

Strøm- og spenningsnivåer i returkretsen til BTRC- og AT-systemet

Espen Kolstad Svendsen

Master i veg og jernbane

Innlevert: mai 2016

Hovedveileder: Hans Kristian Høidalen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Problembeskrivelse

Ved innføring av det nye autotransformatorsystemet (AT-system) i Norge vil man gå bort fra tidligere sugetransformatorsystemer. Det er derfor ønskelig å se på de endringer innføringen av det nye systemet medfører for strøm- og spenningsnivåer i returkretsen. På grunn av kompleksiteten til jernbanesystemene har det tidligere vært utfordrende å modellere og simulere skinnepotensialet og strømmer i jordsmonnet for systemene. Påvirkninger langs jernbanetraséen, som blant annet variasjoner i grunnen, været og forurensning/slitasje, påvirker jordresistiviteten og avledningskonduktans til jord. Dette medfører store variasjoner i beregningene.

Hovedmål

Oppgaven skal med fokus på forskjeller mellom BTRC- og AT-systemet modellere og simulere strømmer og spenninger i returkretsen. For systemene skal det ses på strømmer i jordsmonnet og skinnepotensialet, det skal vurderes hvordan disse blir påvirket av impedansen i skinnegangen og avledningskonduktans til jord.

Delmål:

- Vurdere om ATPDraw er egnet for simulering av jernbanesystemer
- Utarbeide en simuleringsmodell for begge forsyningssystemene i ATPDraw
 - Utføre simuleringer for begge systemer av skinnepotensialet og strøm i jordsmonnet med variasjon av skinneimpedansen og avledningskonduktansen til jord
 - Presentere simuleringsresultater
- Resultatene fra simuleringene for de to ulike systemene skal sammenlignes og vurderes
- Vurdere resultatene opp mot simuleringer andre har utført tidligere
- Vurdere resultatene opp mot krav fra gjeldene standarder

Hypoteser:

- Det er en betydelig forskjell i skinnepotensial og strømmer i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet
- Variasjon i avledningskonduktansen har samme påvirkning på skinnepotensial og strømmer i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet
- Variasjon i skinneimpedansen har samme påvirkning på skinnepotensial og strømmer i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet

Forord

Denne rapporten er resultatet av arbeidene med min masteroppgave i 2015/16 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven er siste del av mitt erfaringsbaserte masterstudie i veg og jernbane.

Jeg vil benytte anledningen til å takke Professor Hans Kristian Høidalen for god hjelp med veiledning frem til en ferdig oppgave. Han har bidratt med flere verdifulle poeng og tilbakemeldinger under arbeidet. Hjelpen til forståelsen av jernbanesystemene og gode diskusjoner med Frank Martinsen i Jernbaneverket fortjener en stor takk. Jeg vil også takke for alle faglige diskusjoner og støtte under arbeide fra mine kollegaer i ECT A/S. Hele studiet har vært interessant og spennende, jeg er glad for muligheten Jernbaneverket og ECT A/S har gitt meg til å gjennomføre dette. Til slutt vil jeg takke min kone Kari-Johanne Iversen for støtten og forståelsen ved stressende og frustrerende tider under studiet.

Sandvika, 15.05.2016

Espen Kolstad Svendsen

Abstract

The increase in required capacity on the railway power supply system makes it necessary to change most of today's systems. The new system will be an autotransformer system with sectioned contact line. This master thesis studies differences in the traction systems return path of the BTRC-system and the new AT-system.

To simulate the two systems ATPDraw has been used for different scenarios. In the simulations the parameters of rail to earth leakage conductance and the rail impedances has been used as variables. The rail to earth leakage conductance have large variations depending on the weather and local conditions. It is not unusual with values between 0.25 S / km and 0.75 S/km. Higher values may also occur, especially at the station areas. The rail to earth leakage conductance has a major influence on the results.

The result of the rail potential and return current in earth for the systems has been studied. These show that the rail potential and the return current in earth will be higher for the AT-system than for the BTRC-system.

The simulations showed that:

- The rail to earth leakage conductance affects the systems differently. The rail potential is reduced by a factor of 0.48 for a change in the rail to earth leakage conductance from 0.05 S/km to 0.75 S/km for the AT-system and a factor of 0.66 for the BTRC-system. The return current in earth is increased by a factor of 5 for the AT-system and 5.5 for the BTRC-system by the same change in the rail to earth leakage conductance.
- The rail impedances affects the rail potential and the return current in earth uniformly for both systems by a factor of 1.4 times the change in absolute value of the rail impedances
- Touch voltage for the BTRC-system complies with requirements of IEC 50122-1 by rail to earth leakage conductance down to $G = 0.05$ S/km. The requirements are not met for the AT-system for rail to earth leakage conductance under $G = 0.25$ S/km, without limiting measures. IEC 50121-3 does not set specific requirements for the return current in earth. The return current in earth from the AT-system is considerably larger, it's believed to provide higher electromagnetic fields and higher interference.
- ATPDraw have components that are well suited for simulation of railway systems, but the program lacks features for managing continuous rail to earth leakage conductance and current dependent impedance for the rails.

Sammendrag

På grunn av økt behov for kapasitet på forsyningssystemet til jernbanen er det behov for å skifte ut store deler av dagens forsyningssystemer. Det vil bli skiftet ut til et autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning (AT-system). Oppgaven har sett på forskjeller i returkreten mellom dagens BTRC-system og det nye AT-systemet.

Det er benyttet ATPDraw for å simulere de to systemene ved forskjellige scenarier. I simuleringene er skinneimpedansen og avledningskonduktansen til jord benyttet som variabler. Avledningskonduktansen har store variasjoner avhengig av været og stedlige forhold. Det er ikke uvanlig med verdier mellom 0,25 S/km og 0,75 S/km. Høyere verdier kan også forekomme, spesielt ved stasjonsområder. Avledningskonduktansen har stor påvirkning på resultatene.

Resultatene av skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet for systemene er studert. Disse viser at skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet vil være høyere for AT-systemet enn for BTRC-systemet.

Simuleringene viser også at:

- Avledningskonduktansen påvirker systemene ulikt. Skinnepotensialet blir påvirket med en faktor på 0,48 ved en endring i avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km for AT-systemet og en faktor på 0,66 for BTRC-systemet. Strømmen i jordsmonnet blir påvirket med en faktor på 5 for AT-systemet og 5,5 for BTRC-systemet ved en endring i avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km.
- Skinneimpedansen påvirker skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet likt for begge systemene med en faktor på 1,4 ganger endringen i absoluttverdien til skinneimpedansen.
- Kravet i NEK EN 50122-1 til berøringsspenning er overholdt for BTRC-systemet ned mot en avledningskonduktans på $G = 0,05$ S/km. AT-systemet overholder ikke kravet ved avledningskonduktans under $G = 0,25$ S/km, uten begrensende tiltak. NEK EN 50121-3 setter ingen konkrete krav til strømmen som tillates i jordsmonnet. Ettersom strømmen i jordsmonnet fra AT-systemet er betydelig større antas det å gi høyere elektromagnetiske felter og høyere forstyrrelser på nærliggende anlegg.
- ATPDraw har komponenter som egner seg godt for simulering av jernbanesystemer, men programmet mangler funksjoner for håndtering av kontinuerlig avledningskonduktans og strømvhengig impedans i skinnegangen.

Nomenklaturliste

| | |
|------------------------|---|
| AT-system | Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning |
| AT-vindu | Strekningen mellom to autotransformatorer |
| Avledningskonduktans | Avledning av strøm fra skinner og/eller objekter til jord |
| Berøringsspenning | Spenning mellom ledende deler når disse berøres samtidig av et menneske eller dyr |
| BTRC-system | Sugetransformatorsystem med returledere der det er benyttet isolerte skinnerkjøter ved sugetransformatoren (system D) |
| BT-vindu | Strekningen mellom to sugetransformatorer |
| E-Felt | Elektrisk feltstyrke, med måleenhet V/m |
| Fjern jord | Potensial som konvensjonelt kan betraktes som null uten påvirkninger fra andre jordingssystemer |
| H-Felt | Magnetisk feltstyrke, med måleenhet A/m |
| Isolerte skinnerkjøter | Skjøt av jernbaneskinne med isolerende materialet mellom skinnestrengene som skjøtes |
| Jordsmonn | Den delen av grunnen/jorden under og i nærheten av jernbanetraséen som kan føre strøm fra jernbanesystemet |
| Kontaktledning | Felles betegnelse for både bæreline og kontakttråd |
| Returkrets | Returkretsen består av skinner, jord og eventuelle returledere |
| Skinnepotensiale | Spenning mellom kjøreskinner og fjern jord |

Innholdsfortegnelse

| | Side |
|---|-----------|
| 1 Innledning | 1 |
| 2 Forskrifter, standarder og regelverk | 2 |
| 2.1 Forskrift om EØS-krav til (EMC) for utstyr til elektronisk kommunikasjon..... | 2 |
| 2.2 Forskrift om elektriske forsyningsanlegg | 3 |
| 2.3 NEK EN 50121..... | 3 |
| 2.4 NEK EN 50122..... | 4 |
| 2.5 Jernbaneanleggets Tekniske regelverk..... | 5 |
| 3 Jernbaneanleggets komponenter og parametere | 6 |
| 3.1 Kontaktledningsanlegget som forsyningsystem..... | 6 |
| 3.2 Transformatorer | 12 |
| 3.3 Analytiske beregninger av impedanser i kontaktledningsanlegget | 15 |
| 3.4 Jordresistivitet..... | 24 |
| 3.5 Avledningskonduktansen til jord..... | 26 |
| 4 Modellering og simulering | 32 |
| 4.1 ATPDraw | 32 |
| 4.2 Verifisering av komponenter i ATPDraw | 35 |
| 4.3 Oppbygging av modellene..... | 36 |
| 4.4 Verifisering av antall linjesegmenter i modellen..... | 39 |
| 4.5 Scenarier | 40 |
| 5 Resultater | 42 |
| 5.1 BTRC-systemet - Skinnepotensial..... | 43 |
| 5.2 BTRC-systemet - Strøm i jordsmonnet | 46 |
| 5.3 AT-systemet - Skinnepotensial..... | 48 |
| 5.4 AT-systemet - Strøm i jordsmonnet | 51 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6 | Vurdering av resultater | 53 |
| 6.1 | Vurdering av modellene | 53 |
| 6.2 | Vurdering av beregningsprogrammet | 54 |
| 6.3 | Skinnepotensial..... | 55 |
| 6.4 | Strøm i jordsmonnet | 60 |
| 6.5 | Krav fra standarder | 64 |
| 7 | Konklusjon..... | 67 |
| 8 | Videre arbeid | 69 |
| 9 | Figurliste | 70 |
| 10 | Tabell liste..... | 72 |
| 11 | Referanser..... | 74 |
| 12 | Vedlegg..... | 76 |

1 Innledning

På grunn av behov for økt kapasitet på jernbanens forsyningssystem og høy alder på kontaktledningsanleggene, er det nødvendig å fornye anleggene med et system som har større overføringsevne. Det er da vurdert flere systemer før det ble valgt å benytte autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning. Ved en endring fra dagens forsyningssystemer er det ønskelig å se på hvilke forskjeller dette gir i returkretsen.

Jernbaneanlegget er et komplekst system med flere komponenter og sammenkoblinger. I normal drift vil det gå strøm i jordsmonnet og jordingsanlegget til jernbanen. Det er da viktig å ha kontroll på hvilke strømmen og spenninger som kan oppstå i anlegget. Det stilles krav til maksimale berøringsspenninger og tillatte forstyrrelser på nærliggende anlegg. På grunn av kompleksiteten til jernbaneanlegget er det nødvendig å benytte beregningsprogrammer for å analysere de strømmen og spenninger som oppstår i anlegget.

Oppgaven tar for seg det mest brukte systemet i Norge i dag, som er system-D (Booster transformer return conductor) og det nye AT-systemet. Det blir sett på de ulike komponentene i systemene og hva som påvirker disse. Skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet for de to systemene blir simulert og sammenlignet.

Videre tar oppgaven for seg kartlegging av forskrifter, standarder og Jernbaneverkets Tekniske regelverk som setter krav for systemene. Det er gjort en vurdering av de komponenter, parametere og systemer som betraktes. Dette danner grunnlaget for modellene som simuleres i ATPDraw og hvilke scenarier som skal undersøkes. Prosjekt-filene for simuleringen i ATPDraw er vedlagt i egen ZIP-fil. Grunnleggende kjennskap til ATPDraw kan også være en fordel. Resultatene fra simuleringene er videre sammenstilt og presentert. Det er gjort en vurdering av simuleringen og resultatene der systemene sammenlignes. Oppnådde resultater er også vurdert mot simuleringer utført av professor György Varjú ved det tekniske universitet i Budapest, samt standardene NEK EN 50121 og NEK EN 50122. Det er trukket konklusjoner basert på de resultater og vurderinger som er gjort. Til slutt oppsummeres hvilke videre arbeider som bør studeres ytterligere.

Det forutsettes at leseren har generell jernbane- og elektroteknisk forståelse. Nomenklaturlisten forklarer noen av begrepene benyttet i oppgaven. Referanser som er benyttet i slutten av en setning er kun knyttet til setningen. Ved referanser i slutten av et avsnitt er disse knyttet til hele avsnittet.

2 Forskrifter, standarder og regelverk

Dette kapitlet gjør rede for de mest relevante forskrifter, standarder og Jernbaneløst Tekniske regelverk i forbindelse med krav til maksimale berøringsspenninger og elektromagnetisk sameksistens i jernbaneanlegget. Ettersom strømmen i jordsmonnet har stor påvirkning på de elektromagnetiske feltene rundt jernbanen blir det sett på krav knyttet til disse feltene. Fokuset i kapitlet vil være faste installasjoner og jernbaneanlegget som system. Det blir kun sett på forstyrrelser fra driftsfrekvenser (16 2/3 Hz og 50 Hz). Enkeltkomponenter blir ikke omtalt.

Som en del av EØS-avtalen er direktiv 2014/30/EU grunnlaget for utarbeidelse av forskriftene som regulerer elektromagnetisk sameksistens i Norge. CENELEC har utarbeidet flere standarder for EMC. Standarden NEK EN 50121 er utarbeidet spesielt for jernbaneanlegg. NEK EN 50121 ser ikke på det sikkerhetsmessige aspektet ved elektriske jernbaneanlegg. Dette blir omtalt i NEK EN 50122. [1]

2.1 Forskrift om EØS-krav til (EMC) for utstyr til elektronisk kommunikasjon

Delkapitlet er basert på referanse [2]. Elektromagnetisk sameksistens for jernbanen er regulert av forskrift om EØS-krav til elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) for utstyr til elektronisk kommunikasjon. Forskriften har hjemmel i lov om elektronisk kommunikasjon (ekomloven). Forskriften setter ikke konkrete immunitets- og emisjonsgrenser, men et funksjonskrav til sameksistens. Formålet til forskriften er:

«å sikre at det indre marked fungerer og at utstyr til elektronisk kommunikasjon har en tilstrekkelig grad av elektromagnetisk kompatibilitet.»¹

¹ Utstyr er definert i forskriften som: *ethvert apparat eller fast installasjon.*

2.2 Forskrift om elektriske forsyningsanlegg

I dette delkapittelet er referanse [3] benyttet. Forskriften er hjemlet i lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr (el-tilsynsloven). Formålet til forskriften er:

«Elektriske anlegg skal prosjekteres, utføres, driftes og vedlikeholdes slik at de sikkert ivaretar den funksjon de er tiltenkt uten å fremby fare for liv, helse og materielle verdier.»

I forskriften har jernbaneanlegg flere unntak, det er også et kapittel som gjelder spesielt for jernbaneanlegg. DSB har utarbeidet en veiledning til forskriften. Denne utdyper og forklarer momenter i forskriften viser til hvilke spesifikasjoner og normer DSB legger til grunn for forståelsen av kravene i forskriften. Veiledningen angir at berøringsspenninger ikke skal overskride verdier gitt i NEK EN 50122-1 og definerer sone for kontaktledning og strømvaktaker.

2.3 NEK EN 50121

Dette delkapittelet baserer seg på referanse [4]. Standarden NEK EN 50121 «Jernbaneapplikasjoner Elektromagnetisk kompatibilitet» er delt opp i fem deler som består av:

1. Generelt
2. Emisjon fra hele jernbanesystemet til omverdenen
3.
 1. Rullende materiell – Tog og komplette vogner
 2. Rullende materiell - Apparater
4. Emisjon og immunitet fra signal- og telekommunikasjonsapparater
5. Emisjon og immunitet fra faste strømforsynings-installasjoner og apparater

Standarden setter funksjonskrav til anleggene, men det er kun del 2 som setter spesifikke grenseverdier for jernbanesystemet ved driftsfrekvens. I del 3 er immunitet for signal- og teleutstyr beskrevet. Standarden sier her at ved driftsfrekvens skal signal- og teleutstyr testes etter funksjonsbeskrivelsen til utstyret.

Del 2 setter emisjonsgrenser for elektromagnetisk støy jernbaneanlegget kan påvirke omverdenen med. Hovedsakelig er det støy fra høyfrekvente kilder som er beskrevet.

Standardens vedlegg B angir typisk verdier for det elektriske og magnetiske feltet². For 16,7 Hz aksepteres det et E-felt på 750 V/m og et H-felt på 40 A/m. Verdiene er ved måling 1 m over skinnegangen og 10 m fra jernbanesporet, med en strøm på 2000A.

2.4 NEK EN 50122

I dette delkapittelet er referanse [5] benyttet. Standarden NEK EN 50122 «Jernbaneanvendelser – Faste installasjoner, Elektrisk sikkerhet, jording og returkrets» består av tre deler:

1. Beskyttende tiltak mot elektrisk sjokk
2. Tiltak mot påvirkning av vagabonderende strømmer fra traksjonssystemer med d.c.
3. Gjensidig påvirkning mellom traksjonssystemer med d.c. og a.c.

Del 2 og 3 vil ikke bli anvendt i denne oppgaven.

Del 1 av standarden spesifiserer krav til beskyttende tiltak for elektrisk sikkerhet ved faste jernbaneinstallasjoner.

Det er beskrevet krav for hva som skal kobles til banestrømmens returkrets og hvilke tiltak som må gjennomføres om dette ikke er mulig. Grenseverdier for tillatte effektive berøringsspenninger er gitt i standardens kapittel 9 for ulike varigheter av spenningen. For kontinuerlig berøringsspenning (>300 s) er maksimal tillatt verdi 60 V. I Norge er utkoblingstiden ved feil satt i Jernbaneverkets Teknisk regelverk til 0,3 s som gir en maksimal tillatt verdi på 480 V i henhold til standarden.

² Verdiene som er angitt i vedlegg B henviser til H-feltet, men har benevnelsen i Tesla. Det er antatt at verdien skal være i A/m.

2.5 Jernbaneverkets Tekniske regelverk

I dette delkapittelet er referanse [6] benyttet. Jernbaneverkets Tekniske regelverk er krav Jernbaneverket stiller til prosjektering, bygging og vedlikehold for å oppnå mål om tilgjengelighet, sikkerhet, kostnadseffektivitet og kapasitet. Det er ikke funnet krav knyttet direkte til strøm i jordsmonnet. Ettersom strømmen i jordsmonnet påvirker de elektromagnetiske feltene fra jernbanen blir disse kravene studert.

2.5.1 Krav til personsikkerhet

Jernbaneverkets Tekniske regelverk har et eget kapittel som omhandler jording og utjevning. Dette kapittelet tar for seg hvordan det skal oppnås tilstrekkelig beskyttelse mot elektrisk sjokk uten at beskyttelsen forringer jernbaneanleggenes funksjon. Kapittelet har sterke bindinger til NEK EN 50122 for løsninger og krav som stilles. Dette gjelder blant annet; krav om maksimal tillatt berøringsspenning og hvilke objekter som skal jordes til banestrømmens returkreis. Det stilles også flere utførelseskrav til jordingsanlegget.

2.5.2 Elektromagnetiske forstyrrelser

For jernbanetekniske installasjoner beskriver Teknisk regelverk at NEK EN 50121 skal følges.

Kravene regelverket setter til elektromagnetiske felter er referert til ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) og gjengitt i Tabell 2-1

Tabell 2-1 Maksimale verdier for kortvarig eksponering av elektromagnetiske felt

| | E-felt (V/m) | H-felt (A/m) | B-felt (μT) |
|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Publikum (16,7 Hz) | 10000 | 240 | 300 |
| Yrkesaktive (16,7Hz) | 20000 | 1200 | 1500 |

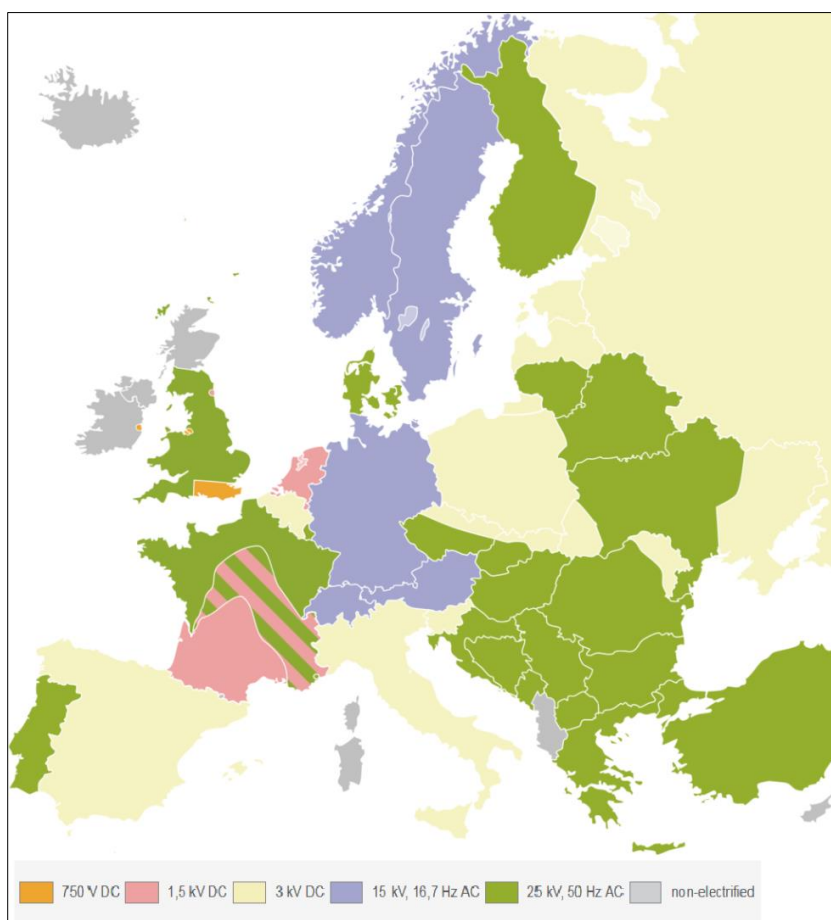
For langvarig eksponering av magnetfelt henvises det til Statens strålevern/NVE veiledning datert 1.10.2007. Denne setter krav om at tiltak skal utredes og vurderes ved en gjennomsnittlig eksponering i løpet av et år som er høyere enn $0,4\mu$ T.

3 Jernbaneanleggets komponenter og parametere

Jernbanesystemet er et komplekst system som består av flere komponenter som blant annet; ledninger, transformatorer, skinner og fundamenter. Dette er i dette kapittelet gir en kort beskrivelse av jernbanesystemene og de ulike komponentene som benyttes videre i oppgaven. Det er gjort utregninger av komponentenes parametere og forklart hvilke egenskaper som forutsettes. Parametere som jordresistivitet og avledningskonduktans til jord fra sporet har også innvirkninger på systemet. Forventede verdier og påvirkninger på disse parameterne er også beskrevet.

3.1 Kontaktledningsanlegget som forsyningssystem

I dag er det hovedsakelig tre spenningsnivåer som blir brukt i Europa som vist i Figur 3-1. I Norge, Sverige, Tyskland, Sveits og Østerrike brukes 15 kV, 16 2/3 Hz. 25 kV, 50 Hz brukes hovedsakelig i Øst-Europa, Frankrike, England og Portugal. Likestrømsystemet har flere spenningsnivåer. De vanligste er 750 V, 1,5 kV og 3 kV. [7]



Figur 3-1 Spenningsnivåer benyttet i Europa [8]

Det lave spenningsnivået i likestrømsystemene medfører store overføringsstrømmer, spesielt ved strekninger med mye stigning og ved bruk av store togsett. Systemet er brukt blant annet i Spania, Italia, Frankrike og Øst-Europa. [7]

Norge benytter i dag $16 \frac{2}{3}$ Hz (videre i oppgaven omtalt som 16,7 Hz)³, dette ble valgt ved starten av elektrifiseringen av jernbanen. Den manglende teknologien for hastighetsregulering og valg av motorer ved elektrifiseringen av jernbanen gjorde at det var behov for en lav frekvens. Ved å benytte en trefaset motor koblet til 50 Hz nettet som trekker en enfaset generator med $\frac{1}{3}$ av polparene til motoren kunne frekvensen omformes fra 50 Hz til 16,7 Hz. Dette gjør at frekvensen kan oppnås med samme hastighet på akslingen mellom maskinene. [7]

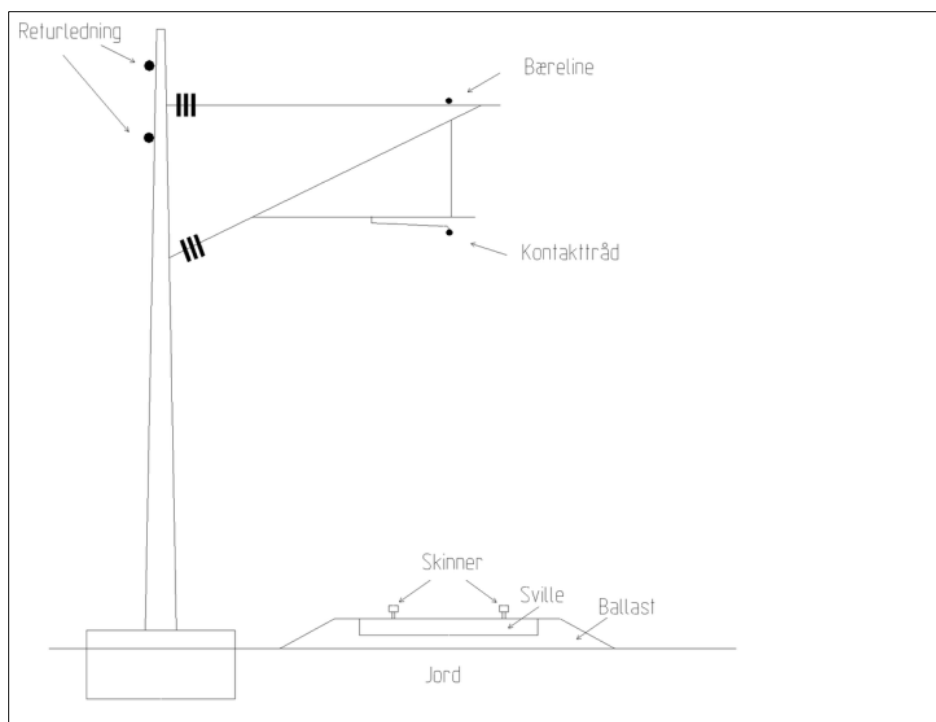
Det er flere grunner til at akkurat 16,7 Hz ble valgt. Noen av dem er listet opp under [7, 9]:

- Kommutatorstørrelsen på motoren og generatoren er proporsjonal med frekvensen. Derfor var det fordelaktig å benytte lavefrekvenser til togfremføringen.
- Stor slitasje på kommutatoren ved 50 Hz for tilgjengelige motorer
- Sverige, Tyskland, Sveits og Østerrike, hvor jernbanen ble elektrifisert på samme tidspunkt, valgte også denne frekvensen.
- Vekselstrømsystem har større fremføringskapasitet enn et likestrømsystem.
- Lavere frekvens gir mindre forstyrrelser på kabler parallelt med jernbanetraséen.
- Asymmetri i belastningen ved direkte forsyning fra 50Hz nettet.

I Norge omformes i dag spenningen fra 50 Hz nettet til 16,7 Hz ved hjelp av roterende og statiske omformere. Omformerstasjonene leverer en spenning på 16,5 kV som vil kompensere for spenningsfallet frem til toget [10]. Ved toget vil spenningen transformeres ned og omformes for å drive en trefase motor. Omformingene gjøres ved hjelp av frekvensomformere som gjør det mulig å regulere moment og hastighet for dagens motorer. [11]

Kontaktledningsanlegget skal overføre elektrisk energi frem til toget fra omformerstasjonen. Toget benytter da en strømvtager for å overføre strømmen fra kontaktledningen til toget og tilbake via skinnegangen. Figur 3-2 viser en typisk oppbygging av kontaktledningsanlegget. [10]

³ I 2000 endret Østerrike, Tyskland og Sveits sin nominelle frekvens fra $16 \frac{2}{3}$ Hz til 16,7 Hz. Dette er også benyttet i standardene EN 50163 og EN 50188



Figur 3-2 Typisk oppbygging av kontaktledningsanlegget [12]

Det finnes flere løsninger og oppbygginger av overføringskretsen frem til toget. System D (BTRC-system) og autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning som benyttes videre i oppgaven ses det på nedenfor. System A, B og C er også beskrevet kort. [1]

3.1.1 System A - Rail Return (RR)

Systemet benytter kontaktledningen som fremleder og sporet som tilbakeleder.

3.1.2 System B – Bostertransformer Rail Return (BTRR)

Systemet benytter kontaktledningen som fremleder og sporet som tilbakeleder. Det er også koblet en sugetransformator i mellom kontaktledningen og sporet.

3.1.3 System C – Boostertransformer Return Conductor (BTRC)

Det er for dette systemet ført parallelle returledere langs banen for å forsterke returkretsen. Sugetransformatoren tvinger da strømmen opp fra jord, gjennom sporet til returlederne.

3.1.4 System D – Boostertransformer Return conductor (BTRC)

I dette delkapittelet er referanse [12] benyttet. System B og D er de systemene som har vært mest brukt i Norge. De senere årene har det blitt bygget system D (BTRC-system) siden det settes krav til returleder for nye anlegg. Tegninger av BTRC-systemet er vist i Vedlegg A.

BTRC-systemet er en blanding av system B og C der det benyttes sugetransformator og returleder, samt at det er benyttet isolerte skinneskjøter ved sugetransformatorene. For BTRC-systemet vil sugetransformatoren bli koblet med primærsiden i serie med kontaktledningen og sekundærsiden i serie med returlederne. Sporet har en sammenbinding til returlederne omtrent midt mellom sugetransformatorene. Magnetfeltet i transformatoren tvinger da returstrømmen opp fra jord og skinnegangen tilbake i returlederne.

For BTRC-systemet vil strømmen bli ført gjennom kontaktledningen frem til toget og gjennom returlederne tilbake til omformerstasjonen. Magnetiseringsstrømmen for sugetransformatoren vil gå i jorden. Ettersom størstedelen av strømmen går i returlederne vil det gi korte avstander mellom frem- og tilbakeleder når returlederne henges opp i kontaktledningsmastene. Den korte avstanden gjør at magnetfeltet reduseres i de BT-vinduer hvor toget ikke befinner seg.

Det er benyttet isolerte skinneskjøter ved hver sugetransformator. Skinnegangen mellom to isolerte skinneskjøter kalles nullfelt, som er omtrent 30 m langt. Nullfeltet kobles til sugetransformatorens midtuttak. Dette gjør at berøringsspenningen over de isolerte skinneskjøtene halveres.

Ettersom sugetransformatoren er koblet i serie med frem- og tilbakeleder vil impedansen i systemet være større i forhold til et system uten sugetransformator eller med autotransformator.

3.1.5 Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning

Til banestrømforsyning antas autotransformatorsystemet å ha blitt benyttet for første gang i USA på New York, New Haven & Hartford-banen mellom 1907 og 1914. Det ble senere tatt i bruk ved økt forsyningsbehov ved Sanyo Shinkansen i Japan 1972 og TGV Paris – Lyon i Frankrike 1981. Autotransformatorsystemer med ulik utforming blir i dag brukt i flere europeiske land. Blant annet Frankrike, Tyskland, Ungarn, Sverige, Russland og Japan. [7, 13]

I 1987 ble det utviklet et forenklet autotransformatorsystem av Varjü. Dette systemet ble bygget i Ungarn og er forløperen til autotransformatorsystemet som er bygget i Sverige og Tyskland. Disse systemene danner grunnlaget for utformingen av det norske AT-systemet som er under utbygging i Norge i dag. AT-systemet ble videre utviklet av Varjü i samarbeid med Jernbaneverket. Forslag om seksjonering av kontaktledningsanlegget fra Frank Martinsen (Jernbaneverket) gjør at kontaktledningsanlegget utenfor AT-vinduet ikke bidrar som en del i energioverføringen. Systemet opprettholder derfor strømbalansen mellom positiv- og negativleder. [13, 14]

Fra 2010 ble det tatt i bruk et fjernledningssystem med autotransformatorsystem på Ofotbanen. Dette systemet har ikke samme oppbygging som det som bygges i dag [13]. Systemet på Ofotbanen vil ikke bli nærmere behandlet i denne oppgaven.

Norge er på vei til å gå over til AT-system for jernbanen. Det ble åpnet en strekning på Dovrebanen i 2015 mellom Minnesund og Kleverud. På Jærbanen ferdigstilles et AT-system mellom Egersund og Sandnes i 2016. [15]

AT-systemet som bygges i Norge er vist i Vedlegg B. Dette har en avstand mellom autotransformatorene på ca. 10-12 km og separat negativ- og positivleder. Kontaktledningen er seksjonert i lengder på 3-6 km og tilkoblet positivleder i et punkt. Skinnegangen er tilkoblet midtuttaket til autotransformatorene. Spenningen mellom positiv- og negativleder er 30 kV (± 15 kV), mellom positivleder og skinnegangen vil det da være en spenning på 15 kV. [14]

Ettersom autotransformatorene er koblet i parallell reduseres impedansen til systemet. Den høye overføringsspenningen gjør at belastningsstrømmen halveres. Impedansen sett fra primærsiden (Z_{15kV}) blir da fire ganger lavere enn impedansen på sekundærsiden (Z_{NLPL}) ved et viklingsforhold på 1:2 som vist i Formel 3-1.

$$Z'_{15kV} = Z_{PLNL} \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \quad \text{Formel 3-1}$$

Tapene og spenningsfallet frem til toget blir derfor kraftig redusert i et AT-system. Dette gjør at overføringskapasiteten øker, overføringslinjene kan bli lengere og avstanden mellom omformerstasjonene øker. [14]

De elektromagnetiske feltene fra en krets øker ved ubalanse mellom impedansen til frem- og tilbakeleder. Resistansen og reaktansen for disse bør derfor holdes så lik som mulig. Høy jordresistivitet vil forsterke denne effekten. For autotransformatorsystemet i Sverige løses

dette ved å tilpasse ledertversnittet og den geometriske plasseringen av lederne slik at resistansen og reaktansen i kretsen er tilnærmet lik. For Norge er dette vanskelig på grunn av flere trange tunneler og skjæringer. Ved å seksjonere kontaktledningen vil strømmen i prinsippet kun gå i negativ- og positivleder utenfor AT-vinduet hvor toget befinner seg. Impedansforskjellen i frem- og tilbakeleder er derfor redusert. Dette gjør at de elektromagnetiske feltene utenfor AT-vinduet som er belastet reduseres. Negativ- og positivleder kan da plasseres geometrisk uavhengig av kontaktledningen. En annen fordel med seksjoneringen er muligheten for utkobling av en kontaktledningsseksjon for vedlikehold, samtidig som det er drift på naboseksjonene. [14]

Fordeler [7, 13]

- Mindre elektromagnetiske forstyrrelser i parallelle kabler nær traséen.
- Mindre elektromagnetiske felter tilknyttet overføringslinjen.
- Lengre overføringslengder på grunn av høyere overføringsspenninger (Lengere avstand mellom omformerstasjoner).
- Lengre avstand mellom autotransformatorer kontra sugetransformatorer.
- Bedre overføringskapasitet.
- Lavere impedans i systemet enn forsyningssystem med sugetransformatorer.
- Mindre tap

Ulemper

- Installasjonskostnad pr. autotransformator er dyrere enn for sugetransformator
- Høyere krav til isolasjonsavstander mellom overføringsledere.
- Høyere krav til isolasjon av ledere og teknisk utstyr
- Det behøves ytterligere én overføringsleder i forhold til systemer uten returledere
- Behov for høyere master, som krever større fundamenter. Dette gir økte kostnader for anlegget

3.2 Transformatorer

Banestrømforsyningen i Norge benytter hovedsakelig sugetransformatorer og autotransformatorer i kontaktledningsanlegget. Disse har flere funksjoner. Blant annet trekker de returstrømmen i anlegget fra jord til en definert returkrets, for eksempel skinnegangen, returleder o.l. De reduserer også spenningsfallet i systemet.

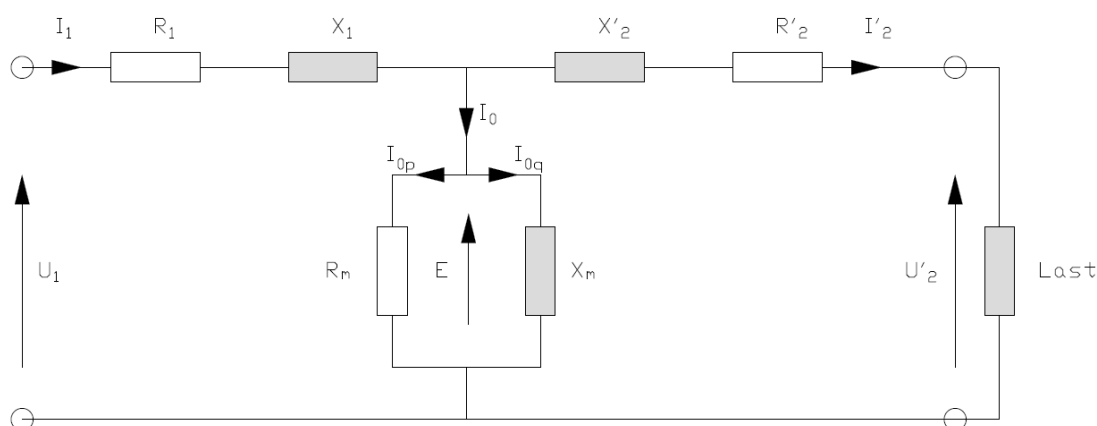
3.2.1 Sugetransformatorer

Dette delkapittelet baserer seg på referanse [16, 17]. Sugetransformatoren skal redusere strømmen i jordsmonnet og sørge for at den blir ført tilbake til omformerstasjonen via skinnegangen eller egne returledere. Den reduserer også spenningsfallet i returkretsen. Transformatoren er en strømtransformator og har like mange vindinger på primærsiden (N_p) og sekundærsiden (N_s), den har derfor et omsetningsforhold (n) som vist i Formel 3-2.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = 1 \quad \text{Formel 3-2}$$

Ved å koble fremlederen gjennom primærsiden og tilbakelederen gjennom sekundærsiden vil de magnetiske feltene i transformatoren tvinge returstrømmen tilbake gjennom sekundærsiden på transformatoren.

Sugetransformatorens primærstrøm setter opp fluks i primærviklingen. Spenningen som genereres som følge av fluksen som omslutter sekundærviklingen vil trekke sekundærstrømmen. Figur 3-3 viser et ekvivalentskjema for en transformator.



Figur 3-3 Ekvivalentskjema for sugetransformator [16]

Primærvindingen er representert av R_1 og X_1 . Sekundærvindingen sett fra primærsiden er representert av R'_2 og X'_2 som kan uttrykkes med Formel 3-3 og Formel 3-4.

$$R'_2 = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad \text{Formel 3-3}$$

$$X'_2 = X_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad \text{Formel 3-4}$$

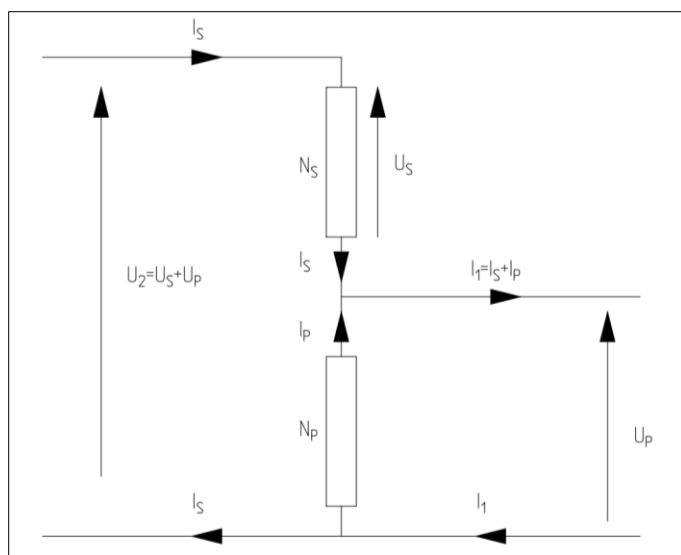
Sekundærstrømmen (I'_2) sett fra primærsiden blir som vist i Formel 3-5. Ser man bort fra tapene i transformatoren vil da primær- og sekundærstrømmen være lik, som følge av et omsetningsforhold på 1.

$$I'_2 = I_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad \text{Formel 3-5}$$

Tomgangstapene i transformatoren vil komme fra virvelstrøm- og hysteresetap (R_m) og magnetiseringsreaktansen (X_m). Magnetiseringsstrømmen (I_0) gjennom disse vil gå i jord og skinnegang utenfor sugetransformatorens vindinger i anlegget.

3.2.2 Autotransformatorer

Dette delkapittelet omhandler autotransformator koblet som medkobling og nedtransformering (Step down) og baserer seg på referanse [16]. Ekvivalentskjemaet for transformatoren er vist i Figur 3-4.



Figur 3-4 Ekvivalentskjema for autotransformator [16]

Autotransformatoren består av to viklinger; parallellviklingen (N_p) og serieviklingen (N_s). Disse er koblet i serie med samme retning, dette gjør at spenningene over viklingene vil summere seg. Spenningen over parallellviklingen og serieviklingen er vist i Formel 3-6.

$$U_2 = U_s + U_p \quad \text{Formel 3-6}$$

Autotransformatoren som benyttes i jernbaneanleggene i Norge har da omsetningsforhold (n) som vist i Formel 3-7.

$$n = \frac{U_2}{U_p} = \frac{U_p + \frac{N_s}{N_p} \cdot U_p}{U_p} = 1 + \frac{N_s}{N_p} = 2 \quad \text{Formel 3-7}$$

Ettersom parallell- og serieviklingen er koblet sammen vil primær- og sekundærsiden være både galvanisk og magnetisk koblet. Dette gjør at autotransformatoren ikke vil utgjøre et galvanisk skille som en konvensjonell toviklingstransformator.

Siden viklingene er koblet i serie vil strømmen gjennom parallelviklingen (I_p) og serieviklingen (I_s) summeres som vist i Formel 3-8

$$I_1 = I_s + I_p \quad \text{Formel 3-8}$$

For en autotransformator vil kortslutningsstrømmene være dempet av kortslutningsimpedansen på lik linje med en ordinær toviklingstransformator. Forholdet mellom kortslutningsimpedansen sett fra primærsiden (Z_K') og sekundærsiden (Z_K'') er vist i Formel 3-9

$$Z_K'' = Z_K' \cdot n^2 \quad \text{Formel 3-9}$$

Fordeler

- Viklingene behøver ikke å omsette samme effekt
- Kortslutningsimpedansen vil være mindre
- Mindre i fysiske dimensjoner (kostnadsbesparende)
- Mindre tap enn en konvensjonell transformator

Ulemper

- Ikke galvanisk skille
- Kortslutningsimpedansen vil være mindre
- En kortslutning i vindingene kan føre til lik spenning på primær- og sekundærsiden

3.3 Analytiske beregninger av impedanser i kontaktledningsanlegget

I de neste avsnittene er referansene [1, 18, 19] benyttet. Det er sett på serieimpedansen til kontaktledningen, skinnegangen og negativ- og positivleder, samt den gjensidige impedansen mellom dem. For å finne serieimpedansen og den gjensidige impedansen er Carsons formler benyttet. Det forutsettes da at jordsmonnet er homogent, uten langsgående variasjoner i jordstrømmen og at man kan se bort fra endeeffekter. Ved korte avstander vil endeeffektene få større betydning.

Forutsetningene for at Carsons formler kan benyttes er:

1. Bølgetallet⁴ til jord må være mye større enn bølgetallet for vakuum.
2. Avstanden fra observasjonspunktet til lederen og avstanden fra lederen til jord må være mye mindre enn bølgelengden til vakuum.
3. Radiusen til lederen må være mye mindre enn høyden til lederen over jord.
4. Forplantningskonstanten til lederen må være mye mindre enn bølgetallet til jord.

Vurdering av forutsetningene for å kunne benytte Carsons formler:

1. For en frekvens på 16,7 Hz vil bølgetallet til jord være mye større enn bølgetallet til vakuum, punktet anses derfor som oppfylt.
2. Siden bølgelengden til vakuum ved en frekvens på 16,7 Hz er mye mindre enn avstanden fra observasjonspunktet til lederen og avstanden fra lederen til jord anses punktet som oppfylt.
3. Etersom skinnene tilnærmet ligger på jord vil ikke forutsetningen være gjeldende. Isolasjonen mellom skinnene og svillene, samt avledningskonduktansen til jord gjennom ballasten gjør at kontakten med jord er relativt lav. Bruken av sugetransformatorer og autotransformatorer bidrar også til å holde strømmen i skinnene. Man kan derfor anta at skinnene ligger noe over jord. Punktet anses derfor som oppfylt.
4. Når skinnene ligger på jord vil forplantningskonstanten ha omtrent samme verdi som bølgetallet til jord. Anngjerd Pleym [18] henviser til undersøkelser der det er store

⁴ Bølgetallet er antall bølger pr. lengde enhet. (Den inverse verdien av bølgelengden)

forskjeller på forplantningskonstanten mellom en leder som ligger på jord og en som ligger over jord. Punktet anses derfor som oppfylt på samme grunnlag som punkt 3.

Serieimpedansen (Z) vil være summen av den indre impedansen (Z_i) og den ytre impedansen (Z_y). Det er benyttet en tilnærming av Carsons formler i Formel 3-10 og Formel 3-11 for den indre- og ytre impedansen som gjelder for lave frekvenser.[1]

$$Z_i \approx \frac{1}{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma} + \frac{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu_0}{8\pi} \quad \text{Formel 3-10}$$

For den indre impedansen har lederen et tverrsnitt (a) og en ledningsevne (σ). Det er benyttet en frekvens (f) på 16,7 Hz.

$$Z_y \approx \frac{2\pi \cdot f \cdot \mu_0}{8} + \frac{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{660 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{a} \right) \quad \text{Formel 3-11}$$

For den ytre impedansen har lederen en radius (a). Det er benyttet en frekvens (f) på 16,7 Hz og en jordresistivitet (ρ).

$$Z_m \approx \frac{\pi \cdot f \cdot \mu_0}{4} + j \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \ln \left(\frac{660 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{D} \right) \quad \text{Formel 3-12}$$

En tilnærming av den gjensidigeimpedansen for lave frekvenser er gitt av Formel 3-12. Der avstanden mellom lederne er gitt av (D). Det er benyttet en frekvens (f) på 16,7 Hz og en jordresistivitet (ρ). [1]

3.3.1 Kontaktledning

Kontaktledningen består av bæreline og kontaktråd. Den geometriske plasseringen til disse to ledningene er avhengig av hvilket kontaktledningssystem som benyttes på strekningen. I Norge benyttes system 20 og 25 på nye strekninger [17]. Videre i oppgaven er System 20 lagt til grunn. Sammensetningen av metallene i lederende vil være noe forskjellig mellom de ulike leverandørene og derfor gi litt forskjellig ledningsevne.

Systemhøyden angir avstanden mellom kontaktråden og bærelinen ved innfestingen til utliggeren. For System 20 vil denne være 1,6 m. Mellom utliggerne vil avstanden mellom de to lederne være mindre, men videre i oppgaven er systemhøyden benyttet som fast avstand.

Den gjensidige impedansen mellom kontakttråd og bæreline er regnet ut med Formel 3-12. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Resultatene er vist i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Gjensidig impedans mellom bæreline og kontakttråd

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_m Gjensidig impedans [Ω/km] |
|---------------------------------------|---|
| 100 | 0,016+j0,145 |
| 1000 | 0,016+j0,169 |
| 2600 | 0,016+j0,179 |

Bæreline

Bæreline for system 20 er laget av bronse BzII (CuMg). Det benyttes et ledertverrsnitt på 50 mm^2 . [20] Ledningsevnen til en BzII bæreline er satt til $36 \cdot 10^6$ S/m. [7] Det er benyttet en radius på 4,5 mm.

Det er gjort utregninger av serieimpedansen til bærelinen ved å benytte Formel 3-10 og Formel 3-11. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Resultatene er vist i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Bærelinens serieimpedans

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_i Indre impedans [Ω/km] | Z_y Ytre impedans [Ω/km] | Serieimpedans [Ω/km] |
|---------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| 100 | 0,556+j0,005 | 0,016+j0,268 | 0,572+j0,274 |
| 1000 | 0,556+j0,005 | 0,016+j0,293 | 0,572+j0,298 |
| 2600 | 0,556+j0,005 | 0,016+j0,303 | 0,572+j0,308 |

Kontakttråd

Kontakttråden skal overføre strøm fra transformatorene eller omformerstasjonene og frem til toget. Den skal også overføre elektrisitet til toget som er i bevegelse. Kontaktledningen må derfor dimensjoneres for både de elektriske og de mekaniske kreftene den blir utsatt for. Kontakttråden er laget av kobber og har en utforming med to spor på sidene som gjør det mulig å koble til hengetråder, utliggerer o.l. Figur 3-5 viser utformingen til kontakttråden og festeanordningen for hengetråden. Lederen er ikke rund, men vil i oppgaven bli betraktet som en sirkulær leder. Det antas dette har liten betydning på impedansen og er gjort ved tidligere utregninger av Friedrich Kiessling [7] og Hans Kristian Høidalen [1].



Figur 3-5 Utforming av kontakttråd og innfestning [21]

Tverrsnittet til kontakttråden bestemmes av strømføringsevnen, spenningsfallet og strekket i lederen for oppspenning. For system 20 benyttes kontakttråd av typen RiS 100. Denne har et ledertverrsnitt på 100 mm^2 . Formen og arealet til kontakttråden vil variere på grunn av slitasje. Jernbaneverkets Tekniske regelverk setter krav til maksimum slitasje på 80 %. Videre i oppgaven blir det kun sett på ny utforming av kontakttråden. [17, 20]

Jernbaneverkets Tekniske regelverk setter krav til den spesifikke motstanden for kontakttråden til maksimum $0,017593 \cdot 10^6 \text{ } \Omega\text{m}$ ved 20 C° ($56,84 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) [20]. Videre i oppgaven er den oppgitte verdien til jernbaneverket benyttet og det er benyttet en radius på 6 mm.

Det er gjort utregninger av serieimpedansen til kontakttråden ved å benytte Formel 3-10 og Formel 3-11. Utregningene er gjort for jordresistivitet på $100 \text{ } \Omega\text{m}$, $1000 \text{ } \Omega\text{m}$ og $2600 \text{ } \Omega\text{m}$. Resultatene er vist i Tabell 3-3

Tabell 3-3 Kontakttrådens serieimpedans

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_I Indre impedans [Ω/km] | Z_Y Ytre impedans [Ω/km] | Serieimpedans [Ω/km] |
|--|--|---|---|
| 100 | $0,176+j0,005$ | $0,016+j0,262$ | $0,192+j0,268$ |
| 1000 | $0,176+j0,005$ | $0,016+j0,287$ | $0,192+j0,292$ |
| 2600 | $0,176+j0,005$ | $0,016+j0,297$ | $0,192+j0,302$ |

3.3.2 Skinnegangen

Skinnegangen har flere oppgaver i tillegg til den mekaniske bæringen og styringen av toget. Skinnene har blitt brukt for togdeteksjonsanlegg (Audiofrekvente, enkle og dobbelt isolerte sporfelte m.m.). Ved videre utbygging i Norge innføres nå akseltellersystemet, dette gjør at funksjonen skinnegangen har som del av togdeteksjonssystemet forsvinner. Ved bruk av akseltellere vil det da ikke lenger være behov for å seksjonere skinnegangen med isolerte

skinneskjøter og den kan således utføres som kontinuerlig elektrisk ledende. Selv om togdeteksjonsanlegget fjernes fra skinnegangen vil den fortsatt ha en funksjon for å føre returstrømmen tilbake til omformerstasjonen. Togdeteksjonsanlegg vil ikke bli utredet videre i denne oppgaven. [22]



Figur 3-6 Utforming av skinnegang og underbygning [23]

Figur 3-6 viser et eksempel på den geometriske utformingen til skinnestrengen. Innfestingen av skinnestrengen og oppbyggingen rundt svillene er også vist.

Sporvidden som er avstanden mellom skinnestrengene er 1,435m i Norge. Dette gjør at senteravstanden mellom skinnene tilnærmet er 1,5m. Det finnes flere forskjellige skinnetyper. Til nye anlegg i Norge benyttes stort sett S54 og UIC 60 (60E1) [24]. Den gjensidige impedansen mellom skinnestrengene er regnet ut med Formel 3-12. Utrekningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Resultatene er vist i Tabell 3-4

Tabell 3-4 Gjensidig impedans for to skinnestrenger

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_m Gjensidig impedans [Ω/km] |
|--|--|
| 100 | 0,016+j0,147 |
| 1000 | 0,016+j0,171 |
| 2600 | 0,016+j0,181 |

Når skinnene ikke blir brukt til togdeteksjonsanlegg vil skinnestrengene ikke isoleres fra hverandre og det etableres utjevningforbindelser mellom skinnene ca. hver 300 til 500 meter. [22]

Indre impedans

Den indre impedansen i en jernbaneskinne er vanskelig å beregne analytisk på grunn av skinnens geometriske utforming og det ferromagnetiske materialet. Den geometriske utformingen vil også være avhengig av om skinnene er nye eller brukte. Strømfortregningen og den relative permeabiliteten i skinnene vil være avhengig av både strøm og frekvens. Dette

vil også være gjeldende ved 16,7 Hz. Det gjør at strømmen vil fordele seg ujevnt i tverrsnittet av skinnen. På grunn av dette anbefaler Pleym og Kiessling å benytte målte verdier for den indre impedansen i skinnene. Det er da nødvendig å skille på om det er 16,7 eller 50 Hz målinger (50 Hz målinger vil ha tilnærmet dobbel verdi av 16,7 Hz målingene). [7, 18]

Varjü [25] legger til grunn en laststrøm på 500A, denne vil dele seg mellom skinnegangen, jord og eventuelle jord- og returledere. Parametere for skinnene som hentes fra målinger må derfor vurderes opp mot hvor stor del av strømmen som går i skinnestrengen. Strømmen i skinnegangen vil også variere på strekningen mellom omformerstasjonene. Dette kommer av antall tog på strekningen, samt at auto- og sugetransformatorer trekker strømmen tilbake i henholdsvis AT- og returledere. Ved dobbeltspor vil strømmen også kunne fordele seg mellom fire skinnestrenger.

Tabell 3-5 Målinger av den indre impedansen til en skinnestreng

| Strøm [A] | Storset [16,7 Hz] | | Trueblood [15 Hz] | | Sture [- Hz] | |
|-----------|-------------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|---|
| | S54 | UIC60 | 50 kg (100 lbs) | 64 kg (130 lbs) | 50 kg (100 lbs) | - |
| 100 | 0,060+j0,060 | 0,050+j0,050 | 0,065+j0,062 | 0,059+j0,062 | 0,078+j0,066 | - |
| 200 | 0,067+j0,067 | 0,054+j0,054 | 0,081+j0,075 | 0,078+j0,071 | 0,098+j0,078 | - |
| 300 | 0,078+j0,084 | 0,066+j0,064 | 0,109+j0,084 | 0,099+j0,078 | 0,126+j0,087 | - |
| 400 | 0,107+j0,104 | 0,076+j0,077 | 0,130+j0,090 | 0,118+j0,084 | 0,146+j0,095 | - |
| 500 | 0,123+j0,123 | 0,096+j0,096 | 0,143+j0,093 | 0,137+j0,090 | 0,158+j0,098 | - |

Verdiene i Tabell 3-5 er hentet fra målinger som tidligere er utført av Storset [26], Trueblood [27] og Sture [9] (frekvensen på målingene er ikke oppgitt). Verdiene avviker noe, men er omtrent innenfor verdien Kiessling [7] beskriver bør benyttes for 16,7 Hz:

-Resistans (R) 0,06 til 0,125 Ω/km

-Reaktans (X) 0,075 til 0,11 Ω/km

Verdiene henviser da til strøm i hver skinnestreng på 100 A for de laveste verdiene og 1000 A for de høyere verdiene.

Varjü [28] har i sine rapporter benyttet 0,060+j0,066 Ω/km for S54 skinnen. Disse verdiene stemmer også bra med tidligere målte verdier når strømmen fordeler seg mellom to skinnestrenger og i begge retninger.

Ytre impedans

For å finne den ytre impedansen er Formel 3-11 benyttet. Resultatene er vist i Tabell 3-6.

På grunn av den geometriske utformingen til skinnene, må det benyttes en ekvivalent radius (a). Storset [26] har foreslått å benytte en radius på 20 mm. Høidalen [1] skriver at denne verdien kan være noe høy. Det er derfor benyttet en ekvivalent radius på 15 mm.

Siden strømmen vil fordele seg i hele retursystemet (begge skinnene og i begge retninger mot hver transformator) antas det at det kan benyttes en strøm på 100 A til 150 A pr. skinnestreng. Dette gir en indre impedans på ca. $0,060+j0,065 \Omega/\text{km}$ som er tilnærmet samme verdi benyttet av Varjü [28].

Det er gjort utregninger av serieimpedansen til en skinnestreng ved å benytte Formel 3-11 og de tidligere målte verdiene. Utregningene er gjort for jordresistivitet på $100 \Omega\text{m}$, $1000 \Omega\text{m}$ og $2600 \Omega\text{m}$. Resultatet er vist i Tabell 3-6.

Tabell 3-6 Serieimpedans for en skinnestreng

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_I Indre impedans [Ω/km] | Z_Y Ytre impedans [Ω/km] | Z Serieimpedans [Ω/km] |
|--|--|---|---|
| 100 | $0,060+j0,065$ | $0,016+j0,195$ | $0,076+j0,260$ |
| 1000 | $0,060+j0,065$ | $0,016+j0,219$ | $0,076+j0,284$ |
| 2600 | $0,060+j0,065$ | $0,016+j0,229$ | $0,076+j0,294$ |

Videre i oppgaven er det benyttet en ekvivalent skinneimpedans Z_T for sporet (Begge skinnestrenger) beregnet med Formel 3-13. Der Z er serieimpedansen til skinnestrengen og Z_m er den gjensidige impedansen mellom dem.

$$Z_T = \frac{Z^2 - Z_m^2}{2 \cdot Z^2 - 2 \cdot Z_m} \quad \text{Formel 3-13}$$

3.3.3 Negativ- og positivleder

Negativ- og positivleder i det norske AT-systemet blir normalt opphengt med en avstand på 1 m og montert på isolatorer øverst på mastene ca. 10 m over sporet. Figur 3-7 viser oppheng av negativ- og positivleder. Det er anbefalt å benytte 400 mm^2 blank aluminiumsleder da dette gir gode marginer for lastøkning og usymmetrisk belastning ved høy overføringseffekt. I tunneler, under bruer og lignende kan kabel benyttes for å utnytte det gitte profilet til traseen. Ved å benytte for store lengder med kabel mellom omformerstasjonene vil det kunne oppstå resonansproblemer på grunn av den kapasitive koblingen mot skjerm/jord. Problemer knyttet til resonans er ikke utredet ytterligere i denne oppgaven. [14]



Figur 3-7 Oppheng av positiv- og negativleder [15]

Den gjensidige impedansen mellom negativ- og positivleder er regnet ut med Formel 3-12. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Resultatene er vist i Tabell 3-7.

Tabell 3-7 Gjensidig impedans mellom negativ- og positivleder

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_m Gjensidig impedans [Ω/km] |
|--|--|
| 100 | 0,016+j0,155 |
| 1000 | 0,016+j0,179 |
| 2600 | 0,016+j0,189 |

Ledningsevnen til aluminiumsledere er satt til $35,38 \cdot 10^6$ S/m. [7]. Ved å benytte Formel 3-10 blir den indre impedansen for lederen $0,071+0,005 \Omega/\text{km}$. Det er benyttet en radius på 13 mm.

Det er gjort utregninger av serieimpedansen til negativ- og positivleder ved å benytte Formel 3-10 og Formel 3-11. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Resultatet er vist i Tabell 3-8.

Tabell 3-8 Negativ- og positivleders serieimpedans

| Jordresistivitet [Ωm] | Z_I Indre impedans [Ω/km] | Z_y Ytre impedans [Ω/km] | Z Serieimpedans [Ω/km] |
|--|--|---|---|
| 100 | 0,071+0,005 | 0,016+j0,246 | 0,087+j0,251 |
| 1000 | 0,071+0,005 | 0,016+j0,270 | 0,087+j0,276 |
| 2600 | 0,071+0,005 | 0,016+j0,280 | 0,087+j0,286 |

3.3.4 Returleder

Returledningen skal bidra til at returstrømmen føres tilbake gjennom lederen i stedet for gjennom sporet og jord. Den føres derfor nærme kontaktledningen slik at frem- og tilbakeleder skaper minst mulig elektromagnetisk kobling til andre kabler. Det benyttes to

kabler som returledere, dette sikrer at returveien ikke brytes ved feil på en av kablene. Disse henges opp i bakkant av mastene med en avstand på 0,5 m som vist i Figur 3-8. Det benyttes aluminiumskabler av typen TX 240/61 Al, denne har et tverrsnitt på 240 mm² og isolasjonsnivå på 1 kV. [17]



Figur 3-8 Returledere hengt opp i kontaktledningsmast [12]

Den gjensidige impedansen mellom returlederne er regnet ut med Formel 3-12. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm, 1000 Ωm og 2600 Ωm. Resultatene er vist i Tabell 3-9.

Tabell 3-9 Gjensidig impedans mellom returlederne

| Jordresistivitet [Ωm] | Z _m Gjensidig impedans [Ω/km] |
|-----------------------|--|
| 100 | 0,016+j0,170 |
| 1000 | 0,016+j0,194 |
| 2600 | 0,016+j0,204 |

Det er oppgitt en ledningsevne til denne lederen i [7] på 35,38·10⁶ S/m. Ved å benytte Formel 3-10 blir den indre impedansen for lederen 0,118+0,005 Ω/km. Det er benyttet en radius på 8,7 mm.

Det er gjort utregninger av serieimpedansen til returlederne ved å benytte Formel 3-10 og Formel 3-11. Utregningene er gjort for jordresistivitet på 100 Ωm, 1000 Ωm og 2600 Ωm. Resultatet er vist i Tabell 3-10.

Tabell 3-10 Returledernes serieimpedans

| Jordresistivitet [Ωm] | Z _i Indre impedans [Ω/km] | Z _y Ytre impedans [Ω/km] | Serieimpedans [Ω/km] |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 100 | 0,118+0,005 | 0,016+j0,255 | 0,134+j0,260 |
| 1000 | 0,118+0,005 | 0,016+j0,279 | 0,134+j0,284 |
| 2600 | 0,118+0,005 | 0,016+j0,289 | 0,134+j0,294 |

3.4 Jordresistivitet

Jordresistiviteten beskriver den elektriske motstanden i jordsmonnet. Verdien angis i Ωm som er motstanden til én kubikkmeter med jord. Jordsmonnet er delt opp i flere jordlag som for eksempel leire, jord og stein. Disse lagene inneholder også variasjoner i innhold og kan bestå av en blanding med forskjellige typer stein og jord. Overgangsmotstanden til elektroder og fundamenter kan beregnes relativt enkelt om man antar at jordsmonnet er homogent. [29]

For typiske verdier i et homogent jordsmonn kan Tabell 3-11 benyttes. [1]

Tabell 3-11 Typiske verdier for jordresistivitet ved forskjellige jordsmonn

| Jordsmonn | Jordresistivitet ρ [Ωm] |
|-------------------|--|
| Våt jord (sump) | 5-40 |
| Leire, matjord | 20-200 |
| Sand | 200-2500 |
| Grus | 2000-3000 |
| Morene | Opptil 30000 |
| Fjell | 1000-10000 |
| Granitt | Opptil 50000 |
| Forurenset betong | 100 |

Jordresistiviteten vil være påvirket av forskjellige faktorer som frost, fuktighet, temperatur, jordlag, ulike sammensetninger av jorden og andre nedgravde konstruksjoner (for eksempel vannrør og betongkonstruksjoner). [29]

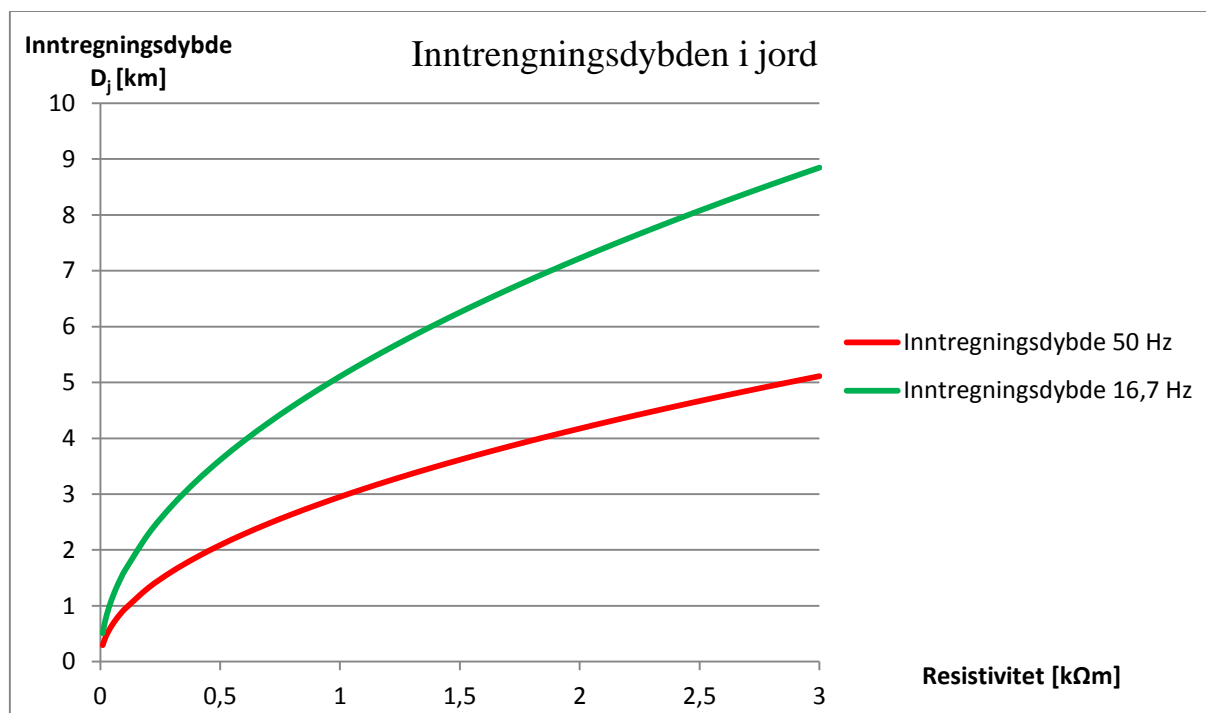
Kiessling [7] beskriver målinger utført på rød leire. Her ga en økning av fuktigheten i jorden fra 10 % til 20 % en økning i jordresistiviteten som var 30 ganger større. Høidalen [1] beskriver at for humusholdig sand stiger jordresistiviteten fra 100 Ωm til 3000 Ωm ved en temperaturendring fra -10 C° til 20 C° . Siden jordsmonnet i Norge stort sett består av fjell og stein antas det at jordresistiviteten her er høyere enn ellers i Europa og verdier på under 100 Ωm antas som lavt. [29]

Jordresistiviteten vil påvirke inntrengningsdybden til strømmen i jord og overgangsmotstanden til jord. Inntrengningsdybden (D_j) i jord er avhengig av jordresistiviteten (ρ) og frekvensen (f) som vist av Formel 3-14 [1]. I Norge benyttes 16,7 Hz forsyningssystem og jordresistiviteten er generelt høyere enn andre land i Europa. Dette gjør at inntrengningsdybden vil være større sammenlignet med land som har lav jordresistivitet og 50 Hz forsyningssystem, dette er illustrert i Figur 3-9.

$$D_j = 1.31 \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 660 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

Formel 3-14

Når inntrengningsdybden øker vil avstanden mellom frem- og tilbakeleder bli lengere. Dette gjør at impedansforskjellen mellom frem- og tilbakeleder blir større. Impedansforskjellen gir økt induisert støy på nærliggende anlegg. Returstrømmen vil også ha mulighet for å flyte i andre konstruksjoner lengre fra jernbanen. [14]



Figur 3-9 Sammenligning av inntrengningsdybden i jord for 16,7 Hz og 50 Hz

Jordlagene og homogeniteten til jordsmonnet har lokale variasjoner som er vanskelige å ta hensyn til ved beregninger av en generell modell. For å kunne utføre enkle beregninger blir det antatt at jordsmonnet er homogent og at det bare består av et jordlag.

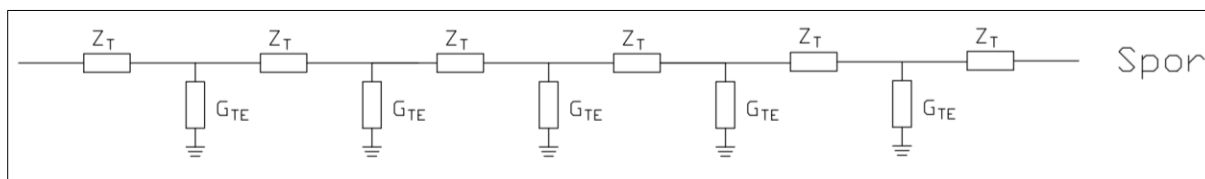
I rapporter fra Varjü [25] er det benyttet en jordresistivitet på 2600 Ωm . Denne er generelt høyere enn det Kiessling [7] beskriver for anlegg sydover i Europa og antas å være en reel verdi for Norske forhold. Siden jordresistiviteten varierer mye med fuktigheten og temperaturen vil det bli sett på flere verdier. For å se på påvirkningen dette har for avledningskonduktansen fra anlegget til jordsmonnet vil det bli sett på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm .

3.5 Avledningskonduktansen til jord

Motstanden mellom skinnegangen og jord, også kalt avledningskonduktansen til jord, er avhengig av flere forhold [7]:

- Jordresistiviteten
 - Varierer med de geografiske forholdene for banen
 - Varierer med været (frost og fuktighet)
- Skinner
 - Type skinner
 - Slitasje på skinnene (endrer den geometriske utformingen)
- Ballast
 - Størrelse på ballasten
 - Utforming av underbygningen
 - Slitasje i form av pukknusing
- Sviller
 - Type sviller (tresviller eller betong sviller)
- Forurensning
 - Bremsestøv o.l. vil medføre at ledningsevnen gjennom ballasten øker.
- Gjenstander koblet til skinnegangen for utjevning.
 - Objekter som kontaktledningsmaster, signaler, skap o.l.
 - Større betongkonstruksjoner (kulverter, bygninger o.l.)

Avledningskonduktansen til jord kan deles opp i avledningskonduktansen fra sporet og fra objekter tilkoblet sporet. I praksis vil strømmen fra sporet til jord være gjennom svillene og pukken. Dette kan omtrent betraktes som kontinuerlig avledningskonduktans. For fundamentene til objekter tilkoblet sporet vil avledningskonduktansen opptre mere punktvis, for eksempel ved hver kontaktledningsmast (ca. hver 60 m). Figur 3-10 viser en modell av koblingen til jord der Z_T beskriver impedansen i skinnegangen. G_{TE} beskriver avledningskonduktansen fra skinnegangen og tilkoblede objekter til jord. [7]



Figur 3-10 Modell av den galvaniske koblingen mellom skinnegangen og jord [7]

Impedansen mellom sporet og jord kan beskrives som en konduktans og en kapasitans i parallell. [30]

Avledningskonduktansen har betydning for banestrømmens returvei. Avhengig av størrelsen vil deler av returstrømmen gå i jord og således påvirke skinnepotensialet og den magnetiske koblingen til nærliggende anlegg. [1]

For likestrømsforsyningssystemer isoleres returkretsen fra jordpotensialet. Dette er ønskelig for å unngå likestrøm gjennom nærliggende konstruksjoner som kan medføre korrosjonsskader på armering og stålkonstruksjoner. Berøringspotensialet holdes nede ved hjelp av spenningsbegrensere. Likestrømsbaner blir ikke videre utredet i oppgaven. [5]

For avledningskonduktansen mellom skinnene og jord beskriver Kiessling [7] at 90 % av avledningskonduktansen vil være avhengig av type ballast og sviller. De resterende 10 % vil være avhengig av resterende underbygning og jordsmonnet. Det henvises her også til at det er utført målinger sommerstid som gir en konduktans på 0,4 S/km til 2,5 S/km og vinterstid som gir en konduktans på 0,06 S/km til 0,67 S/km. Dette viser at konduktiviteten varierer fra 0,06S/km til 2,5 S/km avhengig av været.

Pleym [30] utførte målinger på en 10 m lang skinnestreng. Hun kom frem til at konduktansen varierer mye avhengig av fuktig eller tørt vær, mens kapasitansen er relativt stabil. Ved fuktig vær med lave impedansverdier vil fasevinkelen være tilnærmet 0°. Ved tørt vær der konduktansen er lav vil kapasitansen dominere koblingen mot sporet med opp til 90°

Kiessling [7] beskriver at den reaktive delen er relativt liten med en fasevinkel på 1° til 3° og kan derfor neglisjeres. Ut i fra målingene utført av Pleym [30] ser dette ut til å være avhengig av om det er tørt eller fuktig vær. Målingene her ble ikke utført på en jernbane i drift. Konsekvenser som forurensning (brems støv o.l.), samt slitasje på sporet vil derfor ikke komme frem i målingene.

Konduktansen fra skinnegangen varierer også med temperaturen. Denne kan variere fra 0,1 S/km til 0,5 S/km for temperaturer over og under 0 C°. For betongsviller med ren ballast legger Kiessling til grunn at avledningskonduktansen fra skinnegangen bidrar med 0,5 S/km til 1 S/km og 0,02 S/km til 0,04 S/km ved mye frost. [7, 9]

For å opprettholde personsikkerheten setter NEK EN 50122-1 [5] krav til at alle ledende gjenstander innenfor sone for kontaktledning skal jordes til banestrømmens returkrets. Dette er gjenstander som master, signaler, skap, konstruksjoner o.l. Disse gjenstandene er som regel godt fundamentert i grunnen. Dette medfører at de vil virke som «jordelektroder» langs

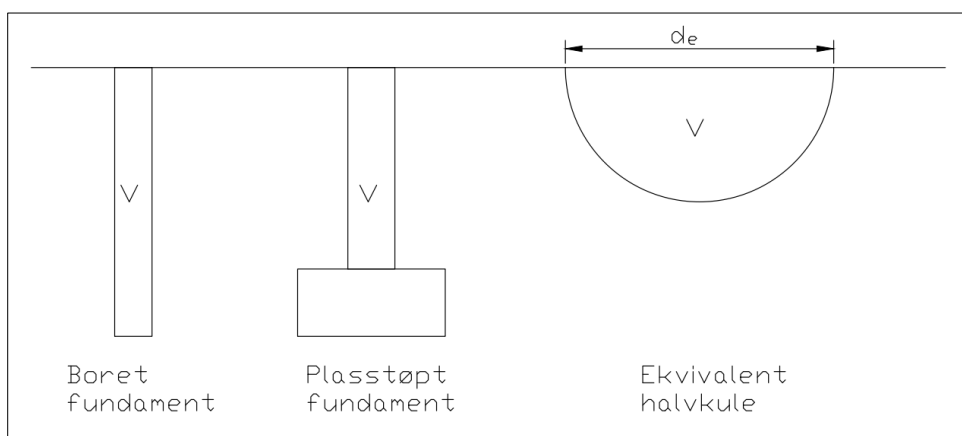
jernbanestrekningen og øke avledningskonduktansen til jord. Dette vil være spesielt gjeldende på stasjoner der antall komponenter nær jernbanen øker.[7]

Avledningskonduktansen fra disse objektene er avhengig av utformingen til fundamentene og jordresistiviteten. I dag benyttes stort sett to typer betongfundamenter for kontaktledningsanlegget; plasstøpte fundamenter eller borede fundamenter. Plasstøpte fundamenter vil være grunnere og med en plate i bunn, mens borede fundamenter består av en betongsøyle med lengde på opptil 4 m.

Formel 3-15 er benyttet av Kiessling og Brede [7, 29] for å gjøre en forenklet utregning av overgangsmotstanden til betongfundamenter med armring, der den ekvivalente diameteren til en halvkule (d_e) med volumet til fundamentet (V) benyttes. Formelen tar ikke hensyn til flere jordlag og forutsetter et homogent jordsmonn.

$$R_m = \frac{\rho_e}{(\pi \cdot d_e)} \quad \text{Formel 3-15}$$

Figur 3-11 viser utformingen av borede- og plasstøptefundamenter, samt en halvkuleformet elektrode med ekvivalent diameter.



Figur 3-11 Fundamentutforming og ekvivalent jordelektrode

Den ekvivalente diameteren til en halvkuleformet elektrode kan regnes ut med Formel 3-16.

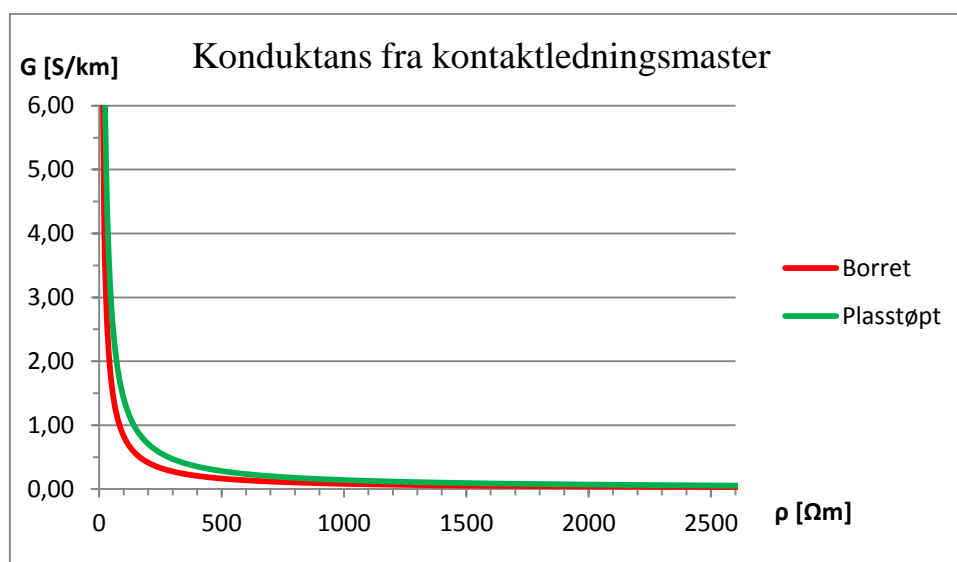
$$d_e = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{2}{3}\pi}} \cdot 2 \quad \text{Formel 3-16}$$

I Norge er maks lengde mellom kontaktledningsmastene satt til ca. 60 m. Dette vil si ca. 17 master pr. kilometer for enkelt spor [17]. Formel 3-17 og Formel 3-18 gir motstanden (R_e) og konduktansen (G) til jord for et gitt antall master (n_m) med overgangsmotstand til jord (R_m).

$$R_e = \frac{R_m}{n_m} \quad \text{Formel 3-17}$$

$$G = \frac{1}{R_e} \quad \text{Formel 3-18}$$

Av grafen i Figur 3-12 kommer det frem at ved økende jordresistivitet vil mastenes bidrag til avledningskonduktansen avta eksponentielt. I Norge er det generell høy jordresistivitet (>100 Ωm), derfor vil mastene ha mindre betydning for avledningskonduktansen til jord. Størrelsen på fundamentet gir heller ikke stor betydning for avledningskonduktansen hvis man sammenligner borede og plasstøpte fundamenter med henholdsvis ca. 0,97m³ og 4,84m³ betong.



Figur 3-12 Bidraget til avledningskonduktansen fra 17 kontaktledningsfundamenter.

Utformingen til fundamentene varierer avhengig av type fundament som blir valgt og de geotekniske forholdene på stedet. Det antas at det blir benyttet større fundamenter ved fuktigere jordsmonn (for eksempel leire) for å oppnå de samme mekaniske egenskapene. Større fundamenter og fuktigere jordsmonn vil gi lavere overgangsmotstand. Av Figur 3-12 kommer det frem at jordresistiviteten vil være dominerende for overgangsmotstanden fundamentet har til jord.

Fra Tabell 3-12 og Figur 3-12 vises det at bidraget til avledningskonduktansen fra kontaktledningsfundamentene er lav for høy jordresistivitet som er typisk for Norge.

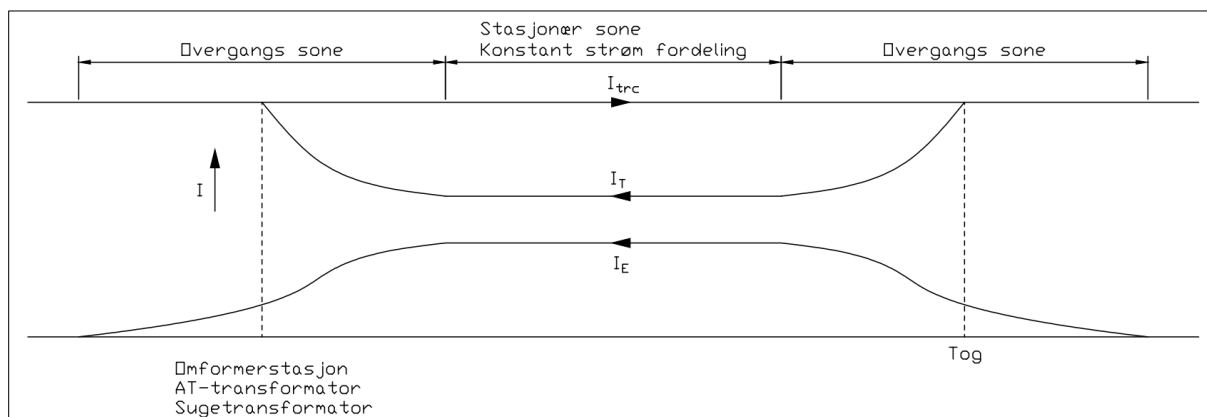
Tabell 3-12 Bidrag fra 17 kontaktledningsfundamenter til avledningskonduktansen til jord

| Jordresistivitet [Ωm] | Avledningskonduktans boredefundamenter [S/km] | Avledningskonduktans plasstøptefundamenter [S/km] |
|---------------------------------------|---|---|
| 100 | 0,825 | 1,412 |
| 1000 | 0,083 | 0,141 |
| 2600 | 0,032 | 0,054 |

Siden de øverste meterne av underbygningen stort sett består av drenerende materiale (pukk og stein) antas det at dette har en effekt på overgangsmotstanden. Dette laget vil også være mer utsatt for frost vinterstid.

Videre i oppgaven følges anbefalingen til Kiessling [7] om å neglisjere den kapasitive delen av impedansen og benytte en ren ohmsk verdi.

Avledningskonduktansen fra spor kan ses som flere konduktanser i parallell langs med sporet. På grunn av impedansen i skinnegangen vil bidraget fra overgangsmotstanden til jord lenger fra betraktningpunktet bli mindre. Dette gjør at strømmen vil flyte mellom skinne og jord i overgangssonene ved omformerstasjon, transformatorer og toget som vist i Figur 3-13. Strømutvekslingen vil skje i begge retninger for punktet. Over lengre strekninger vil det da oppstå en stasjonærsone mellom overgangssonene hvor det tilnærmet ikke er strømutveksling mellom skinne og jord. For kortere avstander vil den stasjonære sonen reduseres og overgangssonene tilslutt overlapse hverandre.



Figur 3-13 Prinsipiell strømfordeling i returkretsen [7]

Både temperatur og nedbør ser ut til å påvirke konduktiviteten mye. Dette er en faktor som ikke kan kontrolleres ved prosjektering av anleggene. Det må derfor tas hensyn til både de lave og høye verdiene som oppstår ved variasjoner i været. Det velges derfor å sammenligne flere verdier for avledningskonduktansen i simuleringene.

Fundamentene har et lite bidrag til avledningskonduktansen ved høy jordresistivitet og et stort bidrag ved lav jordresistivitet. I Norge, der jordresistiviteten er generelt høy, vil fundamentene da gi et mindre bidrag. Bidraget vil øke ved flere spor og høyere kompleksitet på banens infrastruktur (for eksempel flere fundamenter til elektrotekniske anlegg, større konstruksjoner o.l.) Dette vil være typisk for stasjonsområder og tett bebygde strøk.

Tabell 3-13 Avledningskonduktansen til jord for ulike jordresistivitet

| Jordresistivitet [Ωm] | Bidrag fra skinnegang [S/km] | Bidrag fra fundamenter [S/km] | Avledningskonduktans fra anlegget [S/km] |
|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
| 100 | 0,02 - 0,04 | 0,83 - 1,41 | 0,85 - 1,45 |
| 1000 | 0,02 - 0,04 | 0,08 - 0,14 | 0,10 - 0,18 |
| 2600 | 0,02 - 0,04 | 0,03 - 0,05 | 0,05 - 0,09 |

Varjü [25] har sett på tre verdier for avledningskonduktiviteten; $G=0,05$ S/km, 0,25 S/km, 0,75 S/km. Disse verdiene virker fornuftige med tanke på de geologiske forholdene i Norge, tidligere målte verdier, samt resultater fra beregningene vist i Tabell 3-13 med en jordresistivitet på 100 Ωm , 1000 Ωm og 2600 Ωm . Verdiene benyttet av Varjü vil bli benyttet videre i oppgaven ved simulering.

4 Modellering og simulering

Kompleksiteten til BTRC- og AT-systemet presentert i kapittel 3 gjør at det er et behov for å simulere systemene i et beregningsprogram. Det er valgt å simulere systemene i ATPDraw som gjør det mulig å studere strømmer og spenninger i returkreisen til systemene. Dette kapitlet tar for seg beregningsprogrammet og oppbygging av modellene. Det er også beskrevet hva som er gjort for å verifisere komponentene og modellene som er benyttet. De simuleringsscenarioer som blir kjørt er også presentert i dette kapitlet.

Resultatene av simuleringen er presentert i kapittel 5.

4.1 ATPDraw

ATPDraw er et program som gir et grafisk grensesnitt for ATP (Alternative Transient Program) versjonen av EMTP (Electromagnetic Transient Program). Programmet er hovedsakelig laget for beregninger på transienter, men kan også beregne stasjonærverdier. Disse er benyttet videre i oppgaven. Programmet gir ut amplitudeverdien (V_m), RMS-verdien (V_{rms}) regnes ut med Formel 4-1.

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{Formel 4-1}$$

ATPDraw er utviklet av Hans Kristian Høidalen ved NTNU med samarbeid fra Dahl Data Design i Norge og SYSTRAN Engineering Service i Ungarn. Programmet er hovedsakelig blitt finansiert av Bonneville Power Administration, European EMTP User's Group og Schneider Electric. Det er en gratis programvare, men det kreves en ATP lisens. [31]

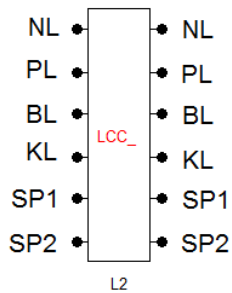
4.1.1 Komponenter i ATPDraw

Modellene kan bygges opp av flere komponenter som er tilgjengelig i programmet. De viktigste komponentene som er benyttet i modellene er kort beskrevet under. For videre informasjon om objektene og utfylling av verdier kan brukermanualen til ATPDraw benyttes [31].

Linjesegmenter (LCC)

Overføringslinjer kan modelleres i ATPDraw ved hjelp av et linjesegment komponent (LCC). Det må blant annet angis utregningsmetode, lederens geometriske plassering og fysiske egenskaper. Jordsmonnets resistivitet og seksjonens lengde må også angis.

Figur 4-1 viser et eksempel på en LCC komponent.



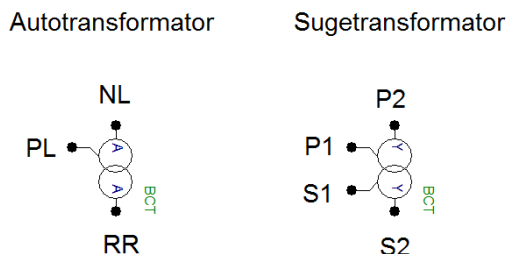
Figur 4-1 Linjesegment (LCC)

I løpet av oppgaven har det ikke lyktes å finne bakgrunnen for «React» verdien benyttet i LCC komponenten. Det er derfor forsøkt med verdier som gir riktig impedans for lederne ved verifiseringen. For totallsystemet antas det at dette har liten betydning da avleste verdier under verifiseringen av komponenten stemmer med verdiene beregnet i kapittel 3.

De verdiene som ble benyttet for lederne i linjesegmentet ved simulering er gjengitt i Vedlegg C.

BCTRAN (Sugetransformator/autotransformator)

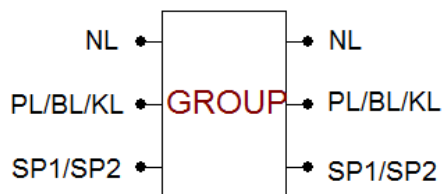
Komponenten BCTRAN benyttes både til auto- og sugetransformatorene. Figur 4-2 viser symbol for transformatorene som er benyttet i denne oppgaven. Verdier som er benyttet til transformator komponentene er vist i Vedlegg D



Figur 4-2 Autotransformator og sugetransformator (BCTRAN)

Group

Komponenten «Group» grupperer og komprimerer flere objekter til en gruppe. Dette gjør modellen mer oversiktlig og strukturert. Figur 4-3 viser et eksempel på en gruppekomponent.



Figur 4-3 Gruppe (Group)

4.1.2 Resultatfremstilling fra simulering

Programmet har flere forskjellige måter å fremstille resultater på, av disse kan det nevnes stasjonære strøm-, spenning- og effektverdier i modelleringsvinduet og grafisk fremstilling av strøm- og spenningskurver ved hjelp av programmet PlotXY. Det kan benyttes komponenten «Max/Min» for å lagre verdier for hver simulering. Ved å kjøre flere simuleringer der en parameter varierer kan avhengigheten på den målte verdien og parameteren studeres.

Det er også mulig å importere de stasjonære spennings- og strømverdiene inn i Excel fra ATP-filen som genereres. Dette gjør det effektivt å hente ut ønskede stasjonære verdier for sammenstilling til en grafisk fremstilling som passer kretsen.

I oppgaven er Excel benyttet for grafisk fremstilling og verdiene er hentet fra «Max/Min» funksjonen og import av stasjonære verdier fra ATP-filen.

4.2 Verifisering av komponenter i ATPDraw

For å være sikker på at riktige verdier ble benyttet på de ulike komponentene i ATPDraw er det utført en verifikasjon av de ulike delene hver for seg. Dette er viktig for at ikke en enkeltfeil i programmet eller bruk av feil parametere følger modelleringen videre ved sammensetning av komponentene. Ved en mere kompleks modellering av kretsen vil det være vanskeligere å finne feilene og reflektere rundt de resultater som oppnås.

4.2.1 Verifisering av ledningssegmenter

Ledningssegmentene er testet for kontaktledningen, skinnegangen, AT- og returlederne. Dette ble utført ved å benytte den beregnede serieimpedansen i kapittel 3 og beregning av impedansen for den ekvivalente lederen med Formel 4-2. Der Z_{11} og Z_{22} er serieimpedansen til lederne og Z_m er den gjensidige impedansen mellom dem.

$$Z_{eq} = \frac{Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_m^2}{Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_m} \quad \text{Formel 4-2}$$

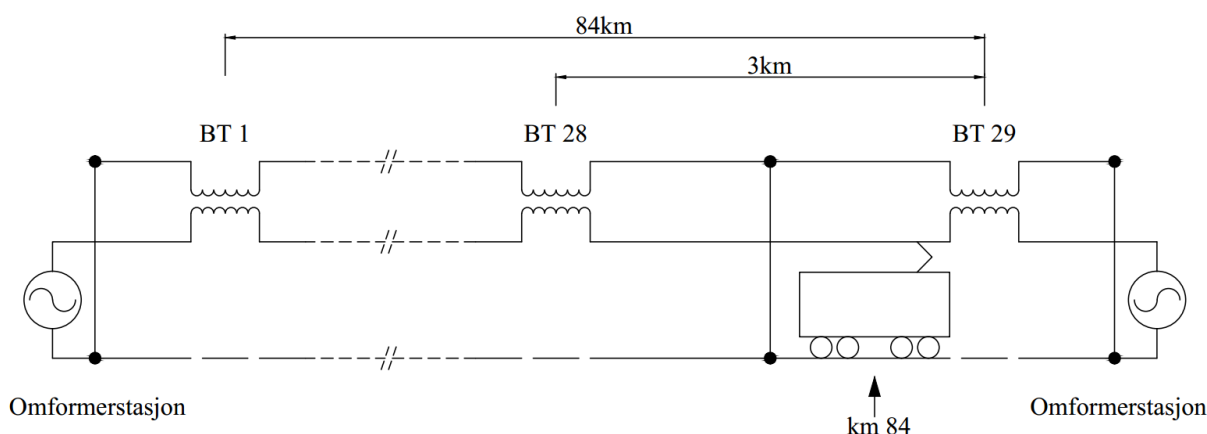
Verifiseringen med sammenligning mot de beregnede verdiene er vist i Vedlegg E. Simuleringene gir en god overenstemmelse med de beregnede verdiene i kapittel 3 og Formel 4-2.

4.2.2 Verifisering av transformatorene

Sugetransformatoren som er benyttet er på 95 kVA og autotransformatoren er på 5 MVA. Transformatorene ble testet i både åpen og kortsluttet tilstand. Vedlegg F viser en sammenligning av verdiene benyttet for transformatorene og simuleringene. Det er en god overenstemmelse med verdiene benyttet til transformatorene som vist i Vedlegg D..

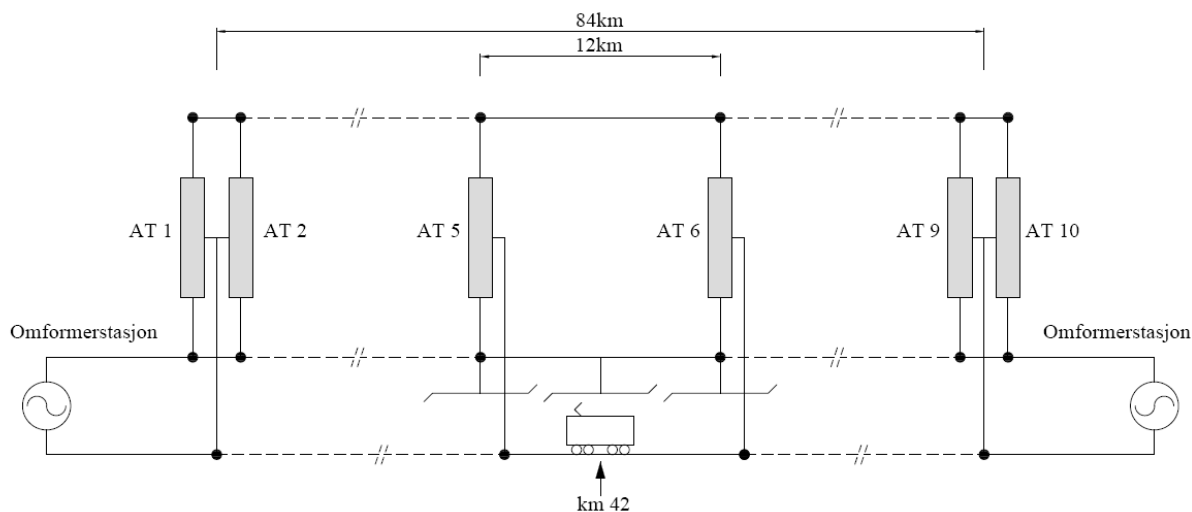
4.3 Oppbygging av modellene

I ATPDraw er det utarbeidet en modell for BTRC-systemet som vist i Vedlegg G og en modell for AT-systemet som vist i Vedlegg H. Modellene består av en enkeltsporet strekning på 84 km mellom to omformerstasjoner for begge systemene. Det er en avstand mellom sugetransformatorene på 3 km for BTRC-systemet og en avstand på 12 km mellom autotransformatorene for AT-systemet. Figur 4-4 viser en forenklet skisse av BTRC-systemet som er modellert. Vedlegg A viser to mer detaljerte tegninger av systemet.



Figur 4-4 Forenklet skisse av det modellerte BTRC-systemet

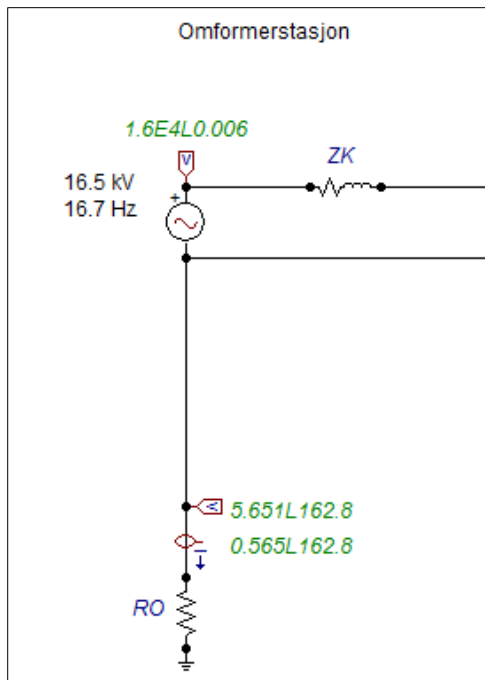
Figur 4-5 viser en forenklet skisse av AT-systemet som er modellert. Vedlegg B viser to mer detaljerte tegninger av systemet.



Figur 4-5 Forenklet skisse av det modellerte AT-systemet

4.3.1 Omformerstasjon og belastning

Omformerstasjonen er modellert som vist i Figur 4-6. Det er benyttet en spenningskilde på 16,5 kV 16,7 Hz. Det er antatt at omformerstasjonen har en overgangsmotstand (R_O) til jord på 10 Ω . Kortslutningsimpedansen Z_K til kilden er modellert med en impedans på $0,198+j4,9$ Ω tilsvarende som for en Q48/Q49 roterende omformer.



Figur 4-6 Modell av omformerstasjonen

Belastningen er modellert som en fast impedans mellom kontaktledningen og sporet. Impedansen på $25,5+j15,8$ Ω tilsvarer en belastning på 500 A og $\cos \varphi$ på 0,85 ved en spenning på 15 kV.

Det kunne alternativt vært benyttet en strømkilde som representerer toget og en svært liten motstand som representerer omformerstasjonen. Da ville strømmen ved togets plassering vært lik for begge systemene. Det ble valgt å se på samme belastning i hvert punkt for begge systemene.

4.3.2 BTRC-system

Modellen er bygget opp etter Vedlegg A. Den geometriske plasseringen av lederne er gjort i LCC komponentene. Sammenkoblinger, seksjonerings og avledningskonduktanser til jord er plassert mellom LCC komponentene. Modellen av BTRC-systemet er vist i Vedlegg G.

Sammenkoblinger og seksjonering

Mellom LCC komponentene er det hver for seg en sammenkobling mellom returlederne, skinnestrengene, kontakttråd og bæreline. Avstanden mellom sammenkoblingene antas å ha liten betydning så lenge lederne ikke skal betraktes hver for seg.

Tilkoblingen av sporet til returlederne er gjort midt mellom sugetransformatorene ved km 82,5.

Ved hver sugetransformator er det benyttet isolerte skinneskjøter. Nullfeltet ved sugetransformatoren som er på ca. 30 m er ikke tatt med i beregningene. Dette gir uendelig motstand til neste seksjon gjennom skinnegangen, men det antas at dette har liten effekt på simuleringen.

Avledningskonduktansen

Skinnegangen har en lengde (L) på 3 km siden det er benyttet isolerte skinneskjøter ved hver sugetransformator. Avledningskonduktansen (G) fra skinnegangen og tilkoblede fundamenter modelleres som en motstand (R_E) for et gitt antall (n) avledningspunkter. Motstanden (R_E) for hvert avledningspunkt blir derfor som vist i Formel 4-3.

$$R_E = \frac{1}{G \cdot \frac{L}{n}} \quad \text{Formel 4-3}$$

For hver motstand er det også plassert ut prober for måling av skinnepotensialet og strømmen som går til jord.

4.3.3 AT-system

Modellen er bygget opp etter Vedlegg B. Den geometriske plasseringen av lederne er gjort i LCC komponentene. Sammenkoblinger, seksjoneringer og avledningskonduktanser til jord er plassert mellom LCC komponentene. Modelleringen av strekningen er vist i Vedlegg H.

Sammenkoblinger og seksjonering

Ved LCC komponentene er det hver for seg en sammenkobling mellom skinnestrengene, kontakttråd og bæreline. Avstanden mellom sammenkoblingene antas å ha liten betydning så lenge lederne ikke skal betraktes hver for seg.

Ved hver autotransformator er det en tilkobling mellom sporet og transformatoren.

I Vedlegg B vises det at kontaktledningen er seksjonert opp i lengder på 6 km. Tilkoblingen mellom kontaktledningsseksjonen og positivleder utføres på midten av seksjonen. Dette blir da ved hver autotransformator og midt mellom to autotransformatorer.

Avledningskonduktansen

Skinnegangen er kontinuerlig elektrisk ledene i hele sin utstrekning. Avledningskonduktansen (G) fra skinnegangen og tilkoblede fundamenter fordeles punktvis mellom linjesegmentene med lengde (L_{LS}). Motstanden (R_E) for hvert avledningspunkt blir derfor som i Formel 4-4.

$$R_E = \frac{1}{G \cdot L_{LS}} \quad \text{Formel 4-4}$$

For hver motstand er det også plassert ut prober for måling av skinnepotensialet og strømmen som går til jord.

4.4 Verifisering av antall linjesegmenter i modellen

Siden avledningskonduktansen ikke kan modelleres som kontinuerlig langs hele skinnestrengen er denne modellert som en overgangsmotstand til jord for hvert linjesegment. Hyppigheten av linjesegmenter og overgangsmotstandene til jord vil være avgjørende for å få tilstrekkelig detaljerte resultater. Detaljeringsgraden til modellen vil øke ved å benytte flere linjesegmenter, men dette øker også kompleksiteten til modellen. Ved en mer kompleks modell vil det være vanskeligere å oppdage eventuelle feil eller unøyaktigheter. Antallet linjesegmenter må derfor bli en avveining mellom detaljeringsgrad og kompleksitet. For å gjøre dette er det kjørt en test med 4, 8 og 16 linjesegmenter for AT-systemet. For BTRC-systemet ble testen utført med 2, 4, 6 og 8 linjesegmenter. Antallet linjesegmenter må også gå opp med utformingen til systemet for tilkoblinger, seksjoneringsringer o.l.

I Vedlegg I vises resultatet for skinnepotensialet og strømmen ved ulikt antall linjesegmenter. De endelige modellene er vist i Vedlegg G og Vedlegg H.

4.4.1 BTRC-Systemet

For sugetransformatorsystemet ser man en stor forbedring i skinnepotensialet mellom 4 og 6 linjesegmenter. Forskjellen mellom 6 og 8 linjesegmenter gir en liten forbedring på ca. 2 V. For strømmen i jordsmonnet ser man en stor forbedring når linjesegmentene økes fra 4 til 6.

Ved å øke antallet linjesegmenter til 8 vil det gi en liten forbedring på ca. 2 A. Det antas at når antall segmenter går mot uendelig vil strømmen i jordsmonnet ved toget gå mot 0 A.

På grunn av økende kompleksitet på modellen ved flere linjesegmenter velges det å fortsette med 6 linjesegmenter for det BT-vindu som blir studert og 2 linjesegmenter for de resterende BT-vinduer. Betydningen for jevnere avledningskonduktans lengere fra betraktningpunktet antas å være liten.

4.4.2 AT-Systemet

For AT- systemet ser man en klar forbedring fra 4 til 8 linjesegmenter. Endringen fra 8 til 16 linjesegmenter gir en liten forbedring på ca. 2 V for skinnepotensialet. Endringen for strømmen i jordsmonnet fra 8 til 16 linjesegmenter vil gi en liten forbedring på ca. 2 A. Det antas at når antall segmenter går mot uendelig vil strømmen i jordsmonnet ved toget gå mot 0 A.

På grunn av økende kompleksitet på modellen velges det å fortsette med 8 linjesegmenter for det AT-vindu som blir studert og 4 linjesegmenter for de resterende AT-vinduer. Betydningen for jevnere avledningskonduktans lengere fra betraktningpunktet antas å være liten.

4.5 Scenarier

For å se på forskjellene i systemenes returkrets betraktes skinnepotensialet og strøm i jordsmonnet for hver av modellene vist i Vedlegg G og Vedlegg H. Skinnepotensialet er potensialhevingen på skinnegangen mot fjern jord. Strøm i jordsmonnet er absoluttverdien til summen av strømmen som avledes til jord ved hver modellerte overgangsmotstand.

Scenariene som kjøres for hvert av systemene er vist i Tabell 4-2. Togets plassering for hvert av systemene er forskjellig. Dette skyldes at Varjü påpeker at høyeste skinnepotensial for AT-systemet oppstår når toget er midt mellom omformerstasjonene og midt mellom autotransformatorene. Dette vil være på km 42 for simuleringene med AT-systemet. For BTRC-systemet er det påpekt at høyeste skinnepotensial vil være når toget er nærmest en av omformerstasjonene like før nærmeste sugetransformator. Dette vil være på km 84 for BTRC-systemet. [25, 28]

Skinneimpedansen (Z_T , begge skinnestrenger) vil bli variert over tre verdier som vist i Tabell 4-1. Varjü sin verdi er basert på en jordresistivitet på 2600 Ωm . Det er ikke beskrevet hvor stor strøm det er tatt høyde for i skinnegangen. For verdien fra Jernbaneverkets Tekniske

regelverk er det ikke beskrevet hvilken jordresistivitet og strøm som ligger til grunn. Den beregnede verdien er hentet fra utregninger utført i kapittel 3 ved en jordresistivitet på 2600 Ωm og strøm i hver skinnestreng på ca. 100 A til 150 A. [22, 25]

Tabell 4-1 Skinneimpedansen som benyttes i simuleringene

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedans Z_T [Ω] |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046+j0,204$ |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033+j0,220$ |

Avledningskonduktansen til jord vil bli variert over tre verdier. Det er valgt å se på 0,05 S/km, 0,25 S/km og 0,75 S/km for avledningskonduktansen. Den vil også varieres fra 0,05 S/m til 1 S/m for betraktning av skinnepotensialet ved togets posisjon.

Belastningsstrømmen ved de ulike scenariene er tilnærmet 496 A. Ettersom det blir benyttet en fast belastning vil belastningsstrømmen variere noe for de ulike scenariene (± 3 A).

Tabell 4-2 Scenarier som vil bli betraktet og hvilke parametere som benyttes.

| Faste parametre | BTRC-system | AT-system |
|--------------------------|-------------|-----------|
| Rho [Ωm] | 2600 | 2600 |
| Strekning x [km] | X = 71-84 | X = 41-49 |

| Scenario | Z_T [Ω] | G [S/km] |
|--|-------------------------|-----------------------|
| Skinnepotensialet ved toget avhengig av avledningskonduktans og skinneimpedans | $Z_{T1} = 0,046+j0,204$ | G = 0,05 - 1 |
| | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | |
| | $Z_{T3} = 0,033+j0,220$ | |
| Skinnepotensialets utstrekning avhengig av avledningskonduktans | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | G ₁ = 0,05 |
| | | G ₁ = 0,25 |
| | | G ₁ = 0,75 |
| Skinnepotensialets utstrekning avhengig av skinneimpedansen | $Z_{T1} = 0,046+j0,204$ | G ₂ = 0,25 |
| | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | |
| | $Z_{T3} = 0,033+j0,220$ | |
| Strøm i jordsmonnet avhengig av avledningskonduktans | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | G ₁ = 0,05 |
| | | G ₂ = 0,25 |
| | | G ₃ = 0,75 |
| Strøm i jordsmonnet avhengig av skinneimpedansen | $Z_{T1} = 0,046+j0,204$ | G ₂ = 0,25 |
| | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | |
| | $Z_{T3} = 0,033+j0,220$ | |

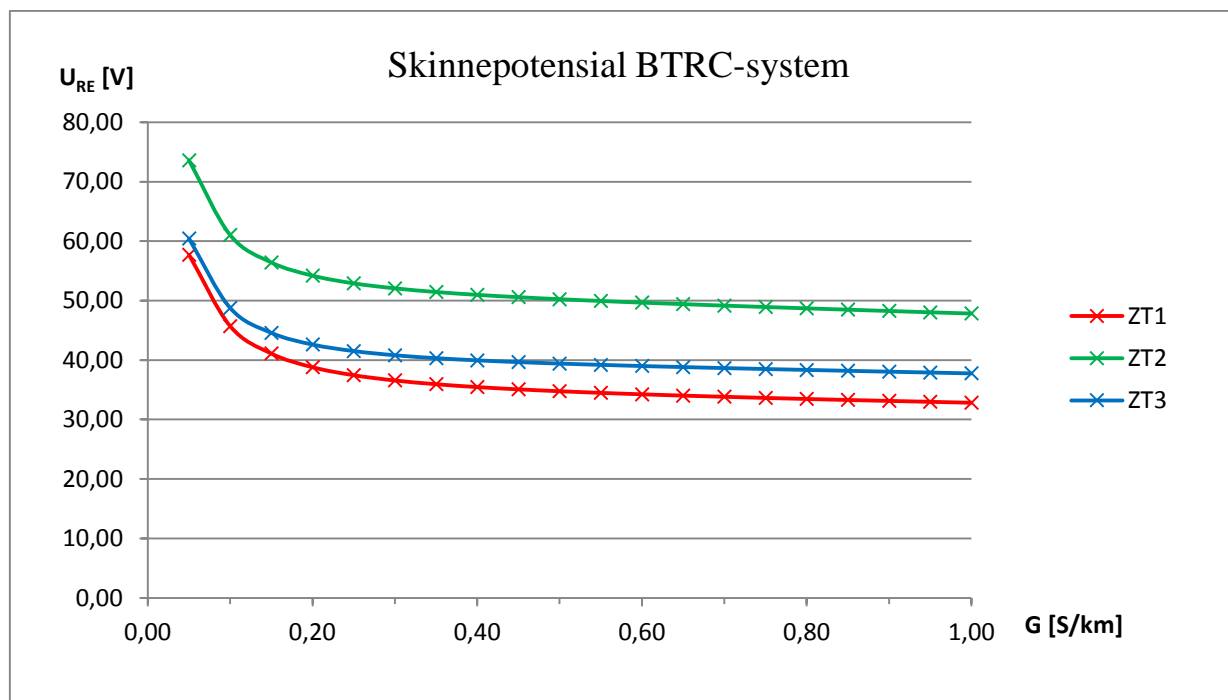
5 Resultater

Kapitlet presenterer resultater fra simuleringer på modellene for BTRC- og AT-systemet vist i kapittel 4. Det er kjørt simuleringer for begge systemene med simuleringsscenariene vist i kapittel 4. Prosjekt-filene til ATPDraw ligger vedlagt som Vedlegg J i egen fil. For BTRC-systemet betraktes de fire siste BT-vinduene før omformerstasjonen og togets posisjon like før siste sugetransformator. For AT-systemet betraktes AT-vindu midt mellom omformerstasjonene og togets posisjon er midt mellom autotransformatorene. Som vist i Vedlegg G og Vedlegg H.

Resultatene fra simuleringen er diskutert i kapittel 6.

5.1 BTRC-systemet - Skinnepotensial

5.1.1 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktans og skinneimpedans



Figur 5-1 Skinnepotensialet ved toget avhengig av avledningskonduktans for tre verdier av skinneimpedansen.

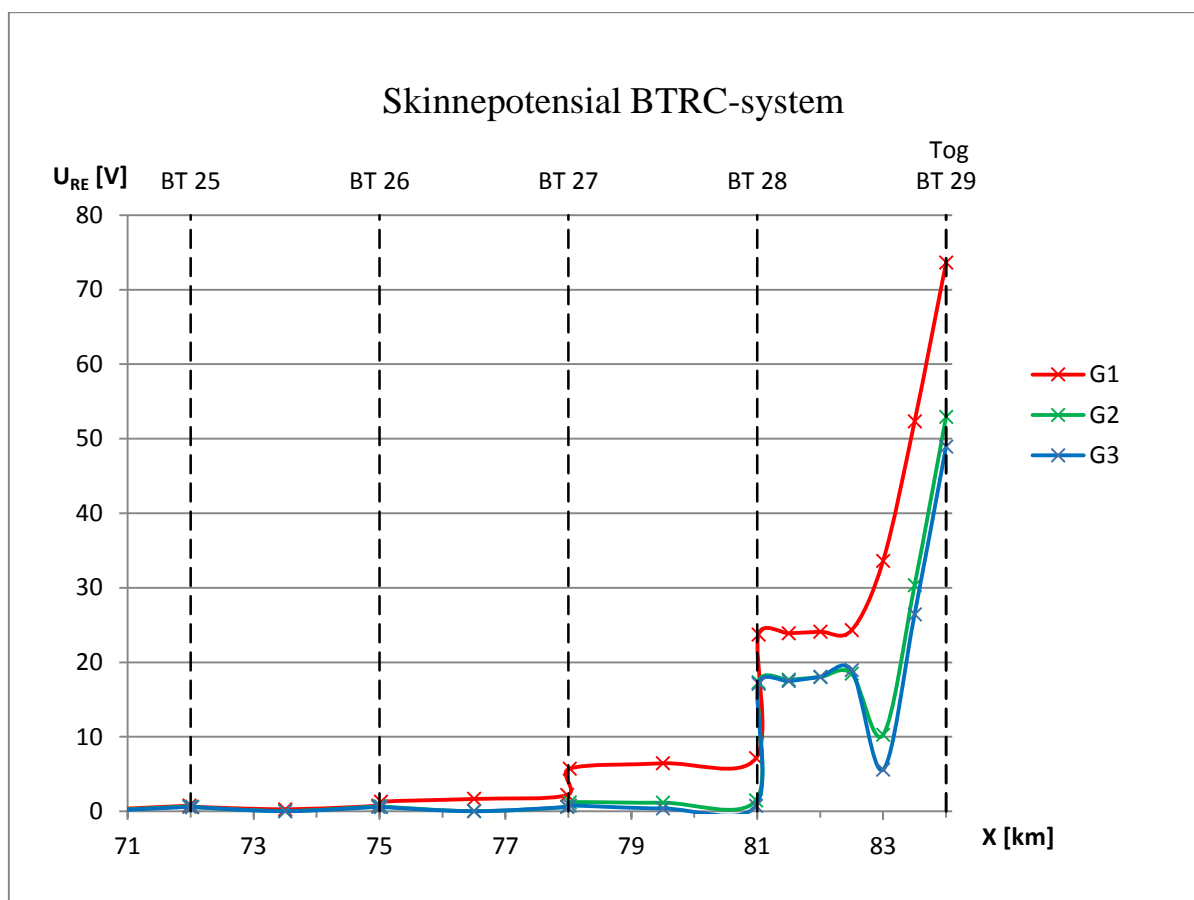
Figur 5-1 viser skinnepotensialet (U_{RE}) ved toget avhengig av avledningskonduktansen (G) fra skinnegangen og fundamenter til jord. Avledningskonduktansen er variert fra 0,05 S/km til 1 S/km. Det er gjort simuleringer for tre verdier av skinneimpedansen (Z_T) som vist i Tabell 5-1.

Tabell 5-1 Høyeste skinnepotensial for tre verdier av skinneimpedans og avledningskonduktans

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω/km] | Skinnepotensialet U_{RE} [V] | | |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|
| | | $G=0,05$ S/km | $G=0,25$ S/km | $G=0,75$ S/km |
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046+j0,204$ | 57,72 | 37,46 | 33,64 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046+j0,237$ | 73,62 | 52,91 | 48,93 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033+j0,220$ | 60,44 | 41,52 | 38,50 |

Tabell 5-1 viser det største skinnepotensialet for tre verdier av avledningskonduktansen. Skinnepotensialet synker ved økt avledningskonduktans. Største verdi for skinnepotensialet oppnås ved lav konduktivitet $G = 0,05$ S/km. Dette gir et skinnepotensiale U_{RE} mellom 57,72 V og 73,62 V avhengig av skinne impedansen.

5.1.2 Skinnepotensialets utstrekning avhengig av avledningskonduktans



Figur 5-2 Skinnepotensial over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen

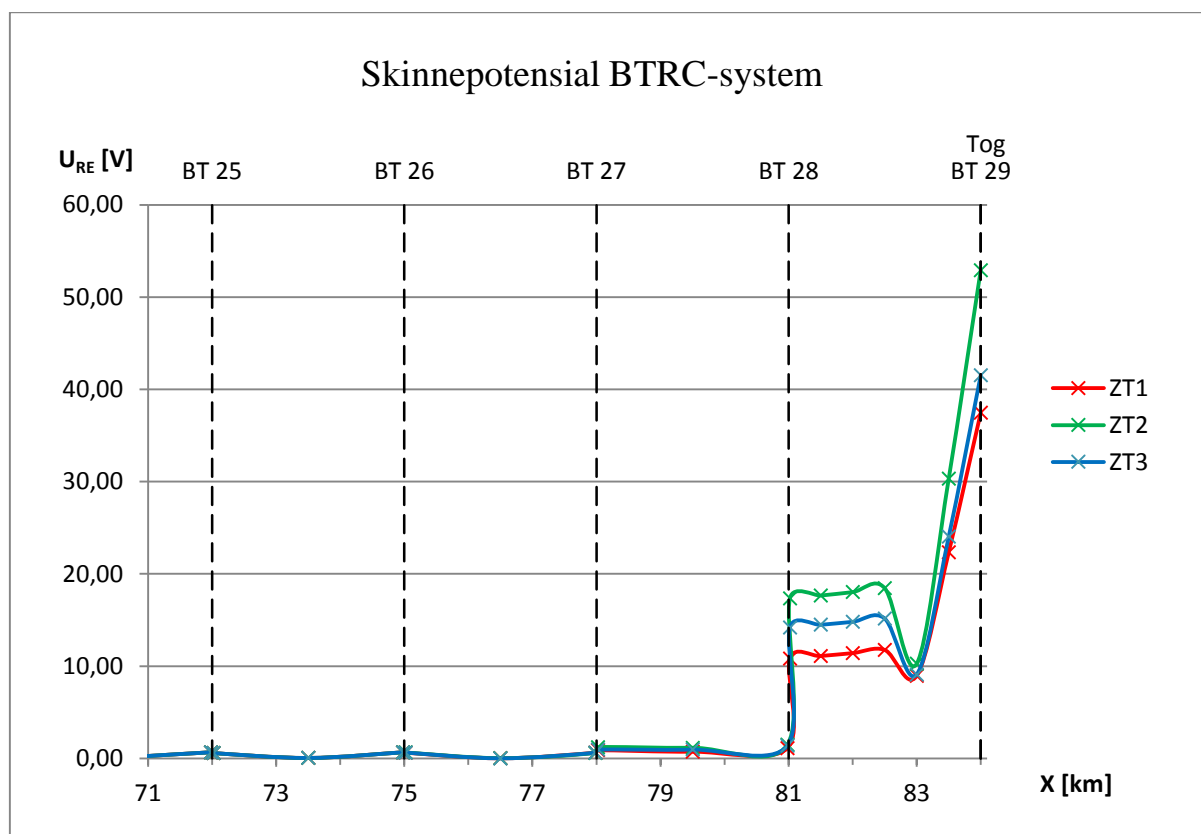
Figur 5-2 viser skinnepotensialet mellom fire sugetransformatorer plassert på km 75, km 78, km 81 og km 84. Togets plassering er rett før sugetransformatoren plassert på km 84. Det er benyttet en skinneimpedans $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$. Det er sett på tre ulike avledningskonduktanser som er listet opp i Figur 5-2.

Tabell 5-2 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av avledningskonduktansen

| Avledningskonduktans G [S/km] | U_{RE} maks [V] |
|----------------------------------|-------------------|
| $G_1 = 0,05$ | 73,62 |
| $G_2 = 0,25$ | 52,91 |
| $G_3 = 0,75$ | 48,93 |

Av Figur 5-2 kommer det frem at man har en spenningstopp i BTRC-systemet som er ved toget. Skinnepotensialet utenfor BT-vinduet er tilnærmet 0 V for avledningskonduktans på 0,25 S/km og 0,75 S/km. For avledningskonduktans på 0,05 S/km er den ca. 2 V til 6 V ved de nærmeste BT-vinduene. Det høyeste skinnepotensialet for de tre verdiene av avledningskonduktansen er listet opp i Tabell 5-2.

5.1.3 Skinnepotensialets utstrekning avhengig av skinneimpedansen



Figur 5-3 Skinnepotensialet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen

Figur 5-3 viser skinnepotensialet mellom fire sugetransformatorer plassert på km 75, km 78, km 81 og km 84. Togets plassering er rett før sugetransformatoren plassert på km 84. Det er benyttet en avledningskonduktans på $G = 0,25 \text{ S/km}$. Det er benyttet tre ulike skinneimpedanser som er listet opp i Tabell 5-3.

Tabell 5-3 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen

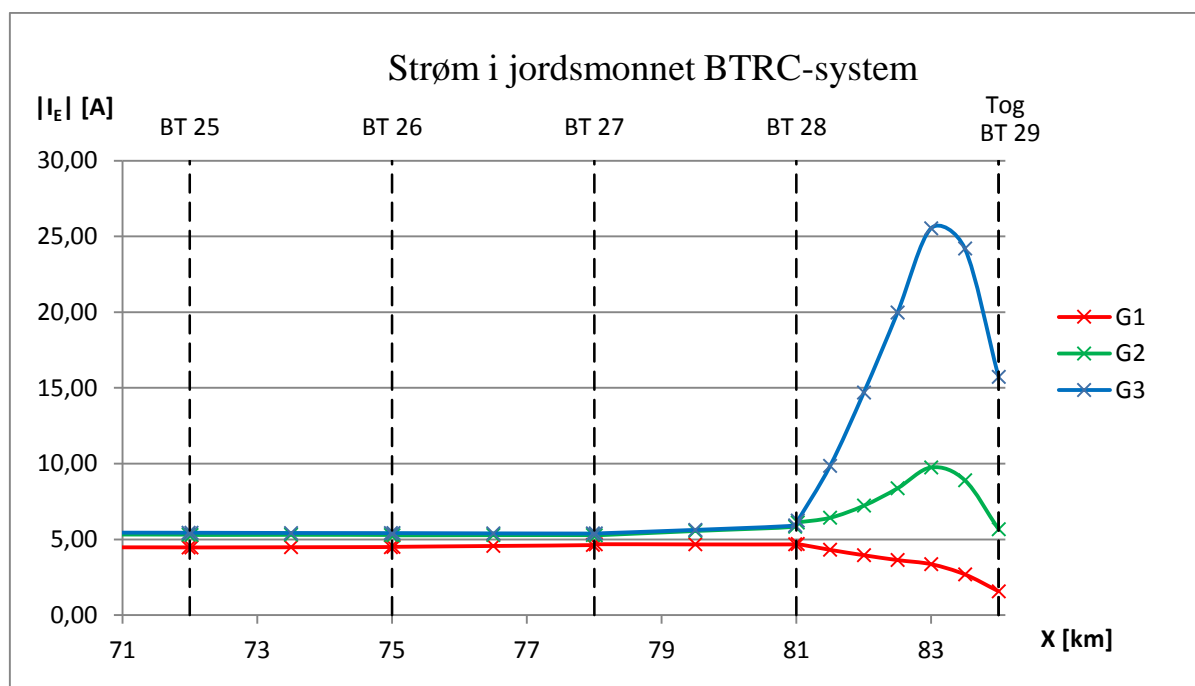
| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω/km] | U_{RE} maks [V] |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 37,45 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 52,92 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 41,52 |

Av Figur 5-3 kommer det frem at man har en spenningstopp i BTRC-systemet som er ved toget. Skinnepotensialet utenfor sugetransformator seksjonen er ca. 0 V til 2 V. Det høyeste skinnepotensialet for de tre verdiene av skinneimpedansen er listet opp i Tabell 5-3.

Den største forskjellen i skinnepotensialet mellom de tre verdiene av skinneimpedansen er ved toget. Det andre stedet med stor variasjon er mellom sugetransformator 27 og tilkoblingen av skinnegangen til returkretsen (km 82,5).

5.2 BTRC-systemet - Strøm i jordsmonnet

5.2.1 Strøm i jordsmonnet avhengig av avledningskonduktansen



Figur 5-4 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen

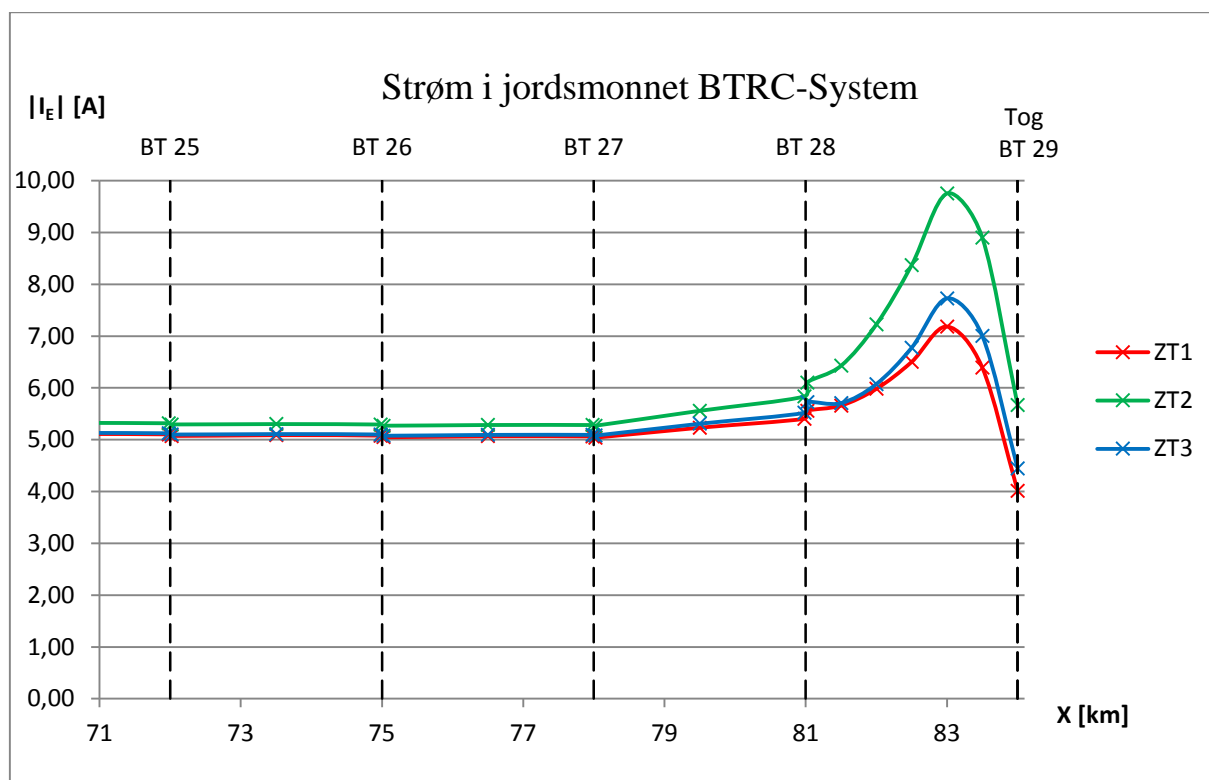
Figur 5-4 viser absoluttverdien av strømmen i jordsmonnet mellom fire sugetransformatorer plassert på km 75, km 78, km 81 og km 84. Togets plassering er rett før sugetransformatoren plassert på km 84. Det er benyttet en skinneimpedans på $Z_T = 0,046 + j0,237 \Omega$. Det er sett på tre ulike verdier av avledningskonduktansen som er listet opp i Tabell 5-4.

Tabell 5-4 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av avledningskonduktansen

| Avledningskonduktansen G [S/km] | I _E maks [A] |
|------------------------------------|---------------------------|
| G ₁ = 0,05 | 4,70 |
| G ₂ = 0,25 | 9,75 |
| G ₃ = 0,75 | 25,54 |

Av Figur 5-4 kommer det frem at høyeste strøm i jordsmonnet for 0,25 S/km og 0,75 S/km er omtrent midt mellom toget og tilkoblingen av skinnegangen til returkretsen. For en avledningskonduktans på 0,05 S/km er den høyeste strømmen i jordsmonnet ved sugetransformatoren. Strømmen stiger da fra toget til sugetransformatoren. Den høyeste strømmen for de tre verdiene er listet opp i Tabell 5-4.

5.2.2 Strøm i jordsmonnet avhengig av skinneimpedansen



Figur 5-5 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen

Figur 5-5 viser absoluttverdien av strømmen i jordsmonnet mellom fire sugetransformatorer plassert på km 75, km 78, km 81 og km 84. Togets plassering er rett før sugetransformatoren plassert på km 84. Beregningene er utført med en avledningskonduktans $G = 0,25 \text{ S/km}$. Det er benyttet tre ulike skinneimpedanser som er listet opp i Tabell 5-5.

Tabell 5-5 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av skinneimpedansen

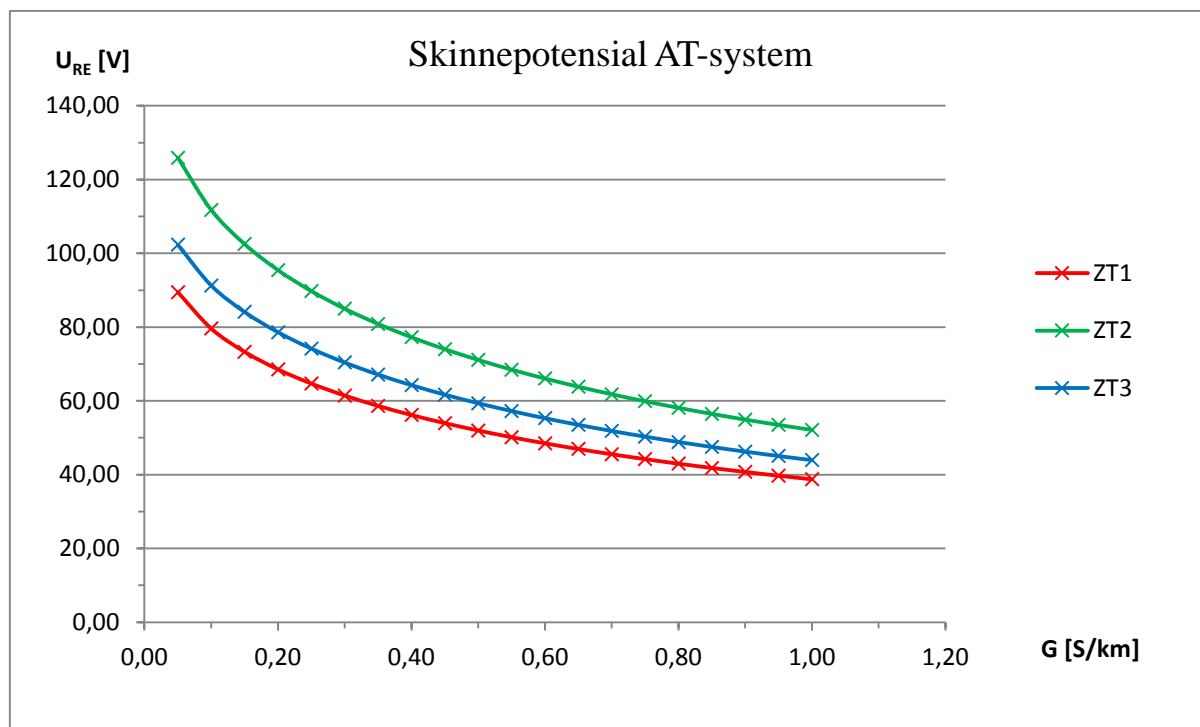
| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω/km] | $ I_E $ [A] |
|-----------------------------|---|-------------|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 7,18 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 9,75 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 7,73 |

Av Figur 5-5 kommer det frem at man har høyest strøm i jordsmonnet midt mellom toget og tilkoblingen av sporet til returlederen. Den høyeste strømmen for de tre verdiene er listet opp i Tabell 5-5.

Avhengig av skinneimpedansen vil punktet for høyeste strøm ligge omtrent på samme sted. Den største forskjellen på strøm i jordsmonnet for de ulike verdiene av skinneimpedansen vil være der strømmen er høyest.

5.3 AT-systemet - Skinnepotensial

5.3.1 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktans og skinneimpedans



Figur 5-6 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktansen for tre verdier av skinne impedansen

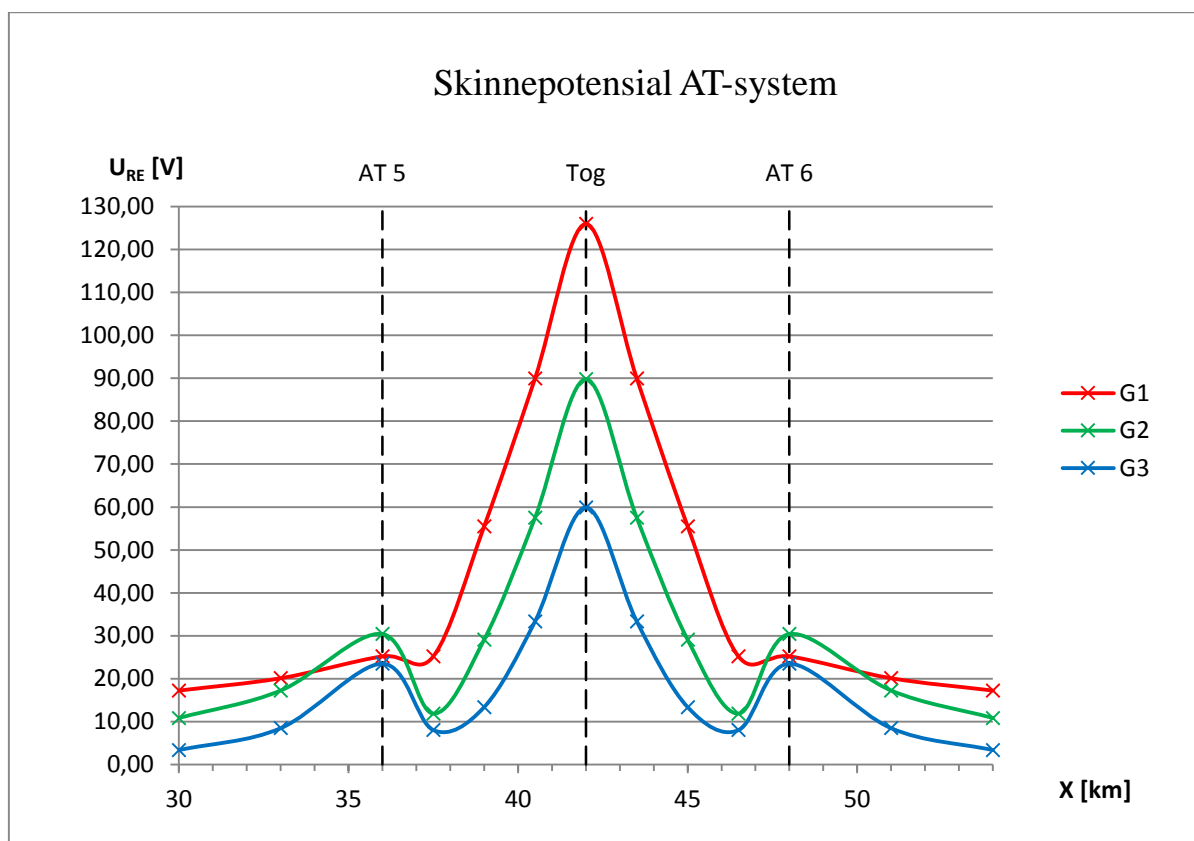
Figur 5-6 viser skinnepotensialet (U_{RE}) ved toget avhengig av avledningskonduktansen (G) fra skinnegangen og fundamenter til jord. Avledningskonduktansen er variert fra 0,05 S/km til 1 S/km. Det er gjort beregninger for tre verdier av skinneimpedansen (Z_T) som vist i Tabell 5-6.

Tabell 5-6 Høyeste skinnepotensial for tre verdier av skinneimpedansen og avledningskonduktansen

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω /km] | Skinnepotensialet U_{RE} [V] | | |
|-----------------------------|--|--------------------------------|----------|----------|
| | | $G=0,05$ | $G=0,25$ | $G=0,75$ |
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 89,47 | 64,69 | 44,21 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 125,92 | 89,77 | 59,89 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 102,33 | 74,16 | 50,30 |

Tabell 5-6 viser det største skinnepotensialet for tre verdier av avledningskonduktansen. Skinnepotensialet synker ved økt avledningskonduktans. Største verdi på skinnepotensialet oppnås ved lav konduktivitet $G = 0,05$ S/km. Dette gir et skinnepotensiale U_{RE} mellom 89,47V og 125,92V avhengig av skinneimpedansen.

5.3.2 Skinnepotensialets utstrekning avhengig av avledningskonduktans



Figur 5-7 Skinnepotensial over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen

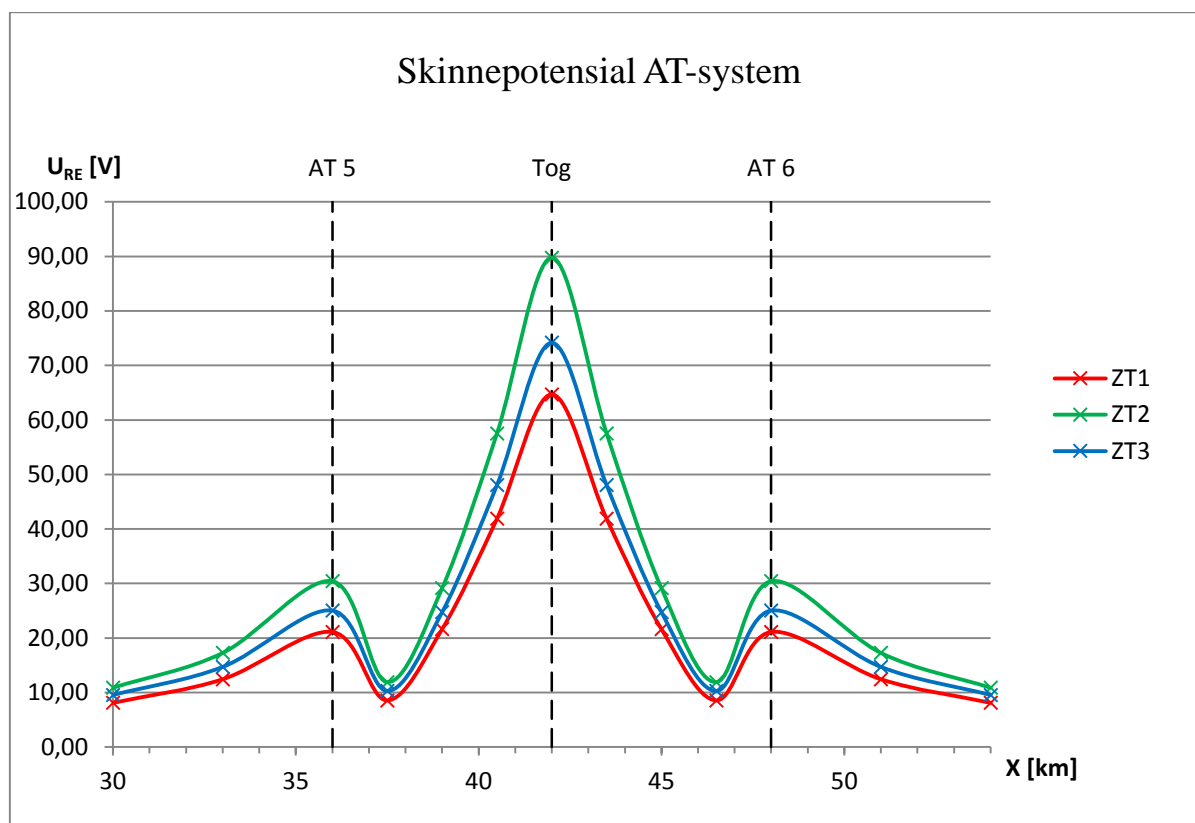
Grafen over viser skinnepotensialet mellom to autotransformatorer plassert på km 36 og km 48. Togets plassering er på km 42 midt mellom autotransformatorene. Det er benyttet en skinneimpedans på $Z_T = 0,046 + j0,237 \Omega$. Det er sett på tre ulike avledningskonduktanser som er listet opp i Tabell 5-7.

Tabell 5-7 Høyeste skinnepotensial ved tre verdier av avledningskonduktansen

| avledningskonduktans G [S/km] | U _{RE} maks [V] |
|----------------------------------|--------------------------|
| G ₁ = 0,05 | 125,92 |
| G ₂ = 0,25 | 89,77 |
| G ₃ = 0,75 | 59,89 |

Av Figur 5-7 kommer det frem at man har 3 spenningstopper for AT-vinduet. De to laveste vil være ved autotransformatoren og den høyeste ved toget. Det høyeste skinnepotensialet for de tre verdiene av avledningskonduktansen er listet opp i tabellen over.

5.3.3 Skinnepotensialets utstrekning avhengig av skinneimpedansen



Figur 5-8 Skinnepotensialet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen

Grafen over viser skinnepotensialet mellom to autotransformatorer plassert på km 36 og km 48. Togets plassering er på km 42 midt mellom autotransformatorene. Beregningene er utført med en avledningskonduktans $G = 0,25$ S/km. Det er benyttet tre ulike skinneimpedanser som er listet opp i Tabell 5-8.

Tabell 5-8 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen

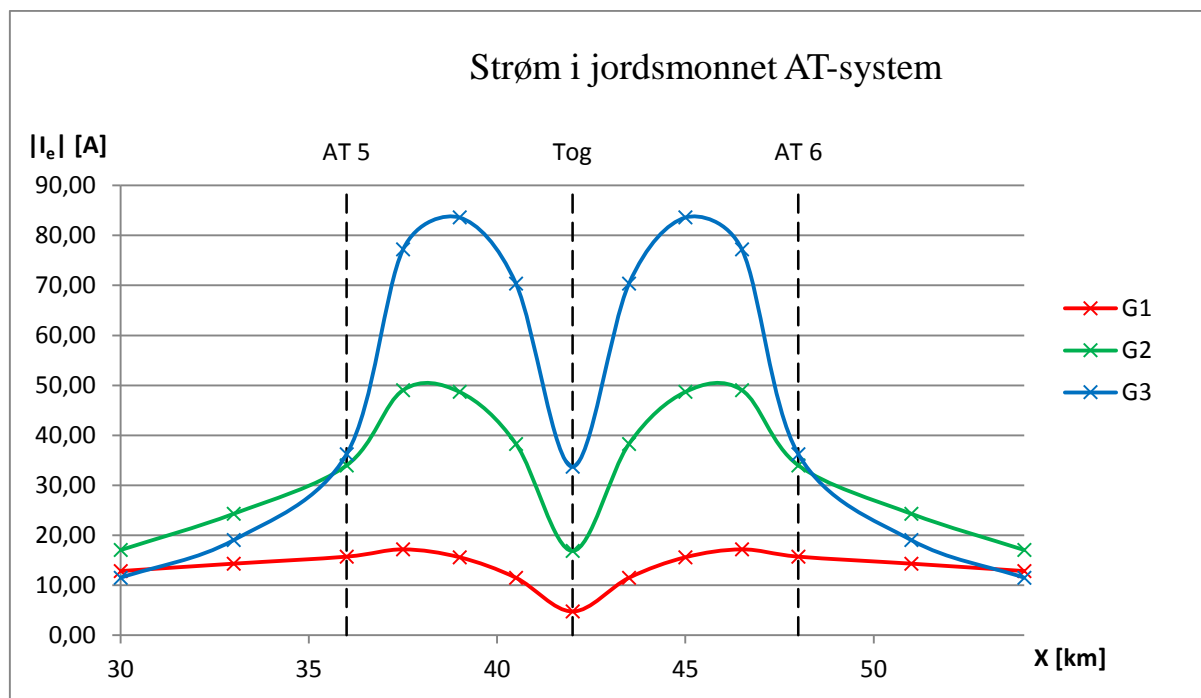
| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω /km] | U_{RE} maks [V] |
|-----------------------------|--|-------------------|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 64,69 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 89,77 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 74,16 |

Av Figur 5-8 kommer det frem at man har tre spenningstopper for AT-vindu. De to laveste vil være ved autotransformatoren og den høyeste ved toget. Det høyeste skinnepotensialet for de tre verdiene av skinneimpedansen er listet opp i Tabell 5-8.

Den største forskjellen i skinnepotensialet mellom de tre verdiene av skinneimpedansen er ved toget. Minste forskjell mellom verdiene er omtrent midt mellom toget og autotransformatoren.

5.4 AT-systemet - Strøm i jordsmonnet

5.4.1 Strøm i jordsmonnet avhengig av avledningskonduktans



Figur 5-9 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen

Figur 5-9 viser absoluttverdien av strømmen i jordsmonnet mellom to autotransformatorer plassert på km 36 og km 48. Togets plassering er på km 42 midt mellom autotransformatorene. Det er benyttet en skinneimpedans på $Z_T = 0,046 + j0,227 \Omega$. Det er sett på tre ulike avledningskonduktanser som er listet opp i Tabell 5-9.

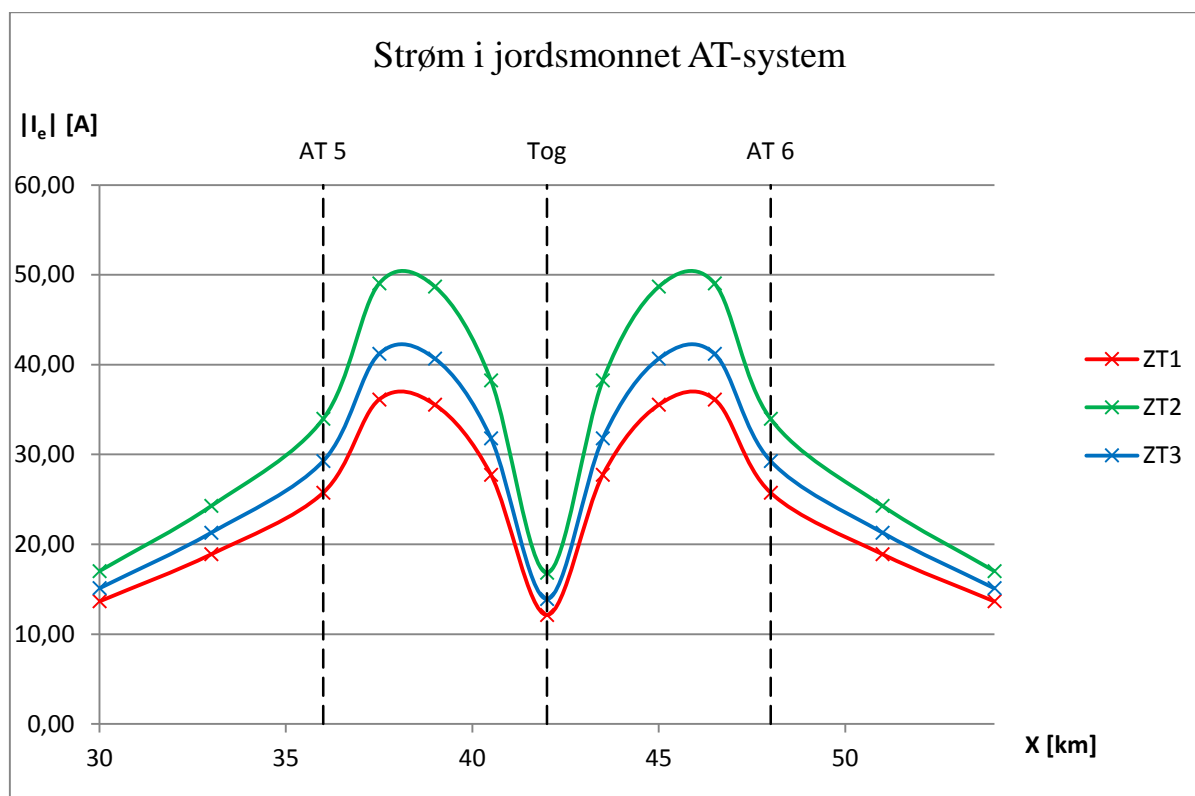
Tabell 5-9 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av avledningskonduktansen

| Avledningskonduktansen G [S/km] | I _e maks [A] |
|------------------------------------|---------------------------|
| G ₁ = 0,05 | 17,15 |
| G ₂ = 0,25 | 49,03 |
| G ₃ = 0,75 | 83,59 |

Av Figur 5-9 kommer det frem at man har høyest strøm i jordsmonnet to steder i AT-vinduet. Den høyeste strømmen for de tre verdiene er listet opp i Tabell 5-9.

Stedene hvor det er høyest strøm i jordsmonnet vil være omtrent midt mellom toget og autotransformatoren. Avhengig av avledningskonduktansen vil punktet for høyeste strøm variere noe. Det ser ut til at punktet for den høyeste strømmen vil være noe nærmere toget ved høyere avledningskonduktans.

5.4.2 Strøm i jordsmonnet avhengig av skinneimpedansen



Figur 5-10 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen

Figur 5-10 viser absoluttverdien av strømmen i jordsmonnet mellom to autotransformatorer plassert på km 36 og km 48. Togets plassering er på km 42 midt mellom autotransformatorene. Beregningene er utført med en avledningskonduktans $G = 0,25 \text{ S/km}$. Det er benyttet tre ulike skinneimpedanser som er listet opp i Tabell 5-10.

Tabell 5-10 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av skinneimpedansen

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω/km] | $ I_E $ [A] |
|-----------------------------|---|-------------|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 36,12 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 49,03 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 41,19 |

Av Figur 5-10 kommer det frem at man har høyest strøm i jordsmonnet to steder for AT-vindu. Den høyeste strømmen for de tre verdiene er listet opp i Tabell 5-10.

Punktene hvor det går mest strøm i jordsmonnet vil være omtrent midt mellom toget og autotransformatoren. Avhengig av skinneimpedansen vil punktet for høyeste strøm ligge omtrent på samme sted. Den største forskjellen på strøm i jordsmonnet for de ulike verdiene av skinneimpedansen vil være der strømmen er høyest.

6 Vurdering av resultater

Dette kapitlet er skrevet med bakgrunn i simuleringsresultatene vist i kapittel 5. Utformingen av modellene og beregningsprogrammet blir diskutert. Det gjøres en vurdering av resultatene og en sammenligning av BTRC- og AT-systemet. Resultatene sammenlignes også med resultater fra simuleringer Varjü har utført [25]. Det vurderes om resultatene kan benyttes for å kontrollere krav stilt i standardene presentert i kapittel 2.

6.1 Vurdering av modellene

Modelleringen av avledningskonduktansen fra spor og fundamenter til jord er gjort punktvis og gir derfor ikke en korrekt fremstilling av overgangsmotstanden til jord fra sporet. Ved å benytte tilstrekkelig antall linjesegmenter og punktvis avledningskonduktans til jord er avviket fra denne tilnærmingen redusert. Om antall linjesegmenter hadde økt ville det maksimale skinnepotensialet steget og den maksimale strømmen i jordsmonnet sunket. En ytterligere økning i linjesegmenter og avledningspunkter enn hva som er benyttet i oppgaven vil likevel ha liten effekt. Ved verifikasjonen av modellene kom det frem at dette gir en endring på ca. 2 V og ca. 2 A i maksimalverdi for spenningen og strømmen.

Fremstillingen av spenningskilden vil avvike noe da det i virkeligheten vil være mulighet for fasevinkel- og spenningsregulering ved omformerstasjonen.

Skinneimpedansen er modellert konstant for hele systemet. På grunn av strømvhengigheten vil denne i praksis variere langs sporet. Derfor vil dette gi et avvik i resultatene. Betydningen av skinneimpedansen lenger fra betraktningpunktet antas å ha mindre påvirkning på resultatene.

6.1.1 BTRC-systemet

Systemet er modellert med seks linjesegmenter mellom sugetransformatorene der toget befinner seg. For resten av systemet er det benyttet to linjesegmenter. Bidraget fra avledningskonduktansen lenger unna betraktningpunktet vil få mindre innvirkning på grunn av skinneimpedansen. Det antas derfor at dette har liten påvirkningen på resultatene i området som betraktes.

Skinnegangen er kun modellert mellom omformerstasjonene. For BTRC-systemet antas det at dette har liten betydning på modellen, ettersom det er isolerte skinneskjøter ved sugetransformatorene.

6.1.2 AT-systemet

Systemet er modellert med åtte linjesegmenter mellom autotransformatorene der toget befinner seg. For resten av systemet er det benyttet fire linjesegmenter. Bidraget fra avledningskonduktansen lenger fra betraktningpunktet vil få mindre innvirkning på grunn av skinneimpedansen. Det antas derfor at dette har liten påvirkningen på resultatene i området som betraktes.

Skinnegangen er kun modellert mellom omformerstasjonene. For AT-systemet antas dette å ha liten betydning da området som betraktes ligger midt mellom omformerstasjonene. Påvirkningen fra enden antas da å ha liten betydning.

6.2 Vurdering av beregningsprogrammet

Siden jernbanesystemene har mange detaljer og ulik utforming vil behovet være stort for tilpasninger av kretsen. De fleste tilpasninger er stort sett mulig i ATPDraw og programmet har komponenter som egner seg godt for å representere autotransformatoren og sugetransformatoren.

Programmet er godt egnet for oppbyggingen av overføringslinjene. Det er mulig å angi spesifikke parametere for lederne og generelle parametere for hele linjen. Regelmessigheter som tilkobling av mastefundamenter med jevne mellomrom langs linjen er ikke mulig. Disse må derfor tilpasses i hver ende av linjesegmentene som en felles tilkobling. Impedansen i skinnegangen er også vanskelig å håndtere på grunn av strømvhengigheten og den geometriske utformingen.

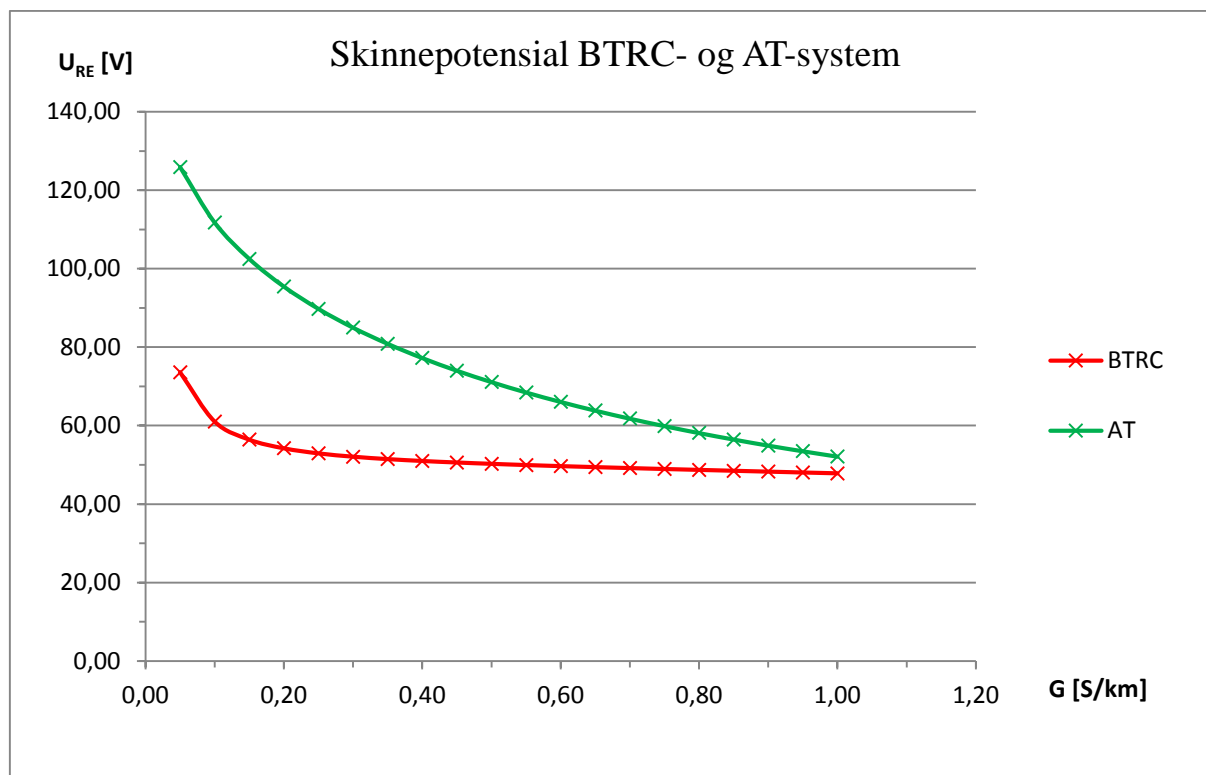
Programmet kan ikke håndtere kontinuerlig avledningskonduktans fra skinne til jord. Det må derfor tilpasses med punktvis avledningskonduktans.

Programmet gir mulighet for flere måter å eksportere resultater, men har ikke integrerte funksjoner der stasjonære verdier kan behandles og eksporteres.

Underveis i modelleringen har det vært oppdaget noen utfordringer med enkelt funksjoner og komponenter i programmet. Høidalen har da gjort forbedringer av programvaren fortløpende.

6.3 Skinnepotensial

6.3.1 Påvirkning fra avledningskonduktansen



Figur 6-1 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktansen.

Figur 6-1 viser skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved skinneimpedans $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ avhengig av avledningskonduktansen (G). Plasseringen av toget er på km 84 for BTRC-systemet og km 42 for AT-systemet.

Skinnepotensialet har en eksponentiell stigning ved lavere avledningskonduktans. For BTRC-systemet vil denne jevne seg ut ved avledningskonduktans over ca. 0,25 S/km. Skinnepotensialet til AT-systemet vil derfor være mere sensitivt for en endring i avledningskonduktansen.

Av Tabell 6-1 kommer det frem at AT-systemet har omtrent 1,2 til 1,7 ganger høyere skinnepotensial enn BTRC systemet avhengig av avledningskonduktansen. Skinnepotensialet blir påvirket med en faktor på 0,48 for AT-systemet og 0,66 for BTRC-systemet ved en endring av avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km. Det antas at dette kan skyldes isoleringen av skinnegangen ved hver sugetransformator for BTRC-systemet. Sugetransformatoren antas også å holde en større andel av strømmen i sporet enn autotransformatoren.

Tabell 6-1 Skinnepotensial for BTRC- og AT-systemet avhengig av avledningskonduktansen

| Avledningskonduktans [S/km] | Skinnepotensial BTRC-system U_{RE} [V] | Skinnepotensial AT-system U_{RE} [V] |
|-----------------------------|--|--|
| $G_1 = 0,05$ | 73,62 | 125,92 |
| $G_2 = 0,25$ | 52,91 | 89,77 |
| $G_3 = 0,75$ | 48,93 | 59,89 |

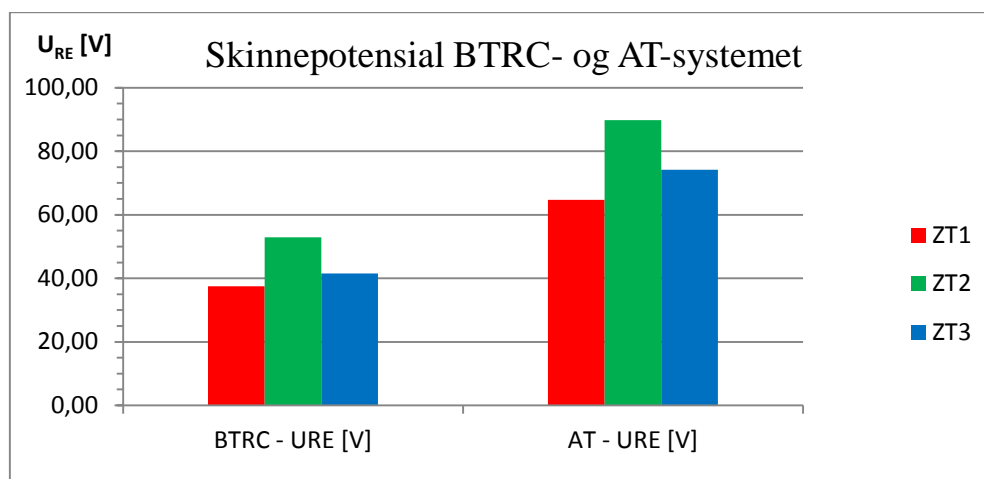
Varjü [25] har i sin rapport utført beregninger av høyeste skinnepotensial for tre ulike avledningskonduktanser i et tilsvarende AT-system. Verdiene som er simulert er sammenlignet i Tabell 6-2. Den store forskjellen i skinnepotensialet på ca. 25-28% skyldes antageligvis forskjellen i skinneimpedansen. Ved å benytte like verdier for skinneimpedansen som Varjü vil skinnepotensialet for en avledningskonduktans på 0,25 S/km og 0,75 S/km være tilnærmet lik. Ved 0,05 S/km er forskjellen ca. 5 %.

Denne forskjellen kan skyldes modelleringen med punktvis fordelt avledningskonduktans til jord. Ved å benytte flere punkter for avledningskonduktansen ville skinnepotensialet øke. Det er ikke beskrevet hvordan Varjü behandler avledningskonduktansen til jord i sine modeller.

Tabell 6-2 Sammenligning med simuleringer utført av Varjü

| Avledningskonduktans [S/km] | Skinnepotensial U_{RE} [V] | | |
|-----------------------------|------------------------------|---|---|
| | Varjü sine simuleringer [25] | Simulering $Z_{T1} = 0,046 + j0,204 \Omega$ | Simulering $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ |
| $G_1 = 0,05$ | 93,88 | 89,47 | 125,92 |
| $G_2 = 0,25$ | 65,31 | 64,69 | 89,77 |
| $G_3 = 0,75$ | 44,44 | 44,21 | 59,89 |

6.3.2 Påvirkning fra skinneimpedansen



Figur 6-2 Sammenligning av skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved tre verdier av skinneimpedansen

Figur 6-2 viser en sammenligning av skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved tre verdier av skinneimpedansen (Z_T) som vist i Tabell 6-3. Tabellen viser også høyeste skinnepotensialet (U_{RE}).

Av Tabell 6-3 kommer det frem at AT-systemet har omtrent 1,7 til 1,8 ganger høyere skinnepotensial enn BTRC systemet avhengig av skinneimpedansen.

Tabell 6-3 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω/km] | Skinnepotensial BTRC-system U_{RE} maks [V] | Skinnepotensial AT-system U_{RE} maks [V] |
|-----------------------------|-------------------------------|---|---|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 37,45 | 64,69 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 52,92 | 89,77 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 41,52 | 74,16 |

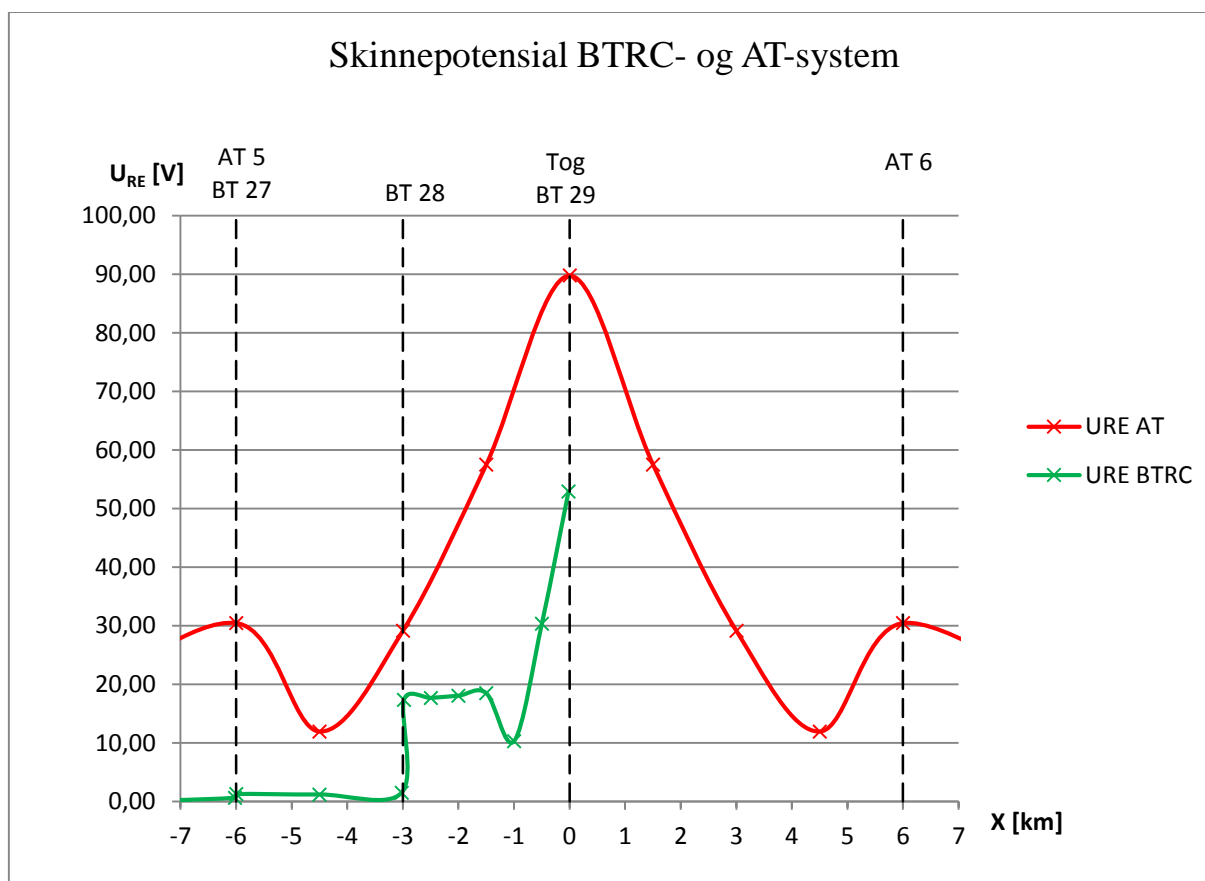
Forskjellen mellom absoluttverdien til skinneimpedansen Varjü [25] benytter i sin rapport og den beregnede skinneimpedansen i kapittel 3 er omtrent 15 %. Dette gjør at skinnepotensialet ligger omtrent 25-28 % høyere for simuleringene i oppgaven. Skinneimpedansen vil derfor ha betydning for å oppnå riktige verdier ved simulering. Skinnepotensialet øker ca. 1,4 ganger endringen i skinneimpedansen for begge systemene.

Det har i oppgaven ikke lyktes å finne den fullstendige bakgrunnen for skinneimpedansen Varjü benytter, men det antas denne er noe lav. Dette kan komme av at han benytter en større skinneradius ved utregning av impedansen.

Påvirkningen skinneimpedansen har på skinnepotensialet kommer av den kontinuerlige avledningskonduktansen fra sporet til jord. Ved lavere skinneimpedans vil overgangsmotstanden lenger fra betraktningpunktet gi et større bidrag til avledningskonduktansen.

Skinneimpedansen regnet ut i oppgaven blir benyttet kontinuerlig langs sporet for hele strekningen. I praksis vil endringer i strømmen langs med sporet endre skinneimpedansen. Det er heller ikke tatt høyde for slitasje på sporet som vil øke impedansen. Disse faktorene vil da ha en påvirkning på skinnepotensialet.

6.3.3 Sammenligning av BTRC og AT-systemet



Figur 6-3 Skinnepotensialet ± 6 km fra togets posisjon

Figur 6-3 viser skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved skinneimpedans $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ og $G = 0,25 \text{ S/km}$. Plasseringen av toget er på km 84 for BTRC-systemet og km 42 for AT-systemet. For å kunne sammenligne systemene er det i grafen tatt utgangspunkt i togets posisjon som gir skinnepotensialet over en delstrekning på ± 6 km.

Skinnepotensialet for begge systemene vil være høyest ved toget. Det antas å komme av at overføringen av strøm mellom skinne og jord vil være størst i dette punktet.

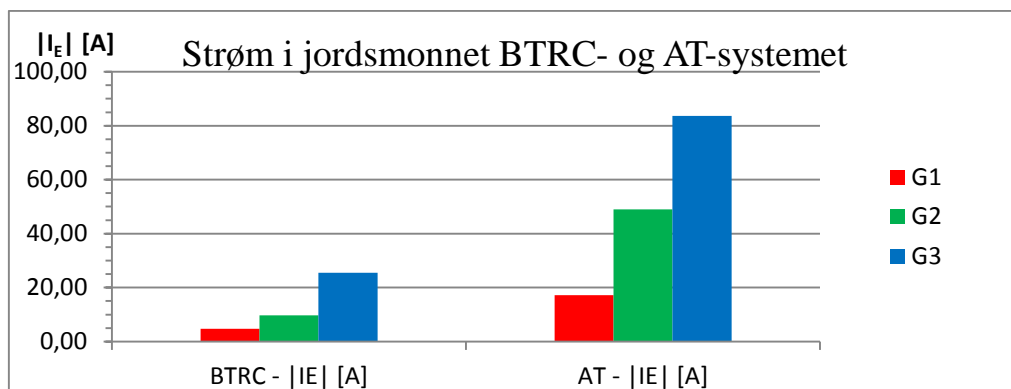
For AT-systemet vil potensialet synke jevnt mot autotransformatoren, der den vil stige noe. Siden deler av strømmen blir dratt tilbake i skinnegangen i nærheten av autotransformatoren vil man få en stigning i skinnepotensialet rundt denne.

For BTRC-systemet vil skinnepotensialet synke jevnt mot sammenkoblingen mellom skinnegangen og returlederne ca. 1,5 km fra toget. I nærheten av sammenkoblingen vil strømmen bli dratt fra jord og skinnegang opp i returlederne.

Den store forskjellen i skinnepotensialet mellom disse to systemene kommer antageligvis av avstanden mellom transformatorene. Sugetransformatorene har en avstand på 3 km og autotransformatorene har en avstand på 12 km. Dette gjør at en større andel av strømmen vil overføres fra skinne til jord, før strømmen blir trukket tilbake i skinnegang på grunn av transformatorene.

6.4 Strøm i jordsmonnet

6.4.1 Påvirkning fra avledningskonduktansen



Figur 6-4 Høyeste strøm i jordsmonnet over en strekning på ± 6 km avhengig av avledningskonduktansen

Figur 6-4 og Tabell 6-4 viser høyeste strøm i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet ved skinneimpedans $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ avhengig av avledningskonduktansen. Plasseringen av toget er på km 84 for BTRC-systemet og km 42 for AT-systemet. For å kunne sammenligne systemene er det tatt utgangspunkt i togets posisjon over en delstrekning på ± 6 km.

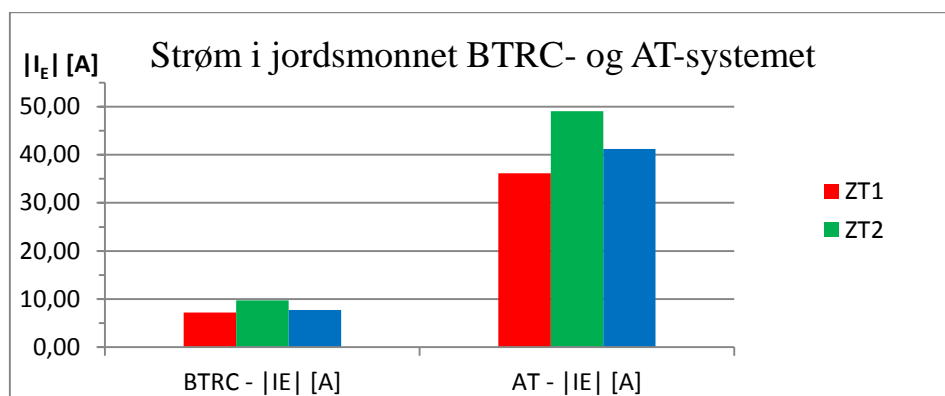
BTRC-systemet vil ha ca. 5,5 ganger høyere strøm i jordsmonnet som følge av en økning i avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km. AT-systemet vil ved denne økningen ha 5 ganger høyere strøm i jordsmonnet. BTRC-systemet ser ut til å være mere påvirket av en endring i avledningskonduktansen enn AT-systemet. Dette antas å komme av at det er isolerte skinneskjøter ved hver sugetransformator.

AT-systemet har ca. 3-5 ganger høyere strøm i jordsmonnet enn BTRC-systemet. Forskjellen vil være størst ved avledningskonduktans på 0,25 S/km. Dette kommer antageligvis av avstanden mellom transformatorene og de isolerte skinneskjøtene ved sugetransformatorene (hver 3 km). Dette gjør at avledningskonduktansen blir mindre enn for et kontinuerlig elektrisk ledende spor. Det vil derfor gå mindre strøm til jord.

Tabell 6-4 Høyeste absoluttverdi av strømmen i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet ved variasjon av avledningskonduktansen

| Avledningskonduktansen [S/km] | Strøm i jordsmonnet BTRC-system I_E maks [A] | Strøm i jordsmonnet AT-system I_E maks [A] |
|-------------------------------|--|--|
| $G_1 = 0,05$ | 4,70 | 17,15 |
| $G_2 = 0,25$ | 9,75 | 49,03 |
| $G_3 = 0,75$ | 25,54 | 83,59 |

6.4.2 Påvirkning fra skinneimpedansen



Figur 6-5 Høyeste strøm i jordsmonnet over en strekning på ± 6 km avhengig av skinneimpedansen

Figur 6-5 og Tabell 6-5 viser høyeste absoluttverdi av strømmen i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet ved avledningskonduktans til jord på $G = 0,25$ S/km avhengig av skinneimpedansen. Plasseringen av toget er på km 84 for BTRC-systemet og km 42 for AT-systemet. For å kunne sammenligne systemene er det tatt utgangspunkt i togets posisjon over en delstrekning på ± 6 km.

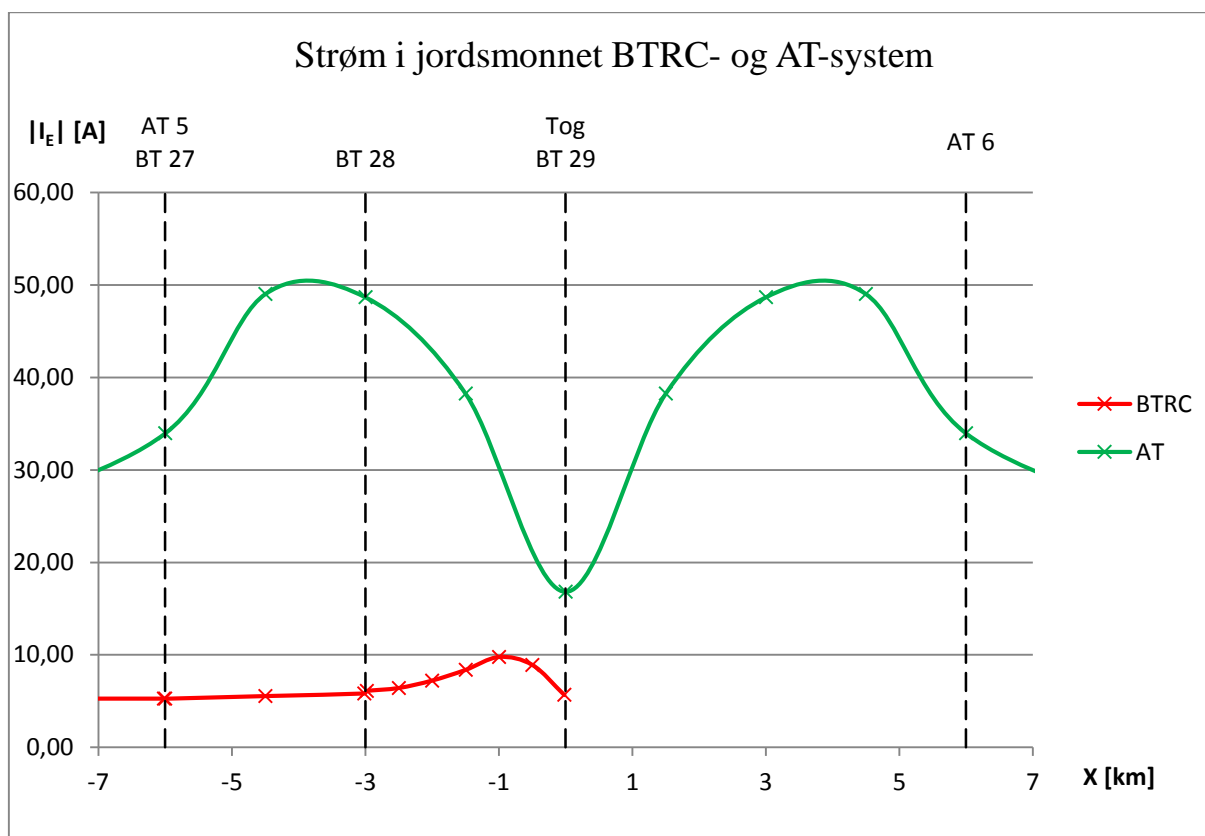
For både BTRC- og AT-systemet er det ca. 1,4 ganger høyere strøm i jordsmonnet ved den høyeste skinneimpedansverdien enn den laveste. Begge anleggene ser derfor ut til å bli påvirket omtrent like mye av endringer i skinneimpedansen. Endringen i absoluttverdien til skinneimpedansen er ca. 15 %. En endring i skinneimpedansen ser derfor ut til å gi en stor påvirkning på den høyeste strømmen i jordsmonnet.

AT-systemet har ca. 5 – 5,5 ganger høyere strøm i jordsmonnet enn BTRC-systemet for alle verdiene av skinneimpedansen. Dette kommer antageligvis av avstanden mellom transformatorene og de isolerte skinneskjøtene ved sugetransformatorene (hver 3 km). Dette gjør at avledningskonduktansen blir mindre enn for et kontinuerlig elektrisk ledende spor. Det vil derfor gå mindre strøm til jord. Begge anleggene ser ut til å bli påvirket like mye av endringer i skinneimpedansen.

Tabell 6-5 Høyeste absoluttverdi av strømmen i jordsmonnet ved variasjon av skinneimpedansen

| Skinneimpedans verdier fra: | Skinneimpedansen Z_T [Ω /km] | Strøm i jordsmonnet BTRC-system I_E maks [A] | Strøm i jordsmonnet AT-system I_E maks [A] |
|-----------------------------|--|--|--|
| Varjü | $Z_{T1} = 0,046 + j0,204$ | 7,18 | 36,12 |
| Beregnet | $Z_{T2} = 0,046 + j0,237$ | 9,75 | 49,03 |
| JBV | $Z_{T3} = 0,033 + j0,220$ | 7,73 | 41,19 |

6.4.3 Sammenligning av AT og BT



Figur 6-6 Strømmen i jordsmonnet ± 6 km fra togets posisjon

Figur 6-6 viser skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved skinneimpedans $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ og $G = 0,25 \text{ S/km}$. Plasseringen av toget er på km 84 for BTRC-systemet og km 42 for AT-systemet. For å kunne sammenligne systemene er det i grafen tatt utgangspunkt i togets posisjon over en delstrekning på ± 6 km.

For BTRC- og AT-systemet kommer det frem at den høyeste strømmen i jordsmonnet vil være mellom toget og der strømmen trekkes ut av skinnegangen til returledere og autotransformatorer. Siden det er benyttet isolerte skinneskjøter ved sugetransformatoren i BTRC-systemet vil strømmen kun gå i en retning. For AT-systemet vil strømmen fordele seg mot autotransformatorene på begge sider av toget. For begge systemene vil økningen av strøm i jordsmonnet være innenfor BT- og AT-vindu. Utstrekningen av denne økningen vil være størst i AT-systemet. Dette antas å komme av avstand mellom transformatorene i BTRC-systemet (3 km) og AT-systemet (12 km).

Overgangssonene der strømmen overføres mellom skinnene og jord ser ut til å overlappe hverandre for begge systemene. Lengden mellom transformatorene ser derfor ut til å være for

kort til at det oppstår en stasjonærsone hvor det ikke overføres strøm mellom skinnegangen og jord.

Strømmen i jordsmonnet for AT-systemet vil ha forskjellig retning bak og foran toget. Grafen viser absoluttverdien til strømmen, men den forskjellige strømrretningen vil få betydning for den induerte spenningen i nærliggende anlegg langs med jernbanen. Om det påvirkede anlegget ligger før eller etter toget vil retningsendringen ikke gi en betydning for den induerte spenningen.

Varjü [25] har i sin rapport utført simuleringer som viser strømmen i jordsmonnet for et tilsvarende AT-system. Verdiene som er hentet ut fra grafene i Varjü sin rapport er sammenlignet med de simulerte verdiene for oppgaven i Tabell 6-6. Forskjellen ved avledningskonduktans på 0,25 S/km og 0,75 S/km er 24 % og 37 % ved bruk av den beregnede skinneimpedansen (Z_{T2}). Ved bruk av samme skinneimpedans (Z_{T1}) som Varjü er forskjellen 27 % og 25 % ved avledningskonduktans på 0,05 S/km og 0,75 S/km. Den høyeste strømmen i jordsmonnet for 0,25 S/km er tilnærmet lik ved bruk av skinneimpedansen (Z_{T1}) til Varjü. Det antas at den punktvis modelleringen av avledningskonduktansen til jord fører til de varierende resultatene. Ved å benytte flere punkter for avledningskonduktansen ville strømmen i jordsmonnet blitt noe redusert. Det er ikke beskrevet hvordan Varjü behandler avledningskonduktansen til jord i sine modeller.

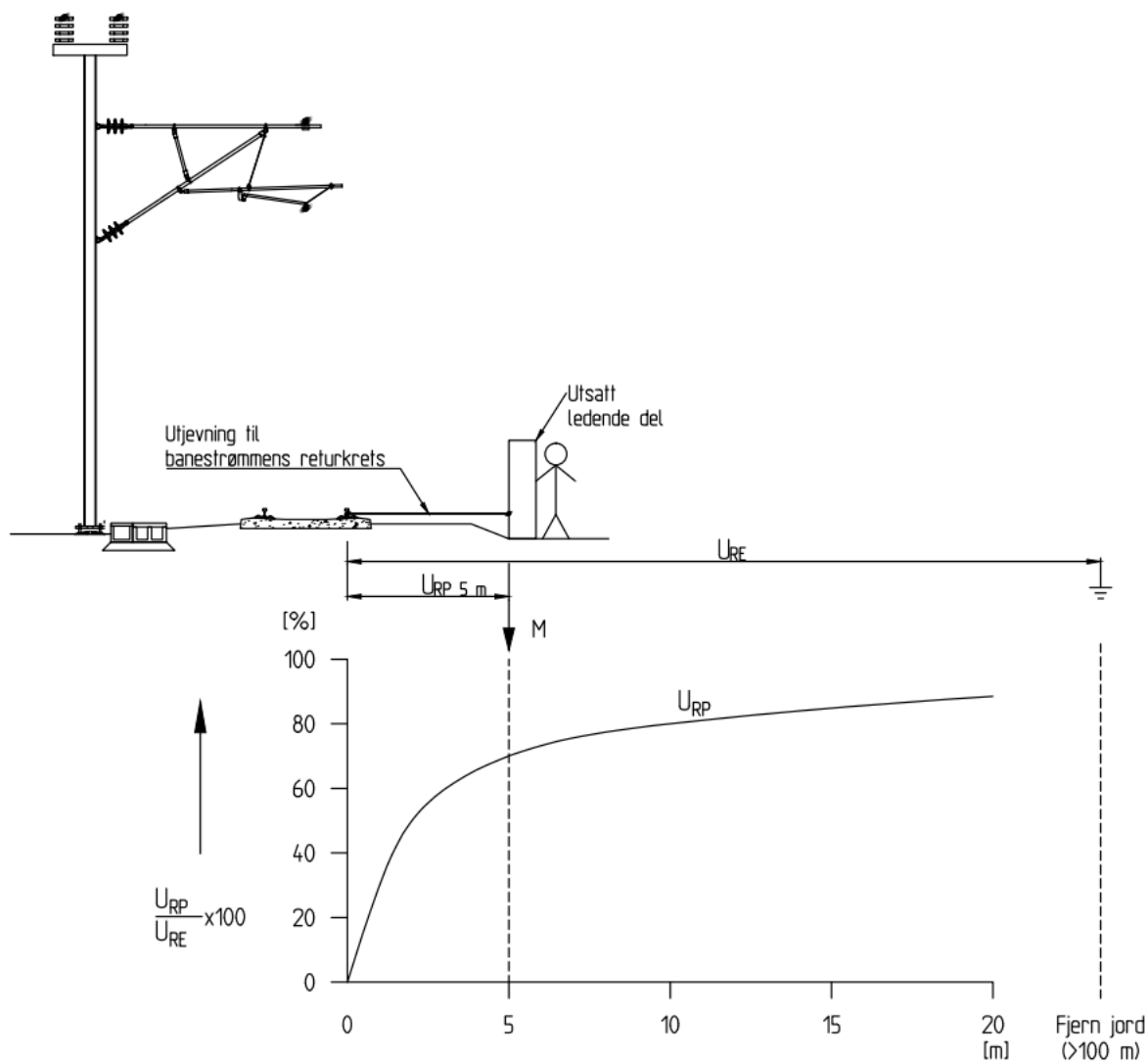
Tabell 6-6 Sammenligning av strøm i jordsmonnet med simuleringer utført av Varjü

| Avledningskonduktansen [S/km] | Høyeste strøm i jordsmonnet I_E [A] | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| | Varjü sine simuleringer [25] | Simulering $Z_{T1} = 0,046 + j0,204 \Omega$ | Simulering $Z_{T2} = 0,046 + j0,237 \Omega$ |
| $G_1 = 0,05$ | 17 | 12,38 | 17,05 |
| $G_2 = 0,25$ | 37 | 36,12 | 49,03 |
| $G_3 = 0,75$ | 53 | 63,07 | 83,59 |

6.5 Krav fra standarder

6.5.1 NEK EN 50122-1

For kontinuerlig berøringspenning ($t > 300$ s) setter NEK EN 50122-1 [5] krav til maksimal berøringspenning på 60 V. Det forutsettes at objekter (utsatt ledende deler) i en avstand på 5 m fra sporet utjevnes til banestrømmens returrets som beskrevet i NEK EN 50122-1.



Figur 6-7 Berøringspenning for utsatt ledende deler utjevnet til banestrømmens returrets [5]

Figur 6-7 viser berøringspenningen mellom lokal jord (M) 5 m fra skinnegangen og utsatt ledende del utjevnet til banestrømmens returrets. Fra Figur 6-7 og NEK EN 50122-1 Tillegg C vil berøringspenningen (U_{RP}) mellom skinnepotensialet (U_{RE}) og lokal jord være 70 % av skinnepotensialet i en avstand på 5 m. For BTRC- og AT-systemet er det da regnet ut berøringspenninger i Tabell 6-7. [5]

Tabell 6-7 Berøringspenninger for BT- og AT-system

| Avledning G [S/km] | Skinnepotensial BTRC-system U_{RE} [V] | Berøringspenning BTRC-system U_{RP} [V] | Skinnepotensial AT-system U_{RE} | Berøringspenning AT-system U_{RP} [V] |
|-----------------------|--|---|--|---|
| $G_1 = 0,05$ | 73,62 | 51,53 | 125,92 | 88,14 |
| $G_2 = 0,25$ | 52,91 | 37,04 | 89,77 | 62,84 |
| $G_3 = 0,75$ | 48,93 | 34,25 | 59,89 | 41,92 |

Kravet NEK EN 50122-1 setter vil være tilfredsstillt for BTRC-systemet ved de verdiene for avledningskonduktans som er studert. For AT-systemet vil avledningskonduktans under ca. 0,25 S/km gi for høy berøringspenning i forhold til kravet satt i standarden.

NEK EN 50122-1 kapittel 9.2.2.4 lister opp eksempler på tiltak som kan begrense risiko fra berøringspenninger. Tiltakene er ikke studert videre i oppgaven.

Berøringspenningen som er avhengig av skinnepotensialet vil som tidligere beskrevet i oppgaven være påvirket av avledningskonduktansen til jord og skinneimpedansen. Det antas at den målte berøringspenningen vil være noe mindre i praksis for objekter som er fundamentert i jorden med lav overgangsmotstand. Tilleggsresistans for sko skal ikke medregnes når dette etter standarden kun skal benyttes for kortvarige berøringspenninger.

Berøringspenninger høyere en kravene gitt i NEK EN 50122-1 kan også oppstå andre steder i anlegget. Det er ikke studert andre tilfeller i oppgaven.

6.5.2 NEK EN 50121-3

NEK EN 50121-3 [4] setter ingen konkrete krav til strømmen som tillates i jordsmonnet. Det overordnede funksjonskravet om at jernbanesystemet ikke skal påvirke andre anlegg i nærheten er derfor vanskelig å dokumentere uten tilstrekkelig informasjon om de anlegg som kan bli påvirket. I mange tilfeller vil informasjon om teleanlegg o.l. i nærheten av jernbanen være mangelfull. Dette vil gjøre det vanskelig å dokumentere kravet i standarden.

Strømmen i jordsmonnet fra AT-systemet er betydelig større og har en lenger utstrekning langs med sporet enn BTRC-systemet. Siden strømmen før og etter toget i AT-systemet vil ha forskjellig retning reduseres påvirkningen til nærliggende anlegg langs jernbanen. Selv med den reduserende effekten dette gir antas det at AT-systemet vil gi en større påvirkning dersom det påvirkede anlegget ligger kun før eller etter toget.

Betydningen strømmen i jordsmonnet får på induertspenning i nærliggende anlegg vil være større i Norge enn land med lavere jordresistivitet og 50 Hz forsyningssystem. Dette kommer av at inntrengingsdybden i jord er stor på grunn av høyere jordresistivitet og lavere driftsfrekvens (16,7 Hz).

Tilfredsstillelse av kravet om elektromagnetiske felter i nærheten av jernbanen bør være mulig å dokumentere ved å benytte den strømfordelingen man har i anlegget. Dette er ikke utført som en del av denne oppgaven.

7 Konklusjon

Det er kjørt simuleringer og fremstilt resultater for å vurdere skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet. Skinneimpedansen og avledningskonduktansen til jord er variert for å vise påvirkningen disse parameterne har på resultatet. Simuleringene viser at skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet vil være høyere for AT-systemet enn for BTRC-systemet. Det fremgår også at variasjon i skinneimpedansen har like stor påvirkning på begge systemene. Avledningskonduktansen påvirker skinnepotensialet mest for AT-systemet og strømmen i jordsmonnet mest for BTRC-systemet.

Basert på resultatene og vurderingen av disse trekkes følgende delkonklusjoner:

- ATPDraw har komponenter som egner seg godt for simulering av jernbanesystemer, men programmet mangler funksjoner for håndtering av kontinuerlig avledningskonduktans og strømvhengig impedans i skinnegangen.
- Det er blitt utarbeidet to modeller i ATPDraw for å studere BTRC- og AT-systemet, der det er benyttet tre verdier for avledningskonduktans og skinneimpedans. Ved tidligere simuleringer av andre er disse tre verdiene av avledningskonduktansen benyttet. Verdiene er vurdert mot typiske verdier i Norge og benyttet for å ha sammenligningsgrunnlag å presentere.
- Avledningskonduktansen påvirker skinnepotensialet i AT- og BTRC-systemet eksponentielt, men påvirkningen avtar for BTRC-systemet ved avledningskonduktans over $G = 0,25 \text{ S/km}$. Utstrekningen mellom autotransformatorene er større enn den mellom sugetransformatorene. Dette gir et større område for AT-systemet enn for BTRC-systemet hvor høye skinnepotensialer og store returstrømmer i jordsmonnet kan forekomme.
- Sammenligninger med Varjü sine simuleringer viser god overenstemmelse for skinnepotensialet, men en større variasjon for strøm i jordsmonnet. Det antas dette kommer av forskjellig modellering av avledningskonduktansen til jord.
- Kravet i NEK EN 50122-1 til berøringspenning er overholdt for BTRC-systemet ned mot en avledningskonduktans på $G = 0,05 \text{ S/km}$. AT-systemet overholder ikke kravet ved avledningskonduktans under $G = 0,25 \text{ S/km}$, uten begrensende tiltak. NEK EN 50121-3 setter ingen konkrete krav til strømmen som tillates i jordsmonnet. Ettersom strømmen i jordsmonnet fra AT-systemet er betydelig større antas det å gi høyere elektromagnetiske felter og høyere forstyrrelser på nærliggende anlegg.

Hypoteser

- Det er betydelig forskjell i skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet for systemene. Skinnepotensialet er 1,2 til 1,8 ganger høyere for AT-systemet enn BTRC systemet avhengig av skinneimpedansen og avledningskonduktansen. Den maksimale strømmen i jordsmonnet er 3 til 6 ganger større for AT-systemet enn BTRC-systemet avhengig av skinneimpedansen og avledningskonduktansen til jord.
- Avledningskonduktansen påvirker systemene ulikt. Skinnepotensialet blir påvirket med en faktor på 0,48 ved en endring i avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km for AT-systemet og en faktor på 0,66 for BTRC-systemet. Strømmen i jordsmonnet blir påvirket med en faktor på 5 for AT-systemet og 5,5 for BTRC-systemet ved en endring i avledningskonduktansen fra 0,05 S/km til 0,75 S/km.
- Skinneimpedansen påvirker skinnepotensialet og strømmen i jordsmonnet likt for begge systemene med en faktor på 1,4 ganger endringen i absoluttverdien til skinneimpedansen.

8 Videre arbeid

På grunn av tidsbegrensningen for oppgaven har det ikke vært mulig å studere alle aspekter rundt systemene. Det er under listet opp noen av de viktigste punktene som oppgaven ikke betrakter og som bør studeres nærmere.

- Avledningskonduktansen til jord har stor betydning på modellene og blir påvirket av flere faktorer. Målinger og beregninger av avledningskonduktansen for norske forhold bør studeres nærmere
- Hvordan avledningskonduktansen til jord modelleres ser ut til å ha stor betydning på resultatene. Det bør ses videre på hvordan modelleringen av avledningskonduktansen til jord kan utføres.
- Skinneimpedansen blir påvirket av flere faktorer og er en viktig parameter i modellene, videre målinger og beregninger av denne bør studeres.
- Det er i oppgaven ikke sett på systemene under kortslutning. Skinnepotensialet og strømmer i jordsmonnet ved kortslutning bør studeres nærmere.
- Tiltak for å endre på skinnepotensialet og strøm i jordsmonnet er ikke studert i oppgaven. En videre utredning og vurdering av effekten fra tiltakene bør studeres.
- Hvilke verdier som kan aksepteres for strøm i jordjordsmonnet uten at anlegget forstyrrer nærliggende installasjoner bør undersøkes.
- Virkningen strømmen i jordsmonnet for hvert av systemene har på de elektromagnetiske feltene og induserte spenninger i nærliggende anlegg bør studeres nærmere.
- Sammenligningen av strømmen i jordsmonnet med verdier fra Varjü sine simuleringer viste store variasjoner. Det bør studeres videre hva som er årsaken til variasjonene.

9 Figurliste

| | Side |
|---|------|
| Figur 3-1 Spenningsnivåer benyttet i Europa [8] | 6 |
| Figur 3-2 Typisk oppbygging av kontaktledningsanlegget [12] | 8 |
| Figur 3-3 Ekvivalentskjema for sugetransformator [16]..... | 12 |
| Figur 3-4 Ekvivalentskjema for autotransformator [16] | 13 |
| Figur 3-5 Utforming av kontakttråd og innfestning [21] | 18 |
| Figur 3-6 Utforming av skinnegang og underbygning [23] | 19 |
| Figur 3-7 Oppheng av positiv- og negativleder [15]..... | 22 |
| Figur 3-8 Returledere hengt opp i kontaktledningsmast [12]..... | 23 |
| Figur 3-9 Sammenligning av inntrengningsdybden i jord for 16,7 Hz og 50 Hz | 25 |
| Figur 3-10 Modell av den galvaniske koblingen mellom skinnegangen og jord [7] | 26 |
| Figur 3-11 Fundamentutforming og ekvivalent jordelektrode | 28 |
| Figur 3-12 Bidraget til avledningskonduktansen fra 17 kontaktledningsfundamenter. | 29 |
| Figur 3-13 Prinsipiell strømfordeling i returkretsen [7]..... | 30 |
| Figur 4-1 Linjeselement (LCC)..... | 33 |
| Figur 4-2 Autotransformator og sugetransformator (BCTRAN) | 33 |
| Figur 4-3 Gruppe (Group) | 34 |
| Figur 4-4 Forenklet skisse av det modellerte BTRC-systemet | 36 |
| Figur 4-5 Forenklet skisse av det modellerte AT-systemet..... | 36 |
| Figur 4-6 Modell av omformerstasjonen..... | 37 |
| Figur 5-1 Skinnepotensialet ved toget avhengig av avledningskonduktans for tre verdier av skinneimpedansen. | 43 |
| Figur 5-2 Skinnepotensial over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen | 44 |
| Figur 5-3 Skinnepotensialet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen..... | 45 |
| Figur 5-4 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen | 46 |

| | |
|---|----|
| Figur 5-5 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen | 47 |
| Figur 5-6 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktansen for tre verdier av skinne impedansen | 48 |
| Figur 5-7 Skinnepotensial over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen | 49 |
| Figur 5-8 Skinnepotensialet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen..... | 50 |
| Figur 5-9 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av avledningskonduktansen | 51 |
| Figur 5-10 Strøm i jordsmonnet over 12 km ved tre verdier av skinneimpedansen | 52 |
| Figur 6-1 Skinnepotensial ved toget avhengig av avledningskonduktansen..... | 55 |
| Figur 6-2 Sammenligning av skinnepotensialet for BTRC- og AT-systemet ved tre verdier av skinneimpedansen | 57 |
| Figur 6-3 Skinnepotensialet ± 6 km fra togets posisjon..... | 58 |
| Figur 6-4 Høyeste strøm i jordsmonnet over en strekning på ± 6 km avhengig av avledningskonduktansen | 60 |
| Figur 6-5 Høyeste strøm i jordsmonnet over en strekning på ± 6 km avhengig av skinneimpedansen | 61 |
| Figur 6-6 Strømmen i jordsmonnet ± 6 km fra togets posisjon | 62 |
| Figur 6-7 Berøringsspenning for utsatt ledende deler utjevnet til banestrømmens returkrets [5] | 64 |

10 Tabell liste

| | Side |
|---|------|
| Tabell 2-1 Maksimale verdier for kortvarig eksponering av elektromagnetiske felt | 5 |
| Tabell 3-1 Gjensidig impedans mellom bæreline og kontakttråd | 17 |
| Tabell 3-2 Bærelinens serieimpedans | 17 |
| Tabell 3-3 Kontakttrådens serieimpedans | 18 |
| Tabell 3-4 Gjensidig impedans for to skinnestrenger | 19 |
| Tabell 3-5 Målinger av den indre impedansen til en skinnestreng | 20 |
| Tabell 3-6 Serieimpedans for en skinnestreng | 21 |
| Tabell 3-7 Gjensidig impedans mellom negativ- og positivleder | 22 |
| Tabell 3-8 Negativ- og positivleders serieimpedans | 22 |
| Tabell 3-9 Gjensidig impedans mellom returlederne | 23 |
| Tabell 3-10 Returledningenes serieimpedans | 23 |
| Tabell 3-11 Typiske verdier for jordresistivitet ved forskjellige jordsmonn | 24 |
| Tabell 3-12 Bidrag fra 17 kontaktledningsfundamenter til avledningskonduktansen til jord.. | 30 |
| Tabell 3-13 Avledningskonduktansen til jord for ulik jordresistivitet | 31 |
| Tabell 4-1 Skinneimpedansen som benyttes i simuleringene | 41 |
| Tabell 4-2 Scenarier som vil bli betraktet og hvilke parametere som benyttes. | 41 |
| Tabell 5-1 Høyeste skinnepotensial for tre verdier av skinneimpedans og avledningskonduktans | 43 |
| Tabell 5-2 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av avledningskonduktansen..... | 44 |
| Tabell 5-3 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen..... | 45 |
| Tabell 5-4 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av avledningskonduktansen | 46 |
| Tabell 5-5 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av skinneimpedansen | 47 |
| Tabell 5-6 Høyeste skinnepotensial for tre verdier av skinneimpedansen og avledningskonduktansen | 48 |

| | |
|---|----|
| Tabell 5-7 Høyeste skinnepotensial ved tre verdier av avledningskonduktansen..... | 49 |
| Tabell 5-8 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen..... | 50 |
| Tabell 5-9 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av avledningskonduktansen | 51 |
| Tabell 5-10 Høyeste strøm i jordsmonnet ved tre verdier av skinneimpedansen | 52 |
| Tabell 6-1 Skinnepotensial for BTRC- og AT-systemet avhengig av avledningskonduktansen | 56 |
| Tabell 6-2 Sammenligning med simuleringer utført av Varjü | 56 |
| Tabell 6-3 Høyeste skinnepotensialet ved tre verdier av skinneimpedansen..... | 57 |
| Tabell 6-4 Høyeste absoluttverdi av strømmen i jordsmonnet for BTRC- og AT-systemet ved variasjon av avledningskonduktansen | 60 |
| Tabell 6-5 Høyeste absoluttverdi av strømmen i jordsmonnet ved variasjon av skinneimpedansen | 61 |
| Tabell 6-6 Sammenligning av strøm i jordsmonnet med simuleringer utført av Varjü | 63 |
| Tabell 6-7 Berøringsspenninger for BT- og AT-system | 65 |

11 Referanser

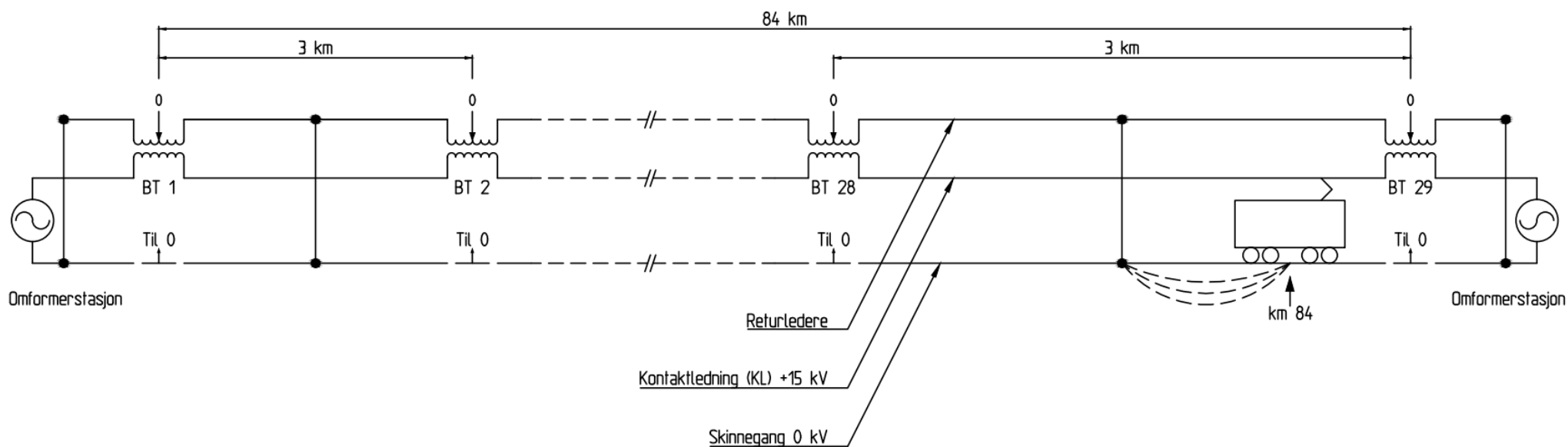
1. Høidalen, H.K., *Elektromagnetisk sameksistens i Jernbaneanlegg*. 2006, NTNU: Trondheim.
2. *Forskrift om EØS-krav til elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) for utstyr til elektronisk kommunikasjon*, Samferdselsdepartementet, Editor. 2016.04.20.
3. DSB. *Veiledning til forskrift om elektriske forsyningsanlegg*. [cited 2016 05.03]; Available from: <http://www.dsb.no/no/Rettskilder/Regelverk/Oppslagsverket/3898/3899/5519/5520/>.
4. NEK, *NEK EN 50121:2015 Del 1-5*. 2015, Norsk Elektroteknisk Komite.
5. NEK, *NEK 900:2014 Elektriske jernbaneinstallasjoner*, in *NEK EN 50119 og NEK EN 50122-del 1-3*. 2014, Norsk Elektroteknisk Komite.
6. Jernbaneverket. *Jernbaneverkets Tekniske regelverk*. 2016 [cited 2016 02.01]; Available from: <https://trv.jbv.no/wiki/Forside>.
7. Kiessling, et al., *Contact lines for electric railways*. 2. utg. ed. 2009, Erlangen: Publicis Publishing.
8. Jklamo. *Europe rail electrification*. [cited 2016 01.15]; Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_rail_electrification.png.
9. Sture, P., *Lærebok for kontaktledningsingeniører*. 1993: Nesodden.
10. Jernbaneverket, *Slik fungerer jernbanen*. 2013.
11. Östlund, S., *Electric Railway Traction*. 2012, Stockholm: KTH.
12. Jernbanekompetanse. *Kontaktledningsanlegg*. 2015 [cited 2016 8.3]; Available from: <http://jernbanekompetanse.no/wiki/Kontaktledningsanlegg>.
13. Martinsen, F., M. Nordgard, and T. Schütte, *A new type of autotransformer system for the railway in Norway*. Elektrische Bahnen, 2010(8-9/2010).
14. Jernbanekompetanse. *Banestrømforsyning*. 2015 [cited 2016 03.03]; Available from: <http://jernbanekompetanse.no/wiki/Banestr%C3%B8mforsyning>.
15. Jernbaneverket. *Jernbaneverket*. 2016 [cited 2016 03.01]; Available from: <http://www.jernbaneverket.no/>.
16. Thorsen, O.V., *Transformatorer*. 1973, Oslo: Universitetsforlaget.
17. Jernbaneverket. *Teknisk regelverk - Kontaktledning*. 2016 [cited 2016 03.01]; Available from: <https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning>.

-
18. Pleym, A., *EMC in railway systems : coupling from catenary system to nearby buried metallic structures*. 2000, NTNU: Trondheim.
 19. Ogunsola, A. and A. Mariscotti, *Electromagnetic Compatibility in Railways : Analysis and Management*. 2012: Springer.
 20. Jernbaneverket. *Tekniske spesifikasjoner - Kontaktledning/Liner, tråd, ledning og kabel*. 2016 [cited 2016 03.01]; Available from: [https://trv.jbv.no/ts/Kontaktledning/Liner, tr%C3%A5d, ledning og kabel](https://trv.jbv.no/ts/Kontaktledning/Liner_tr%C3%A5d_ledning_og_kabel).
 21. Safetrack. *Safetrack*. [cited 2016 02.01]; Available from: www.safetrack.se.
 22. Jernbaneverket. *Teknisk regelverk - Felles elektro*. 2016 [cited 2016 10.03]; Available from: [https://trv.jbv.no/wiki/Felles elektro](https://trv.jbv.no/wiki/Felles_elektro).
 23. Løhren, A.H., *Jernbanens overbygning*, in *Grunnleggende jernbaneteknikk* 2014: Oslo.
 24. Jernbaneverket. *Teknisk regelverk - Overbygning*. 2016 [cited 2016 03.01]; Available from: <https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning>.
 25. Varjú, G., *Further investigation of AT-System for the Norwegian railway*, P. 2., Editor. 2005: Budapest.
 26. Storset, K., *Strømfordeling impedans og felt i NSB`s kontaktledningsanlegg*. 1995, Norges Tekniske Høgskole: Trondheim.
 27. Trueblood, H.M. and G. Wascheck, *Investigation of Rail Impedances*. American Institute of Electrical Engineers, 1934. **53**(12): p. 1771-1780.
 28. Varjú, G., et al., *Comparison of the BTRR, BTRC and the AT Traction Feeding System in Norway*. 2003.
 29. Brede, A.P., et al., *Underlag for beregninger og målinger på jordelektroder i forskjellige elkraftanlegg*. 1995, Trondheim: EFI.
 30. Pleym, A., *Målinger på Stavne 1998 og 1999*. 1999: NTNU.
 31. László Prikler and H.K. Høidalen, *ATPDRAW version 5.6 for windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual*. 2009.

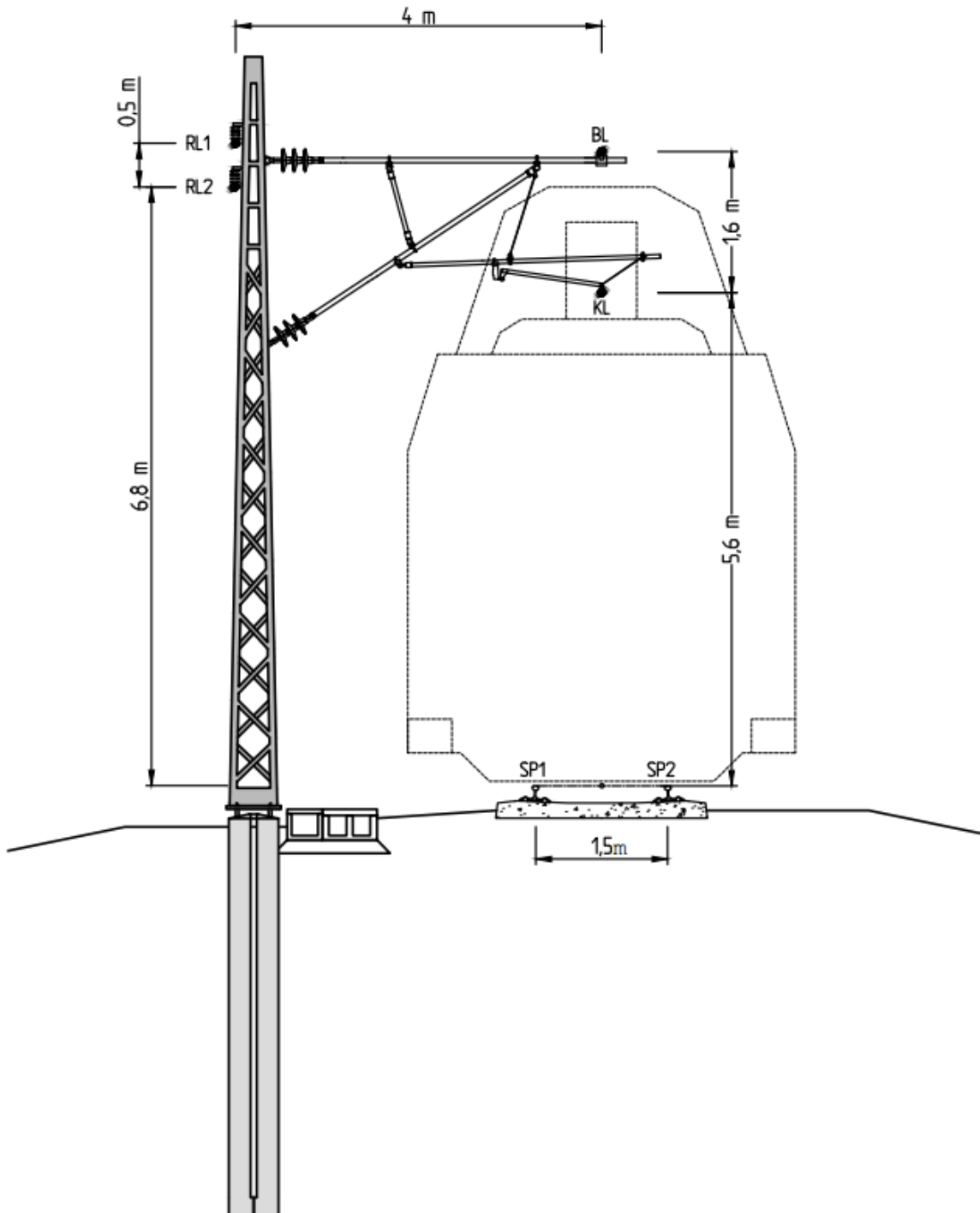
12 Vedlegg

- Vedlegg A BTRC-system (Boster transformer return conductor, system D)
- Vedlegg B AT-system (Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning)
- Vedlegg C Verdier benyttet for linjesegmenter i ATPDraw
- Vedlegg D Suge- og autotransformator verdier
- Vedlegg E Verifikasjon av linjesegmenter
- Vedlegg F Verifikasjon av transformatorer
- Vedlegg G Modellert BTRC-system
- Vedlegg H Modellert AT-system
- Vedlegg I Verifikasjon av antall linjesegmenter
- Vedlegg J ATPDraw prosjekt-filer (Ligger vedlagt i egen fil)

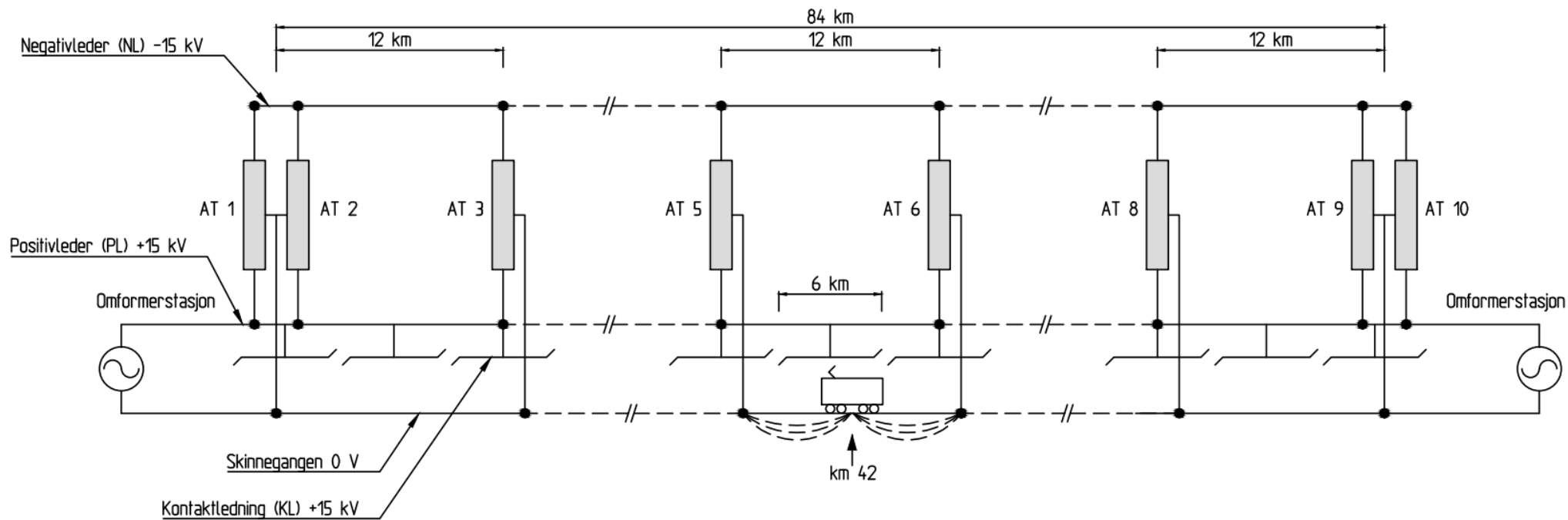
Vedlegg A – BTRC-system (Booster transformer return conductor, System D)



Vedlegg A
BTRC-system (Booster transformer return conductor, System D)

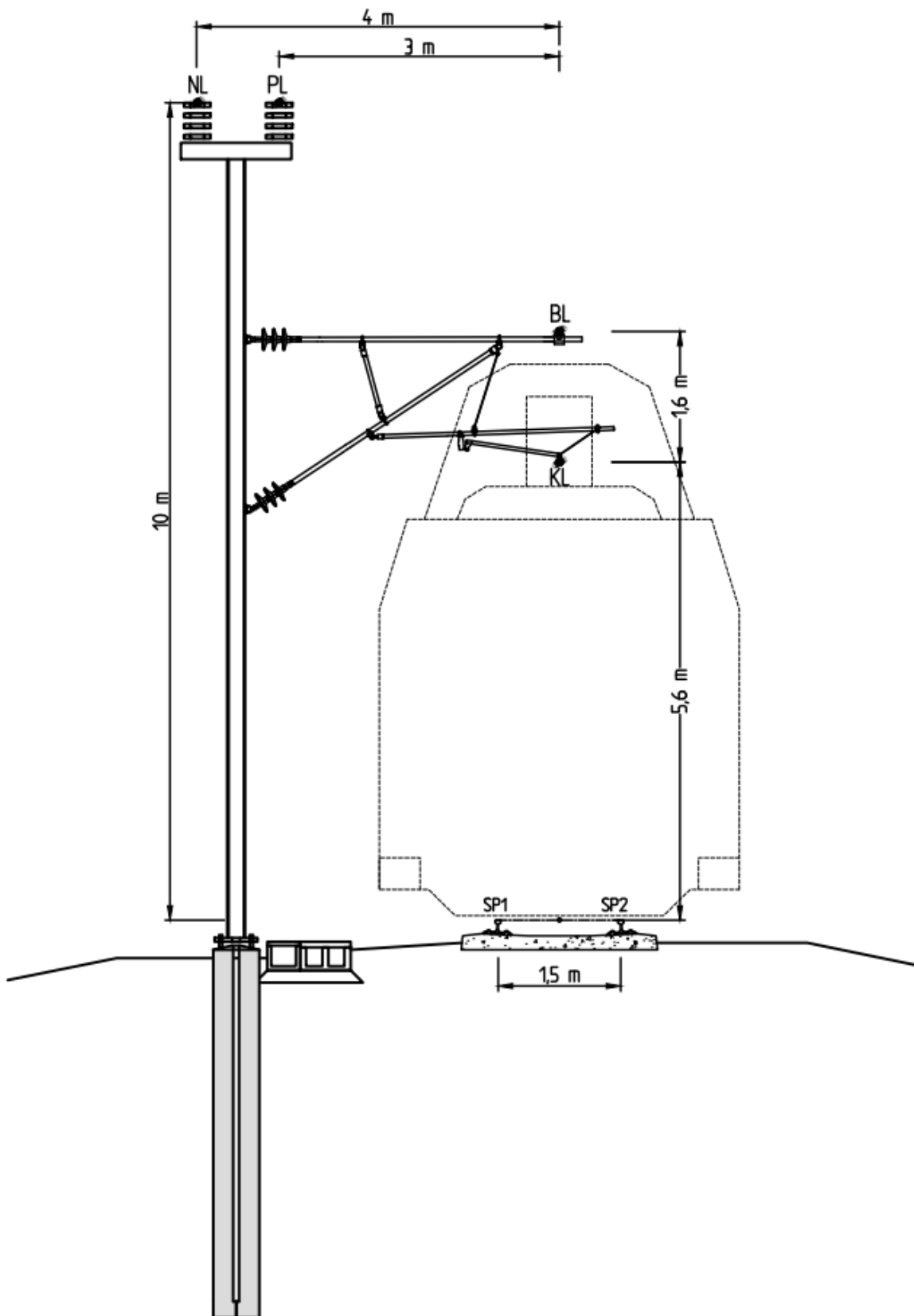


Vedlegg B – Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning



Vedlegg B

Autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning



Vedlegg C - Verdier benyttet for linjesegmenter i ATPDraw

BTRC-system

| Leder | Forkortelse | Ph.no | React | Rout | Resis | Horiz | Vtower | Vmid |
|-------------|-------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
| Bæreline | BL | 1 | 0,1680 | 0,45 | 0,5556 | 0,00 | 7,20 | 7,20 |
| Kontakttråd | KT | 2 | 0,1635 | 0,60 | 0,1759 | 0,00 | 5,60 | 5,60 |
| Returleder | RL | 3 | 0,1545 | 0,87 | 0,1177 | -4 | 5,85 | 5,85 |
| Returleder | RL | 4 | 0,1545 | 0,87 | 0,1177 | -4 | 5,35 | 5,35 |
| Skinne V | SP1 | 5 | 0,1545 | 15,00 | 0,0600 | -0,75 | 0,20 | 0,20 |
| Skinne H | SP2 | 6 | 0,1545 | 15,00 | 0,0600 | 0,75 | 0,20 | 0,20 |

AT-system

| Leder | Forkortelse | Ph.no | React [Ω /km AC] | Rout [cm] | Resis [Ω /km AC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] |
|--------------|-------------|-------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------|----------|
| Negativleder | NL | 1 | 0,1460 | 1,30 | 0,0707 | -4,00 | 10,00 | 10,00 |
| Positivleder | PL | 2 | 0,1460 | 1,30 | 0,0707 | -3,00 | 10,00 | 10,00 |
| Bæreline | BL | 3 | 0,1680 | 0,45 | 0,5556 | 0,00 | 7,20 | 7,20 |
| Kontakttråd | KT | 4 | 0,1635 | 0,60 | 0,1759 | 0,00 | 5,60 | 5,60 |
| Skinne V | SP1 | 5 | 0,1545 | 15,00 | 0,0600 | -0,75 | 0,20 | 0,20 |
| Skinne H | SP2 | 6 | 0,1545 | 15,00 | 0,0600 | 0,75 | 0,20 | 0,20 |

Skinneverdier benyttet ved simulering med skinneimpedans fra Varjü

| Leder | Forkortelse | Ph.no | React [Ω /km AC] | Rout [cm] | Resis [Ω /km AC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] |
|----------|-------------|-------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------|----------|
| Skinne V | SP1 | 5 | 0,0880 | 15,00 | 0,0600 | -0,75 | 0,20 | 0,20 |
| Skinne H | SP2 | 6 | 0,0880 | 15,00 | 0,0600 | 0,75 | 0,20 | 0,20 |

Skinneverdier benyttet ved simulering med skinneimpedans fra JBV

| Leder | Forkortelse | Ph.no | React [Ω /km AC] | Rout [cm] | Resis [Ω /km AC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] |
|----------|-------------|-------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------|----------|
| Skinne V | SP1 | 5 | 0,1195 | 15,00 | 0,0330 | -0,75 | 0,20 | 0,20 |
| Skinne H | SP2 | 6 | 0,1195 | 15,00 | 0,0330 | 0,75 | 0,20 | 0,20 |

Vedlegg D – Suge- og autotransformator verdier

Sugetransformator:

| | |
|------------------------|-----------|
| Ytelse: | 95 kVA |
| Omsetning i tomgang : | 119/119 V |
| Frekvens: | 16 2/3 Hz |
| Koblingsmåte: | Iin0 |
| Kortslutningsimpedans: | 17,65 % |
| Tomgangstap: | 40 W |
| Belastningstap: | 6990 W |

Autotransformator:

| | |
|------------------------|----------|
| Ytelse: | 5 MVA |
| Primærspenning: | 33000 V |
| Sekundærspenning: | 16500 V |
| Frekvens: | 16,67 Hz |
| Koblingsmåte: | Ia0 |
| Kortslutningsimpedans: | 0,4 % |
| Tomgangstap: | 1570 W |
| Belastningstap: | 10100 W |

Vedlegg E – Verifikasjon av linjesegmenter

Verifikasjon av linjesegmenter i ATPDraw

Linjesegmentene er testet for kontaktledningen, sporet, AT- og returlederne. Dette ble utført ved å beregne serieimpedansen (Z_{nn}), den gjensidige impedansen mellom lederne (Z_m) og impedansen for den ekvivalente lederen (Z_{eq}) med formelen angitt nedenfor. Ved verifikasjonen er beregningene og simuleringen basert på en jordresistivitet på 100 Ω m. Ved endring av jordresistiviteten i ATPDraw vil impedansene i ledningsseksjonene endres tilsvarende.

$$Z_{eq} = \frac{Z_{11} * Z_{22} - Z_m^2}{Z_{11} + Z_{22} - 2 * Z_m}$$

Resultatene fra simuleringen gir tilnærmet like verdier som ved beregninger for alle lederne.

Vedlegg E – Verifikasjon av linjesegmenter

Kontaktledningen

For å verifisere linjesegmentet til kontaktledningen ble det tilført en strøm på 1 A over bæreline, kontakttråd og begge ledere i parallell. Spenningen ble målt og det gir en impedans på:

| | Beregnet impedans [Ω /km] | Målt impedans i ATPDraw [Ω /km] |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Serieimpedans bæreline | 0,572+j0,274 | 0,572+j0,273 |
| Serieimpedans kontakttråd | 0,192+j0,268 | 0,192+j0,269 |
| Ekvivalentleder kontaktledning | 0,155+j0,222 | 0,155+j0,222 |

Serieimpedans bæreline



Serieimpedans kontakttråd



Ekvivalentleder kontaktledning



Vedlegg E – Verifikasjon av linjesegmenter

AT ledere

For å verifisere linjesegmentet til AT-lederne ble det tilført en strøm på 1 A over negativleder, positivleder og begge ledere i parallell. Modelleringen er vist i figuren under. Spenningen ble målt for hvert av senarioene og det gir en impedans på:

| | Beregnet impedans [Ω/km] | Målt impedans i ATPDraw [Ω/km] |
|----------------------------|---|---|
| Serieimpedans negativleder | 0,087+j0,251 | 0,087+j0,251 |
| Serieimpedans positivleder | 0,087+j0,251 | 0,087+j0,251 |
| Ekvivalentleder ATledere | 0,052+j0,204 | 0,052+j0,203 |

Serieimpedans negativleder



Serieimpedans positivleder



Ekvivalentleder



Vedlegg E – Verifikasjon av linjesegmenter

Spor

For å verifisere linjesegmentet til sporet ble det tilført en strøm på 1 A over venstreskinnestreng, høyreskinnestreng og begge skinnestrenger i parallell (sporet).

Modelleringen er vist i figuren under. Spenningen ble målt for hvert av scenarioene og det gir en impedans på:

| | Beregnet impedans [Ω /km] | Målt impedans i ATPDraw [Ω /km] |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Serieimpedans venstre skinnestreng | 0,076+j0,260 | 0,077+j0,260 |
| Serieimpedans høyre skinnestreng | 0,076+j0,260 | 0,077+j0,260 |
| Ekvivalentleder spor | 0,046+j0,203 | 0,046+j0,203 |

Serieimpedans venstre skinnestreng



Serieimpedans høyre skinnestreng



Ekvivalentleder spor



Vedlegg E – Verifikasjon av linjesegmenter

Returledere

For å verifisere linjesegmentet ble det tilført en strøm på 1 A over hver av returlederne og begge lederne i parallell. Modelleringen er vist i figuren under. Spenningen ble målt for hvert av senarioene og det gir en impedans på:

| | Beregnet impedans [Ω /km] | Målt impedans i ATPDraw [Ω /km] |
|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Serieimpedans returleder 1 | 0,134+j0,260 | 0,134+j0,260 |
| Serieimpedans returleder 2 | 0,134+j0,260 | 0,134+j0,260 |
| Ekvivalentleder spor | 0,075+j0,215 | 0,075+j0,215 |

Serieimpedans returleder 1



Serieimpedans returleder 2



Ekvivalentleder



Vedlegg F – Verifikasjon av transformatorer

Verifisering av sugetransformatoren i ATPDraw

Sugetransformatoren er testet i åpen og kortsluttet tilstand som vist på bilde nedenfor. I testen ble den tilførte effekten målt og kontrollert mot de oppgitte verdiene til sugetransformatoren.

I den første testen er transformatoren kortsluttet over sekundær siden. Det ble tilført en spenning på 21V ($U=U_P*Z_K$) på primærsiden og belastningstapet ble målt til 6,989 kW.

I den andre testen er sekundærsiden på transformatoren åpen. Det ble tilført en spenning på 119 V på primærsiden og tomgangstapet ble målt til 39,9 W.

Oppgitte verdier:

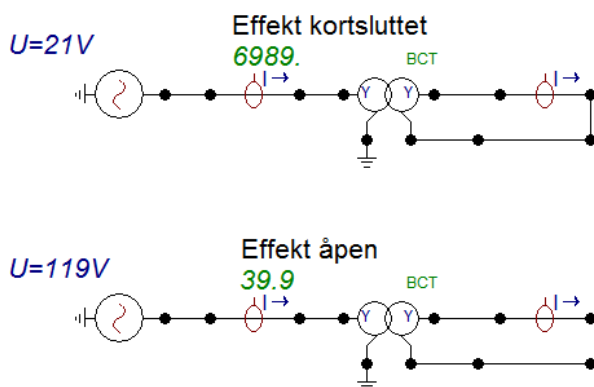
Merkeeffekt: 95 kVA

Omsetning i tomgang: 119/119 V

Kortslutningsimpedans: 17,65%

Tomgangstap: 40 W

Belastningstap: 6990 W



Vedlegg F – Verifikasjon av transformatorer

Verifisering av autotransformatoren i ATPDraw

Autotransformatoren er testet i kortslettet og åpen tilstand som vist på bilde nedenfor. I testen ble den tilførte effekten målt og kontrollert mot de oppgitte verdiene til autotransformatoren.

I den første testen er transformatoren kortslettet over sekundær siden. Det ble tilført en spenning på 132V ($U=U_P*Z_K$) på primærsiden og belastningstapet ble målt til 10,1 kW.

I den andre testen er sekundærsiden på transformatoren åpen. Det ble tilført en spenning på 33 kV på primærsiden og tomgangstapet ble målt til 1569W

Oppgitte verdier:

Merkeeffekt: 5 MVA

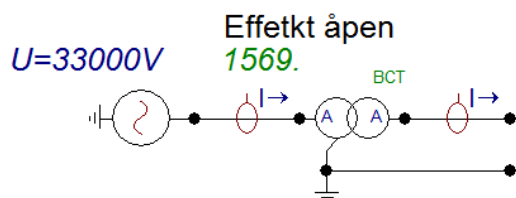
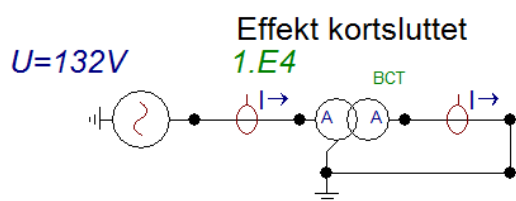
Primærspenning: 33 kV

Sekundær spenning 16,5 kV

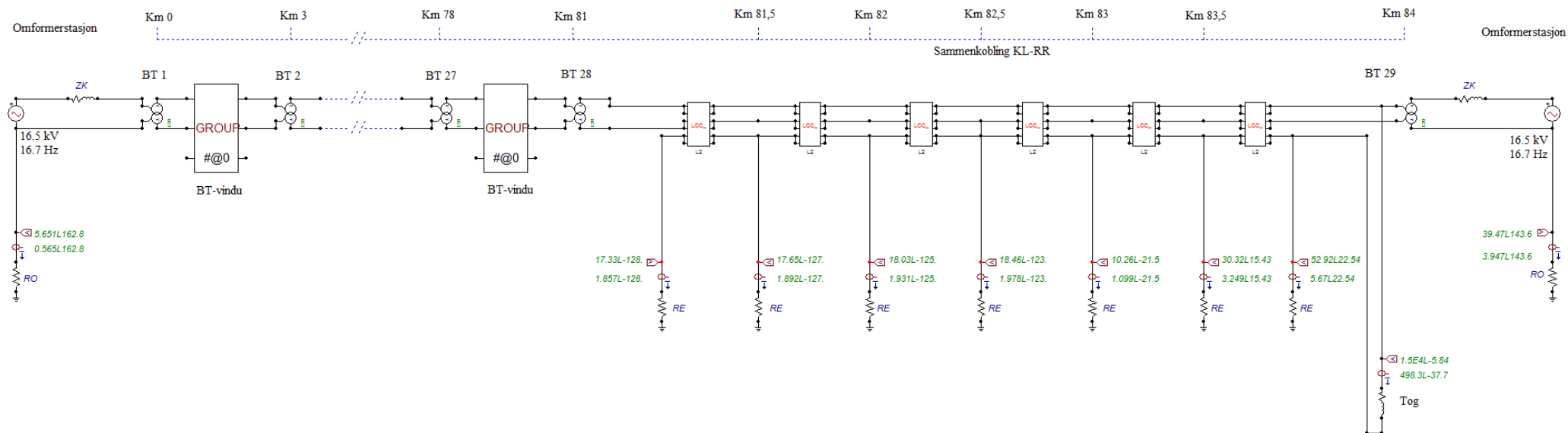
Kortslutningsimpedans: 0,4%

Tomgangstap: 1570 W

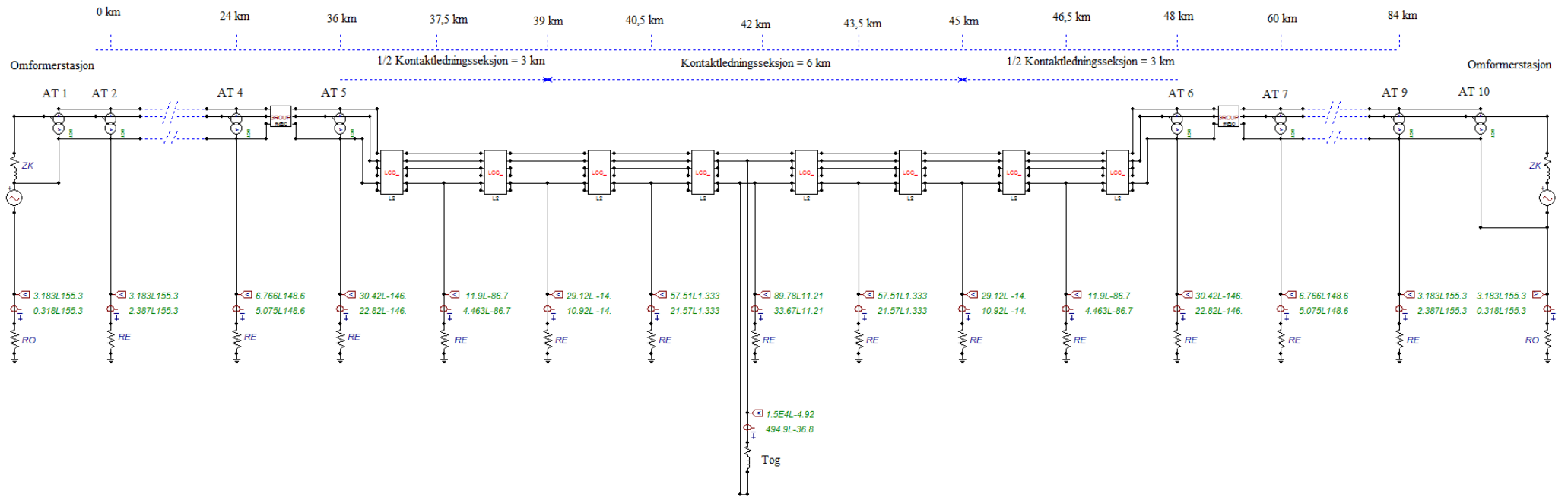
Belastningstap: 10100 W



Vedlegg G - Modellert BTRC-system



Vedlegg H – Modellert AT-system



Vedlegg I – Verifikasjon av antall linjesegmenter

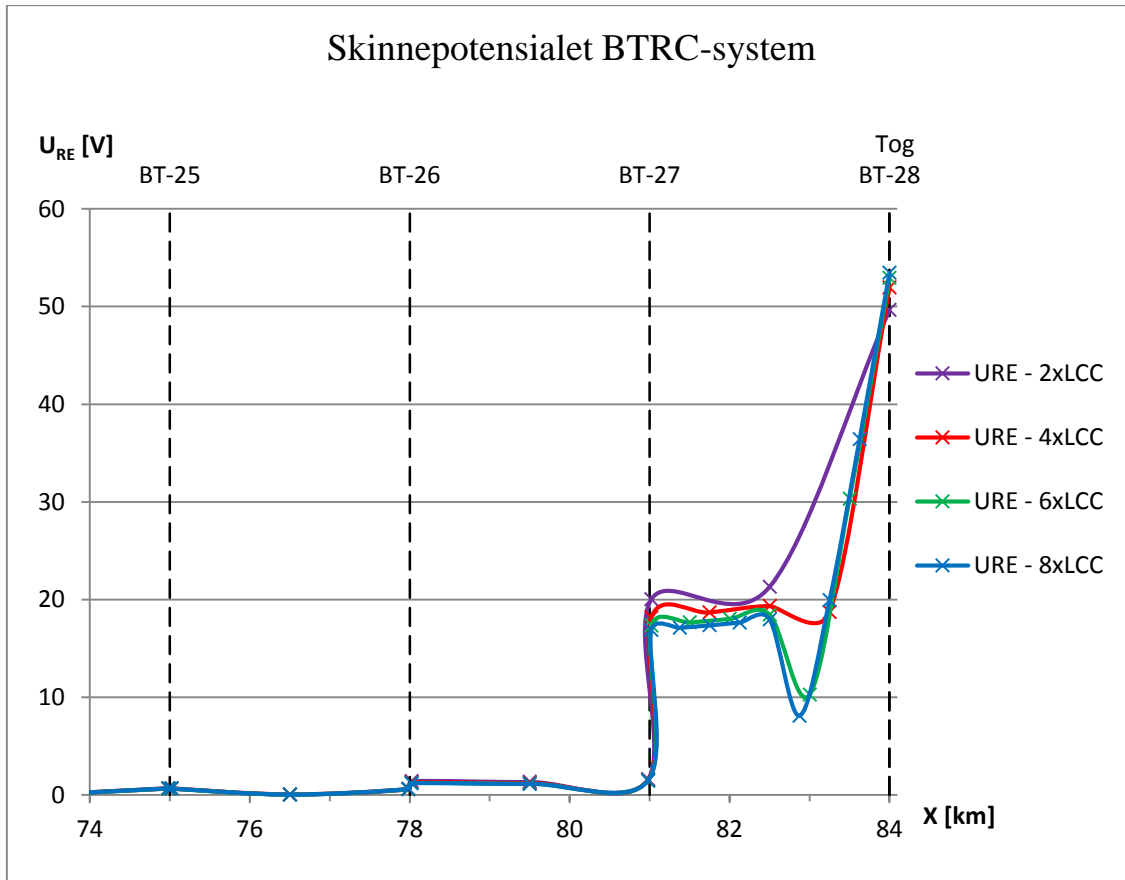
Verifisering av antall linjesegmenter

For å verifisere antall linjesegmenter (LCC) er det kjørt simuleringer med 2, 4, 6 og 8 linjesegmenter for BTRC-systemet. For AT-systemet er det kjørt simuleringer med 4, 8 og 16 linjesegmenter. Resultatet av skinnepotensialet og strøm i jordsmonnet er vist i grafene. I simuleringene er det benyttet en skinneimpedans på $Z_T = 0,046 + j0,237\Omega$ og en avledning $G = 0,25 \text{ S/km}$.

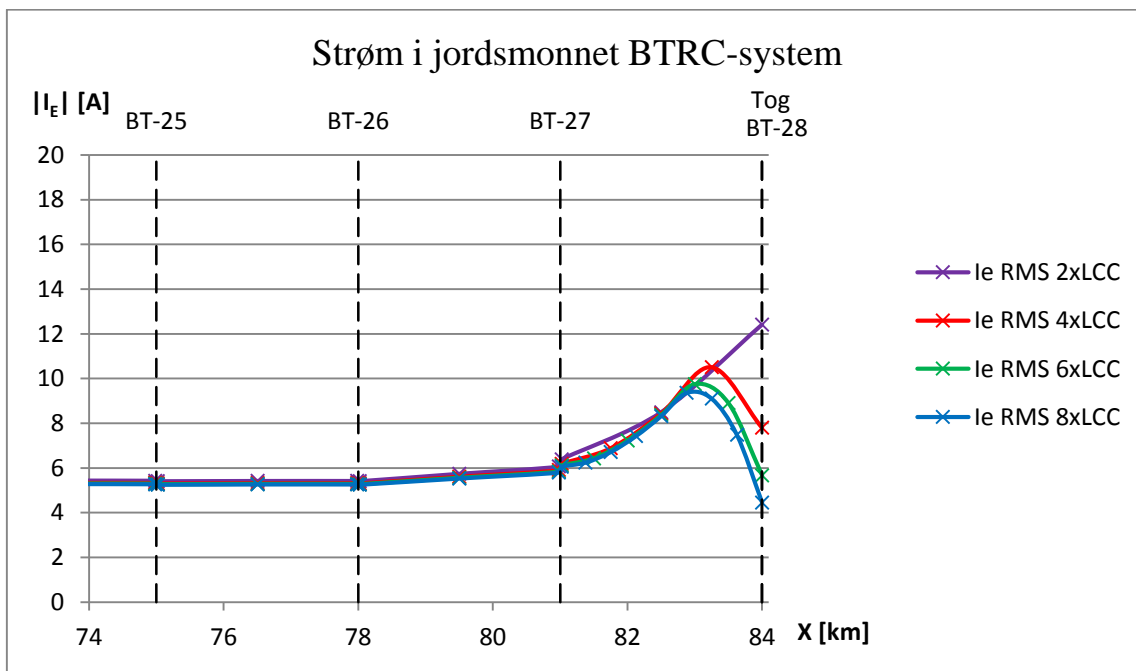
Vedlegg I – Verifikasjon av antall linjesegmenter

BTRC – Systemet

Skinnepotensialet



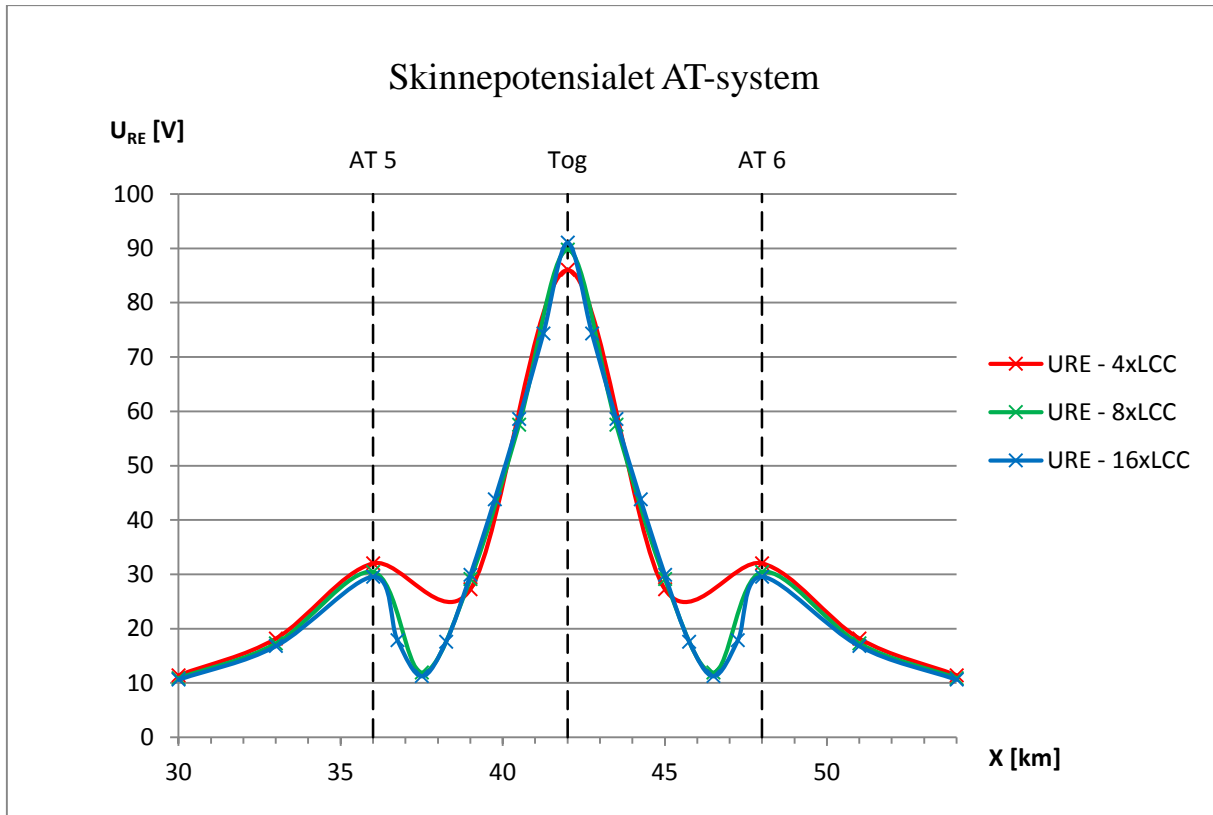
Strøm i jordsmonnet



Vedlegg I – Verifikasjon av antall linjesegmenter

AT-systemet

Skinnepotensialet



Strøm i jordsmonnet

