mellom systemene, fremfor å bruke omformerstasjonen til omkoblingen.

#### 3.5.1 Alternativ 1 c)

I vedlegg A er det vist hvordan alternativ 1 c) kan realiseres elektrisk. Det kommer BT-system på Dovrebanen til Stavne. Ved Søndre tilsving, som svinger inn på Stavne-Leangenbanen, går BT-systemet over til to AT-system. Det ene AT-systemet går opp til Trondheim S og videre til Leangen, mens det andre forsyner Stavne-Leangenbanen. Stavne-Leangenbanen er relativt kort, ca. 6 km, og det er derfor ikke satt inn noen flere AT-er enn én ved hvert endepunkt (Stavne og Leangen). Kontaktledningen på Stavne-Leangenbanen er som vist i koblingsskjemaet delt i to seksjoner. Ifølge Teknisk regelverk skal det normalt være 6 km mellom hver seksjonering [3]. To seksjoner vil dermed være tilstrekkelig. Om det er nok med én seksjon, er en vurdering som burde utredes nærmere av Jernbaneverket ved en eventuell utbygging. Ved Leangen kobles Stavne-Leangenbanen på Nordlandsbanen via brytere 20-L og 21-L. Dette gjøres for å oppnå best mulig redundans. Under normale forhold vil det være ca. 10 km mellom AT1 og AT2. AT2 er satt inn for å vise hvordan systemet

kommer til å se ut videre. Nordre tilsving er koblet til PL via bryter 30-L. Denne delen av jernbanen er såpass kort at det ses på som unødvendig å koble den til i begge ender. Stavne omformerstasjon mater inn på PL ved Stavne via bryter 50-L, på samme måte som den i dag mater ut på kontaktledningen til det eksisterende BT-systemet. Det er lagt opp til at omformerstasjonen enkelt kan kobles fra, uten noen store endringer på kl-anlegget, om den eventuelt fjernes i fremtiden. AT-systemenes seksjonerte kontaktledning er matet på midten av seksjonen via skillebrytere (01-L til 08-L) i henhold til krav fra Teknisk regelverk [3].

### 3.5.2 Alternativ 2 b)

Vedlegg B viser de samme strekningene, men her går BT-systemet opp til Trondheim. Det går så AT-system videre fra Trondheim S mot Steinkjer. Det vil i dette alternativet være nødvendig å plassere minst én AT på Trondheim S, da det er et endepunkt for et av AT-systemene. Denne er på koblingskjemaet kalt AT1. BT-systemet som kommer opp til Trondheim S er ikke tilkoblet AT-systemet som går videre på Nordlandsbanen, av grunner forklart tidligere. Nordre tilsving er tenkt koblet til det eksisterende BT-systemet som går opp til Trondheim S. Det vil også være mulig å koble den på AT-systemet på Stavne-Leangenbanen hvis det skulle vise seg å være en bedre løsning. Stavne-Leangenbanen er lik på vedlegg B og vedlegg A, med et AT-system som kobler seg på Nordlandsbanen ved Leangen via brytere 20-L og 21-L.

### 3.5.3 Alternativ 3 c)

Alternativ 3 c) vises i vedlegg C. Her er det tenkt å forlenge det eksisterende BT-systemet fra Trondheim S til Leangen. AT-systemet begynner på Stavne, går over Stavne-Leangenbanen og videre mot Steinkjer. BT-systemet på Dovrebanen er koblet på AT-systemet til Stavne-Leangenbanen via bryter 01-L. I tillegg er BT-systemet koblet på AT-systemet ved Leangen, via bryter 20-L. Siden det i følge Teknisk regelverk skal være 3-4 km mellom hver sugetransformator må det plasseres en ekstra sugetransformator mellom Trondheim S og Leangen [18]. Denne er kalt ST2 i vedlegg C. Nordre tilsving er her, på samme måte som i vedlegg B, koblet til BT-systemet ved Stavne.

## 4 Konklusjon og anbefaling

Ut i fra det arbeid som er utført og beskrevet i denne rapporten er konklusjonen at det ved elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen, inklusiv Stavne-Leangenbanen, bør benyttes alternativ 1 c) med direkte omkobling mellom systemene. Dette fordi det ses på som unødvendig å benytte koblingshus, da direkte kobling er enklere og gir et tilfredsstillende resultat. Valget av alternativ 1 c) er basert på at det er ønskelig å ha AT-system på alle strekninger i og rundt Trondheim. Dette vil føre til best mulig kvalitet og stabilitet på spenningen, lave effekttap og en god redundans. Å ha AT-system på alle strekningene tilrettelegger for større og tyngre togtrafikk enn det som vil være mulig med BT-system. Det å bygge et nytt AT-system koster omtrent like mye som å bygge et nytt BT-system. Det vurderes dermed som både logisk og fremtidsrettet å bygge AT-system på strekningene der det ikke er elektrifisert jernbane fra før. I denne løsningen er det valgt at det skal installeres AT-system fra Stavne til Trondheim S. Fordelene med å ha AT-system på denne strekningen er i denne rapporten vurdert som større enn ulempene ved å måtte installere det over det eksisterende BT-systemet. Ved å ha AT-system på denne strekningen tilrettelegges det også for sammenkobling når det i fremtiden blir bygget AT-system på Dovrebanen opp til Stavne. I denne løsningen skal det også være AT-system på Stavne-Leangenbanen, noe som legger til rette for å kunne vurdere nye ruter for godstrafikk og plassering av godsterminalen i fremtiden.

### 4.1 Videre arbeid – Oppfølgingspunkter

For å finne ut om anbefalt løsning er gjennomførbar, er det oppsummert noen punkter som er ønskelig å se nærmere på. Det kan også ses på om det er andre konkrete løsninger som viser seg mer lønnsomme.

- Prognoser for fremtidig effektbehov
- Hvor mange AT-er trengs
- Godstrafikk på Stavne-Leangenbanen
- Om det er plass til omkoblingspunkt og AT på Trondheim S
- Beregninger, simuleringer og følsomhetsanalyse
- Bruk av Stavne omformerstasjon til omkobling
- Økonomi
- Behov for redundans
- Tuneller, broer og bebyggelse
- Behov for å benytte koblingsanlegg for bedre seksjonering og forrigling.

## Referanser

- [1] Jernbaneverket, «Ordforklaring,» 2012. [Internett]. Available:  
[http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell\\_beskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg#Ordforklaringer](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_kontaktledningsanlegg#Ordforklaringer).
- [2] Jernbaneverket, «Elektrifisering av Trøndelag,» 2016. [Internett]. Available:  
<http://www.jernbaneverket.no/Prosjekter/prosjekter/Elektrifisering-trondelag/les-om-prosjektet/>.
- [3] Jernbaneverket, «Prosjektering/Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning,» 2016. [Internett]. Available:  
[https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Autotransformatorsystem\\_med\\_seksjonert\\_kontaktledning#Autotransformatorer](https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Autotransformatorsystem_med_seksjonert_kontaktledning#Autotransformatorer).
- [4] Jernbaneverket, «Prosjektering av banestrømforsyning,» 2016. [Internett]. Available:  
[https://trv.jbv.no/wiki/Banestrømforsyning/Prosjektering\\_og\\_bygging/Kraftsystem](https://trv.jbv.no/wiki/Banestrømforsyning/Prosjektering_og_bygging/Kraftsystem).
- [5] Jernbaneverket, «Historisk tilbakeblikk på elektrifiseringen av jernbanen,» 2012. [Internett]. Available:  
[http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell\\_beskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg#Historisk\\_tilbakeblikk\\_p.C3.A5\\_elektrifisering\\_av\\_jernbanen](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_kontaktledningsanlegg#Historisk_tilbakeblikk_p.C3.A5_elektrifisering_av_jernbanen).
- [6] Jernbaneverket, «Generell beskrivelse av banestrømforsyning,» 2015. [Internett]. Available:  
[http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell\\_beskrivelse\\_av\\_banestrømforsyning](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_banestrømforsyning).
- [7] Jernbaneverket, «Slik fungerer jernbanen,» 2012. [Internett]. Available:  
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Jernbanedrift---eit-komplisert-samspel/>.
- [8] Jernbaneverket, «Generell beskrivelse av kontaktledningsanlegget,» 2012. [Internett]. Available:  
[http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell\\_beskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg#Generell\\_beskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_kontaktledningsanlegg#Generell_beskrivelse_av_kontaktledningsanlegg).

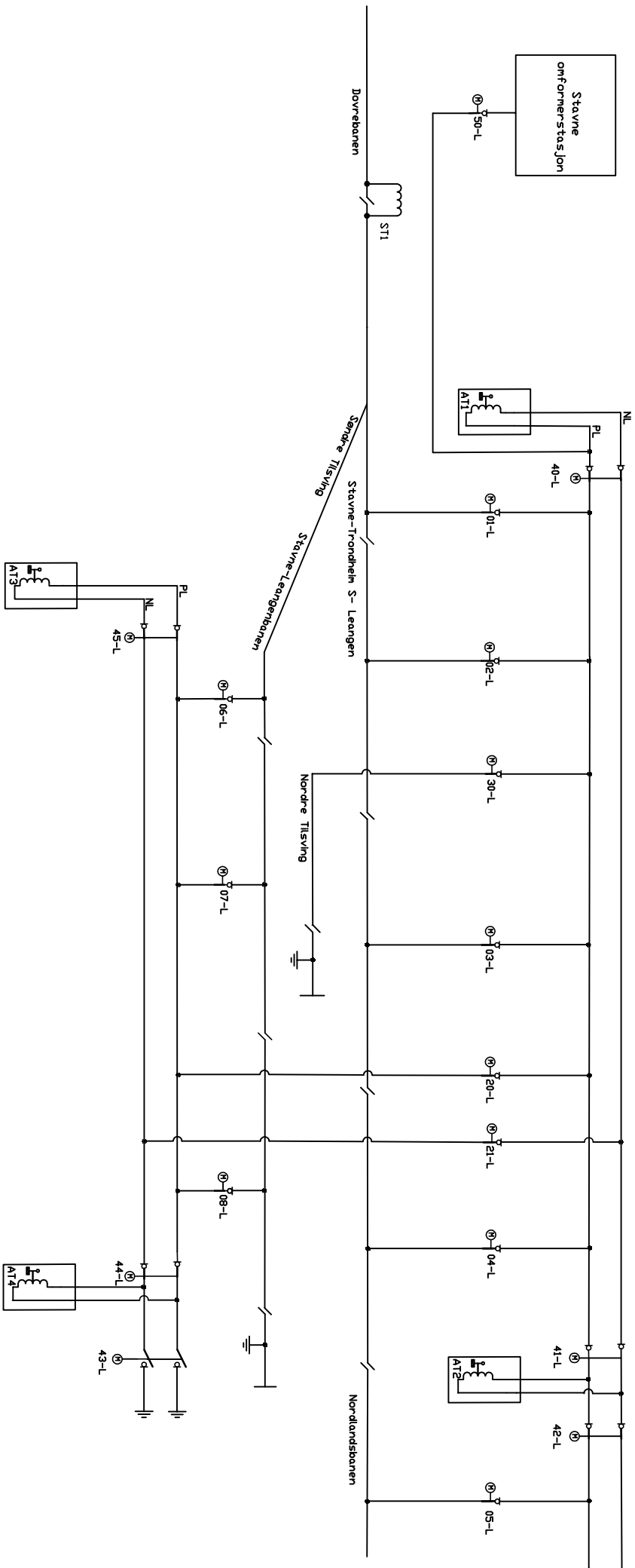
- [9] Jernbaneverket, «Seksjonering av kontaktledningsanlegg,» 2015. [Internett]. Available: [http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk\\_systembeskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg#Seksjonering](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk_systembeskrivelse_av_kontaktledningsanlegg#Seksjonering).
- [10] Jernbaneverket, «Elektrisk systembeskrivelse av kontaktledningsanlegg,» 2015. [Internett]. Available: [http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk\\_systembeskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk_systembeskrivelse_av_kontaktledningsanlegg).
- [11] Norsk jernbaneskole, Bygging av kontaktledningsanlegg del 1:2, 2015.
- [12] Jernbaneverket, «Returkrets,» 2015. [Internett]. Available: [http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk\\_systembeskrivelse\\_av\\_kontaktledningsanlegg#Returkrets](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Elektrisk_systembeskrivelse_av_kontaktledningsanlegg#Returkrets).
- [13] Jernbaneverket, «Bruk av autotransformatorer i banestrømforsyningen,» 3 Mars 2016. [Internett]. Available: [http://jernbanekompetanse.no/wiki/Bruk\\_av\\_autotransformatorer\\_i\\_banestr%C3%B8mforsyningen](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Bruk_av_autotransformatorer_i_banestr%C3%B8mforsyningen).
- [14] N. F. D. Stenlund, «Utbyte av mobil roterande omformare till statisk omriktare med mobilt utförande i Asker,» Högskolan väst, Trollhättan, 2014.
- [15] «Wikipedia,» [Internett]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrification\\_of\\_the\\_New\\_York,\\_New\\_Haven,\\_and\\_Hartford\\_Railroad](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrification_of_the_New_York,_New_Haven,_and_Hartford_Railroad). [Funnet 2016].
- [16] A. Ruud og H. Remme, «Jernbaneverket,» 2015. [Internett]. Available: <http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Miljo/Miljopavirkning/Energiforbruk/>.
- [17] F. Martinsen, «Simuleringsrapport - Elektrifisering av Meråkerbanen og Nordlandsbanen til Steinkjer,» Jernbaneverket, 2016.
- [18] Jernbaneverket, «Kontaktledning/Prosjektering/Returkrets,» [www.trv.jbv.no](http://www.trv.jbv.no), 2016. [Internett]. Available: <https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Returkrets>.

[19] F. Martinsen, Forfatter, *Seminar om kontaktledningsanlegg*. [Performance].  
Jernbaneverket, 2016.

[20] Jernbaneverket, «EMC-studie».

[21] Jernbaneverket, «Effektflyt,» 2015. [Internett]. Available:  
<http://jernbanekompetanse.no/wiki/Effektflyt>.

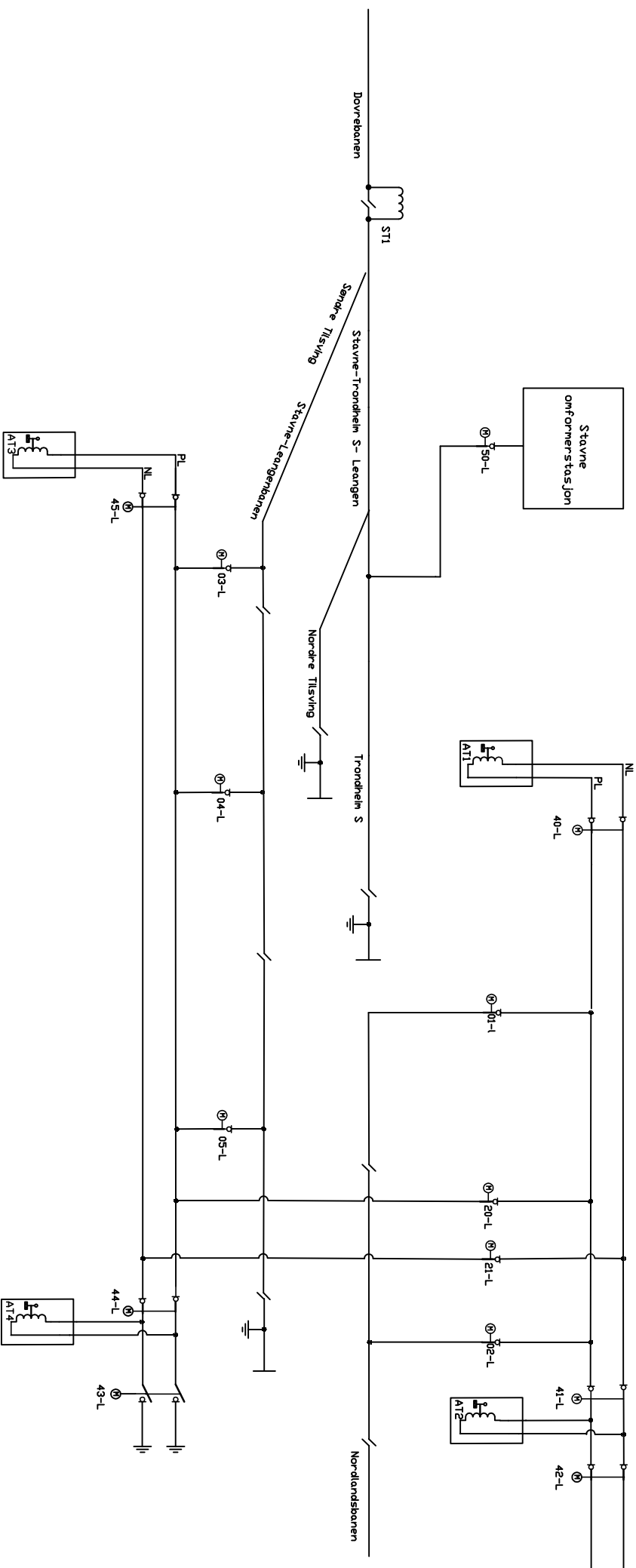




KONTAKTLØSNING/ ELEKTRISKEFORB (GENERELT)	SEKSJON	SEKSJONS- ISOLATOR	SKINNELOD	JORD	SKILLEBRYTER
MOTORDRIFT	TRANSFORMATOR	KOBL.PUNKT	IKKE ELEKTRISK FORBINDELSE	EFFEKTBRYTER	LASTSKILLE- BRYTER

Rev.	000	Revisjonen gjelder
Dato	2016	VM
Målestokk	—	M10
Produkt	—	SJB
Prod.tegn.nr.	1	
Erstatning for	—	
Erstattet av	—	
Tegningsnummer:	1	

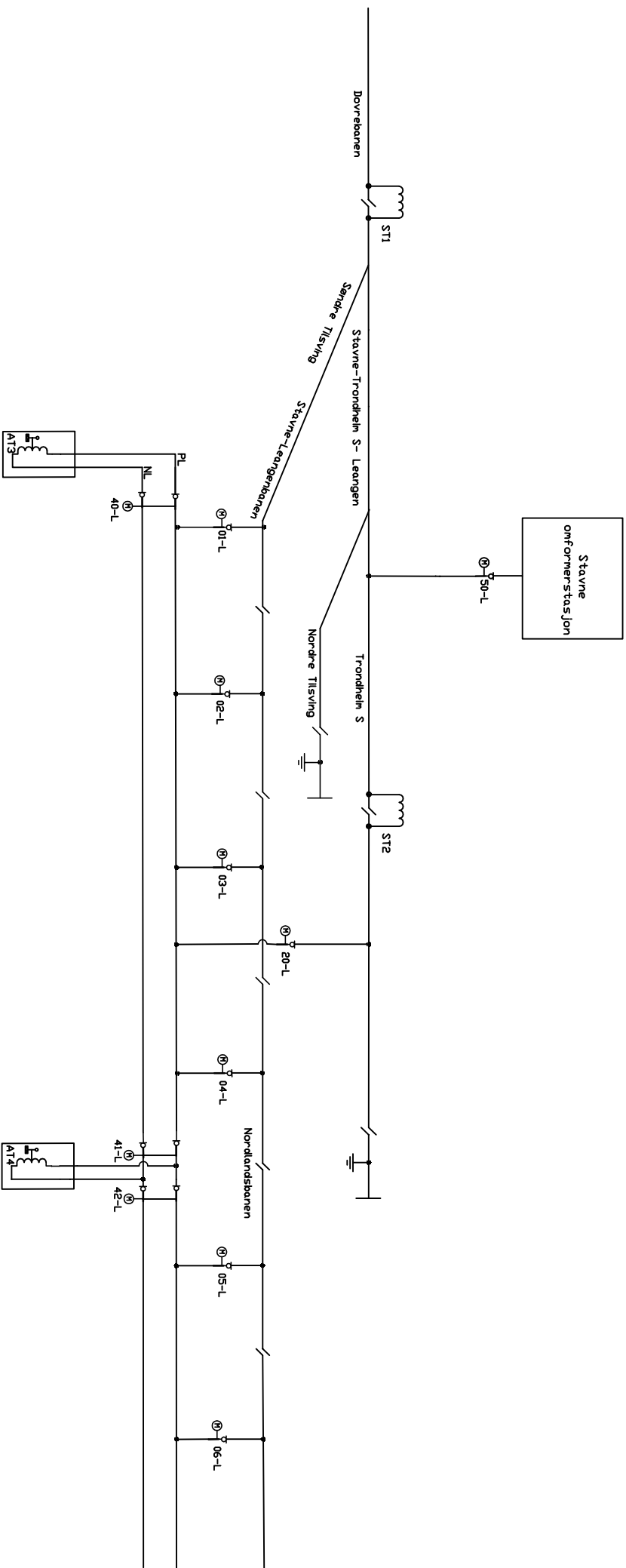
Stovne-Trondheim S, Stovne-Leangenbanen og  
Trondheim S-Leangen  
Koblingsskjema for alternativ 1 c)  
Vedlegg A



KONTAKTLEINING/ ELEKTRISKE ØRER (GENERELT)	SEKSJON	SEKSJONS- ISOLATOR	SKINNELEDD	JORD	SKILLEBRYTER
MOTORØRRT	TRANSFORMATOR	KOBL.PUNKT	IKKE ELEKTRISK FORBINDELSE	EFFEKTBRYTER	LASTSILLE- BRYTER

000	Revisjonen gjelder	2016	VM	MJO	SJB
Stovne-Trondheim S, Stovne-Leangenbanen og Trondheim S-Leangen Kablingsskjema for alternativ 2 b) Vedlegg B					
Dato	Tegnet av	Kontrollert av Godkjent av			
Målestokk	Frikket 1				
Producent	Frikket 2				
Prod.tegn.nr.	Frikket 3				
Erstatning for	Bachheleggruppe E1615, NTNU				
Erstatet av	-				
Tegningsnummer:	2				
Rev.:	000				



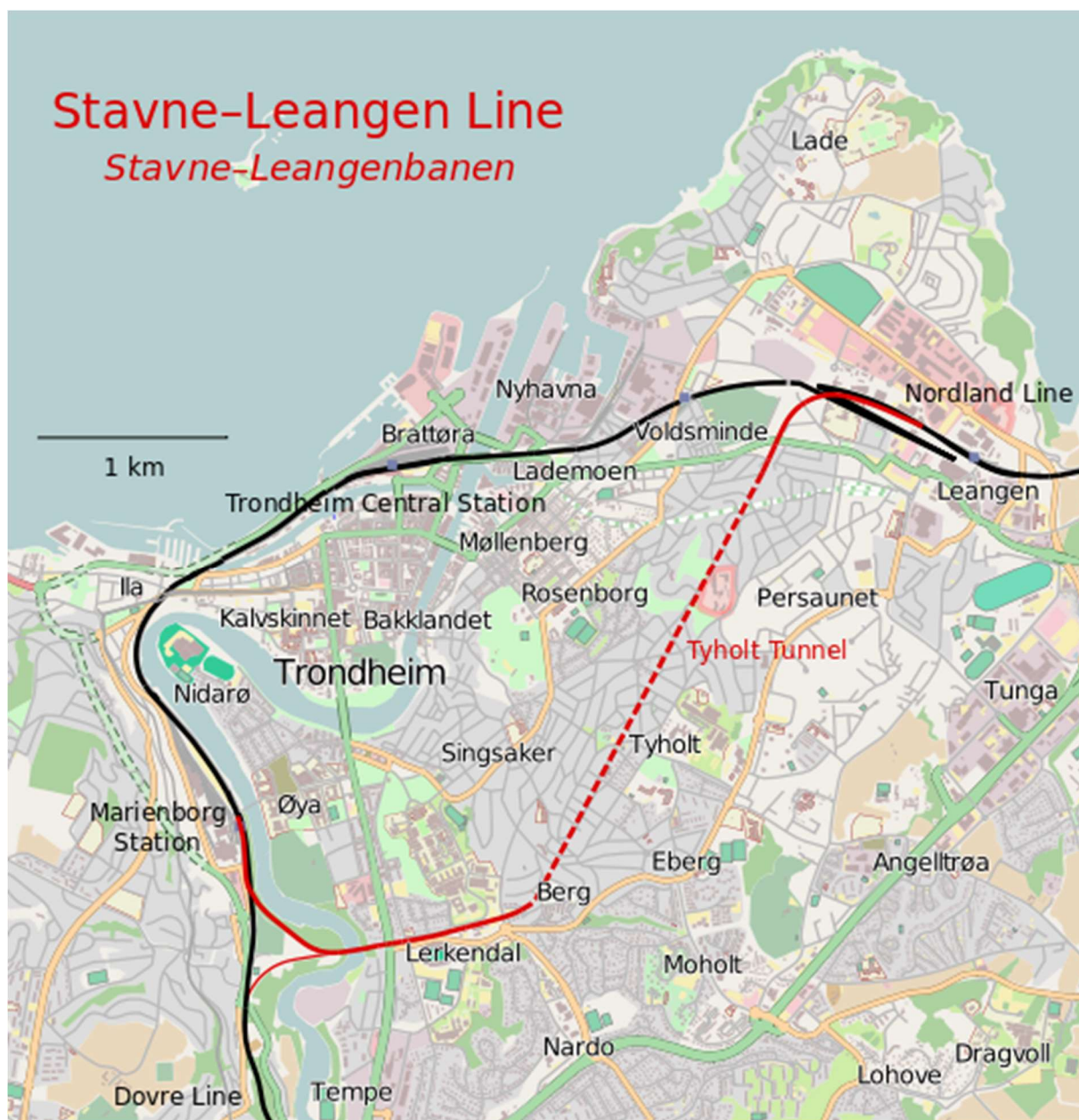


KONTAKTLENNING/ ELEKTRISKEFORB (GENERELT)	SEKSJON	SEKSJONS- ISOLATOR	SKINNELOD	JORD	SKILLEBRYTER
MOTORBRYTT	TRANSFORMATOR	KOBL.PUNKT	KKE. ELEKTRISK FORBINDELSE	EFFEKTBRYTER	LASTSKILLE- BRYTER

Rev.	000	Revisjonen gjelder
Date	2016	Tegnet av VM
Målestokk	—	Kontrollert av MJO
Produkt	—	Godkjent av SJB
Prod.tegn.nr.	3	
Erstetning for	—	
Erstetlet av	—	
Tegningsnummer	3	

Stavne-Trondheim S, Stavne-Leangenbanen og  
Trondheim S-Leangen  
Koblingsskjema for alternativ 3 c)  
Vedlegg C

## Vedlegg D: Illustrasjon av Stavne-Leangenbanen



# Alternative løsninger for sammenkobling av kontaktledningsanleggene på Dovre- og Nordlandsbanen

## Elektrifisering av jernbanen

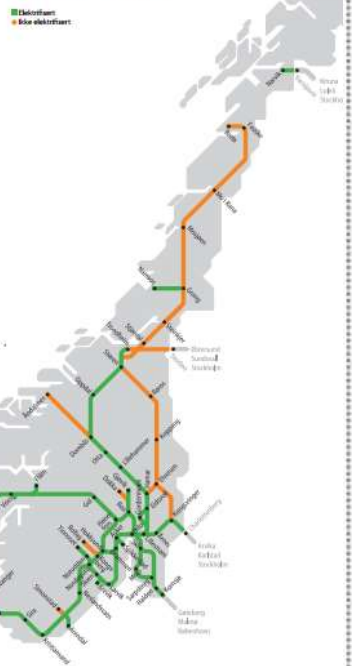
Store deler av jernbanenettet i Norge er elektrifisert. I 2013 ble det besluttet at deler av Nordlandsbanen, ofte kalt Trønder- og Meråkerbanen, skal elektrifiseres. Dette inkluderer Stavne-Leangenbanen i Trondheim. Etter planen skal hele strekningen fra Trondheim til Steinkjer og Storlien stå ferdig i 2023. Det er et prosjekt som er budsjettert til ca. 3 milliarder kroner.

Denne bacheloroppgaven skal ta for seg strekningene i og rundt Trondheim.

Da Norge for rundt 100 år siden begynte å elektrifisere jernbanenettet, gjorde tekniske utfordringer det til at man brukte vekselspenning med frekvensen  $16 \frac{2}{3}$  Hz til å forsyne togene med elektrisk energi. Da det er alt for dyrt å skifte til en annen frekvens, bruker man fortsatt  $16 \frac{2}{3}$  Hz. Det samme gjør Tyskland, Østerrike, Sveits og Sverige.

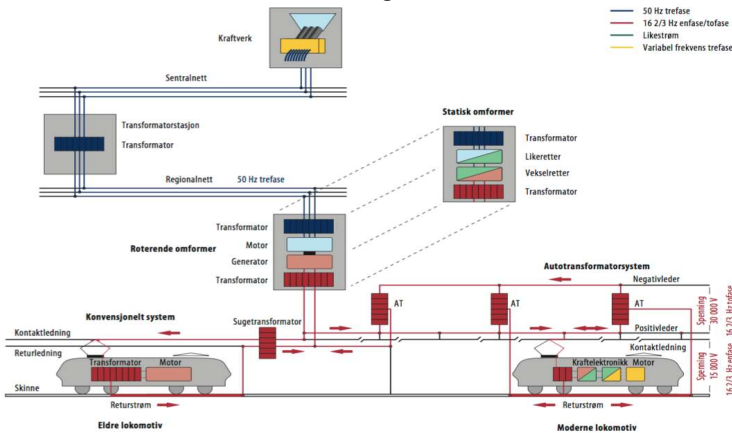
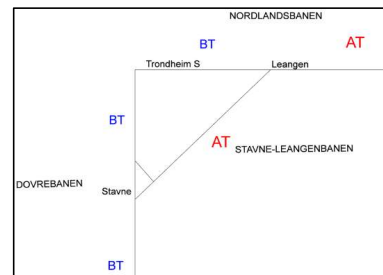
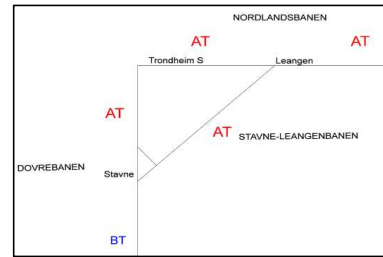
Jernbanenettet er i all hovedsak forsynt av 50 Hz-nettet. For at det skal fungere, må frekvensen omformers til henholdsvis  $16 \frac{2}{3}$  Hz. Frekvensen omformers ved hjelp av frekvensomformere, både roterende og statiske.

Jernbanenettet i Norge



Studentene på befaring ved Stavne omformerstasjon

Denne bacheloroppgaven er utført av tre studenter ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i samarbeid med Jernbaneverket. Hensikten med prosjektet har vært å finne mulige løsninger til prosjektering av banestrømforsyning og sammenkobling av nytt og gammel kontaktledningsanlegg. Noe av det som blir sett på i oppgaven, er hvilket type system som skal installeres på hvilke strekninger i Trondheim. Bildene til høyre er av de to mest aktuelle løsningene. BT er det systemet som også er kalt konvensjonelt system, mens AT er autotransformatorsystem.



I Norge er det to typer system for fremføring av energi til tog som benyttes. Det mest vanlige er kalt konvensjonelt system i figuren over. Der føres energien fra omformerstasjonen via en 15 kV leder kalt kontaktledning. Strømmen går ned gjennom pantografen til toget, transformeres ned til motorspenning og går gjennom motoren. Strømmen ledes så tilbake til omformerstasjonen via skinnegang og returledning. For å unngår lekkstrømmer til jordsmonnet, er det monterte transformatorer med forhold 1:1 som «suger» opp disse strømmene. Det andre systemet som brukes i Norge, kalles autotransformatorsystem. Her kobles en autotransformator

mellom to ledere og også seksjonert, slik at dskinnegangen. Dette gjør at man får 2 ledere med samme spenning som er i mot-fase. Dermed blir peak-to-peak spenning mellom lederne, kalt positiv- og negativleder, 30 kV. Kontaktledningen er tilkoblet positivleder med gjenvne mellomrom, slik at toget blir forsynt med 15 kV. Kontaktledningen er et gåt svært lite strøm i de seksjonene toget ikke oppholder seg i. Dette for å unngå lekkstrømmer o.l. Autotransformatorsystem har en mye høyere overføringskapasitet enn det konvensjonelle systemet, og er derfor å foretrekke der det er mye og tung trafikk.

Et av utgangspunktene var at det skulle være BT-system opp til Stavne, slik som det allerede er i dag, samt at det skulle være AT-system fra og med Leangen og videre langs Nordlandsbanen. Gruppen hadde da 6 forskjellige løsninger. Etter hvert ble det bestemt at man skulle ha AT-system på Stavne-Leangenbanen, og dermed ble flere løsninger forkastet.

For å kunne forsyne energi fra nord til sør, og motsatt, må Dovrebanelen være elektrisk sammenkoblet med Nordlandsbanen. Da det er to forskjellige system, byr dette på enkelte problemer. Det ble dermed laget en linjeskjema for å vise hvordan dette kan gjøres.

Det ble også diskutert om man skulle koble sammen systemene på mer enn en plass, eller isolere dem fra hverandre på enkelte steder. Dette fordi omkoblingspunkt er en ekstra feilkilde, og det kan være plasskrevende å koble om fra BT- til AT-system.

Etter videre vurdering av elektrotekniske, og delvis økonomiske, fordeler og ulemper ble det konkludert med at løsning med AT-system på alle strekningene var det beste, da det gir en god overføringskapasitet, best mulig spenningskvalitet og legger til rette for økt trafikk i fremtiden.

