

Follobaneprojektet, Innføring Oslo S

Helhetlig vurdering av strømndistribusjon i returstrømkretsen

- | | |
|--------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> | Akseptert |
| <input type="checkbox"/> | Akseptert m/kommentarer |
| <input type="checkbox"/> | Ikke akseptert (kommentert)
Revider og send inn på nytt |
| <input type="checkbox"/> | Kun for informasjon |

Sign:

01E	Oppdatert etter tilbakemeldinger	28.11.2022			
00E	Første utgave	26.10.2022			
Revisjon	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av
Tittel: Hovedbanen, Oslo S Follobaneprojektet, Innføring Oslo S Helhetlig vurdering av strømndistribusjon i returstrømkretsen		Sider:			
		69			
		Produsert av:			
		Prod.dok.nr.:		Rev:	
		Erstatter:			
Prosjekt: Follobaneprojektet Parsell: Innføring Oslo S		Dokumentnummer: UOS-10-A-75401		Revisjon: 01E	
		Drift dokumentnummer:		Drift rev.:	

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	BAKGRUNN OG OPPDRAGSBESKRIVELSE	3
1.1	OPPDRAGET	3
1.2	OM FOLLOBANEN.....	3
2	HVA INNEBÆRER «KONTROLL PÅ RETURSTRØM»?	4
3	ELEKTRISKE UTFORMINGER AV KONTAKTLEDNING.....	7
3.1	UTFORMING UTEN KONTROLL PÅ RETURSTRØMMEN: UTFORMING A.....	7
3.2	UTFORMINGER MED SUGETRANSFORMATORER: UTFORMING B, C OG D	7
3.3	UTFORMINGER MED AUTOTRANSFORMATORER: UTFORMING E OG F	8
3.4	DRIFTS- OG KORTSLUTNINGSSTRØMMER.....	10
3.5	RETURSTRØM I JORD	12
4	SPORFELTER	13
4.1	GENERELT OM 95/105 HZ SPORFELTER.....	13
4.2	SARBARHETER FOR 95/105 HZ SPORFELTER.....	14
4.3	ENKELTISOLERT SPORFELT	18
4.4	DOBBELTISOLERT SPORFELT	21
4.5	BRUK AV FILTERIMPEDANSER.....	24
5	BANESTRØMFORSYNING OG RETURKRETS VED FOLLOBANEN INNFØRING OSLO S....	26
5.1	INNLEDNING.....	26
5.2	BANESTRØMFORSYNING	26
5.3	RETURKRETS FOR FOLLOBANEN OG ØSTFOLDBANEN	28
5.4	KONGSHAVNTUNNELEN OG SUGETRANSFORMATOR 4.1	29
5.5	VURDERING AV SANNSYNLIGHET FOR PÅVIRKNING PÅ SPORFELTER INN MOT OSLO S.....	30
5.6	ESTIMAT OVER STRØMFORDELING MELLOM LEDERE	32
6	DIMENSJONERING AV RETURLEDERE OG JORDLEDERE	35
6.1	GENERELT	35
6.2	DIMENSJONERENDE STRØMBELASTNING	36
6.3	RETURLEDERE FOR FOLLOBANEN.....	38
6.4	RETURLEDERE FOR ØSTFOLDBANEN.....	40
6.5	LANGSGÅENDE JORDLEDERE	40
6.6	UTJEVNINGSFORBINDELSER.....	41
6.7	FILTERIMPEDANSER.....	42
7	JORDING AV SKJERMER FOR HØYSPENNINGSKABLER I BEGGE ENDER	43
7.1	INNLEDNING.....	43
7.2	VURDERING AV EFFEKTEN AV JORDING I BEGGE ENDER.....	43
7.3	VURDERING AV RAPPORT.....	44
7.4	OPPSUMMERT VURDERING.....	46
8	MÅLEPUNKTER FOR Å VERIFISERE DISTRIBUSJON AV RETURSTRØM.....	47
8.1	MÅLEMETODER.....	47
8.2	MÅLEPUNKTER FOR RETURSTRØM.....	48
9	OBSERVASJONER VED DOKUMENTGJENNOMGANG	50
10	OPPSUMMERING OG ANBEFALINGER	51
10.1	OPPSUMMERING.....	51
10.2	ANBEFALINGER.....	53
11	DOKUMENTINFORMASJON	54
11.1	ENDRINGSLOGG.....	54
11.2	REFERANSELISTE.....	54
12	VEDLEGG	55

1 BAKGRUNN OG OPPDRAGSBESKRIVELSE

1.1 Oppdraget

I desember 2022 skal den nye Follobanen settes i drift mellom Oslo S og Ski stasjon. Bane NOR ønsker en vurdering av koplinger i returkretsen ved innføring til Oslo S for å sikre at anlegget fungerer riktig før idriftsettelse.

Oppdragsbeskrivelsen er formulert som følger:

Follobanen har behov for helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen for å unngå uønsket påvirkning av signalanlegget. Vurderingene presenteres i en teknisk rapport som konkluderer med tilstand og eventuelt nødvendige tiltak.

Rapport:

1. Definere «kontroll på returstrøm» og gi en kort utledning på hvordan NSB-77 signalanlegg kan påvirkes av returstrømkretsen – inkludert betraktninger rundt bruk av filterimpedanser
2. Vurdere om distribusjon av returstrøm i anlegget er hensiktsmessig i overgang mellom tunnel og IOS (Innføring Oslo S) - Se UFB-30-R-65700
 - a. Vurdere sannsynligheten for at bygget returkrets og jordingsanlegg vil påvirke signalanlegg i grensesnitt inn mot Oslo S (Østfoldbanen og Klypen)
 - b. Vurdere dimensjonering av returstrømkrets, inkludert jordingsanlegg
 - c. Anbefale eventuelle tiltak og definere hensiktsmessige målepunkter for å verifisere teoretisk distribusjon av returstrøm
3. Vurdere behov for sugetrafo 4.1 – Se EH-022988-000 på Elkraftportalen

1.2 Om Follobanen

Follobanen omfatter et nytt dobbeltspor i toløps tunnel, Blixtunnelen, mellom Oslo S (ca. km 1) og Ski (ca. km 23). Medregnet et kjedebrudd på noe over 1 km har tunnelen en total lengde på ca. 21 km. Omtrent midt i tunnelen, ved ca. km 12, er det et tverrslag på Åsland.

Follobanen er bygget parallelt med den eksisterende dobbeltsporstrekningen på Østfoldbanen, som også går mellom Oslo S og Ski.

Fra ca. km 1,6 er det bygget en enkeltsporet tunnel, Kongshavntunnelen, for venstre spor for Østfoldbanen (inngående). Høyre spor for Østfoldbanen (utgående) grener av fra Blixtunnelen ved Loenga ca. km 1,4.

Bane NOR sine tegninger UOS-10-X-91003, UOS-10-X-91004 og UOS-10-X-91005 viser oversikt over prosjektområdet i Blixtunnelen mellom portalen ved Oslo koplingshus km 0,95, km 2,8 for Follobanen, og forbindelse mellom Blixtunnelen og Østfoldbanen via Kongshavntunnelen.

2 HVA INNEBÆRER «KONTROLL PÅ RETURSTRØM»? ?

Jernbaneanlegg skal utformes etter gjeldende nasjonale og internasjonale krav. For banestrømforsyning gjelder Forskrift om elektriske forsyningsanlegg, FEF [2]. Krav i FEF til jording i jernbaneanlegg er funksjonsrettet, og angir kort:

§ 8-6 Tilgjengelige potensialforskjeller, berøringsspenninger og strømmer i jord og jordledere

Anlegg skal utformes slik at tilgjengelige potensialforskjeller, berøringsspenninger og strømmer i jord og jordledere ikke representerer personfare eller fare for skade på utstyr eller materiell.

Forskriften har en noe mer utfyllende veiledning, med referanse til standarden NEK EN 50122-1 for detaljert angivelse av hvilket sikkerhetsnivå og sikkerhetstiltak som kreves for et elektrisk jernbaneanlegg. Teknisk regelverk krever at returkretsen og jernbanens jordingsanlegg skal utformes i samsvar med denne standarden.

NEK EN 50122-1 angir de grunnleggende kravene til utforming av jernbanens returkrets. Kravene er fastsatt for å beskytte personer mot elektrisk sjokk ved tilfeldig berøring av ledende deler i jernbaneinfrastrukturen.

Påvirkninger mellom ulike systemer og utstyr er regulert av standardserien EN 50121 (5 hoveddeler), som dreier seg om elektromagnetisk sameksistens (EMC) i jernbaneanlegg. Teknisk regelverk krever at jernbaneanlegget skal utformes i samsvar med denne standardserien. Kravene her retter seg mot å hindre uakseptable påvirkninger mellom ulike systemer og utstyr.

I EN 50121 del 1 er det krav om at det skal etableres en formell plan for håndtering av EMC i prosjekter (EMC-plan). Planen skal identifisere mulige støykilder, støyofre, og elektromagnetiske koplingsmekanismer mellom dem. Planen skal angi hvordan de identifiserte mulige forstyrrelsene håndteres. Det kan gjøres detaljerte analyser/vurderinger og/eller etableres tiltak, slik som

- økt immunitet mot forstyrrelser for sårbart utstyr,
- redusert emisjon av elektromagnetisk støy fra støykilder, og/eller
- svekkede elektromagnetiske koplinger mellom støykilder og støyofre.

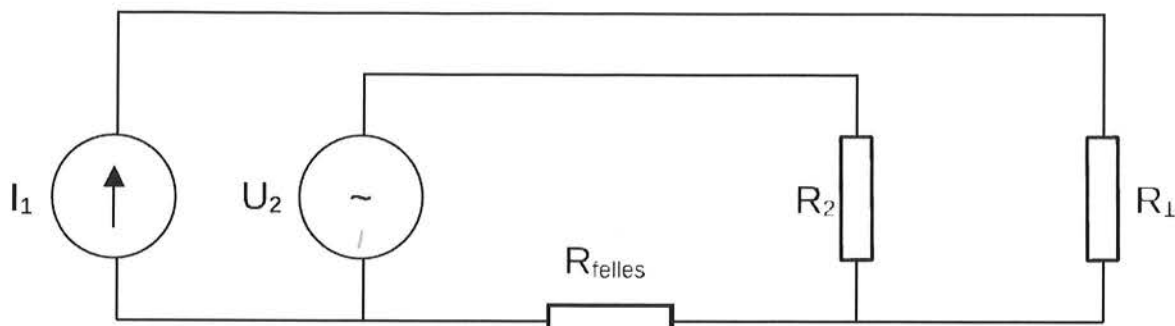
Generelt skal utforming av faste installasjoner utformes slik at elektromagnetiske koplinger mellom ulike kretser blir svake. I vanlige installasjoner oppnås dette ved å utforme installasjonen i tråd med regler for god praksis som definert i nasjonale og internasjonale standarder og regelverk.

EMC-planen skal omfatte alle typer sannsynlige påvirkninger mellom systemer og utstyr. Det omfatter for eksempel:

- skader på utstyr som følge av lynnedslag og andre overspenninger,
- luftbåren radiostøy fra kryptstrømmer, lysbuedannelser og liknende som kan påvirke antenner, trådløse systemer, og elektrisk utstyr,
- ledningsbunden radiostøy som kan påvirke funksjonen til utstyr,
- ledningsbunden svitsjestøy fra statiske omformere i jernbaneinfrastrukturen eller om bord i tog som kan påvirke utstyr,
- galvaniske, induktive/magnetiske og kapasitive koplingsmekanismer mellom kretser og utstyr,
- direkte påvirkning på utstyr som følge av elektriske og magnetiske felter.

Når man snakker om «kontroll på returstrøm» i jernbaneanlegg dreier det seg om å hindre påvirkning på systemer og utstyr som følge av galvanisk overførte forstyrrelser fra returstrøm. Dette er ett av flere temaer som bør bli behandlet i en EMC-plan. Galvanisk overførte forstyrrelser kan oppstå når ulike kretser deler felles kretselementer slik at en spenning blir overført fra en krets til en annen. Et vanlig tilfelle er der ulike kretser har felles returvei i jord eller nøytralleder. Figur 2-1 viser et eksempel på to kretser 1 og 2 som deler et felles kretselement R_{felles} . Dersom krets 1 fører høy strøm I_1 , vil strømmen føre til en spenning $U_{\text{overført}} = I_1 \cdot R_{\text{felles}}$ over motstanden R_{felles} . Denne spenningen overføres så til motstanden R_2 i krets 2. Dersom krets 2 er sårbart for forstyrrelsen, for eksempel dersom motstanden

R_2 representerer en relespole eller en analog eller binær inngang, kan det påvirke funksjonen til krets 2.



Figur 2-1. Galvanisk påvirkning ved to kretser 1 og 2 som deler et felles kretselement R_{felles} .

Det finnes også andre potensielle kilder til uakseptabel påvirkning på sikringsanlegg. Slike andre potensielle feilkilder er ikke vurdert videre i denne rapporten. Eksempler på slike potensielle feilkilder er:

- Fare for induktivt overført spenning til signalkabler. Et slikt problem oppsto ved idriftsettelse av Ski stasjon høsten 2020. Det ble overført en støyspenning ved 4 kHz induktivt til kabel for sporvekselstyring som var større enn tilkoplede utstyr tålte. 4 kHz støystrom ble generert av strømforsyngningsutrustning om bord i tog. I dette tilfellet hadde sporvekselstyringen lav immunitet mot forstyrrelser ved den aktuelle frekvensen, og den lave immuniteten var ikke identifisert eller ivarettatt ved prosjektering. Tett forlegning mellom kablet for sporvekselstyringen og høyspenningskabel, uheldig forlegning av høyspenningskabelen med stor fysisk avstand mellom tur og retur, og uhensiktsmessig valg av kabeltype for signalkabelen bidro alle til at feilen kunne oppstå.
- Fare for påvirkning på systemer og utstyr som følge av lynnedslag og overspenninger
- Fare for påvirkning på systemer og utstyr som følge av direkte påvirkning fra elektriske og magnetiske felter
- Fare for påvirkning på systemer og utstyr som følge av luftbåren og ledningsbunden radiostøy som følge av lysbuedannelse, krepstrømmer over isolatorer

Videre i denne rapporten er vurderingene avgrenset til fare for påvirkning på systemer og utstyr som følge av galvanisk påvirkning fra returstrøm ved normal drift og ved kortslutning.

I en jernbaneinstallasjon finnes flere systemer som kan være sårbare for galvaniske forstyrrelser fra returstrøm. Slike systemer skal derfor utformes slik at de ikke påvirkes utilatelig av forstyrrelsen.

Aktuelle systemer er:

- lavspenningskretser,
- sikringsanlegg,
- sporfeltsystemer,
- teleanlegg

Den mest brukte metoden for å unngå at returstrøm fra tog flyter gjennom kretselementer for disse systemene, er å utforme de tilhørende kretsene slik at de koples til returkretsen i maksimalt ett punkt. Da sikrer man at returstrøm ikke går gjennom felles kretselementer.

En gjennomført tilnærming til dette kan oppnås ved bruk av elektromagnetisk soneteori, som beskrevet i Bane NOR sitt tekniske regelverk [1] (Felles elektro, Prosjektering og bygging, Generelle tekniske krav, vedlegg e). Teknisk regelverk krever at jordingsanlegg i tekniske bygg etableres med trestruktur. Dette er en tilpassing og forenkling av denne soneteorien. Trestrukturen sikrer at hver anleggsdel kun er koplet til returkretsen i ett punkt, og sikrer med det at det ikke oppstår interne spenningsforskjeller i et elteknisk bygg som følge av strøm i returkretsen.

Jordforbindelser innenfor en sone, for eksempel innenfor samme rom i et teknisk bygg, tillates etter soneteorien å danne en jordsløyfe internt i denne sonen, så lenge jordlederen forlegges tett inntil sonegrensen (vegg, gulv eller tak i rommet), slik at induksjon til jordsløyfa blir minimal.

Jordledere og kabelskjermer som krysser en sonегrense, tillates kun å bli jordet i en ende. Kravet kan oppfylles på flere måter, der den vanligste er å jorde kabelskjermer kun i en ende. Kabelskjermen bidrar da ikke til å beskytte kabelen mot forstyrrelser ved høye frekvenser. I mange tilfeller er det heller ikke behov for å beskytte kabelen ved å jorde den i begge ender. Der det er behov for å beskytte signalene ved å jorde kabelens skjerm i begge ender, finnes det noen mulige løsninger.

Teleanlegg etableres i dag kun med fiberoptisk kabel, som ikke påvirkes av forstyrrelser fra returstrøm. Den historiske utførelsen med langlinjekabler med kopperpar var sårbar for forstyrrelser, og ble derfor som hovedregel bygget opp med sitt eget jordingsanlegg separat fra returkretsen.

Ettersom sporfeltsystemer bruker kjøreskinnene som kretselement kan ikke de beskyttes mot påvirkning fra returstrøm på denne måten. I neste avsnitt beskrives det i større detalj hvordan sporfeltsystemene kan bli påvirket av returstrøm fra tog, og hva som kan gjøres for å begrense risiko for påvirkning.

Det er i dette arbeidet ikke gått i detalj på oppbygningen av resten av sikringsanlegget NSB-77 utover sporfeltene. Det forventes at dette anlegget er etablert i tråd med prinsippet om jording i trestruktur med tilkopling til returkretsen i maksimalt ett punkt, slik at returstrøm fra banestrømforsyningen ikke ledes gjennom jordingsystemet for sikringsanlegget.

Bane NOR sitt tekniske regelverk [1] definerer elektriske utforminger A til F, der strømbelastning i returkretsen blir styrt på ulike måter. I avsnitt 3 er de elektriske utformingene beskrevet.

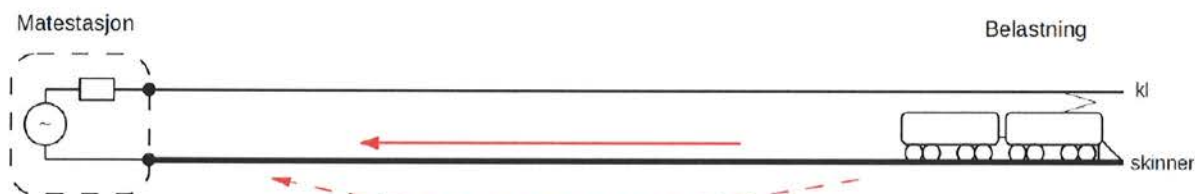
3 ELEKTRISKE UTFORMINGER AV KONTAKTLEDNING

3.1 Utforming uten kontroll på returstrømmen: Utforming A

Grunnleggende fungerer banestrømforsyning ved at en matestasjon forsyner spenning til kontaktledningen. Tog belaster strøm fra kontaktledningen. Returstrømmen følger kjøreskinnene og jord tilbake til matestasjonen. I norsk banestrømforsyning er nominell spenning 15 kV mellom kontaktledning og returkrets, og nominell frekvens er 16,7 Hz. Vanlig innregulert tomgangsspenning i matestasjonene er 16,5 kV. Faktisk frekvens er bestemt av mekaniske egenskaper for de roterende frekvensomformerne som brukes, slik at banestrømforsyningens frekvens blir eksakt $\frac{1}{3}$ av frekvensen i matende nett. Ettersom frekvensen i matende nett er regulert til 50 Hz, blir driftsfrekvensen i banestrømforsyning 16 $\frac{2}{3}$ Hz.

Det er en impedans mellom matestasjonen og toget i kontaktledningen og i returkretsen via kjøreskinnene. Impedansen i returkretsen fører til en spenningsforskjell i returkretsen mellom matestasjonen og toget. Denne spenningsforskjellen fører til at det vil lekke strøm fra returkretsen til jord ved toget, og tilbake fra jord til returkretsen ved matestasjonen. På en lang enkeltsporet strekning med elutforming A kan det beregnes at om lag 40 % av returstrømmen vil gå i jord, og på en lang dobbeltsporstrekning vil om lag 25 % av returstrømmen gå i jord.

Spenningsstigningen i returkretsen sammenliknet med omkringliggende jord fører til berøringsspenning ved berøring av objekter som er koplet til returkretsen. Det finnes grenseverdier for maksimal berøringsspenning. De berøringsspenningene som oppstår begrenser tillatt bruk av denne utformingen. Utformingen kan derfor kun brukes i tilfeller der banestrekningen er kort eller belastningen er lav, slik at berøringsspenningen for objekter tilkoplet returkretsen ved togets posisjon og ved matestasjonen ikke overskrider gjeldende grenseverdier.



Figur 3-1. Elektrisk utforming A, kontaktledning med retur i kjøreskinner.
Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk

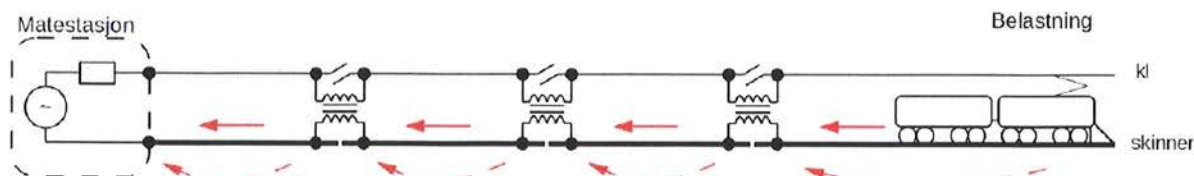
3.2 Utforminger med sugetransformatorer: Utforming B, C og D

Man ble tidlig klar over at elektrisk utforming A medførte problemer med høy berøringsspenning i returkretsen og med stor induisert spenning til telegraflinjene som gikk langs mye av jernbanenett. Ved den omfattende elektrifiseringen som skjedde mellom 1945 og 1970 ble derfor alle hovedstrekningene elektrifisert med sugetransformatorsystem, og telegraflinjene ble erstattet med telekabler som er mer immune mot induksjon fra kontaktledningsnettet. Disse hovedstrekningene ble etablert med 80 – 90 km avstand mellom matestasjonene.

Det eldste sugetransformatorsystemet i Norge er elektrisk utforming B. Dette er fremdeles i utstrakt bruk på enkeltsporede hovedstrekninger. Sugetransformatorene etableres i 3 km intervaller. I sporet ved sugetransformatorene etableres et nullfelt, som seksjonerer kjøreskinnene for tilgrensende strekninger elektrisk fra hverandre.

En sugetransformator er en enfasetransformator med to viklinger med omsetningsforhold 1:1. Primærviklingen koples i serie med kontaktledningen, og sekundærkretsen koples i serie med kjøreskinnene. Dette sikrer lik strøm og spenningsfall over sugetransformatoren i primær- og sekundærviklingen. Spenningsforskjellen mellom to sugetransformatorer blir begrenset av impedansen i kjøreskinnene mellom dem. Midt mellom to sugetransformatorer blir det ingen

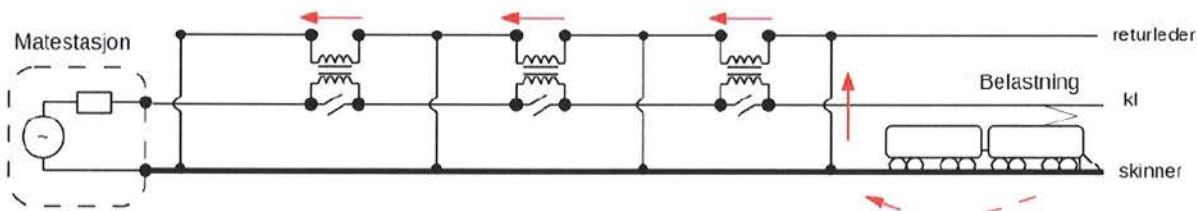
berøringsspenning. Rett ved en sugetransformator blir berøringsspenningen proporsjonal med belastningsstrømmen fra tog.



Figur 3-2. Elektrisk utforming B, kontaktledning med sugetransformatorer og retur i kjøreskinner. Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk

På 1980- og 1990-tallet ble det utviklet to sugetransformatorsystemer med returledere, et uten nullfelt i kjøreskinnene ved sugetransformatoren (utforming C) og et med nullfelt i kjøreskinnene ved sugetransformatoren (utforming D). Bane NOR sitt tekniske regelverk i dag tillater ikke utforming D med nullfelt på nye strekninger, og anbefaler at nullfelter på eksisterende strekninger med utforming D fjernes slik at systemet endres til utforming C.

Sugetransformatorene tvinger her all returstrømmen inn i returlederne slik at det ikke går gjennomgående strøm i kjøreskinnene. Kjøreskinnene utsettes derfor kun for spenningsstigning når et tog er rett i nærheten. Berøringsspenninger blir derfor betydelig redusert sammenliknet med tidligere systemer.



Figur 3-3. Elektrisk utforming C, kontaktledning med sugetransformatorer og returleder, uten nullfelt. Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk

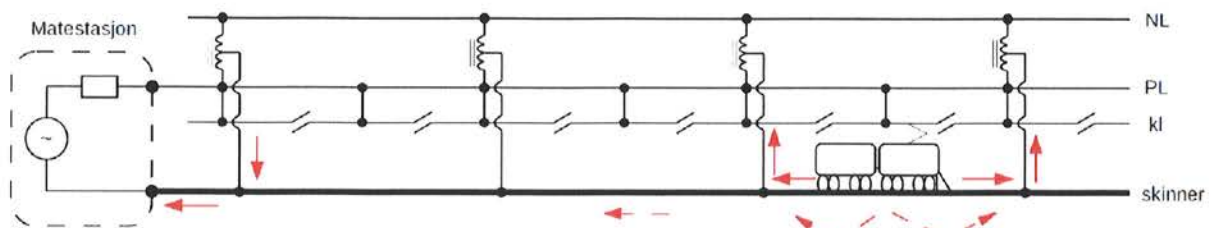
3.3 Utforminger med autotransformatorer: Utforming E og F

Med økende belastning fra tog og ønske om å kjøre tyngre tog i tettere trafikk, har elutforminger A til D begrensninger. Impedansen i kontaktledningen mellom matestasjoner er så høy at strømforsyningen blir en begrensning for muligheten til å kjøre den togtrafikken man ønsker.

Den åpenbare løsningen på dette er å bygge flere matestasjoner i tettere intervaller enn man har gjort tidligere. Dette ville imidlertid bli svært kostbart. Tidlig på 2000-tallet ble det derfor i stedet bestemt at videre elektrifisering av hovedstrekninger skulle skje med autotransformatorsystem. Ved autotransformatorsystemer føres returstrømmen i et negativsystem med -15 kV nominell spenning slik at spenningen for effektoverføringen mellom matestasjon og tog blir 30 kV.

Det finnes ulike måter å kople slike systemer på i Europa. I Norge valgte man å utvikle et eget system som hadde fordeler med oppetid og vedlikeholdsvennlighet, i tillegg til at systemet minimerte strøm i returkrets og jord.

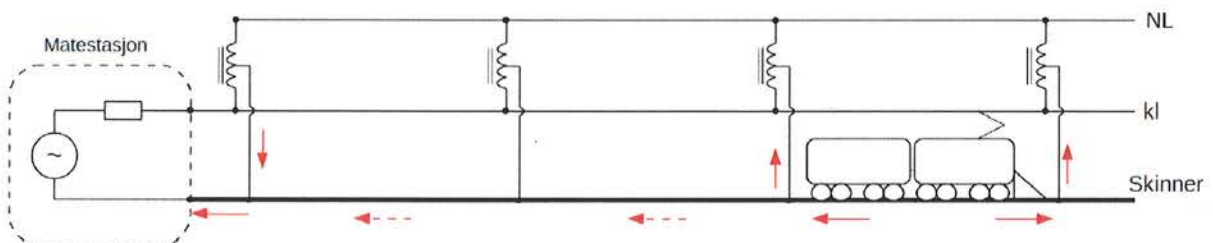
Med den norske koplingen av autotransformatorsystemet etableres en positivleder (PL) og en negativleder (NL), som sikrer effektoverføring over store avstander ved 30 kV nominelt. Kontaktledningen er seksjonert og hver seksjon skal kunne koples ut for vedlikehold uten at det medfører brudd i gjennomgående mating. Systemet er beskrevet i Teknisk regelverk som elutforming E.



Figur 3-4. Elektrisk utforming E, autotransformatorsystem med positivleder (PL), negativleder (NL) og seksjonert kontaktledning. Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk

Slik elutforming E ble beskrevet, så ble systemet kostbart å bygge. Dette førte til at det senere har blitt etablert varianter av systemet. Først ble det etablert en variant av utforming E med lavere master, der det ikke legges opp til at man kan kople ut kontaktledningen uavhengig av positiv- og negativleder for arbeid. Spesielt på dobbeltspor vurderte man nytten av denne muligheten som lavere enn kostnaden for de høyere mastene.

Senere har Teknisk regelverk også etablert en beskrivelse av en ny elutforming F med autotransformatorsystem, der det kun brukes negativleder. Denne har enda lavere kostnader enn utforming E med lave master. Konsekvensen er en noe lavere kapasitet enn utforming E, men kapasiteten er likevel betydelig større enn de tidligere utformingene A til D.

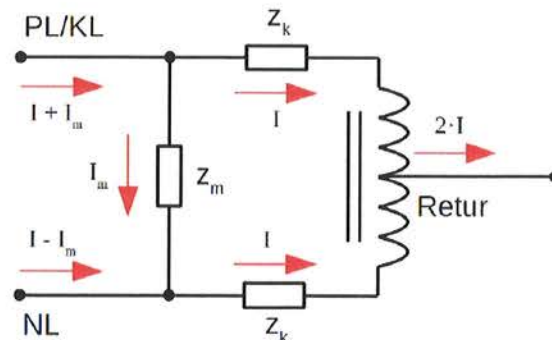


Figur 3-5. Elektrisk utforming F, autotransformatorsystem med enkel negativleder (NL).

Autotransformatorene fungerer til å balansere spenning og strøm i negativ- og positivledersystemet, slik at ved hver autotransformator er spenningen mellom negativleder og retur lik som mellom positivleder / kontaktledning og retur. Mesteparten av returstrømmen blir dermed transformert gjennom autotransformatoren og inn i negativledersystemet. Likevel vil ved dette systemet også en andel av returstrømmen gå i kjøreskinnene. Autotransformatoren sikrer ikke at all returstrømmen går i negativsystemet like effektivt som sugetransformatoren sikrer at all returstrømmen går i returlederne ved elutforming C og D.

Ved autotransformatorsystemer blir berøringsspenninger for objekter tilkoppelt returkretsen høyere enn i systemer med sugetransformatorer (B til D). Krav til maksimale berøringsspenninger dimensjonerer avstand mellom autotransformatorer. Teknisk regelverk angir at autotransformatorer uten videre vurderinger kan installeres i intervaller på inntil 10 km for enkeltspor og 15 km for dobbeltspor. Større intervaller kan brukes etter en spesifikk vurdering som tilsier at kravene til berøringsspenning blir overholdt.

Teknisk regelverk angir ekvivalentskjema for en autotransformator som vist i Figur 3-6. Her er magnetiseringsstrømmen I_m svært liten og kan i mange tilfeller neglisjeres.



Figur 3-6. Autotransformator, ekvivalentskjema.
Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk

3.4 Drifts- og kortslutningsstrømmer

Kontaktledningsnettet belastes med strømmer fra drift og fra kortslutning.

Driftsstrømmer domineres av strømbelastning fra tog i trafikk. Det omfatter godstog med varierende lastvekter og trekraftmateriell, og persontog som består av lokomotiv med vogner eller av motorvognsett.

I tillegg har det de senere år også blitt økende belastning fra parkerte tog som forsynes med strøm fra kontaktledningen på hensettingsområder. Hoveddelen av strøm til parkerte tog går til klimatisering av togene (oppvarming om vinteren, avkjøling om sommeren).

Strømmens kurveform vil variere for ulike typer trekraftmateriell. De eldste typene trekraftmateriell er i dag i bruk i lokomotiv type EL 14 eller eldre. Disse bruker en seriemagnetisert kommutatormotor. Pådraget for en slik motor er gitt av påtrykket spenning på motoren. Pådragsreguleringen skjer ved trinning av togtransformatoren.

En utvikling av denne togtypen er i bruk i lokomotivene EL 16 og svenske typer RC-lokomotiver, og tillegg motorvognsettene type 69 og 70. Alle de angitte trekraftvognene er fremdeles i bruk i Norge. Dette trekraftmateriellet bruker også seriemagnetisert kommutatormotor, men pådragsreguleringen for disse skjer med tyristorlikerettere, som styrer spenningen inn på motoren. Tyristorlikerettere genererer store komponenter av lavere ordens harmoniske strømmer, spesielt tredje, femte, syvende og niende harmoniske (50 Hz, 83 1/3 Hz, 116 2/3 Hz og 150 Hz). Bane NOR sitt tekniske regelverk [1] angir målte nivåer av harmoniske belastningsstrømmer ved disse frekvensene som må forventes i kontaktledningsnettet, spesielt som følge av trekraftmateriell med tyristorlikerettere.

Senere typer trekraftmateriell bruker en nettstrømretter med kraftelektronikkomformere som svitsjer med høy frekvens. Ulike svitsjeteknologier er i bruk. Disse gir ulike karakteristiske harmoniske komponenter. Utstyr med puls-vidde-modulert (PWM) svitsjing har en fast svitsjefrekvens, og harmonisk støy fra materiellet er ved multiple av denne svitsjefrekvensen. Eksempelvis har type 74 og 75 (Flirt) denne svitsjeteknologien, med karakteristiske støyfrekvenser ved 4, 8 og 16 kHz (og også høyere multipler med lavere strømstyrke). Senere materiell introduserer også multinivå svitsjing (MLC), som gir et mer bredspektret svitsjemønster uten en fast svitsjefrekvens, men med lavere strømverdier.

Ved aksept av nye togtyper finnes det et felles europeisk regelverk med akseptgrenser for hvor store overharmoniske komponenter ved ulike frekvenser et tog tillates å produsere. Nye togtyper blir testet etter dette regelverket.

Tilsvarende implementerer også matestasjoner med moderne frekvensomformere svitsjet strømforsyning som mater støy til kontaktledningsnettet ved ulike frekvenser. Støyfrekvenser varierer i området fra noen hundre Hz til over 30 kHz.

Overharmoniske frekvenskomponenter vil man kunne måle som små strømmer i kontaktledning og returkrets, på toppen av driftsfrekvensen på $16 \frac{2}{3}$ Hz. De laveste frekvensene under noen få kHz kan forplante seg i kontaktledningsnettet over store avstander. Høyere frekvenser vil derimot dempes ut fort og avgrenses til et område nær støykilden.

Ved kortslutning i kontaktledningsnettet etableres en lavohmig forbindelse mellom kontaktledningen og returkretsen eller jordingsanlegget. Kontaktledningsspenningen legges da umiddelbart over nettes impedans. Kortslutningsstrømmen kan beregnes ved spenningen før feil delt på impedansen:

$$I_K = \frac{U_{KL}}{Z_{KL}}$$

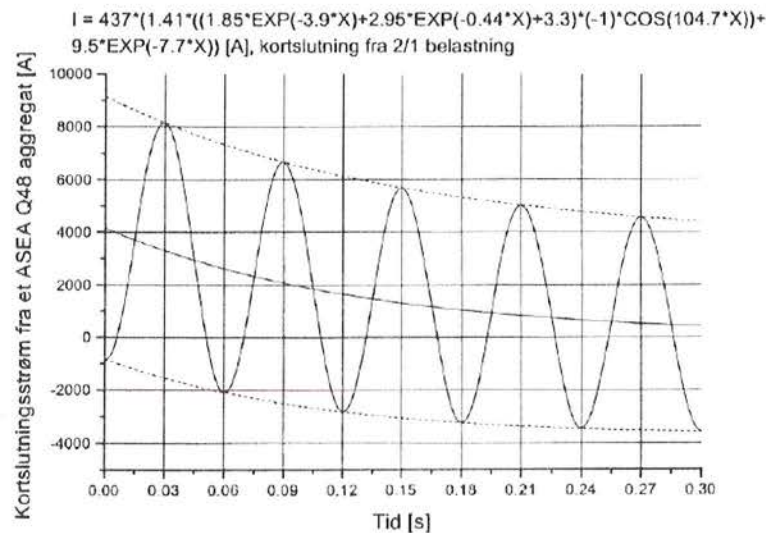
Teknisk regelverk har angitt maksimal dimensjonerende kortslutningsstrøm for ulike deler av kontaktledningsnettet. Ved konstant kontaktledningsspenning innebærer dette også en angivelse av laveste kontaktledningsimpedans for alle parallelle strømveier som forsyner en kortslutning.

Figur 3-7 viser kurveform for kortslutningsstrømmen fra en 10 MVA roterende omformer (ASEA Q48), når omformeren var fullt belastet før kortslutningen [5]. Som figuren viser, kan toppverdien rett etter kortslutning komme opp til 9 kA. Oppgitt subtransient kortslutningsstrøm for denne maskinen er 3,539 kA effektivverdi.

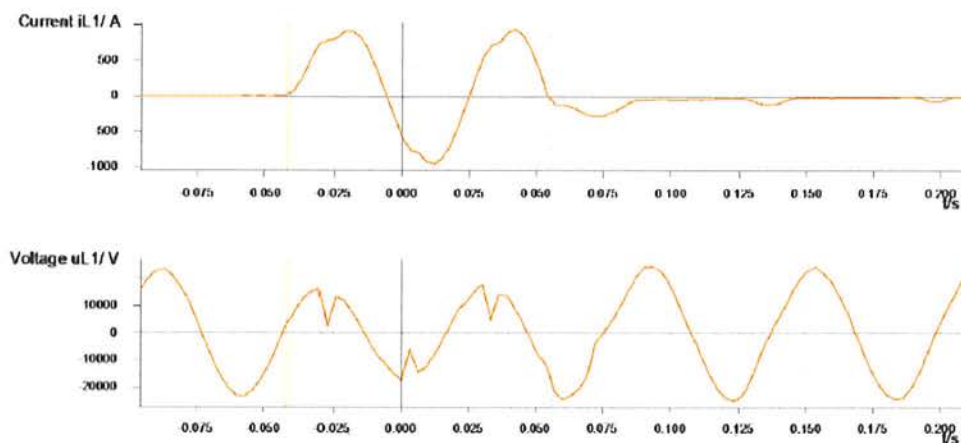
Tilsvarende viser Figur 3-8 utskrift av feilskriveren ved Kjelland omformerstasjon (statisk frekvensomformer) etter kortslutningstest på Jærbanen i 2013 [6]. Utskriften viser en kortslutningsstrøm med varighet på 3 halvperioder (90 ms) med en strømstyrke på ca. 500 A effektivverdi. Under kortslutningen regulerer omformeren spenningen (kan ses som «hakk» i kurven) slik at strømmen ikke overstiger grenseverdien for hva omformeren kan mate ut.

Bane NOR sin tekniske spesifisering for sugetransformatorer [7] angir at metningsgrense for sugetransformatorer er 3,5 – 4,0 kA avhengig av type. Ved metning vil sugetransformatoren virke som en direkte kortslutning over viklingene. Ved så høy kortslutningsstrøm som den dimensjonerende på 31,5 kA forventes det at sugetransformatorer vil gå i magnetisk metning. I det aktuelle området med store dimensjonerende kortslutningsstrømmer forventes det derfor at sugetransformatorer vil opptre som en direkte forbindelse uten magnetisk kopling mellom høyspent- og returkretsen. Sugetransformatorene i nærheten av Oslo S vil derfor ikke ha noen virkning ved kortslutninger med stor strøm.

Ettersom omformerne som forsyner til kontaktledningen er induktive komponenter (elektriske maskiner og transformatorer), vil det ikke kunne oppstå umiddelbar endring i strømmen når kortslutningen inntreffer. Som Figur 3-7 og Figur 3-8 viser, består en kortslutningsstrøm nær utelukkende av grunnharmonisk frekvens ved $16 \frac{2}{3}$ Hz.



Figur 3-7. Kurveform for en kortslutning fra en 10 MVA roterende omformer.
Kilde: BanePartner, Vernstudie – Teoretiske undersøkelser [5]



Figur 3-8. Utskrift av feilskriveropptak fra multifunksjonsvern ved Kjelland omformerstasjon etter en kortslutningstest. Kilde: Bane NOR, Kortslutningstest Jærbanen, 2013 [6]

3.5 Returstrøm i jord

Returstrøm i jord kan ikke unngås. Det er heller ikke et mål å unngå det. Som tidligere beskrevet finnes det ikke krav knyttet til hvor stor strøm som tillates å flyte i jord. Kravene er i stedet knyttet til berøringsspenning (FEF [2] og EN 50122-1 [3]) og til at systemer og utstyr skal ha god elektromagnetisk sameksistens, EMC (EN 50121-serien [4]).

4 SPORFELTER

4.1 Generelt om 95/105 Hz sporfelter

I Norge brukes i stor utstrekning 95 og 105 Hz sporfelter som togdeteksjonssystem ved ulike typer sikringsanlegg. Disse fungerer ved at en sporfeltstrøm mates ut til kjøreskinnene i den ene enden av et sporavsnitt, og mottas av en returkrets med et sporfeltrele i den andre enden av sporfeltet. Så lenge sporfeltstrømmen ved 95 eller 105 Hz kommer fram til sporfeltreleet, er releet trukket og sporavsnittet blir detektert som fritt. Når det er tog på strekningen som kortslutter mellom kjøreskinnene, går sporfeltstrømmen i stedet gjennom togets akslinger og ikke gjennom sporfeltreleet. Sporfeltreleet faller da, og sporavsnittet blir detektert som belagt.

Figur 4-1 viser prinsipiell oppbygning av sporfeltutrustningen for et sporavsnitt som beskrevet i Bane NOR sitt tekniske regelverk [1].

Sporfeltet er bygget opp med en tilførselskrets og en returkrets.

Tilførselskretsen består av:

- En tilførselstransformator
- En tilførselsmotstand R_T montert mellom transformatoren og kjøreskinnene
- En 95 eller 105 Hz strømkilde montert på tilførselssiden av tilførselstransformatoren

Returkretsen består av:

- En returtransformator
- En returmotstand R_R montert mellom returtransformatoren og kjøreskinnene
- En justerbar kabelmotstand R_K montert mellom returtransformatoren og sporfeltreleet
- Et sporfeltrele montert bak returtransformatoren og kabelmotstanden
- Returkretsen karakteriseres med returimpedansen Z_R , som er kretsens totale impedans sett fra sporet. I tillegg til motstandene omfatter denne også transformatorimpedansen og impedansen i relespolen.

Sporfeltene utformes i to hovedvarianter:

- Enkeltisolert, med en jordet kjøreskinne som all returstrømmen går i, og en signalskinne som kun skal føre signalstrøm, og
- Dobbeltisolert, med to isolerte kjøreskinner der returstrøm fordeles mellom de to kjøreskinnene ved hjelp av filterimpedanser.

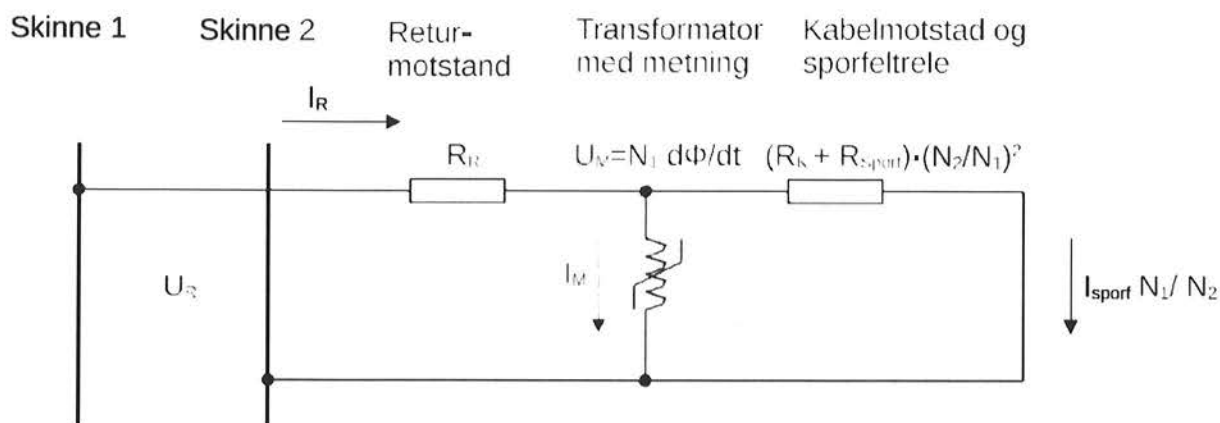
Disse variantene er beskrevet detaljert i avsnitt 4.3 og 4.4. Prinsippkjemaet i Figur 4-1 viser et enkeltisolert sporfelt.

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	14 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i	Rev:	01E
	returstrømkretsen	Dato:	28.11.2022

4.2 Sårbarheter for 95/105 Hz sporfelter

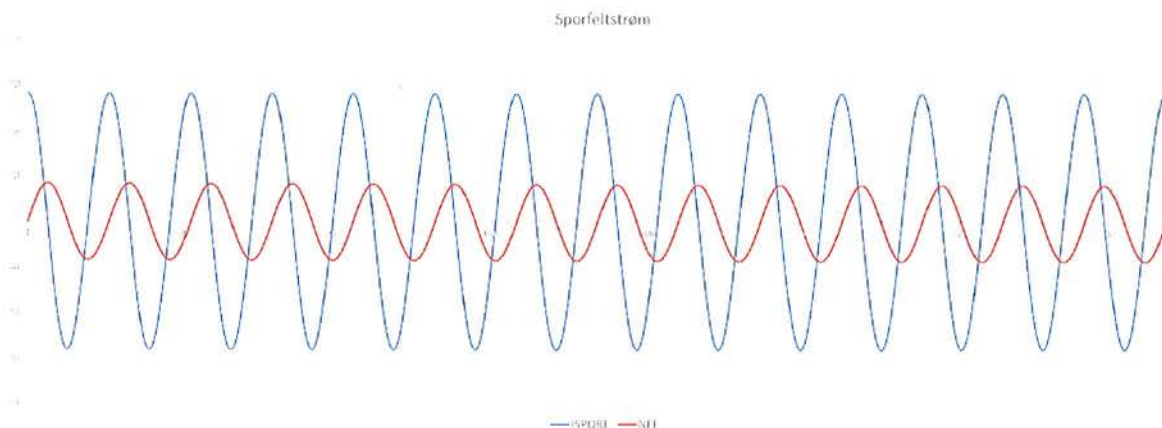
Sporfelter med 95/105 Hz har to primære sårbarheter:

- Lekkasje av sporfeltstrøm mellom kjøreskinner, og
- Fremmedspenninger mellom kjøreskinner som forstyrrer sporfeltutrustningen



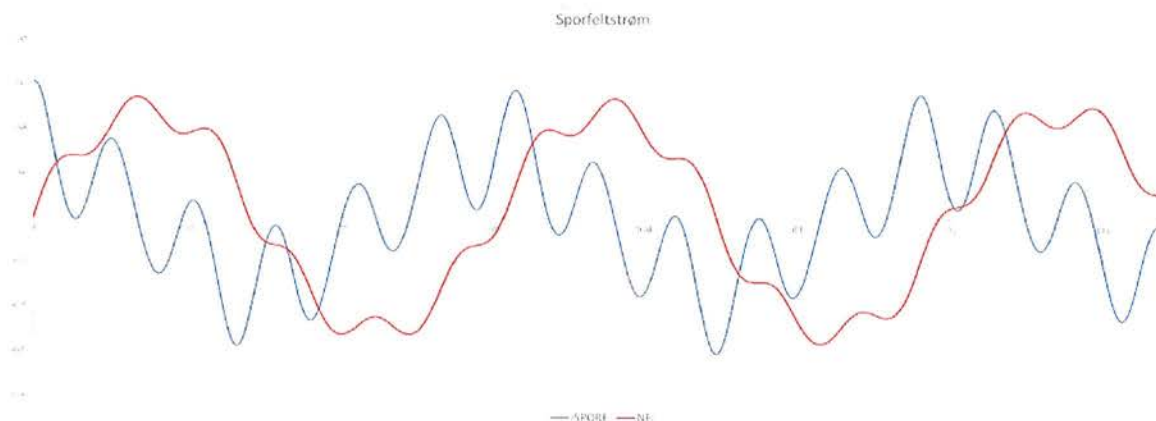
Figur 4-2. Ekvivalent sporfeltkrets

Med denne ekvivalentkretsen og modellen av transformator med metning, viser Figur 4-3 beregnet strøm I_{spor} gjennom sporfeltreleet og magnetisk fluks $N_1 \cdot \varphi$ i returtransformatoren når det ikke er noen påvirkning fra traksjonsstrøm. Strømmen gjennom sporfeltreleet er justert til 200 mA. Det gir en spenning U_R mellom kjøreskinnene på 4,43 V. Sporfeltfrekvensen er 95 Hz. Den viste magnetiske fluksen er angitt i Wb, men er i figurene skalert opp 15 ganger slik at den blir synlig i samme skala som strømmen gjennom sporfeltreleet.



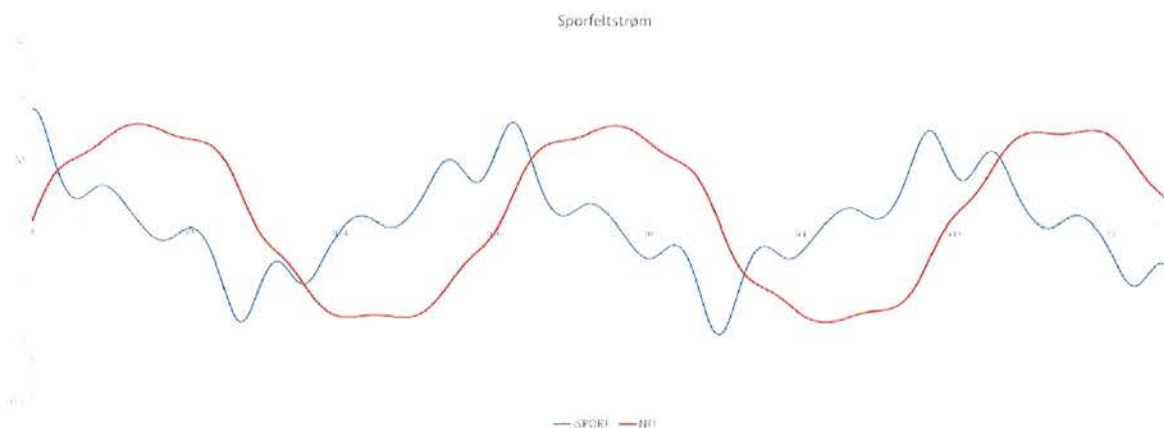
Figur 4-3. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) uten påvirkning av traksjonsstrøm.

Figur 4-4 viser strømmen gjennom sporfeltreleet i det samme tilfellet som i Figur 4-3, der det i tillegg er en spenning på 5 V ved $16 \frac{2}{3}$ Hz mellom kjøreskinnene. Figuren viser hvordan $16 \frac{2}{3}$ Hz strømmen gjennom sporfeltreleet overlager 95 Hz strømmen, men det oppstår ingen metning i transformatoren slik at begge signalene transformeres uhindret gjennom transformatoren.



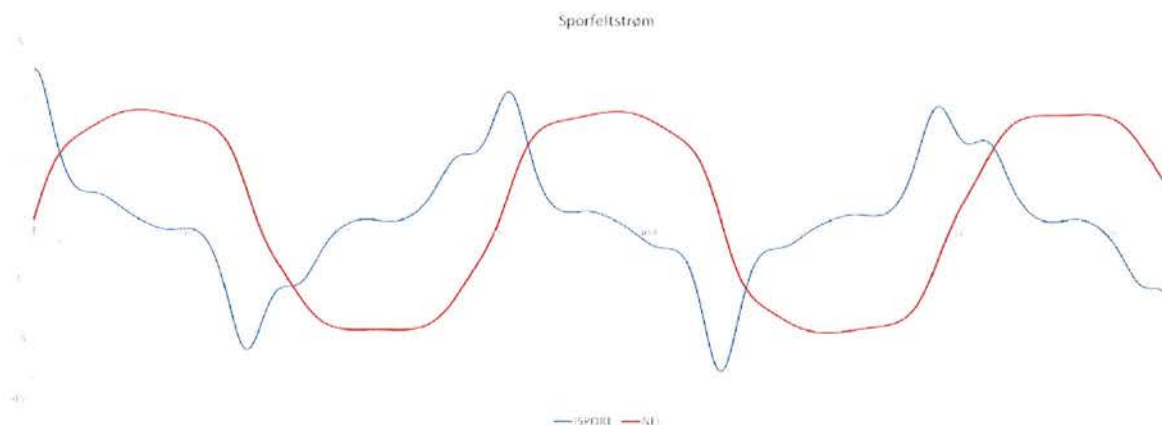
Figur 4-4. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz spenning mellom kjøreskinner på 5 V.

Figur 4-5 viser det samme tilfellet når spenningen mellom kjøreskinnene ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz er 10 V. Her kan man se at transformatoren begynner å gå i metning, ved at fluksen får en utflating på toppen og det blir en strømtopp ved fluksens nullgjennomgang. Det er likevel fremdeles mulig å skille ut 95 Hz signalet på en tydelig måte.



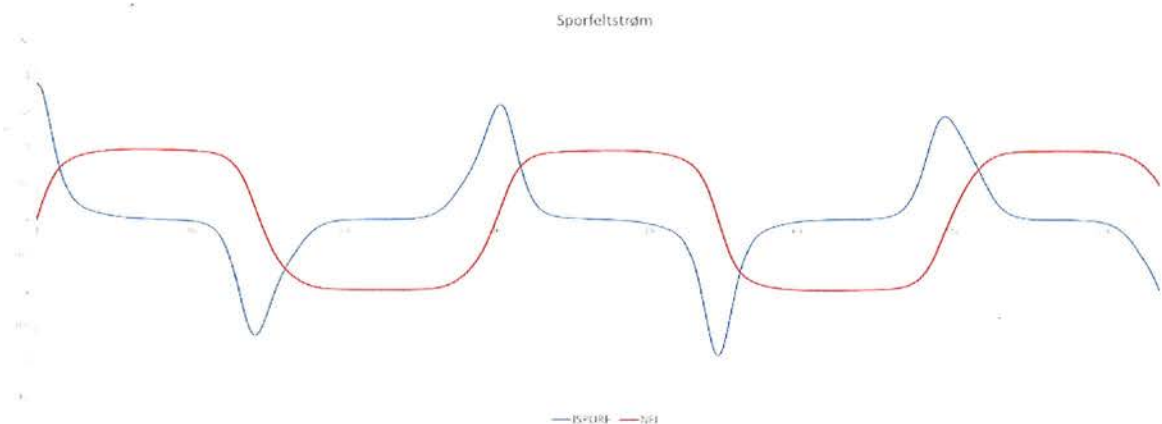
Figur 4-5. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz spenning mellom kjøreskinner på 10 V.

Figur 4-6 viser tilfellet når spenningen ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz mellom kjøreskinnene er 15 V. Dette er den tidligere oppgitte grenseverdien for hva et slikt sporfelt tåler. Som en ser her, er nå sporfeltstrømmen ved 95 Hz ganske utdempet, og det vil være vanskelig å skille ut sporfeltstrømmen ved 95 Hz fra forstyrrelsen ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz i den blå kurven.



Figur 4-6. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz spenning mellom kjøreskinner på 15 V.

Til slutt er det vist et tilfelle i Figur 4-7 der returtransformatoren er helt i metning og nyttesignalet ved 95 Hz har forsvunnet helt fra strømmen gjennom sporfeltreleet. I det viste tilfellet er spenningen ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz mellom kjøreskinnene 25 V.



Figur 4-7. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) ved 16 $\frac{2}{3}$ Hz spenning mellom kjøreskinner på 25 V.

Som man kan se, fører metningen i sporfeltets returtransformator til at den totale strømmen gjennom sporfeltreleet begrenses. Dette er en metode å beskytte utstyr mot høy strøm i feilsituasjoner. Det er rimelig at transformatorens ytelse og metningskarakteristikk er valgt slik for å beskytte sporfeltreleet mot å bli skadet som følge av stor strøm.

4.3 Enkeltisolert sporfelt

Enkeltisolert sporfelt (sporfelt type 1) er kun tillatt benyttet på stasjoner iht. Teknisk regelverk [1]. Sporfeltlengden tillates å være maksimalt 250 meter der det ikke er returleder som fører gjennomgående returstrøm forbi sporfeltet, og 700 meter der det finnes returleder som fører gjennomgående returstrøm forbi sporfeltet.

Figur 4-8 viser prinsipiell kopling av et enkeltisolert sporfelt, i dette tilfellet med tilgrensende strekninger uten sporfelt.

Ved enkeltisolert sporfelt går det strøm gjennom jordet kjøreskinne. Spenningsforskjellen som oppstår mellom de to endene av et sporavsnitt er gitt av produktet av strømmen I som går gjennom jordet kjøreskinne, og impedansen Z_s i skinna. Impedansen i en kjøreskinne er vanskelig å anslå på grunn av kjøreskinnens magnetiske egenskaper. Ulike kilder oppgir svært ulike parametre for denne basert på ulike strategier for beregning og måling. I avsnitt 5.6 i denne rapporten er impedansen i en kjøreskinne estimert til å være om lag $0,19 \Omega/\text{km}$.

Ved å anta skinneimpedans $Z_s=0,19 \Omega/\text{km}$ og sette returstrømmen lik største tillatte strømbelastning per tog på 700 A, kan spenningen over jordet kjøreskinne mellom sporfeltets tilførselskrets og returkrets beregnes til 13,3 V per 100 meter lengde for sporavsnittet. Denne spenningen fordeler seg også over sporfeltets tilførselskrets, returkrets, og impedansen i signalskinna. Fordelingen er bestemt av impedanser i de aktuelle kretsene.

Komponentverdiene for sporfeltet som oppgitt i Teknisk Regelverk er:

Tabell 4-1. Komponentverdier for enkeltisolert sporfelt 95/105 Hz type 1 [1]

Komponent	Parameter
Tilførselstransformator	$S_R = 150 \text{ VA}$
Tilførselsmotstand	$R_T = 4 \Omega$
Returtransformator	$n = 3:5 \text{ V}$
Returmotstand	$R_R = 6 \Omega$
Kabelmotstand	$R_K = 10 \Omega$ (regulerbar), reguleres slik at Z_R sett fra spor mot sporfeltrele blir 13Ω

Dette er også parameterverdiene som er lagt til grunn for beregning av strømmen gjennom sporfeltrele i avsnitt 4.2.

Parameterverdiene innebærer at spenningsforskjellen over jordet kjøreskinne vil fordele seg med om lag 4/17 (23,5%) over sporfeltets tilførselskrets, og 13/17 (82,5%) over sporfeltets returkrets. Impedansen i signalskinna blir liten sammenliknet med impedansen i tilførsels- og returkretsen, og kan neglisjeres. Ved strømbelastning på 700 A kan det med disse forutsetningene beregnes at den tidligere grenseverdien for spenning mellom kjøreskinnene ved tilførsels- og returkretsen på 15 V vil overskrides når sporfeltets lengde overskrider 136 meter.

Beregningen er en eksempelberegning, som baserer seg på flere antakelser. Resultatet blir derfor ikke eksakt. Men beregningen viser likevel at økende belastningsstrømmer lett kan føre til at enkeltisolerte sporfelte blir påvirket av traksjonsstrøm som går i jordet kjøreskinne gjennom sporavsnittet.

Ved enkeltisolert sporfelt skal alle jordforbindelser koples til jordet kjøreskinne. Jordforbindelser gir ikke økt risiko for forstyrrelse på sporfeltet. Ved mange jordforbindelser, og spesielt med parallellkopling med andre spor og med langsgående jordledere, vil strømmen i jordet kjøreskinne bli redusert, og dette bidrar til en reduksjon i risikoen for uakseptable påvirkninger.

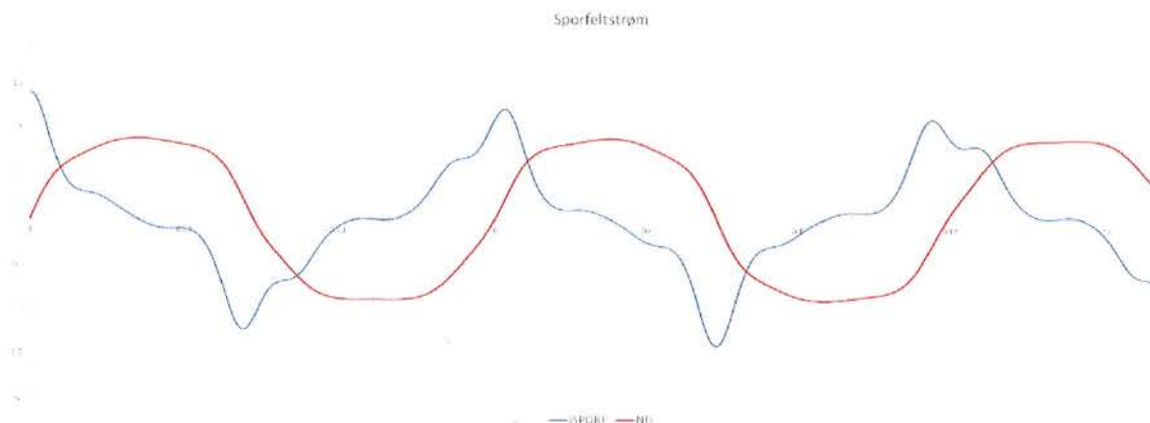
Teknisk regelverk angir videre en type av enkeltisolert sporfelt med justerte parameterverdier (sporfelt type 2), som kan benyttes for å gjøre sporfeltet mer immunt mot forstyrrelser fra returstrøm fra tog. De justerte parameterverdiene er vist i Tabell 4-2.

Tabell 4-2. Komponentverdier for enkeltisolert sporfelt 95/105 Hz type 2 [1]

Komponent	Parameter
Tilførselstransformator	$S_R = 300 \text{ VA}$
Tilførselsmotstand	$R_T = 4 \Omega$
Returtransformator	$n = 3:7 \text{ V}$
Returmotstand	$R_R = 12 \Omega$
Kabelmotstand	$R_K = 10 \Omega$ (regulerbar), reguleres slik at Z_R sett fra spor mot sporfeltrele blir 16Ω

Den viktigste endringen fra type 1 er at returmotstanden R_R har blitt dobbelt så stor, som gjør at en større del av spenningsfallet over returkretsen blir på sporsiden av returtransformatoren. Grensen for hvor stor spenning mellom kjøreskinnene som fører til at returtransformatoren går i metning, vil bli høyere enn ved sporfelt type 1. Videre er tilførselstransformatoren dimensjonert opp. Disse tiltakene gjør at spenningsforskjellen mellom kjøreskinnene kan bli om lag dobbelt så høy før transformatorene går i metning og blokkerer for sporfeltstrøm.

Figur 4-9 viser en tilsvarende beregning som i avsnitt 4.2 med enkeltisolert sporfelt type 2 og spenning mellom kjøreskinne på 30 V. I dette tilfellet blir kurveformen for sporfeltstrømmen sammenliknbar med kurveformen ved enkeltisolert sporfelt type 1 ved en forstyrrelse på 15 V. Sporfelt type 2 framstår dermed med betydelig bedre immunitet mot forstyrrelser fra returstrøm fra tog sammenliknet med enkeltisolert sporfelt type 1. I tilfeller der man forventer at strøm fra tog vil gå gjennom et enkeltisolert sporfelt, vil det være en stor fordel å velge sporfelt type 2 framfor type 1. Ulempen med bruk av type 2 sammenliknet med type 1 er at sporfeltstrømmen i kjøreskinnene blir større slik at sporfeltene må mates med større strømstyrke og større effekt. Tilførselskretsen må da dimensjoneres kraftigere, og det blir større energitap i sporfeltet.



Figur 4-9. Strøm gjennom sporfeltreleet (blå) og magnetisk fluks i returtransformator (rød) ved enkeltisolert sporfelt type 2 og 16 $\frac{2}{3}$ Hz spenning mellom kjøreskinner på 30 V.

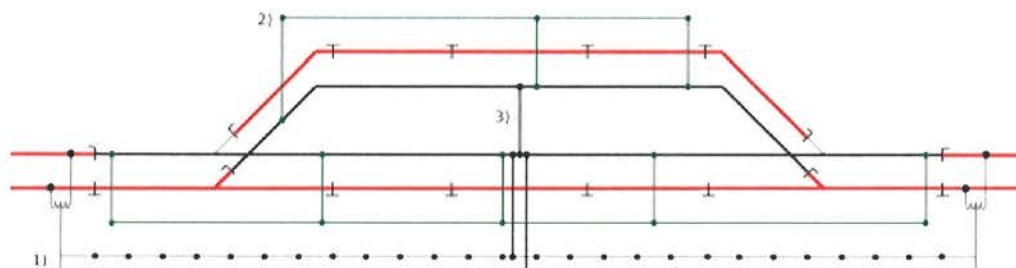
Tiltak for å redusere forstyrrelser som et enkeltisolert sporfelt blir utsatt for er å føre returstrøm forbi sporavsnittet i returleder som vist i Figur 4-10. Koplingen skal være slik at strøm fra tog som befinner seg foran et signal som sporfeltet styrer, ikke skal føre til returstrøm gjennom sporfeltet. Returlederen og nedføringen kan da være felles for flere sporavsnitt, for eksempel alle sporavsnitt på en stasjon.

Figur 4-10. Beskyttelse av enkeltisolert sporfelt mot forstyrrelser fra returstrøm med returleder

En metode å begrense strømmen i jordet kjøreskinne uten å eliminere den helt, er vist i Figur 4-11. Her er en returleder parallellkoplet med jordet kjøreskinne uten at det er etablert isolert skjot i jordet kjøreskinne i hver ende. Nedføring midt på strekningen er her ikke nødvendig. Denne løsningen reduserer returstrøm i jordet kjøreskinne, og dermed også spenningsforskjell mellom tilførselskretsen og returkretsen. I dette tilfellet blir imidlertid ikke spenningsstigningen redusert like mye som ved løsningen vist i Figur 4-10, og det er fremdeles en risiko for at det kan oppstå påvirkninger på sporfeltet. Ved bruk av et stort antall parallellkoplete spor, returledere og jordledere, slik at kun en liten andel av returstrømmen går i jordet kjøreskinne, kan imidlertid dette også være en effektiv beskyttelsesmetode.

Figur 4-11. Beskyttelse av enkeltisolert sporfelt med returleder som er parallellkoplet jordet kjøreskinne

Praktisk utføres returkrets på stasjoner med enkeltisolerte sporfelt som vist i Teknisk regelverk [1], gjengitt i Figur 4-12. Denne figuren er vist med dobbeltisolerte sporfelt på tilgrensende strekninger. I figuren er tykk svart strek jordet kjøreskinne, tykk rød strek er isolert kjøreskinne, tynn grønn strek er langsgående jordleder, tynn sort strek med prikker er returleder.



Figur 4-12. Prinsipiell kopling av returkrets på stasjon med enkeltisolert sporfelt. Kilde: Bane NOR Teknisk regelverk [1].

4.4 Dobbeltisolert sporfelt

Den andre varianten av 95/105 Hz sporfelt er dobbeltisolert (sporfelt type 3). Denne varianten er tillatt benyttet på alle strekninger, men den er lite brukt på stasjoner fordi den blir mer komplisert og kostbar her. På linjestrekninger mellom stasjoner er dette den eneste typen av 95/105 Hz sporfelt som Teknisk regelverk tillater. Denne sporfeltypen er tillatt brukt på sporavsnitt uten returleder med lengde inntil 1000 meter, og på sporavsnitt med returleder med lengde inntil 1250 meter.

Figur 4-13 viser prinsipiell kopling av et dobbeltisolert sporfelt, i dette tilfellet med tilgrensende strekninger uten sporfelt.

Teknisk regelverk beskriver også en type midtmatet dobbeltisolert sporfelt (sporfelt type 4) som er i bruk enkelte steder i landet. Det er ikke tillatt å etablere denne typen ny. Type 4 er ikke behandlet i denne rapporten.

Ved dobbeltisolert sporfelt er begge kjøreskinnene isolert fra jord. Returstrøm fordeles likt mellom kjøreskinner ved hjelp av filterimpedanser. Filterimpedansene har metningskarakteristikk som sikrer forbindelse med lav spenning også ved kortslutning i den ene tilkoplingen eller i en kjøreskinne.

Ettersom returstrøm fordeles likt mellom de to kjøreskinnene, blir spenningsforskjellen over kjøreskinnene i sporavsnittet likt i de to skinnene. Dette fører til at spenningsforskjellen mellom skinnene ved tilførselskretsen og ved returkretsen blir liten.

Ved dobbeltisolert sporfelt kan utstyr jordes til kjøreskinnene. Utstyr som er jordnet til kjøreskinnene fører til avledning fra kjøreskinnene til jord via fundamenter.

Lekkasje av sporfeltstrøm mellom kjøreskinnene opptrer i større omfang ved dobbeltisolert sporfelt enn ved enkeltisolert sporfelt, som følge av:

- Lekkasje via filterimpedanser. Hver filterimpedans kan antas å lekke noe sporfeltstrøm mellom kjøreskinnene. For sporfelte med mange tilkoblede filterimpedanser, kan dette summere seg til en stor strøm. Ved prosjektering antas vanligvis at dette setter en praktisk øvre grense på 4 filterimpedanser per sporavsnitt. I noen tilfeller med stor avledning vil det heller ikke være mulig å installere så mange som 4 filterimpedanser på ett sporavsnitt.
- Lekkasje mellom kjøreskinnene via jord som følge av jordelektrodevirkning fra fundamenter som er koplet rett til kjøreskinnene. For mastefundamenter som er satt ned i masser med lav jordresistivitet, kan avledningen av sporfeltstrøm ved hvert mastefundament være opp mot 100 mA. På en strekning som har 10 master tilknyttet hver kjøreskinne, vil det totalt kunne lekke om lag 1-1,5 A sporfeltstrøm fra den ene kjøreskinna til den andre via jord.

Så lenge avledningen mellom kjøreskinner og jord er balansert og omtrent lik for de to kjøreskinnene, gir ikke det stor spenningsforskjell mellom kjøreskinnene. Det er imidlertid vanskelig å sikre perfekt balanse i avledningen mellom de to kjøreskinnene. I praktiske tilfeller vil det oppstå større avledning fra den ene kjøreskinna enn den andre. Når forskjellen i avledning av driftsstrømmer ved 16 2/3 Hz for de to kjøreskinnene blir stor, vil det føre til en spenningsforskjell ved 16 2/3 Hz mellom kjøreskinnene.

Ved ulik kontaktmotstand i tilkoplingen mellom filterimpedans og kjøreskinner, vil serieimpedansen Z_s for de to kjøreskinnene bli ulik. Det kan føre til spenningsforskjell ved 16 2/3 Hz mellom kjøreskinnene. En beregning (ikke gjengitt her) tilsier at forskjell i kontaktmotstand på mer enn om lag 40 mΩ kan føre til en større spenningsforskjell mellom kjøreskinnene enn 15 V. Høy kontaktmotstand i tilkoplingen mellom en filterimpedans og spor ble identifisert som årsaken til en omfattende driftsstans etter arbeid ved Bekkelaget stasjon på sensommeren 2019. Problemet var ikke synlig ved visuell inspeksjon, og ble først funnet etter en lang driftsstans.

For dobbeltisolerte sporfelt vil flere tiltak være aktuelle for å begrense de ulike formene for påvirkning:

1. Fagmessig montasje av filterimpedanser.

Montasjen av filterimpedanser må utføres og kontrolleres slik at kontaktmotstanden i koplingspunktene blir lav.

2. Balansert tilkopling av fundamenter/elektroder til kjøreskinner.

Balansert tilkopling av fundamenter og elektroder til de to kjøreskinnene er hovedregelen i Teknisk regelverk. Dette er den billigste og enkleste praktiske utførelsen. Det gir imidlertid en ikke ubetydelig risiko for at man ikke klarer å balansere avledningen fra de to kjøreskinnene godt nok. Man må etter idriftsettelse være forberedt både på å etterjustere sporfeltet og på å flytte utjevninger mellom kjøreskinner for å sikre bedre balanse i avledningen fra hver kjøreskinne til jord.

3. Jording av objekter via spenningsbegrensende komponent, VLD-F.

Fundamenter med stor avledning til jord, inkludert fundamenter for kontaktledningsmaster, kan koples til returkretsen via en spenningsbegrensende komponent, VLD-F som spesifisert i standardene EN 50122-1 og i EN 50526-2. En VLD-F er en åpen krets i normal drift. Når spenningen over komponenten overstiger en gitt grenseverdi, kortslutter den med svært hurtig virkning (størrelsesorden 1-2 ms). Dette gjør at ved kortslutning til objektet som er utjevnet, kan en VLD-F anses som en fast forbindelse. Historisk har ikke komponenten vært mye brukt i Norge, men bruken er økende ettersom løsningen har lavere kostnad enn mange alternativer (se nedenstående punkter).

4. Jording av objekter med stor avledning via filterimpedans.

Filterimpedansen sikrer balansert tilkopling til dobbeltisolert sporfelt, og sikrer at tilkoblede objekter ikke fører til ubalansert avledning fra kjøreskinnene. Se imidlertid tidligere merknad om at praktisk største antall filterimpedanser på et sporavsnitt vanligvis settes til 4 av hensyn til at det vil oppstå lekkasje av sporfeltstrøm mellom kjøreskinnene via filterimpedansene. Filterimpedanser er også kostbare komponenter.

5. Langsgående jordleder / returleder

Det kan etableres langsgående jordleder eller returleder forbi sporavsnittet. Alle jordelektroder og jordet utstyr skal da koples til den langsgående jordlederen / returlederen og ikke til kjøreskinnene. Denne utførelsen medfører at avledningen fra kjøreskinnene til jord blir kraftig redusert sammenliknet

med utførelser med direkte tilkoping til kjøreskinner. Den langsgående jordlederen skal tilkoples sporet via midtpunktet for alle filterimpedanser som er tilkopleet et sporavsnitt. Det vil normalt si en filterimpedans i hver ende av sporavsnittet, men det kan i noen tilfeller finnes flere filterimpedanser på et sporavsnitt. Parallellkoplingen med sporet fører til at en andel av returstrømmen går i langsgående jordleder og ikke i kjøreskinnene. Jordlederen må derfor dimensjoneres tilstrekkelig for denne strømmen.

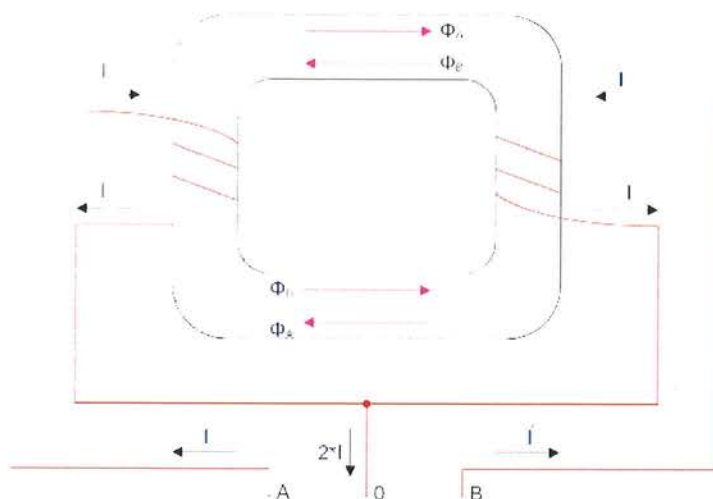
Dersom det benyttes langsgående jordleder / returleder som alle objekter jordes til, vil et dobbeltisolert sporfelt bli svært robust også ved store returstrømmer fra tog.

Sporfeltets

4.5 Bruk av filterimpedanser

Filterimpedanser brukes for balansert tilkoping av returstrøm til dobbeltisolert sporfelt. Ved dobbeltisolerte sporfelt er bruk av filterimpedanser nødvendig. Det er ikke nødvendig å bruke filterimpedans i noen andre sammenhenger enn ved dobbeltisolert sporfelt. Filterimpedansen er bygget opp med en todelt vikling på en jernkjerne, slik at de to halvdelene av viklingen blir magnetisk koplet som i en transformator.

Figur 4-15 viser den prinsipielle virkemåten for en filterimpedans. Lik strøm føres inn i tilkoping A og B og summeres til dobbel strøm ut av tilkoping 0. For all strøm som flyter med lik fase inn i A- og B-viklingen for en filterimpedans, blir filterimpedansen en svært lav impedans som slipper strømmen gjennom med minimalt spenningsfall. For sporfeltstrøm, som ikke har lik fasevinkel i A- og B-tilkoplingen, blir filterimpedansen derimot en stor spole. Filterimpedansen vil tilnærmet blokkere slik strøm. Merk likevel at spolevirkningen gjør at noe sporfeltstrøm lekker gjennom filterimpedansen.



Figur 4-15. Prinsipiell virkemåte for en filterimpedans. Magnetisk fluks fra de to viklingene, Φ_A og Φ_B er omtrent like store og med motsatt fortegn slik at de kansellerer hverandre.

Filterimpedanser kan gå i metning når det totale magnetfeltet i jernkjernen blir for stort. Det kan spesielt skje ved stor spenningsforskjell mellom de to kjøreskinnene. Vanlig belastning, inkludert kortslutning med stor strøm, påvirker ikke magnetfeltet i jernkjernen så lenge strømmen er balansert. Filterimpedansen kan derfor overbelastes mye uten at det forstyrrer funksjonen. Imidlertid vil den gå i metning ved kortslutning til den ene kjøreskinnen. Det innebærer at impedansen oppfører seg som en direkte forbindelse mellom de tre tilkoplingspunktene. I denne situasjonen vil sporfeltstrøm ledes gjennom impedansen, og sporfeltet blir belagt.

Det samme kan oppstå dersom spenningen mellom kjøreskinnene blir høy av andre årsaker. Bane NOR sin tekniske spesifikasjon for filterimpedanser [9] krever at impedansen skal gå i magnetisk metning ved spenning mellom kjøreskinner som er høyere enn 20 – 30 V effektivverdi.

Det er spesifisert to typer filterimpedanser: Type 1 med merkestrøm 600 A, og Type 2 med merkestrøm 800 A. Tabell 4-4 gjengir krav til overbelastningsevne for filterimpedanser. Som tabellen viser, har begge typene en betydelig overbelastningsevne. Med den varierende belastningen som oppstår i jernbanenettet, der hvert tog maksimalt tillates å trekke 700 A kortvarig, vil type 1 i de aller fleste tilfeller utgjøre en tilstrekkelig dimensjonering.

Tabell 4-4. Overbelastningsevne for filterimpedanser.

Tid	Type 1 [A]	Type 2 [A]
Merkestrøm	600	800
2 timer	800	1 000
30 minutter	950	1 200
5 minutter	1 600	2 000
1 minutt	3 500	4 000
1 sekund	20 000	20 000

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	26 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

5 BANESTRØMFORSYNING OG RETURKRETS VED FOLLOBANEN INNFØRING OSLO S

5.1 Innledning

Vurderinger og beregninger utført i dette kapitlet er basert på utførelse som beskrevet i mottatte dokumenter angitt i dokumentlista i vedlegg 1. Ved kommentering av rapporten i etterkant er det mottatt kommentar om at returskinne i ICH A og jordingsforbindelse mellom Follobanen og Kongshavntunnelen i ICH A nå er fjernet. Returkablene er skjøtt over i hverandre slik at kablene fra ICH B går ubrutt fram til Oslo koplingshus. Dette vil påvirke resultatene ved at returstrømmen får færre ledere å fordele seg på strekningen mellom returopptaket ved ICH B og Oslo koplingshus. Returstrømmen i gjenværende ledere og i kjøreskinner mellom ICH B og Oslo koplingshus vil da bli høyere enn det som er estimert i avsnittene under.

Det er i avsnitt 5.6 estimert at jordforbindelsen kan føre inntil 15,1 % av den totale returstrømmen. Når forbindelsen fjernes, må denne strømmen fordeles på de gjenværende kjøreskinner, jordledere og returledere. Det vil kunne gi en økning i strømbelastning i de resterende ledere og kjøreskinner på inntil

$$\left(\frac{100}{100 - 15,1} - 1\right) \cdot 100 \% = 17,8 \%$$

sammenliknet med de verdier som er beregnet i dette kapitlet. Marginer mot forstyrrelser på sporfeltene blir redusert tilsvarende, selv om det forventes at disse marginene fremdeles vil være store.

5.2 Banestrømforsyning

Oppbygning av banestrømforsyningen og returkretsen ved Oslo S i retning mot Follobanen og Østfoldbanen er vurdert på bakgrunn av dokumenter angitt i dokumentlista i vedlegg 1.

Figur 5-1 viser det overordnede prinsippet for banestrømforsyning på Oslo S. Stasjonsområdet mates via egne brytere fra Oslo koplingshus. Mellom stasjonsområdet og tilgrensende jernbanelinjer i alle retninger er det åpne seksjoneringer i kontaktledningen (seksjonsfelt eller seksjonsisolator). Alle spor som går ut fra stasjonen mates med kabler fra Oslo koplingshus tilkoplede kontaktledningsnettet på utsiden av disse seksjoneringene ved stasjonsgrensen.

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	27 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømdistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

Figur 5-1. Prinsipp banestrømforsyning Oslo S.

Utenfor stasjonsgrensen er det ulike elektriske utforminger. De fleste er utforming C eller D (sugetransformatorsystem med returleder med eller uten nullfelt).

Ved utmating til kontaktledningen på Hovedbanen, Drammenbanen og Østfoldbanen er det etablert en sugetransformator slik at det trekkes like mye strøm ut fra returkretsen og inn i returledere, som det tilføres kontaktledningen via kabler i disse punktene. Dette fører til at returstrømmen i kjøreskiner og jordingsanlegg blir begrenset mellom koplingshuset og utmatingspunktet for disse kabelforbindelsene.

Ved utmating til kontaktledningen for Gardermobanen og Gjøvikbanen (Gjøvikbanen er ikke vist i prinsippskissen) er det ikke etablert noen slik sugetransformator. Det er ikke tilgjengelig returkretsskjema for innføringen til Oslo S på Bane NOR sin elkraftportal for disse strekningene. Her kan metoden som er beskrevet i Teknisk regelverk for å begrense strømmen i sporene uten bruk av sugetransformator være benyttet. Det er også mulig at man for disse forbindelsene kan ha akseptert at det vil gå noe returstrøm i kjøreskinnene gjennom stasjonen, slik at man har koplet kretsen som angitt for stasjoner uten returledere. Hvis det er gjort, så er tillatt maksimal lengde for sporavsnitt på strekningen 250 meter i henhold til Teknisk regelverk.

Follobanen får elektrisk utforming E (autotransformatorsystem med seksjonert kontaktledning), der det står autotransformatorer ved hhv. Oslo koplingshus (km 0,9), Åsland (km 12,0) og Ski (km 23,5). Strømbelastning fra tog på strekningen vil følge kjøreskiner, returledere og jordledere som er koplet parallelt med sporet, fram til nærmeste autotransformator på hver side. Andelen av strømmen som ledes gjennom kjøreskiner på strekningen mellom stasjonsgrensen og returoptaket ved koplingshuset, bestemmer hvor stor forstyrrelse sporfeltene på denne strekningen blir utsatt for.

Merk at den inntegnede mellom returoptak for Follobanen og jordingsanlegg/returkrets for Kongshavntunnelen i ettertid er fjernet.

Mulige metoder for å unngå at strømmen i kjøreskinnene fører til uakseptabel påvirkning på sporfeltene på denne delstrekningen, er å:

- sikre at returstrømmen ikke går i sporfeltene ved bruk av isolerte skjøter i jordskinne på strekningen og tilkopling mellom retur/jordingsanlegg kun i ett punkt, eller å
- kople mange ledere parallelt med sporet slik at kun en liten strøm fra tog på Follobanen vil føres gjennom kjøreskinne for ett enkelt sporavsnitt. Hvis strømmen i hver enkelt jordet kjøreskinne blir tilstrekkelig lav vil det oppstå så stor spenningsforskjell over sporavsnittet, og sporfeltet vil da ikke bli påvirket.

For returstrøm mellom Follobanen og koplingshuset, er metoden med mange parallelle ledere valgt.

Kontaktledningen i Kongshavntunnelen er forsynt fra Østfoldbanen inn mot stasjonen. Avsnitt 5.4 beskriver og vurderer matingen her.

5.3 Returkrets for Follobanen og Østfoldbanen

For å få oversikt over koplningene i returkretsen mellom Oslo koplingshus og utmatingene til Follobanen og Østfoldbanen er det ved utarbeidelse av denne rapporten gått detaljert gjennom oppbygningen av returkrets og jordingsanlegg på strekningen. Det er utarbeidet et oversiktsskjema, vist i vedlegg 2.

Omtrent ved km 2,0, noen hundre meter fra avgreningen av Kongshavntunnelen fra Blixtunnelen, er det etablert en forbindelsestunnel mellom Kongshavntunnelen og Blixtunnelen. Inne i forbindelsestunnelen er det to tekniske rom: ICH B er nær sporet ved Follobanen, og ICH A er nær sporet ved Kongshavntunnelen. Det er en retursamleskinne i hvert av de tekniske rommene, og retursamleskinnene er forbundet med 8 x 240 mm² Al returkabler.

Strekningen mellom Oslo koplingshus og ICH A er om lag 1,5 km lang. På denne strekningen er det etablert 8 x 240 mm² Al returkabler.

Denne første delen av Blixtunnelen mellom munningen og avgreningen av Blixtunnelen, kalles «Klypen». Her går det i hovedsak 4 spor gjennom Blixtunnelen:

- Østfoldbanen utgående (ØB1, via Loenga)
- Østfoldbanen inngående (ØB2, til Kongshavntunnelen)
- Follobanen utgående (FB 2)
- Follobanen inngående (FB 1)

I tillegg går et spor for Østfoldbanen (ØB5) i dagen over den første delen av Blixtunnelen og sammen med ØB1 ved Loenga. Jordet kjøreskinne for alle sporene på Loenga er koplet parallelt med dette sporet.

Etter avgreningen av Kongshavntunnelen fra Blixtunnelen, deler også Follobanen seg i to separate løp med tverrforbindelsestunneler hver 500 meter.

Skjemaet i vedlegg 2 viser at jordet kjøreskinne for alle sporene er koplet til returkretsen på tilgrensende banestrekninger videre via filterimpedanser. Det er dermed laget parallelle veier for returstrøm via jordet kjøreskinne for de enkeltisolerte sporfeltene på stasjonen mellom forbindelsestunnelen og Oslo koplingshus.

Forbindelsen mellom ICH A og Kongshavntunnelen er en jordleder som kopler returkretsen for Kongshavntunnelen sammen med returkretsen for Follobanen. Bane NOR har ved kommentering av denne rapporten opplyst at forbindelsen har blitt fjernet. Da blir ikke returkretsen og jordingsanlegget for Kongshavntunnelen en parallell strømvei for returstrømmen. Strømmen vil derfor i stedet øke tilsvarende i returlederne og i kjøreskinnene og jordingsanlegget for Follobanen.

Det er koplet mange langsgående jordledere på strekningen. Jordingsplanen viser varierende antall langsgående jordledere på strekningen, men på størstedelen av strekningen er det 4 – 5 langsgående jordledere i kabelkanal. Jordledere i kabelkanal er 120 mm² Al isolert (IX). Det er videre også langsgående jordledere i tunneltak for utjevning av hengemaster, med 95 mm² uisolert Cu. Enkelte av

jordlederne er seksjonerte med ett tilkoplingspunkt til resten av jordingsanlegget, men de fleste er koplet til øvrig jordingsanlegg og returkrets i flere punkter slik at de danner en parallell strømvei. En andel av returstrømmen fra Follobanen vil derfor flyte i slike parallellkoblede jordledere.

Figur 5-2 viser skjematisk koplingene for returkretsen ved tilkopling til Follobanen. De innregnede kjøreskinnene har flere sammenkoplinger, og er i tillegg parallellkoplet med langsgående jordledere, som ikke er tegnet inn i skjemaet.

Matingene mot Østfoldbanen er som tidligere beskrevet utført via sugetransformator for hver av utmatingene. Prinsippeskjema for mating til Østfoldbanen er vist i Figur 5-3 i avsnitt 5.4.

5.4 Kongshavntunnelen og sugetransformator 4.1

Det er erfart problemer med sugetransformator 4.1 i Kongshavntunnelen, med brannskade på en høyspenttilkopling for sugetransformatoren. Bane NOR ønsker derfor at det gjøres en vurdering av behovet for denne sugetransformatoren.

Sporet i Kongshavntunnelen forsynes fra Østfoldbanens venstre spor (innkommende). Dette sporet har tosidig mating, fra Oslo koplingshus og fra Holmlia omformerstasjon, km 10,8. Figur 5-3 viser skjematisk mating for Kongshavntunnelen og Østfoldbanen.

Sugetransformator 4.1 er plassert nær enden av Kongshavntunnelen mot påkopling for Østfoldbanen, km 2,82. Denne er koplet mot returledere som går inn til Oslo koplingshus. Med denne koplingen blir sugetransformatoren kun belastet når det befinner seg tog i Kongshavntunnelen. Som angitt i avsnitt 3.4, vil sugetransformatoren som følge av metning ikke ha noen virkning ved kortslutning.

Strømveien for tur- og returstrøm er angitt i Figur 5-3 med hhv. røde og svarte piler. Når sugetransformatoren er belastet, blir returstrømmen sendt fra toget, via returkretsen til Oslo kbh, og med returkablene ut igjen til sporet ved Østfoldbanen via sugetransformator 4.1. Herfra blir returstrømmen fordelt med en andel mot sugetransformator 2 og en andel mot sugetransformator 4, gitt av hvor stor andel av matingen som kommer fra henholdsvis Oslo koplingshus og Holmlia

omformerstasjon. For den delen av matingen som kommer fra Oslo koplingshus, vil returstrømmen så gå tilbake igjen til Oslo koplingshus via sugetransformator 2 og 2.1.

Ut ifra denne beskrivelsen er det ikke funnet sannsynlig at de oppståtte problemene med kabeltilkoplingene ved sugetransformator 4.1 er forårsaket av kretsens kopling. Sugetransformatoren framstår imidlertid som unødvendig. Den vil til en stor grad virke mot sin hensikt, ved at returstrømmen blir sendt i en unødvendig sløyfe via Oslo koplingshus og returkablene for sugetransformator 4.1. Dette gir en unødvendig strøm gjennom sporfeltene på Oslo S. Uten sugetransformatoren hadde strømmen i stedet gått direkte ut fra Kongshavntunnelen ved tunnelmunningen mot Østfoldbanen.

Det stilles spørsmål ved at normal mating av kontaktledning til Kongshavntunnelen er fra Østfoldbanen. Det vurderes at det her ville være mer naturlig å mate strekningen fram til sugetransformator 4.1 fra Oslo koplingshus via stasjonsavgangene og KL-kiosk 4. Bryter 10-208-L må da være åpen i normalttilfellet. En slik mating ville ha noen fordeler sammenliknet med dagens mating:

- Mating til Kongshavntunnelen får samme prinsipp som mating til øvrige spor på Oslo S og i første del av Blixntunnelen («Klypen»). Normal mating for alle øvrige spor på stasjonen kommer fra Oslo koplingshus. Likt prinsipp for matingen gir et mer oversiktlig og gjenkjennelig koplingsbilde ved planlegging og gjennomføring av arbeider på kontaktledningen.
- Kortslutninger koples fra momentant, det vil si raskere enn 0,1 s, ved mating fra Oslo koplingshus. Ved mating fra Østfoldbanen vil det gjenstå en betydelig kortslutningsstrøm fra Holmlia omformerstasjon i ytterligere 0,2 s etter frakopling fra Oslo-siden. Oppvarming av jordledere ved kortslutning blir derfor større ved mating fra Østfoldbanen enn ved mating fra Oslo kbh.

Det foreslås derfor å vurdere endring av normalmatingen for Kongshavntunnelen. I begge tilfeller kan sugetransformator 4.1 med fordel fjernes.

5.5 Vurdering av sannsynlighet for påvirkning på sporfelter inn mot Oslo S

Bane NOR sitt tekniske regelverk [1] stiller krav til hvordan returkrets på stasjoner med enkeltisolerte sporfelt med returleder skal koples. Kravene skal sikre at returstrøm ledes forbi stasjonen i returlederen uten at den belaster jordet kjøreskinne for enkeltisolerte sporfelt på stasjonen. Den angitte utførelsen gir svært lav sannsynlighet for uakseptabel påvirkning på sporfelte på stasjonen. Prinsippet er vist i Figur 4-12 i avsnitt 4.3.

Returkretsen på Oslo S er ikke bygget etter dette prinsippet, heller ikke returkretsen for de nye sporene mot Follobanen og Østfoldbanen. Returkretsen er i stedet koplet gjennomgående i kjøreskinnene på den måten Teknisk regelverk angir for stasjoner som ikke har returleder. For det tilfellet angir Teknisk regelverk at maksimal lengde for et sporavsnitt skal være 250 meter. Sporiseringskjemaet viser at de fleste sporavsnitt er kortere enn 250 meter, men sporfeltene i Kongshavntunnelen er opp mot 700 meter lange.

Det er imidlertid etablert tiltak som begrenser faren for påvirkning på sporfelt, som ikke er beskrevet i Teknisk regelverk.

Mating til Østfoldbanen skjer via sugetransformator 1.1 (utgående retning ved Loenga) og sugetransformator 2.1 (innkommende retning ved Loenga). Disse sugetransformatorene sikrer at strøm som mates ut til Østfoldbanen via kabelavgangene ledes tilbake i tilhørende returkabler, og setter strømmen som går i kjøreskinner til nær 0 A. Denne løsningen antas å ha omtrent like god virkning som løsningen fra Teknisk regelverk ved normal drift. Ved kortslutningsstrømmer vil sugetransformatorene gå i metning. Det kan da oppstå en kortvarig, men høy spenning ved 16 2/3 Hz over sporfeltets returkrets, som gjør at sporfeltreet kan falle et kort øyeblikk. Løsningen er videre mer kostbar å etablere enn løsningen i Teknisk regelverk, ettersom det er behov for en ekstra sugetransformator ved stasjonsgrensen for hvert av de aktuelle sporene.

Mating til Follobanen skjer uten bruk av sugetransformatorer. Her vil returstrømmen fordele seg mellom alle de parallellkoblede sporene, de 8 returkablene som er etablert til koplingshuset, og jordingsanlegget med varierende antall parallellkoblede jordledere. Alle disse parallellkoplingene fører til at kun en liten andel av returstrømmen vil gå i jordet kjøreskinne for ett enkeltisolert sporfelt. Denne løsningen vil gi større forstyrrelser på sporfeltet enn utførelsen som er beskrevet i Teknisk regelverk. Likevel kan det store antallet parallelle ledere føre til at strømmen i hver enkelt kjøreskinne blir lav nok til at det ikke påvirker sporfeltet uakseptabelt. Det er gjort en vurdering i avsnitt 5.6 av hvordan strømfordelingen i dette tilfellet kommer til å bli. Konklusjonen fra den vurderingen er at strømmen som går i hver enkelt kjøreskinne vil bli så lav at det i alle tilfeller blir en stor margin mot den tidligere gjeldende grenseverdien for spenning mellom kjøreskinner på 15 V. Ifølge estimatene må det forventes at inntil om lag 12 % av returstrømmen går i jordet kjøreskinne for et sporfelt. Ved en driftsstrøm på 1050 A, en impedans i jordet kjøreskinne på $0,06 + j 0,18 \Omega/\text{km}$, og en sporfeltlengde på maksimalt 250 m, kan det beregnes en spenningsforskjell over jordet kjøreskinne på 6,0 V ved normal drift, og 4,6 V mellom kjøreskinnene ved sporfeltets returkrets. Denne spenningen vurderes som så liten at det ikke er sannsynlig at det vil oppstå uakseptable påvirkninger på sporfeltet som følge av dette.

Dersom tilkoplingen av sporene for Follobanen skulle endres slik at det blir som beskrevet i Teknisk regelverk for stasjoner med returleder, måtte det sikres at returstrømmen går i returforbindelsene fra ICH A til koplingshuset uten at det finnes parallelle strømveier via kjøreskinner på stasjonen. Dette kan oppnås på følgende måte:

- Filterimpedanser km 1,829 for begge sporene på Follobanen fjernes. Langsgående jordledere for Follobanen seksjoneres også her.
- Det skal ikke være koplinger mellom returledere og øvrig returkrets/jordingsanlegg for returledere mellom ICH B og Oslo koplingshus. Dette er oppnådd ved at jordforbindelsen mellom Kongshavntunnelen og ICH A er fjernet.

Returstrømmen for Follobanen vil da følge de 8 returlederne til koplingshuset uten at det finnes andre forbindelser til returkretsen/jordingsanlegget på stasjonsområdet. Sannsynligheten for uakseptable påvirkninger på sporfeltene blir da ytterligere redusert.

Sporfelte i Kongshavntunnelen er enkeltisolerte, med lengde inntil 700 meter. Ved sporfelt som er lengre enn 250 meter krever Teknisk regelverk bruk av returleder. Det er beskrevet at koplingen skal være med åpen krets i sporet ved innkjør, som vist i Figur 4-12. Dette er ikke oppfylt med koplingen av returkretsen som er brukt i Kongshavntunnelen. Fordi sugetransformator 2 og 4 styrer returstrømmen via matekablene for Østfoldbanen vurderes det imidlertid som lav sannsynlighet for at det kan oppstå påvirkninger på sporfeltene som følge av strøm i kjøreskinner her. Dette gjelder både ved eksisterende og foreslått ny kopling av kontaktledning og sugetransformator 4.1.

Endring av returkretsen for Kongshavntunnelen slik at det blir i samsvar med kravet i Teknisk regelverk, vil innebære å bryte sammenkoplingen av returkretsen mot Østfoldbanen ved påkoplingen mellom Kongshavntunnelen og Østfoldbanen.

5.6 Estimat over strømfordeling mellom ledere

Mellom returtilkoplingen for Follobanen ved ICH B og koplingshuset Oslo S går det mange strømveier. De viktigste strømveiene er:

- Returkabler mellom ICH A og koplingshus: 8 x 240 mm² Al
- Kjøreskinner mellom ICH B og koplingshus: Varierende antall spor. Størstedelen av strekningen har 3 spor, og dette legges til grunn.
- Jordingsanlegg mellom ICH A/B og koplingshus. Varierende antall jordledere. Hele strekningen har minst 3 x 120 mm² Al jordledere, dette legges til grunn.

Merknad: Ved endringen som er gjort ved koplingen mellom Kongshavntunnelen og Follobanen, er antall kjøreskinner og jordledere redusert på deler av strekningen. Strømbelastningen for gjenværende kjøreskinner vil derfor være høyere estimatene i dette kapittelet tilsier.

Strømfordelingen er gitt av forholdet mellom impedans i hver av de ulike kretsene. Impedansen er en viserstørrelse representert med et komplekst tall:

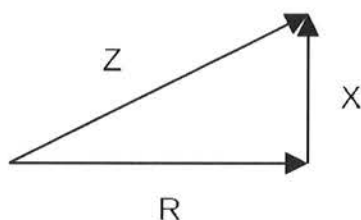
$$Z = R + jX = R + j\omega L$$

der:

- R er resistansen i hver enkelt leder/krets angitt i Ω
- X er kretsens totale reaktans angitt i Ω
- $\omega = 2\pi f$ er vinkelfrekvensen angitt i rad/s. Ved driftsfrekvens f på 16 2/3 Hz er vinkelfrekvensen 104,7 rad/s.
- L er kretsens induktans angitt i H.

Merk at mens resistans er en egenskap som kan beregnes for hver enkelt leder, er induktans en egenskap ved en strømsløyfe, bestemt av magnetfeltet som oppstår i strømsløyfen. Resistans og induktans er uavhengige parametre.

Viserdiagrammet i Figur 5-4 viser hvordan resistansen R og reaktansen X summeres i viserplanet.

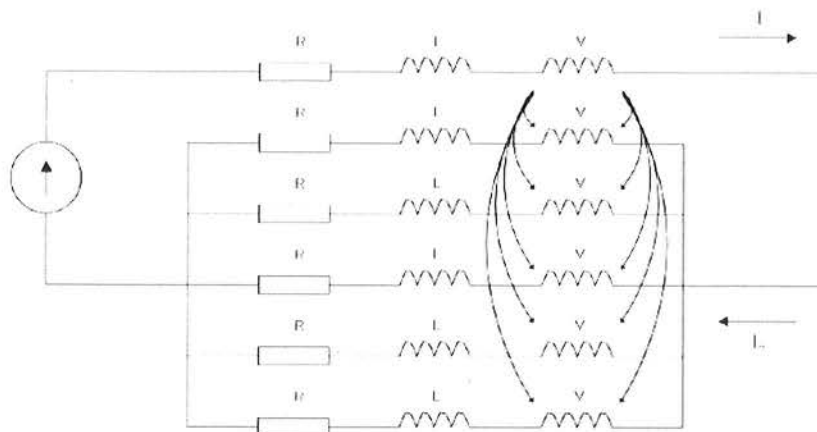


Figur 5-4. Viserdiagram for impedans

Kretsens induktans L er gitt av lederens egeninduktans med returvei i jord L_i og lederens gjensidige induktans M_{ij} med hver av de andre lederne. Dette inkluderer også ledere som fører turstrøm. For en komplett beskrivelse av egen- og gjensidige induktanser i et slikt system angis induktansen L som en $n \times n$ -matrise, n er antall ledere i systemet. Diagonalelementene er egeninduktansen L_i for hver enkelt ledersløyfe med retur i jord, og de ikke-diagonale elementene M_{ij} er den gjensidige induktansen mellom ledersløyfene som leder i og j danner med retur i jord. Dette er en relativt omfattende modellering som avhenger av hver enkelt leders fysiske plassering sammenliknet med hver av de andre lederne.

I denne rapporten er det søkt å forenkle denne sammenhengen. Det er derfor i stedet etablert et anslag for den totale induktansen L for hver leder.

Induktansen er slik at for to ledere som fører strøm i hver sin retning, får egeninduktansen for hver leder og den gjensidige induktansen mellom de to lederne, alltid motsatt fortegn. For ledere som ligger fysisk nær hverandre blir induktansen for strømsløyfen som utgjøres av de to lederne liten, og induktansen øker med økende avstand mellom lederne.



Figur 5-5. Prinsippkjema for parallellkoblede ledere i returstrømkretsen med gjensidig induktiv kopling med en turløder.

Det finnes et formelverk for beregning av den gjensidige induktansen mellom to ledere. Formlene er blant andre angitt i Fahrleitungen elektrischer Bahnen [8]. En formel som brukes for å anslå dette, er:

$$M_{ij} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_j}{g_{ik}} \right)$$

der

- μ er magnetisk permeabilitet i mediet rundt lederen. For ikke-magnetiske medier (som luft) settes denne til $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$
- D_j er jordavstanden, dvs. en tenkt dybde ned til der hvor en tenkt leder i jord der returstrømmen i jord vil gå. Denne kan etter formel i den samme kilden beregnes til å bli 1616 m ved driftsfrekvens på 16 2/3 Hz og en jordresistivitet på 100 Ωm .
- g_{ik} er den geometriske middelavstanden mellom de to lederne. For runde ledere eller ledere i stor avstand fra hverandre sammenliknet med lederdimensjonene, kan denne settes til den direkte avstanden mellom senter for hver av lederne.

Ut ifra dette kan man beregne den gjensidige induktansen mellom to ledere med diameter på 10 mm i ulik avstand fra hverandre. Egeninduktansen for en leder med diameter 10-20 mm med retur i jord ligger typisk i størrelsesorden 2,5 mH/km, mens den vil være noe høyere for kjøreskinnene. Tabell 5-1 gir oversikt over estimert reaktans for en leder på bakgrunn av avstand g til leder som fører turstrøm.

Tabell 5-1. Gjensidig induktans ved ulik avstand

Avstand g [m]	Egeninduktans [mH/km]	Gjensidig induktans M [mH/km]	Total induktans L [mH/km]	Reaktans X [$\Omega\text{/km}$]
0,01	2,50	2,40	0,1	0,01
0,1	2,50	1,94	0,56	0,06
1	2,50	1,48	1,02	0,11
2	2,50	1,34	1,16	0,12
5	2,50	1,16	1,34	0,14
10	2,50	1,02	1,48	0,15
20	2,50	0,88	1,62	0,17
50	2,50	0,70	1,8	0,19
100	2,50	0,56	1,94	0,20

Merk at dette er en tilnærming, der egeninduktansen ikke er beregnet detaljert for hver ledertype, og noen flere detaljerte effekter med antatt lav påvirkning på resultatet ikke er hensyntatt.

Resistansen R for ulike ledertyper er gitt av ledermaterialets resistivitet og tverrsnittsareal. Følgende resistanser kan beregnes:

- 95 mm² Cu: $R = 0,177 \Omega/\text{km}$
- 120 mm² Al: $R = 0,221 \Omega/\text{km}$
- 240 mm² Al: $R = 0,110 \Omega/\text{km}$

Som det framgår av disse verdiene, så er reaktansen for ledere som er forlagt tett på turstrømmen i PL og NL (nærmere enn ~ 1 m) liten sammenliknet med lederresistansen for ledere som har større tverrsnitt enn 240 mm² Al. Reaktansen i slike tilfeller kan neglisjeres uten at det gjøres en stor feil. For ledere som er forlagt i større avstand fra turstrømmen vil reaktansen få større betydning.

For kjøreskinner legges det til grunn angivelser for skinnens indre impedans som gitt i Fahrleitungen elektrischer Bahnen [8]. Her er impedansen ved lav strøm angitt til $0,06 + j 0,125 \Omega/\text{km}$, basert på målinger. Ved å legge til et estimat for ytre reaktans på $j 0,22 \Omega/\text{km}$, blir skinnens egenimpedans estimert til $0,06 + j 0,33 \Omega/\text{km}$, og sløyfens totale reaktans X varierer mellom 0,1 og 0,3 avhengig av fysisk avstand til tilhørende matekabler. Er avstanden ca 5-10 meter, blir den totale reaktansen X om lag $0,18 \Omega/\text{km}$.

Beregningen av strømfordeling er gjort med estimat for total impedans der returlederne er 0,1 m fra høyspenningskablene, mens kjøreskinner og jordledere er 10 m fra høyspenningskablene. Impedansene for de ulike strømveiene blir da som vist i Tabell 5-2.

Tabell 5-2. Impedans for ledere og kjøreskinner

Ledere	Impedans Z [Ω/km]
Returledere, 8 stk	$0,0138 + j 0,0075$
Langsgående jordledere, 3 stk	$0,074 + j 0,02$
Kjøreskinner, 3 stk	$0,020 + j 0,05$
Total verdi ved parallellkopling	$0,0074 + j 0,0041$

Ytterligere jordledere og kjøreskinner som ikke er modellert, vil bidra til å redusere den totale impedansen ved parallellkopling.

Tabell 5-3. Beregnet strømfordeling mellom ledere

Ledere	Andel strøm
Returledere, 8 stk	54,1 %
Langsgående jordledere, 3 stk	11,1 %
Kjøreskinner, 3 stk	35 %
Hver enkelt returleder	6,8 %
Hver enkelt jordleder	3,7 %
Hver enkelt kjøreskinne	11,7 %

Den summerte strømmen blir mer enn 100%. Dette er ikke en unøyaktighet i beregningen, men oppstår som følge av at strømmen i hver av lederne vil ha ulik fasevinkel.

Oppsummert forventes det at jordet kjøreskinne for et enkelt spor på den aktuelle strekningen fører om lag 12% av den totale returstrømmen fra Follobanen.

6 DIMENSJONERING AV RETURLEDERE OG JORDLEDERE

6.1 Generelt

Elektriske ledere dimensjoneres ut ifra ulike parametere. De viktigste er:

Termisk dimensjonering: Dimensjonering av retur- og jordledere gjøres med utgangspunkt i høyeste tillatte temperatur for lederen i normal drift og ved kortslutning. Teknisk regelverk krever at det skal brukes rimelige marginer i strømforutsetninger ved slik dimensjonering.

Grenseverdier for temperatur for ulike ledertyper fastsettes av leder- eller kabelprodusenten. Følgende forhold ligger til grunn ved fastsettelse av grenseverdier for temperatur:

- For kabler og isolerte ledere er høyeste temperatur fastsatt ut ifra hvor høy temperatur lederisolasjonen tåler.
- For opphengte, hardtrukne ledere (KHF og AHF) settes grenseverdi for å unngå gløding, som vil medføre svekket mekanisk styrke i lederen.
- For uisolerte glødde ledere (KGF, KGM, AGF, AGM), og hardtrukne ledere som ikke er opphengt, er det ikke fastsatt noen generell grenseverdi. Her må man med tilstrekkelig margin unngå at lederen smelter, alternativt at den blir så varm at materiale i direkte kontakt med lederen tar skade eller selvantenner.

Ulike standarder angir generelle grenseverdier for en del vanlige leder- og kabeltyper. Tabell 6-1 gir oversikt over de mest brukte grenseverdiene og hva som er kilden for dem.

Termisk dimensjonering tar utgangspunkt i lederens varmebalanse. Ved kontinuerlig belastning må tilstanden være slik at all tilført elektrisk varme (og i tillegg solinnstråling der det er relevant) blir kjølt vekk fra kabelen. For vurdering av kortslutning legges til grunn at all tilført varme under kortslutningsforløpet fører til oppvarming av ledermaterialet. Etersom tilført varmeeffekt er proporsjonal med kvadratet av strømstyrken, har strømstyrken svært mye å si for hvor varm lederen blir. For kjøling av lederen har isolasjonstykkelse, forlegning og omgivelsestemperatur stor innvirkning.

Elektrisk dimensjonering: Ledere kan overdimensjoneres termisk hvis det er behov for lavt spenningsfall over lederen. Slik overdimensjonering på grunn av elektriske forhold brukes normalt kun der det ved prosjekteringen identifiseres et særskilt behov for dette. For retur- og jordledere kan dette brukes for å begrense strøm i parallelle kretser, for å begrense spenningsfall mellom matestasjon og tog, eller for å begrense berøringsspenninger.

Redundans: Bane NOR sitt tekniske regelverk stiller krav om redundans for returledere, slik at det sikres at det alltid er en alternativ vei for strøm ved brudd i en leder eller kabel, for å unngå farlige spenninger. Det er ikke krav om at denne alternative strømveien skal dimensjoneres med termiske marginer. Det tillates en overtemperatur med begrenset varighet i lederne ved en slik hendelse (nøddrift, iht. NEN 62.75 [10] maksimalt 500 timer summert over kabelens levetid).

I dette kapitlet er det gjort en vurdering av den termiske dimensjoneringen av retur- og jordledere.

Tabell 6-1. Generelle grenseverdier for ulike leder- og kabeltyper

Ledertype	Temperatur kontinuerlig [°C]	Temperatur inntil 1 sekund [°C]	Kommentar
Opphengte hardtrukne ledere i kontaktledningsanlegg, med bevegelig avspenning (uten isolasjon)	80	130 (Al) 170 (Cu)	Kilde: EN 50119
Opphengte hardtrukne ledere med fast avspenning (uten isolasjon)	80	200	Kilde kontinuerlig temperatur: Antatt likt som bevegelig avspenning, hentet fra EN 50119. Kilde inntil 1 sekund: IEC 60865-1.
Glødde ledere, ledere som ikke utsettes for mekanisk strekk	-	300	Det gjelder ingen spesifikke krav, men noen forhold bør hensyntas: <ul style="list-style-type: none"> marginer mot lederens smeltetemperatur, fare for skader og brann for materialer som ligger i direkte kontakt med lederen NEK 440 bruker 300 °C etter kortslutning i sine eksempler, og det er vanlig å bruke dette som en veiledende verdi.
Kabler og isolerte ledere, PVC-isolasjon	70	160	Isolasjonen vil tørke ut og sprekke opp om den utsettes for temperatur over disse grensene. Verdiene er angitt i flere standarder: <ul style="list-style-type: none"> IEC 60502-1 (for kabler mellom 1 og 3 kV) IEC 60502-2 (for kabler mellom 6 og 30 kV) NEN 62.75
Kabler og isolerte ledere, XLPE/PEX eller EPR/HEPR	90	250	Verdiene er angitt i flere standarder: <ul style="list-style-type: none"> IEC 60502-1 (for kabler mellom 1 og 3 kV) IEC 60502-2 (for kabler mellom 6 og 30 kV) NEN 62.75 NEN 62.75 angir også at overtemperatur inntil 130 °C i inntil 500 timer summert over kabelens levetid er akseptabelt («nøddrift»).

6.2 Dimensjonerende strømbelastning

Dimensjonerende strømbelastning fastsettes ut ifra hvor stor strøm som forventes å gå i lederne.

Driftsstrømmer:

Teknisk regelverk angir at påregnelige driftsstrømmer skal bestemmes av dagens og forventet framtidig trafikk og infrastruktur. Trafikken skal omfatte framtidige ruteplaner, påregnelige forsinkelser, bytte av trekkraftmateriell, mulige ekstratog, og endret togvekt.

Slik strømbelastning fra tog beregnes med beregningsmodeller som omfatter både jernbaneinfrastrukturen og togenes bevegelse i en dimensjonerende ruteplan, med et dimensjonerende togmateriell. En slik modell er ikke mulig å etablere innenfor rammen av arbeidet

Follobaneprosjektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	37 av 69
	Follobaneprosjektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

med denne rapporten. Det er ikke mottatt underlag på hva som er dimensjoneringsgrunnlaget for Follobanen. I denne rapporten er det derfor valgt å etablere et grovt estimat for hva som kan være største belastningsstrøm.

Network Statement [11] angir hva som er maksimalt tillatt strømtrekk fra ett enkelt tog per banestrekning for eksisterende banestrekninger. Network Statement utgis årlig med ett års varighet. Det er mulig å endre angivelsene her i framtiden. Angivelsene må derfor betraktes som usikre.

Network Statement fastsetter per 2022 maksimalt tillatt strømtrekk til 700 A per tog (10,5 MVA nominell effekt) for de fleste banestrekninger. For Gardermobanen er maksimalt strømtrekk satt til 900 A (13,5 MVA nominell effekt) per tog. Ettersom Follobanen ikke er satt i drift ennå, fastsetter ikke Network statement noen dimensjonerende belastningsstrøm for Follobanen. I dette arbeidet er det forutsatt at grenseverdien for både Follobanen og Østfoldbanen vil være 700 A per tog.

Returkretsen på Oslo S mot Follobanen vil i hovedsak bli belastet med strøm fra tog som befinner seg mellom Oslo S og autotransformatorene på Åsland, med en fordeling i hver retning. Når toget befinner seg nærmest Oslo vil en stor andel av returstrømmen fra toget gå i retning mot Oslo, og når toget er nærmere Åsland vil en stor andel av returstrømmen gå til autotransformatorene her. En mindre andel av strømbelastningen (størrelsesorden 10 – 20%) vil kunne flyte i returkretsen mot Oslo for tog som befinner seg mellom Åsland og Ski. Dersom tog i den ene retningen akselererer og tog i den andre retningen bremses samtidig, vil returstrømmen flyte via tverrforbindere mellom spor i tverrforbindelsestunneler mellom togene slik at returkretsen avlastes.

Det forventes at kjøretid mellom Oslo S og Ski vil være i størrelsesorden 12 minutter. Dersom togene da kjøres i intervaller som er 6 minutter eller mer (maksimalt 10 tog hver retning per time), så vil det kun finne seg ett tog mellom Oslo S og Åsland av gangen i hver retning. Dette legges til grunn.

Det antas at tog som kjører fra Åsland mot Oslo vil være ferdig med sitt akselerasjonsforløp og eventuelt bremse inn mot Oslo S. Det dimensjonerende belastningstilfellet blir derfor når ett tog er alene i det ene tunnellopet og akselererer fra Oslo S mot Åsland. For å ta høyde for noe ekstra belastning fra tog som befinner seg mellom Åsland og Ski og fra tog som kjører i innkommende tunnellop fra Åsland mot Oslo før det begynner å bremse, legges det til grunn at belastningen i returkretsen mellom Oslo og Follobanen ved høylasttilfeller kan summere seg til belastningen fra 1,5 tog. Det vil si en belastning i returkretsen på 1050 A. Belastningen vil fordele seg mellom autotransformatorene ved Åsland og Oslo koplingshus med en fordelingsnøkkel som avhenger av togenes posisjon. Det er likevel det er i det følgende lagt til grunn at all strømmen skal til autotransformatorene ved Oslo S.

Kortslutningsstrømmer:

Teknisk regelverk fastsetter dimensjonerende kortslutningsstrømmer og varigheter ved Oslo koplingshus og ved tilgrensende strekninger. Grenseverdiene er fastsatt som angitt i Tabell 6-2:

Ut ifra denne tabellen vil nesten hele området som er omfattet av denne rapporten, falle under kravet til 31,5 kA dimensjonerende kortslutningsstrøm. Strøm/varighet på 0,3 sekunder gir alltid høyest temperatur. Som beskrevet i Teknisk regelverk, må denne benyttes for ledere som kan bli utsatt for strøm fra motsatt ende av mateledningen med forsinket frakopling etter maksimalt 0,3 sekunder. Dette vil være tilfelle for spor og kabler som har mating både fra Oslo S og fra et motstående koplingsanlegg ved Ski eller Holmlia. Returledere og sammenhengende langsgående jordledere som fører

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	38 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømdistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

gjennomgående strøm blir i hovedsak belastet med strøm fra hver side, og vil derfor kunne bli utsatt for kortslutningsstrøm i kortere tid fram til Oslo koplingshus kopler fra kortslutningen.

Teknisk regelverk har angitt en mulighet for å legge til grunn kortere frakoplingstid for kortslutninger fra kontaktledningen enn 0,1 sekund dersom denne kortere frakoplingstiden kan dokumenteres. Realistiske verdier for frakoplingstid vil da være 0,03 eller 0,06 sekunder, det vil si 1 eller 2 halvperioder ved $16 \frac{2}{3}$ Hz. Redusert frakoplingstid vil redusere tilført varme til lederen med flere titalls prosent og dermed gi en lavere temperaturstigning i kortslutningsforløpet enn de 0,1 og 0,3 sekunder som må benyttes der frakoplingstiden ikke dokumenteres særskilt. Denne muligheten er ikke tatt i bruk ved denne rapporten, men dette innebærer at det vil være noen ekstra marginer i virkeligheten som ikke er hensyntatt i beregningene.

6.3 Returledere for Follobanen

Mellom ICH B og Oslo koplingshus er det lagt 8 x 1 x 240 mm² Al returkabler. For termisk dimensjonering antas det at disse er forlagt tett sammen slik at de påvirker hverandre termisk.

Driftsstrøm:

Beregning av kontinuerlig strømføringsevne for kabler kan gjøres i henhold til standardserien IEC 60287 [12], og strømføringsevne for syklisk gjentakende strømmer kan gjøres i henhold til standardserien NEK IEC 60853 [13]. Beregning av strømføringsevne ved disse standardene er imidlertid en omfattende oppgave, og det er ikke gjennomført som del av denne rapporten.

Den norske standarden NEN 62.75 [10] angir tabeller for kontinuerlig belastningsstrøm for kabler med korreksjonsfaktorer for ulike forlegninger, basert på beregninger som er kontrollert med målinger. Denne standarden forenkler vurdering av belastningsevne for kabler, men introduserer en større usikkerhet som håndteres med bruk av større marginer.

Beregningsforutsetninger for angitte strømføringsevner i standarden er:

- Lufttemperatur: 25 °C
- Jordtemperatur: 15 °C
- Forlegningsdybde for kabler i jord: 0,7 m
- Termisk resistivitet for jordsmonn: 100 °C * cm / W
- Største tillatte ledertemperatur for PEX-isolert kabel: 90 °C

Strømgrunnlag:

Standarden angir strømføringsevne per kabel for tre enleder 240 mm² aluminiumskabler med 1 kV isolasjon forlagt sammen i gruppe til 465 A ved forlegning i jord, og 505 A ved forlegning i luft.

Korreksjonsfaktorer:

Det må tas hensyn til at positivleder- og negativlederkabler for de to sporene også føres i samme kabeltrase. Det antas i verste tilfelle at alle disse til sammen 12 kablene ligger i tett forlegning. Når antatt 4 slike grupper med tre kabler hver (12 kabler til sammen) i tett forlegning, med en kabeldiameters avstand mellom gruppene, brukes følgende korreksjonsfaktorer:

- Korreksjon for forlegning i rør eller kanal i bygning: 0,72 (skal baseres på oppgitt strøm ved forlegning i jord)
- Korreksjon for 2 grupper med 6 kabler hver forlagt på gulv/bakke: $0,84 * 0,75 = 0,63$

Total kontinuerlig strømføringsevne basert på disse angivelsene blir $465 \text{ A} * 0,72 * 0,63 = 211 \text{ A}$ for hver kabel. Multiplisert opp med 8 returkabler blir total kontinuerlig strømføringsevne 1 687 A. Ved forlegning som gir bedre kjøling, vil den totale strømføringsevnen øke. Dersom kablene eksempelvis forlegges i 4 grupper med trekantforlegning, med to kabeldiameteres avstand mellom gruppene, vil basert på de samme forutsetningene, den summerte strømføringsevnen for de 8 kablene øke med nær 30% til 2 169 A.

Det er gjort en sammenliknende beregning av hva som hadde blitt den summerte strømføringsevnen for returkablene om antall returkabler kabler ble halvert til 4. Det legges da til grunn korreksjonsfaktorer for 3 kabelgrupper med 3 ledere i hver kabelgruppe. Total beregnet kontinuerlig

Follobaneprosjektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	39 av 69
	Follobaneprosjektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

strømføringssevne for de 4 returkablene blir da 1 178 A. Dette kan sammenliknes med de 1050 A toppbelastning som er estimert for denne forbindelsen, med en lavere gjennomsnittlig belastning over tid.

Med den forutsatte belastningen ville dermed 4 returkabler være tilstrekkelig dimensjonering for en kontinuerlig strømføringssevne som er større enn antatt toppbelastning fra tog i Follobanetunnelen. 4 returkabler med denne forlegningsmetoden hadde derfor også med god margin ført den forventede strømbelastningen i denne returforbindelsen.

Kortslutningsstrøm:

For beregning av krav til minste tverrsnitt for kortslutningsstrøm gjelder følgende formel i NEK 440 [14]:

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\theta_i + \beta} \ln \frac{f}{\theta_i + \beta}}$$

der:

- A er lederens tverrsnittsareal i mm^2
- I er kortslutningsstrømmen i A.
- t_f er kortslutningsstrømmens varighet i s
- θ_i er lederens temperatur før kortslutningen i $^{\circ}\text{C}$
- θ_f er lederens temperatur etter kortslutningen i $^{\circ}\text{C}$
- K er en materialkonstant med enheten $\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}} / \text{mm}^2$
- β er en materialkonstant med enheten $^{\circ}\text{C}$

For aluminium er K oppgitt til 148 og β til 228

For kopper er K oppgitt til 226 og β til 234,5

For kabler som fører driftsstrøm antas vanligvis at kablene har maksimalt tillatt driftstemperatur før kortslutningen inntreffer. I dette tilfellet vil det si 90°C . Ved innsetting i likningen med aktuelle ledere kan man finne minste tverrsnitt som oppfyller krav til temperatur etter kortslutning. Ved kortslutningsstrøm på 37,8 kA i 0,1 sekund for kortslutning mellom Oslo S og Åsland, setter man inn:

- $I = 37\,800 \text{ A}$
- $t_f = 0,1 \text{ s}$
- $\theta_i = 90^{\circ}\text{C}$
- $\theta_f = 250^{\circ}\text{C}$
- Materialfaktorene brukes som angitt

Ved innsetting i formelen finner man da at krav til minste tverrsnitt er $126 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ for at ledertemperaturen etter kortslutning skal være mindre enn kravet på 250°C . Det totale installerte tverrsnittet i de 8 kablene er om lag 15 ganger større enn dette.

Oppsummert er det driftsstrømmene som dimensjonerer antall returkabler i denne forbindelsen. Det er estimert at 4 returkabler med $240 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ hadde gitt god margin opp til forventet driftsstrøm i denne kabelforbindelsen.

Det konkluderes med at de 8 returkablene mellom Oslo koplingshus og ICH B er tilstrekkelig dimensjonert.

6.4 Returledere for Østfoldbanen

Returlederne for Østfoldbanen er koplet til hvert sitt spor via sugetransformatorer. Sugetransformatorene sikrer at strømbelastningen som går i returlederne blir lik som i matekabelen.

Strømbelastning på denne strekningen er primært bestemt av omformerne som er installert ved Holmlia. Holmlia omformerstasjon har installert 2x10 MVA roterende omformere og 1x15 MVA statisk omformer. Den totale kontinuerlige belastningsevnen til omformerstasjonen blir da 35 MVA, det vil si 2,3 kA ved 15 kV. Banestrekningen som går forbi Holmlia omformerstasjon er dimensjonert for en kontinuerlig strøm på 600 A for hvert spor i hver retning, det vil si 1,2 kA i hver retning. Denne strømmen på 600 A for hvert spor gjenspeiler den varige strømmen som det må forventes at Holmlia mater inn til Oslo koplingshus i en tunglastperiode. Denne strømmen på 600 A per spor kontinuerlig legges til grunn i denne vurderingen.

Det bør bemerkes at etter disse anslagene vil forventet total belastning for returkablene til Østfoldbanen i et tunglasttilfelle være høyere enn den tilsvarende forventningen for Follobanen. Dette som følge av omformerstasjonen som er plassert på strekningen, som vil gi mating til flere strekninger fra Oslo koplingshus enn bare Follobanen.

Hvert av sporene mot Østfoldbanen er utført med en høyspenningskabel og to returkabler. Det antas tett trekantforlegning for hvert av kabelsettene, og at de to kabelsettene er forlagt i minst to kabeldiameteres avstand fra hverandre. Med den samme metodikken som for Follobanen finner man da korreksjonsfaktor for forlegning i kanal til å være 0,72, og korreksjonsfaktor for to kabelsett med to kabeldiameteres avstand til å være 0,90. Total kontinuerlig strømføringsevne for hvert spor blir da 602 A. Dette motsvarer nesten nøyaktig estimatet for kontinuerlig belastningsstrøm for hvert spor, og innebærer at disse kablene kan få temperatur nær grenseverdien på 90 °C ved høylast.

Med henvisning til beregning av minste dimensjon for kortslutningsstrøm for Follobanen slutes det uten videre at krav til dimensjonering av disse kablene for kortslutningsstrøm også vil være oppfylt med god margin. Det forventes at sugetransformatorene vil gå i metning ved kortslutning, slik at kortslutningsstrøm også vil gå i kjøreskinner og jordingsanlegg og avlaste returlederne.

6.5 Langsgående jordledere

Driftsstrøm:

Langsgående jordledere på strekningen er koplet parallelt med sporet og vil derfor bli belastet med en andel av returstrømmen. I avsnitt 5.6 er det estimert at strømbelastningen i hver jordleder kan bli inntil 3,7 % av den totale returstrømmen fra Follobanen. Med en estimert største returstrøm fra Follobanen på 1050 A blir estimert største strømbelastning i hver langsgående jordleder 39 A.

NEN 62.75 [10] har ikke oppgitt belastningsevne for 120 mm² Al kabel, derfor benyttes verdier for laveste oppgitte dimensjon under dette, som er 95 mm² Al. På tilsvarende måte som for returledere finnes her belastningsevne for PVC-isolert 1 kV kabel til å være 260 A. Med korreksjon på 0,72 for rør eller kanal i bygning, og 1,0 for enleder kabel forlagt i stor avstand fra andre strømførende ledere, blir kontinuerlig strømføringsevne for en slik leder 187 A. Det vil si om lag 4 ganger høyere kontinuerlig strømføringsevne enn anslått maksimal strøm.

Kortslutningsstrøm:

Ettersom belastningen av driftsstrøm kun er om lag 1/4 av lederens belastningsevne, er det ikke nødvendig å legge til grunn høyeste tillatte driftstemperatur i lederen før kortslutning. Høyeste tillatte driftstemperatur for en PVC-isolert leder er 70 °C, det vil si 45 °C over omgivelsestemperaturen på 25 °C som angitt i standarden. Ettersom tilført varmeeffekt er proporsjonal med kvadratet av strømbelastningen, blir temperaturøkningen ved denne belastningen bli om lag $45 / 4^2$ °C, det vil si om lag 3 °C. For beregning av temperaturstigning ved kortslutning kan det derfor legges til grunn en temperatur før feil på 28 °C.

- Som temperatur før kortslutning θ_i legges det til grunn 28 °C.
- Tillatt ledertemperatur etter kortslutning settes til 160 °C, for PVC-isolert (IX) leder.

- Som for returledere legges det til grunn en kortslutningsstrøm på 37,8 kA med en varighet på 0,1 sekund.

De fleste av de langsgående jordlederne er koplet til øvrig returkrets i begge ender, og det vil da oppstå en strømdeling i hver retning fra et feilsted. I Teknisk regelverk er det estimert at strømningen kan bli slik at 80% går i en retning, og 20% går i den andre retningen. Enkelte jordledere er imidlertid tilkoppelt øvrig returkrets i den ene retningen, og disse vil utsettes for full kortslutningsstrøm.

Jordledere som utjevner utstyr som er forsynt fra tilgrensende matestrekninger, og ikke alene fra koplingshuset Oslo S, må forventes å bli utsatt for en reststrøm fra motstående stasjon slik at total frakoplingstid blir lengre. Dette gjelder eksempelvis eksisterende mating av Kongshavntunnelen. Den termiske strømmen i dette feilforløpet blir lavere, men på grunn av den lengre varigheten blir total oppvarming av jordlederen større.

Ut ifra dette kan det lages en tabell med krav til minste tverrsnitt for isolerte langsgående jordledere i aluminium.

Tabell 6-3. Langsgående jordleder i isolert aluminium. Beregning av temperatur etter kortslutning ved 120 mm² Al, og minstetverrsnitt for maksimaltemperatur på 160 °C

Minstetverrsnitt og beregnet temperatur ved 120 mm ²	Andel feilstrøm 80% (normalt tilfelle)	Andel feilstrøm 100% (enkelte tilfeller)
Frakoplingstid 0,1 sekund (normalt tilfelle)	Temperatur: 114 °C Tverrsnitt: 100 mm ²	Temperatur: 175 °C Tverrsnitt: 125 mm ²
Frakoplingstid 0,3 sekunder (enkelte tilfeller)	Temperatur: 129 °C Tverrsnitt: 107 mm ²	Temperatur: 203 °C Tverrsnitt: 134 mm ²

Basert på disse beregningene blir dermed tverrsnittet i jordledere i aluminium som kun er koplet til øvrig returkrets i en ende, for lite til å holde ledertemperaturen under 160 °C ved dimensjonerende kortslutning. Imidlertid overskrider ikke temperaturen kravet med mange grader.

For opphengte jordledere i tunneltak i Cu, som brukes til å jorde hengemaster, settes høyeste tillatte ledertemperatur til 300 °C, og minste tillatte ledertverrsnitt blir 67 mm² i det verste tilfellet over. Det benyttede tverrsnittet på 95 mm² er derfor tilstrekkelig for disse jordlederne.

Det vurderes som sannsynlig at dersom det kan tas høyde for raskere frakoplingstid av høy kortslutningsstrøm enn de 0,1 s som er benyttet i denne beregningen, så vil temperaturen i alle tilfeller bli lavere enn grenseverdien. Dersom jordledere i kabelkanalen gjentatte ganger utsettes for temperaturer over grenseverdien, kan konsekvensen over tid være at isolasjonen tørker ut og sprekker opp. Dersom temperaturgrensen overskrides vil det dermed ikke føre til umiddelbar driftstans.

Det er ikke mottatt beskrivelser som underbygger valget av langsgående jordleder i kabelkanal til 120 mm² Al med IX isolasjon. Dette vurderes som en underdimensjonering sammenliknet med kravene til kortslutningsdimensjonering. Konsekvensene av denne underdimensjoneringen vurderes imidlertid ikke som så alvorlige at vi vil anbefale bytte eller forsterkning av jordledere. Det anbefales i stedet at jordlederne inspiseres regelmessig, spesielt etter kortslutninger med stor strøm. En enkel forsterkning som kan vurderes, er å kople «åpne» ender av langsgående jordledere i kabelkanal, til nærmeste jordat kjøreskinne.

6.6 Utjevningsforbindelser

Utjevningsforbindelser er ikke utsatt for driftsstrømmer, og trenger derfor kun å dimensjoneres for kortslutningsstrømmer.

Utjevningsforbindelser til objekter som er plassert utenfor «Sone for kontaktledning» er ikke utsatt for kortslutningsstrøm fra kontaktledningen, og vil derfor kunne utjevnes med lavt tverrsnitt. NEK 440 anbefaler at det brukes et minste tverrsnitt på 16 mm² Cu eller 35 mm² Al for slike objekter. Det tas dermed hensyn til at det kan gå en viss strøm til objektets fundamentering eller jordelektrode i tilfelle kortslutning.

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	42 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømndistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

Utjevningsforbindelser til objekter som er plassert i «Sone for kontaktledning» er utsatt for full kortslutningsstrøm ved nedfalt kontaktledning. Minste tverrsnitt kan da beregnes etter formelen fra NEK 440 angitt i avsnitt 6.3. For slike forbindelser legges det til grunn en største tillatt temperatur etter kortslutning på 160 °C som følge av at de er oppgitt å være med IX isolasjon, og en omgivelsestemperatur på 25 °C. Ettersom feilstrømmen fra begge sider av et feilsted vil gå gjennom denne forbindelsen, må det benyttes frakoplingstid på 0,3 sekunder, med tilhørende kortslutningsstrøm på 23,4 kA.

Med disse forutsetningene er beregnet minste tillatte tverrsnitt etter formelen, 133 mm² Al eller 88 mm² Cu. Dersom jordlederne hadde vært utført uten isolasjon, og dermed blitt dimensjonert for en høyeste temperatur etter kortslutning på 300 °C, ville minste tverrsnitt ha vært 101 mm² Al eller 67 mm² Cu.

Mottatt underlag UOS-10-A-85372 angir at det er benyttet 95 mm² isolerte ledere med IX isolasjon for utjevningsforbindelser. Maksimal temperatur etter kortslutning på 160 °C for denne lederen blir overholdt ved angitte dimensjonerende kortslutningsstrøm.

6.7 Filterimpedanser

På sporene for Follobanen fra om lag km 1,8 er det etablert dobbeltisolerte sporfelt. Returtilkoplingen mellom sporene for Follobanen og ICH B er derfor gjort med filterimpedanser. Alle impedansforbindelser mellom ICH B og slutten av sporfeltene ved om lag km 3,0 er dubleret. For hvert spor er det etablert til sammen 8 filterimpedanser for disse 4 returtilkoplingene.

Som følge av jevnlig parallellkopling mellom returkretsen for sporene om lag hver 500 meter, kan returkretsen for Follobanen anses som en felles returkrets for de to sporene. Strømmen i tilkoplingen til sporene for Follobanen fra ICH B vil derfor fordele seg omtrent likt mellom disse sporene. I avsnitt 6.2 er dimensjonerende kortvarig strømbelastning for sporene på Follobanen estimert til å være 1050 A. Den kontinuerlige strømbelastningen kan stige opp mot denne avhengig av hvor tett togene på strekningen kjøres. Det forventes derfor at toppbelastningen på hver av disse filterimpedansene vil være om lag 263 A, og at kontinuerlig belastning over tid vil være lavere enn dette.

Belastbarhet for filterimpedanser er angitt i Bane NOR sin tekniske spesifisering for filterimpedanser, og gjengitt i Tabell 4-4. Det framgår at filterimpedansene er kraftig overbelastbare, slik de kan belastes med en betydelig kortvarig strøm utover den kontinuerlige strømmen uten at de blir for varme. Filterimpedansene kommer i utgaver med 600 A og 800 A merkestrøm.

Ut ifra dette framstår bruken av dublerete filterimpedanser for disse tilkoplingene som en overdimensjonering. Den estimerte belastningen i returkretsen og belastbarheten for filterimpedanser tilsier at det ville ha vært tilstrekkelig med en enkel filterimpedans for alle returtilkoplinger her.

7 JORDING AV SKJERMER FOR HØYSPENNINGSKABLER I BEGGE ENDER

7.1 Innledning

Bane NOR har angitt at høyspenningskabler mellom ICH B og PL/NL i hovedtunnelene er jordet til returkretsen i begge ender. Dette gjelder også kabler for 22 kV 50 Hz langsgående forsyningsanlegg, som går mellom transformatorer plassert i hver forbindelsestunnel mellom de to tunnellopene, hver 500 meter.

Bane NOR har oversendt beregningsrapporten UFB-30-A-65609: «Follobanen, Tunnel. TPS. Challenges with long Auto Transformer supply cables». Rapporten beregner strøm i skjermen for PL og NL i tunnelen, og konkluderer med at tilleggsoppvarmingen av kablene som følge av strøm i skjermen er så liten at den kan neglisjeres ved normal drift, og at den er på et akseptabelt lavt nivå under kortslutning.

Norconsult er bedt om å gjøre en kvalitetssikring av denne beregningen og vurderingen.

7.2 Vurdering av effekten av jording i begge ender

Bane NOR sitt tekniske regelverk krever at høyspenningskabler skal utjevnes til returkretsen i en ende eller i begge ender.

Utjevning i kun en ende er mest brukt i Norge. Ved den utførelsen er det krav om at den åpne enden skal beskyttes mot lynnedslag med overspenningsavleder. Ved utjevning til returkretsen i begge ender vil det gå strøm i skjermen, og Teknisk regelverk krever at tilleggsoppvarming av kabelen som følge av dette skal vurderes. Tilleggsoppvarmingen er avhengig av varmeeffekten som avgis til skjermen som følge av strøm i skjerm:

$$P = R \cdot I^2$$

Spenningsbalansen i skjermen er gitt av:

$$U_{skjerm} = (R_{skjerm} + jX_{skjerm}) \cdot I_{skjerm} + jX_{sL} \cdot I_L + jX_{s1} \cdot I_1 + jX_{s2} \cdot I_2 + \dots + jX_{sn} \cdot I_n$$

der:

U_{skjerm} er spenningsforskjellen mellom returkretsen i hver ende av skjermen,

$(R_{skjerm} + jX_{skjerm})$ er egenimpedansen til skjermen,

I_{skjerm} er strømmen i skjermen

X_{sL} er gjensidig induktans mellom skjerm og senterlederen i kabelen

I_L er strømmen i senterlederen i kabelen

$jX_{s1} \cdot I_1 + jX_{s2} \cdot I_2 + \dots + jX_{sn} \cdot I_n$ er den induserte spenningskomponenten i skjermen for hver av de n parallelle strømførende lederne.

En egenskap ved konsentriske ledere (som senterleder og skjerm i en kabel) er at skjermens egeninduktans X_{skjerm} er lik den gjensidige induktansen mellom skjermen og senterlederen X_{sL} . Det innebærer at dersom all returstrømmen går i skjermen, så vil reaktansen fra senterlederen og skjermen kansellere hverandre.

I virkeligheten vil returstrømmen fordele seg mellom flere parallelle ledere og jord slik at I_{skjerm} blir mindre enn I_L . Da blir også spenningskomponenten fra senterlederen større enn det reaktive

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	44 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

spenningsfallet i skjermen. Det blir altså en induisert spenning i skjermen fra senterlederen som er proporsjonal med strømmen i senterlederen.

Ettersom beregningen av gjensidig induktans mellom senterleder og skjerm i en kabel er avhengig av avstand til øvrige ledere som fører returstrøm, og strømfordelingen mellom lederne, blir beregningen fort komplisert. Det er likevel her prøvd å utarbeide et estimat for hvor stor den gjensidige induktansen kan bli.

Egeninduktansen for en skjerm med radius r med retur i jord er gitt av likningen [8]:

$$L = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{D_j}{r}\right) \left[\frac{H}{m}\right]$$

Ved å anta $\mu = \mu_0$ og D_j lik som i avsnitt 5.6 på 1 616 m, kan egeninduktansen til kabelskjermen beregnes til 2,25 mH/km. Dette er også den gjensidige induktansen mellom skjermen og senterlederen. Ved 16 2/3 Hz utgjør dette en impedans på 0,236 Ω /km. Det vil si: Ved en kilometer lang kabel med 1000 A strømbelastning, vil den induserte spenningen fra strømmen i senterlederen til skjermen, bli 236 V.

Ettersom mye av returstrømmen ikke vil gå i jord, men i ledere som er nærmere høyspenningskabelen, vil strømmen og den gjensidige induktansen i disse lederne sette opp en induisert spenning i skjermen i motsatt retning. Dette gjør at den totale induserte spenningen til skjermen blir lavere. Dersom eksempelvis all returstrømmen går i returledere som er forlagt i en fast avstand fra høyspenningskabelen, kan D_j i formelen erstattes med denne avstanden. Ved 1 meter vil eksempelvis den totale induserte spenningen være 81 V, og ved tett forlegning på 10 cm blir spenningen 33 V. Ved 50 Hz driftsfrekvens blir disse spenningene om lag tredoblet.

Tett forlegning med kabler som fører returstrøm er viktig for at den induserte spenningen til skjermen skal bli lav. Ved stor avstand til kabler som fører returstrøm induseres en stor spenning i kabelskjermen. Dersom kabelskjermen er jordet i begge ender kan da strømmen i skjermen bli betydelig.

Returkretsen vil i tillegg ha en spenningsgradient som følge av returstrøm ved 16 2/3 i kjøreskiner og returledere. Høyspenningskabler vil derfor oppleve en spenningsforskjell i returkretsen mellom de to kabelendene. Både PL, NL og skjerm for 22 kV 50 Hz forsyning blir utsatt for denne spenningsforskjellen. Spenningsforskjellen kan begrenses ved å sikre lav seriell impedans i returkretsen (mange parallelle kjøreskiner, returledere og jordledere), og/eller ved å sikre lav overgangsmotstand til jord ved å etablere jordelektroder med lav overgangsmotstand til jord. I Teknisk regelverk for elutforming E er spenningsgradienten beregnet for enkelt- og dobbeltspor uten bruk av langsgående jordledere, ved ulike avstander mellom autotransformatorer og ulike overgangsmotstander til jord. Eksempelvis er det beregnet at ved dobbeltspor og 10 km mellom autotransformatorene, og ved en overgangsmotstand til jord på 0,2 S/km (dette er antatt konservativt), så blir spenningsstigningen i returkretsen 126 V per kA belastningsstrøm. Det gir en gradient på om lag 126 V / 5 km = 25 V per km per kA belastningsstrøm. Ved bruk av langsgående jordledere som i Follobanetunnelen, vil denne spenningen bli enda lavere.

For de fleste høyspenningskabler vil derfor effekten av induksjon være større enn effekten av variasjon i returpotensialet som følge av belastningsstrømmer.

7.3 Vurdering av rapport

Rapporten UFB-30-A-65609: «Follobanen, Tunnel. TPS. Challenges with long Auto Transformer supply cables» er lest gjennom og vurdert. Rapporten beskriver to tilfeller: Kabelføring fra tunnellopene til autotransformatorene i dagen ved Åsland, og seriell kabling av PL og NL til brytere i tunnellopet.

Overordnet framstår tilnærmingen i rapporten som for enkel.

Follobaneprosjektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	45 av 69
	Follobaneprosjektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømdistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

Det er kun vurdert strøm som følge av spenningsgradienten mellom ulike punkter i returkretsen, og ikke som følge av induksjon fra strøm i senterleder. Merk at det i avsnitt 7.2 ble estimert at effekten av induksjon fra strøm i senterleder har større betydning for hvor stor strøm som oppstår i skjermen, enn spenningsgradienten i returkretsen. Gjensidige induktanser mellom parallelle ledere ser ikke ut til å være hensyntatt i beregningsmodellen.

Rapporten angir kabeltype for høyspennings- og returkabel. Det er angitt impedans for kablene ved 16,67 Hz. Angivelsen synes ikke å være riktig. Reaktansen er angitt som en egenskap ved kabelen. Det er ikke riktig. Reaktans/induktans er ikke en egenskap ved en leder, men en egenskap ved ei strømsløyfe. Den oppgitte reaktansen for 400 mm² Al kabel ser ut til å være omtrent like stor som den som oppstår i ei strømsløyfe med tett forlegning mellom tur og retur. Dette er en viktig premisse. Det er også viktig å merke seg at hvordan den totale reaktansen påvirkes av at det installeres flere parallelle ledere, avhenger av hvordan det magnetiske feltbildet blir ved den valgte lederkonfigurasjonen. Det er ikke gitt at flere ledere per fase gir en betydelig lavere total reaktans for ledersløyfa.

Beregningen av resistans i skjermen ser riktig ut. Det er en svakhet at aluminiumsfolien i skjermen er neglisjert, da denne bidrar til å øke strømstyrken i skjermen. Antakelsen av at reaktansen i skjermen er lik som skjermens resistans er imidlertid feilaktig. Reaktansen oppstår som følge av magnetfelt i ei ledersløyfe, og er helt uavhengig av lederens resistans. Reaktansen for skjermen med returvei i jord eller i parallelle ledere, blir betydelig lavere enn de 0,821 Ω/km som er lagt til grunn. Denne høye verdien for reaktans bidrar til å underestimere strømmen i skjermen.

Vi har den samme innvendingen til antakelsen av reaktansen for langsgående jordledere. Ved returvei i jord vil reaktansen være noe høyere enn angitt, men ved returvei i andre ledere vil reaktansen til jordlederen også være høyere enn reelt.

På bakgrunn av disse innvendingene til rapporten mener vi at beregningene i rapporten ikke gir et troverdig resultat for strøm i kabelskjerm ved jording til returkretsen i begge ender. Vi tror den termiske virkningen på kabelen blir større enn det rapporten konkluderer med.

Likevel vurderer vi det som sannsynlig at en mer korrekt beregning også vil kunne konkludere med at situasjonen blir akseptabel, selv om det må legges til grunn en større oppvarming av kabelen som følge av strøm i skjermen. Dette underbygges med angivelse i NEN 62.75 [10]. Der er det angitt strømverdier for «åpen» og «lukket» kappe/skjerm for 24 kV-kabler. «Åpen» kappe/skjerm indikerer at skjermen er jordet i en ende, mens «lukket» indikerer at den er jordet i begge ender. Tabell 7-1 viser oppgitt strømføringssevne for ulike kabeltyper og forlegninger, og forholdstallet mellom dem. Tabellen antyder at, ved å jorde kabelens skjerm direkte i hver ende i en trefasekrets med flat forlegning og 50 Hz driftsfrekvens, så vil kabelens strømføringssevne falle med 10 – 20 % avhengig av kabeldimensjon. Lavere driftsfrekvens vil gjøre denne reduksjonen mindre.

Tabell 7-1. Oppgitt strømføringssevne fra NEN 62.75 [10] med lukket og åpen jording av skjermen

Kabeltype. Tre enleder kabler 14/24 kV.	Forlegning	Åpen jording [A]	Lukket jording [A]	Lukket/ åpen [%]
240 mm ² Al	Flat i luft	570	515	90
400 mm ² Al		790	680	86
630 mm ² Al		1040	840	81
240 mm ² Al	Flat i jord	510	465	91
400 mm ² Al		670	590	88
630 mm ² Al		850	715	84

Tidligere utgave av Teknisk regelverk hadde tilsvarende angivelse for PL og NL som var forlagt sammen i et AT-system, for kabling i tunneler og under bruer. Tabellen som var oppgitt i Teknisk regelverk for det, viste en betydelig mindre reduksjon i strømføringssevne enn det som framgår av NEN 62.75. Bakgrunnen for dette var sannsynligvis den lavere frekvensen i jernbaneanlegget.

7.4 Oppsummert vurdering

Direkte jording av kabelskjerm i begge ender er lite brukt i norsk banestrømforsyning. Det er imidlertid en tillatt utførelse, under forutsetning av at det vises at kabelen tåler den ekstra termiske belastningen fra strøm i kabelskjermen.

Rapporten som Norconsult har fått i oppdrag av Bane NOR å vurdere, gir ikke et troverdig grunnlag for å underbygge at den termiske belastningen på kabelen som følge av jording blir tilstrekkelig lav. Norconsult har flere innvendinger til rapporten. Den viktigste er at induisert spenning fra senterlederen til skjermen ikke er vurdert. Norconsult vurderer dette forholdet til å ha større virkning for kabelens termiske belastning enn den effekten som er vurdert i rapporten.

Strømmen i skjermen er svært avhengig av kabelforlegning. Tett forlegning av PL, NL, returledere og langsgående jordledere, eventuelt med en kabeldiameters avstand for å sikre god kjøling, kan gi et stort bidrag til å begrense strøm i kabelskjermen og dermed varmeutvikling i skjermen.

Basert på angivelser i NEN 62.75 vurderer vi det som sannsynlig at man, ved hensiktsmessig kabelforlegning, vil kunne oppnå at varmeutviklingen i kabelskjermen blir tilstrekkelig lav til at skjermene kan jordes til returkretsen i begge ender. Med hensiktsmessig forlegning menes her tett forlegning mellom tur og returstrøm, sammen med parallelle retur- eller jordledere i tett forlegning med høyspenningskablene.

Strømmen i skjermen vil bli ulik avhengig av kabelkonfigurasjon og driftsfrekvens. Infrastrukturforstyrrelse med 22 kV 50 Hz vil få andre betingelser enn PL og NL.

Det anbefales å gjøre en mer detaljert beregning av dette på bakgrunn av faktisk forlegning av høyspennings- og returkabler. Alternativt kan strømmen i senterleder og skjerm måles etter idriftsettelse, og på bakgrunn av målt strømfordeling kan det estimeres hvor stor tilleggsoppvarming kabelen får som følge av strøm i skjermen.

8 MÅLEPUNKTER FOR Å VERIFISERE DISTRIBUTJON AV RETURSTRØM

8.1 Målemetoder

Bane NOR planlegger å gjennomføre målinger for å verifisere den beregnede fordelingen av returstrøm mellom ledere i returkretsen. Det oppgis at det planlegges å bruke loggeinstrumentet Fluke 1736. I vedlegg 3 er produktdatablad for dette instrumentet. Produktdatabladet angir båndbredde for frekvens ned til 42,5 Hz. Det framstår derfor som usikkert hvor egnet dette instrumentet er for måling av strøm med grunnharmonisk frekvens på 16 $\frac{2}{3}$ Hz.

Måling av strøm gjøres ved bruk av strømtenger eller rogowskispoler som er koplet til et måleinstrument eller loggeinstrument. En rogowskispole er fordelaktig ved at dersom den er lang nok, så kan den tres rundt flere ledere samtidig og måle visersummen av strømmen som går gjennom lederne som spolen omslutter. Strømtenger er ofte så små at de bare kan brukes rundt en enkelt kraftkabel av gangen.

Ettersom returstrømmen ved normal drift vil variere med belastning, kan det være utfordrende å sette opp et måleprogram for å dokumentere strømfordeling mellom mange ledere. Aktuelle strategier for måling vil være:

1. Måling under normal drift, og
2. Måling ved en dedikert test

For at måling under normal drift skal kunne gi et resultat som kan behandles og dokumenteres, bør det brukes et loggeinstrument logger med flere måleinnnganger samtidig. Summert strøm i returkretsen bør måles sammen med strøm i enkeltledere, slik at det er mulig å beregne hvor stor andel av den summerte strømmen som flyter i enkeltlederen. Dette setter begrensning rundt hvilke ledere det kan måles strøm i, ettersom det må føres måleledninger både mellom instrumentet og stedet der det måles sumstrøm, og mellom instrumentet og enkeltlederen.

Returstrøm fra Follobanen vil fordele seg mellom mange ledere som har ulik fysisk plassering. Jordlederne i hvert tunnellop, kjøreskinnene, og de 8 returkablene mellom ICH B og ICH A vil alle føre en andel av returstrømmen. Disse har ulik fysisk plassering. Direkte måling av sumstrøm blir derfor utfordrende. Dersom alle kabler for PL og NL for de to sporene er forlagt tett sammen, kan det tres en rogowskispole rundt disse kablene. Det er imidlertid usikkert om dette er mulig. Logging ved normal drift har derfor klare ulemper ved at det krever detaljert planlegging og detaljert kjennskap til kabelforlegningen på planleggingsstadiet. Det er uansett ikke sikkert at det lykkes å etablere et tilfredsstillende testoppsett.

Måling i en testsituasjon gir større frihet knyttet til hvor det kan måles. Testoppsettet som brukes ved termografering, kan med fordel også brukes ved en slik måling. Der etableres en kortslutning mellom kontaktledning og spor ved ønsket posisjon, og utmatet strøm fra omformerstasjonen reguleres til ønsket strømstyrke. Denne strømstyrken kan typisk være rundt 300 – 600 A avhengig av termiske begrensninger i omformereren som benyttes. Strømstyrken er kjent og konstant under målingen, og det er da ikke nødvendig med et spesielt loggeinstrument for å fastsette denne. Det kan benyttes et vanlig multimeter med tilkøpelt rogowskispole eller strømtang.

Strømmen vil ikke variere under en måling ved en dedikert test. Det kan derfor gjøres målinger av strøm i hvilken som helst leder og kjøreskinne. Man kan ut ifra målingen beregne med stor nøyaktighet andelen strøm som går i hver enkelt jordleder og returleder.

Ulempen med dette testoppsettet, er at all togtrafikk i et større område rundt Oslo S må stoppes for å kunne gjennomføre målingen. Planlegging av en slik måling kan derfor være omfattende. Som alternativ til testoppsettet med termografering, kan konstant strømtrekk realiseres med et testtog inne i tunnelen. Toget kan programmeres til å trekke stor reaktiv strøm over lang tid. Da kan målinger gjennomføres uten at togtrafikk på øvrige strekninger påvirkes i like stort omfang. Leie og programmering av testtog for å gjennomføre testen kan likevel være et omfattende arbeid.

Follobaneprojektet	Hovedbanen, Oslo S	Side:	48 av 69
	Follobaneprojektet, Innføring Oslo S	Dok.nr:	UOS-10-A-75401
	Helhetlig vurdering av strømfordistribusjon i returstrømkretsen	Rev:	01E
		Dato:	28.11.2022

Det antas at logging i normal trafikk gir for store begrensninger rundt hvilke ledere det kan måles strøm i. Det legges derfor i det videre til grunn at måling av strømfordeling gjennomføres ved en test der summert strøm er kjent.

Ved de angitte målemetodene kan strømmene som er estimert i denne rapporten sammenliknes med faktiske målinger. Merk at det forventes at det vil forekomme avvik, spesielt som følge av at beregningen i denne rapporten ikke har tatt med alle jordledere og kjøreskinner som faktisk finnes på stedet. Det innebærer en generell forventning om at målte strømmer vil være lavere enn strømmer som er estimert i denne rapporten.

8.2 Målepunkter for returstrøm

Ved måling med testoppsett er sumstrøm kjent, og trenger ikke å måles sammen med strøm i hver enkelt leder. Det forutsettes at kortslutning mellom kontaktledning og kjøreskinner etableres et stykke inne i Blix tunnelen i retning mot Åsland. Det forutsettes også at en bryter for PL og NL mellom kortslutningsstedet og Åsland er utkoplest, slik at all returstrømmen følger returkretsen ut av tunnelen og tilbake til koplingshuset.

Strømmåling gjøres med et enkelt multimeter som er tilkoplest en strømsensor (strømtang for måling av strøm i enkeltkabler, eller rogowskispoler ved samtidig måling av summert strøm i flere kabler). Det må verifiseres at både multimeteret og strømsensoren er egnet for måling ved så lav frekvens som $16 \frac{2}{3}$ Hz. Dersom multimeteret eller sensoren har minste oppgitt frekvens som er høyere enn $16 \frac{2}{3}$ Hz, vil det føre til store avvik i målingen, sannsynligvis vil målingen vise en lavere strøm enn det som er reelt.

Med et måleoppsett med multimeter og strømtang eller rogowskispole, og med kjent sumstrøm, kan følgende målepunkter foreslås:

- Summert returstrøm: Måles ved kortslutningsstedet eller ved omformereren eller toget som mater ut strøm. Denne er referanse for de andre målingene.
 - Denne strømmen bør reguleres til ca. 400 – 500 A hvis det brukes en omformer eller et tog som kan mate ut dette. Hvis ikke, brukes så høy strøm som omformereren eller toget tåler å mate ut over tid.
 - For hver av målingene som er beskrevet under, bør også denne strømmen leses av, fordi strømmen kan endre seg noe over tid.
- Hver enkelt av de 8 x 240 mm² Al returkabler mellom ICH B og koplingshuset.
 - Forventet strøm i hver leder er inntil 8,3 % av summert returstrøm. Etter at jordforbindelsen mellom ICH B og Kongshavntunnelen ble fjernet er det forventet at denne strømmen kan bli noe høyere. Det forventes at strømmen er lik i alle disse lederne.
- Strøm i midtpunktet på filterimpedans 1 og filterimpedans 10.
 - Forventet strøm er inntil 7,7% av summert returstrøm i hver av disse filterimpedansene. Etter at jordforbindelsen mellom ICH A og Kongshavntunnelen ble fjernet er det forventet at denne strømmen kan bli noe høyere.
- Strøm i jordforbindelse mellom returskinne i ICH A jordleder/spor for Kongshavntunnelen.
 - Denne forbindelsen er fjernet etter at denne rapporten ble utarbeidet. Forventet strøm før den ble fjernet var inntil 15,1% av summert returstrøm (en kjøreskinne og to parallellkoblede jordledere)
- Langsgående jordledere i kabelkanaler i «Klypen» mellom tunnelmunningen og avgreningen for Kongshavntunnelen.
 - Forventet strøm i hver jordleder er inntil 4,2% av summert returstrøm. Etter at jordforbindelsen mellom ICH A og Kongshavntunnelen ble fjernet er det forventet at denne strømmen kan bli noe høyere for enkelte av jordlederne.
- Returkabler tilkoplest sugetransformator 4.1.
 - Forventet strøm i hver returkabel er 0 A.
- Returkabler tilkoplest sugetransformator 1.1 og 2.1.
 - Forventet strøm i hver returkabel avhenger av testoppsettet. Om Holmlia omformerstasjon brukes for mating under testen vil disse kablene være belastet med

om lag 25% av summert strøm i hver av de fire kablene. Om det brukes en annen omformerstasjon for mating under testen, vil disse kablene ikke være belastet.

9 OBSERVASJONER VED DOKUMENTGJENNOMGANG

Det er gjort noen observasjoner ved dokumentgjennomgang. Disse er beskrevet i dette avsnittet.

I Blixttunnelen ved km 1,965 for spor FB1 og ved km 2,000 ved spor FB2 er det tegnet inn utjevning fra langsgående jordleder til en kjøreskinne i jordingsplan UOS-10-R-85239. Her er det dobbeltisolert sporfelt, og slike utjevninger til kjøreskinner vil forstyrre sporfeltet slik at det blir belagt. Bane NOR har bekreftet at disse forbindelsene ikke er etablert.

Langsgående jordleder i kabelkanal er isolert 120 mm² Al. I rapporten UOS-10-A-85372 (Jordingsanlegg Fagnotat) er det beskrevet at utjevninger til denne med 95 mm² Cu (i de fleste tilfeller også isolert) skal presses på med C-press. Koplingspunktet skal forsegles med krympeslange der det er fare for fukt. Faren med denne utførelsen er korrosjon av aluminiumet i koplingspunktet. Vi vurderer det slik at dersom man lykkes i å holde fukt borte fra koplingspunktet, så vil aluminiumet være beskyttet mot korrosjon. Vi er imidlertid usikre på hvor godt det er mulig å beskytte mot fukt selv ved denne utførelsen. Dette er en utførelse vi er skeptiske til. Vi anbefaler derfor Bane NOR å følge med på disse koplingspunktene og kontrollere dem for korrosjon. Hvis det oppstår korrosjon regner vi med at det vil bli synlig relativt raskt, spesielt dersom enkelte av koplingspunktene er installert i et vått miljø. For inspeksjon antas det at enkelte av krympeslangene må fjernes. Inspeksjon bør derfor baseres på stikkprøvekontroll.

Returkretsskjema UFB-30-R-65700 viser sammenkoplinger mellom langsgående jordleder og filterimpedanser på strekningen med dobbeltisolert sporfelt inn mot ICH B. Jordingsplanene UOS-10-R-85228, UOS-10-R-85229 og UOS-10-R-85239, og returkretsskjemaet UOS-10-R-86122, viser ingen slike tilkoplinger mellom langsgående jordleder og filterimpedanser. Teknisk regelverk krever at disse som hovedregel skal være sammenkoplede ved alle filterimpedanser. Når sammenkoplingene bare er vist på noen av tegningene blir det krevende å få oversikt over kretsens overordnede kopling. Slike sammenkoplinger bør framgå fra alle de angitte tegningene (der slike sammenkoplinger finnes).

Koplingskjemaet for Oslo S, EH-022988-000 rev 007 viser ikke brytere i koplingskiosk 4. Tegningen har et merknadsfelt som angir tegningsnummer for bryterposisjoner i koplingskiosken. Det oppleves likevel som utfordrende å lese koplingsbildet rundt bryterkiosken ut ifra koplingskjemaet.

Returkretsskjemaet for tilkopling mellom ICH B og returkretsen i tunnelen, UFB-30-R-65700 revisjon 02C, har feil angivelse av retning for detalj A og detalj D. For disse detaljene må angivelsen av retning mot «Ski» og mot «Oslo» bytte plass for at angivelsen skal bli rett.

10 OPPSUMMERING OG ANBEFALINGER

10.1 Oppsummering

Rapporten er inndelt i to hoveddeler.

Den første hoveddelen består av avsnitt 2 til 4. Denne delen gir generelle beskrivelser av det elektriske banestrømforsyningsanlegget og sporfeltsystemene. I denne hoveddelen er det beskrevet hvilke krav som ligger til grunn for utforming av anleggene, hvordan banestrømforsyningsanlegget kan forstyrre sporfeltsystemene som benyttes ved Oslo S, og hva som kan gjøres for å begrense risiko for uakseptabel påvirkning. De 95/105 Hz sporfeltene som er benyttet på strekningen er sårbare for spenning ved 16 ⅔ Hz mellom kjøreskinnene. Ved enkeltisolert sporfelt vil det oppstå en slik spenning mellom kjøreskinnene dersom det går strøm gjennom jordet kjøreskinne. Spenningen er proporsjonal med strømstyrken og med sporfeltets lengde. Det er vist at det er mulig å etablere et anlegg som oppfyller gjeldende krav til sporfeltlengde, men som med de tillatte maksimale belastningsstrømmer fra ett enkelt tog likevel vil føre til feilfunksjon i sporfeltsystemet.

Den andre hoveddelen består av avsnitt 5 til 9, og omfatter konkret beskrivelse og vurdering av løsningen som er etablert for Follobanen og Østfoldbanen ved innføring til Oslo S.

Follobanen er etablert med AT-system med autotransformatorer ved Oslo S og ved Åsland. Returstrøm fra tog skal i hovedsak tilbake til autotransformatorene. Det er estimert at for strekningen mellom Oslo S og Åsland vil den høyeste samtidige belastningen være om lag den summerte belastningen fra 1,5 tog, tilsvarende 1 050 A. Dette estimatet forutsetter en minste togfølgetid på 6 minutter, eller 10 tog i timen i hver retning.

Returkretsen gjennom stasjonen fra sporene for Follobanen er en parallellkopling av 8 x 240 mm² returkabler, et varierende antall langsgående jordledere, og jordet kjøreskinne for et varierende antall spor. Koplingen som gir en parallell vei for returstrømmen via kjøreskinner er den som Teknisk regelverk angir for stasjoner uten returledere. Denne gir økt risiko for forstyrrelser på sporfeltet, og for dette tilfellet krever Teknisk regelverk en maksimal lengde for sporavsnittene på 250 meter. Dette er oppfylt på den aktuelle strekningen.

For å vurdere risiko for påvirkning på sporfeltene er det laget et estimat for hvor stor andel av returstrømmen fra Follobanen som vil gå i jordet kjøreskinne for enkeltisolert sporfelt. Det er estimert at noe under 8 % av returstrømmen kan gå i hver enkelt jordet kjøreskinne. Det er en så liten andel at det ikke vurderes som sannsynlig at det vil føre til uakseptable påvirkninger på sporfelter som er kortere enn 250 meter. Dersom det finnes enkeltisolerte sporfelter som er betydelig lengre enn 250 meter, kan de være utsatt for å bli påvirket av returstrøm gjennom sporavsnittet.

Omkopling av returkretsen slik at all returstrømmen fra Follobanen går i returlederne, vil ytterligere redusere risikoen for påvirkning på sporfeltene. Dette vil eventuelt kreve noen endringer i returkretsen. Det er anbefalt å vurdere slik omkopling dersom det oppstår uakseptable påvirkninger.

Østfoldbanen er etablert med sugetransformatorsystem med returledere. Det er brukt sugetransformatorer på matekablene mellom Oslo S og sporene for Østfoldbanen ved Loenga. Sugetransformatorene tvinger returstrøm fra Østfoldbanen til å følge returkablene til Oslo koplingshus. Denne løsningen er ikke beskrevet i Teknisk regelverk, men den forventes å være omtrent like effektiv som løsningen beskrevet i Teknisk regelverk. Det forventes ikke påvirkning på sporfelter som følge av strømbelastning på Østfoldbanen. Ved kortslutninger med stor strøm forventes det at sugetransformatorene vil gå i metning. Det kan da oppstå et kortvarig falskt belegg for sporfeltene under kortslutningen.

I Kongshavntunnelen er det benyttet sporavsnitt med enkeltisolerte sporfelter inntil 700 meter. Ved så lange enkeltisolerte sporfelter stiller Teknisk regelverk krav om at det skal være returleder, med kopling som angitt i Teknisk regelverk sikrer at returstrøm ikke går i kjøreskinnene. Den faktiske utførelsen er ikke slik som Teknisk regelverk beskriver det i denne situasjonen. Med eksisterende kopling vurderes det imidlertid at det vil være lav sannsynlighet for påvirkning på sporfelt også her.

Eventuell endring for å oppnå samsvar med Teknisk regelverk vil innebære å bryte forbindelsen i returkretsen mellom Kongshavntunnelen og Østfoldbanen.

Ved belastning fra Østfoldbanen vil sugetransformatorene sikre at returstrøm føres i returkabler til koplingshuset.

Ved belastning fra Follobanen er det ingen returledere eller andre tiltak som styrer hvordan returstrømmen går. Her vil derfor returstrømmen fordele seg mellom 8 returkabler og et varierende antall kjøreskinner og jordledere, som alle er parallellkoplede mellom forbindelsestunnelen og koplingshuset. Det er estimert at om lag 67% av returstrømmen vil gå i returkablene, og resten vil fordele seg mellom kjøreskinner og langsgående jordledere. I hver kjøreskinne er det estimert at det vil gå om lag 8% av returstrømmen fra Follobanen. Med denne strømmen i jordet kjøreskinne for et sporavsnitt som er inntil 250 meter langt, beregnes det at spenningen over jordet kjøreskinne for sporavsnittet vil bli om lag 3,5 V. Dette er et så lavt nivå at det ikke forventes at det vil oppstå påvirkninger på sporfeltene.

Termisk dimensjonering av ledere i returkretsen og jordingsanlegget, og filterimpedanser, er vurdert for driftsstrømmer og kortslutningsstrømmer. Det er funnet at returledere og filterimpedanser er overdimensjonert. De vil derfor være i stand til å føre forventede strømmer i alle tilfeller.

For jordingsanlegget er det funnet følgende om termisk dimensjonering:

- Utjevningsforbindelser i isolert Cu er utført med 95 mm². Temperaturkravet for lederen er 160 °C etter kortslutningen. Beregningen viser at minstekravet da blir 88 mm². Disse er derfor korrekt dimensjonert.
- Langsgående jordleder i tunneltak i uisolert Cu er utført med 95 mm². Temperaturkravet for lederen er vurdert til å være 300 °C. Beregningen viser at minstekravet da blir 67 mm². Disse jordlederne framstår derfor som noe overdimensjonert.
- Langsgående jordleder i kabelkanal er utført med 120 mm² isolert Al. Temperaturkravet for slike ledere er 160 °C etter kortslutningen. De langsgående jordlederne er koplede til øvrig returkrets på ulike måter. Den mest benyttede utførelsen med tilkøpling til øvrig returkrets i begge ender, gir akseptabelt tverrsnitt for disse lederne. Men i tilfeller der den langsgående jordlederen er koplede til øvrig returkrets i bare en ende, vil temperaturkravet bli overskredet ved dimensjonerende kortslutning. Med det benyttede tverrsnittet på 120 mm² Al er temperaturen etter kortslutning beregnet til 175 °C eller 203 °C avhengig av hvor jordlederen er installert. Det antas imidlertid at det finnes ytterligere termiske marginer knyttet til varigheten for kortslutningen, som ikke er hensyntatt her. Det vurderes derfor som sannsynlig at faktisk ledertemperatur etter kortslutning vil være lavere enn grenseverdien. Det er imidlertid ikke beregnet eller vist i denne rapporten.

Filterimpedanser for dobbeltisolert sporfelt for Follobanen i Blixtunnelen er dublet. Denne dubleringen framstår som unødvendig både med tanke på forventet strømbelastning og med tanke på redundans.

Det er gjort en vurdering av utførelse med direkte jording av kabelskjerm for høyspenningskabler i begge ender. Underlaget som er vurdert, gir ikke tilstrekkelig grunnlag for å konkludere med at tilleggsoppvarmingen av kablene fra strøm i skjerm blir neglisjerbar slik som det er konkludert med i underlaget. Det holdes likevel som sannsynlig, med hensiktsmessig utførelse av anlegget, vil jording i begge ender ikke utgjøre et problem. Dette bør imidlertid vises på en mer troverdig måte enn i oversendt rapport.

Det er foreslått ulike tilnærminger for å måle strømfordeling mellom ledere, for verifikasjon av estimatene gjort i denne rapporten. Det er anbefalt målemetode med et testoppsett der total returstrøm på strekningen er kjent, slik at man kan beregne alle strømmer man måler som en andel av den totale strømmen.

Ved dokumentgjennomgang er det funnet noen detaljer som er kommentert og som det er anbefalt å utbedre eller å følge med på.

10.2 Anbefalinger

Anbefaling 1: En bør i tiden etter idriftsettelse følge med på stabiliteten for de enkeltisolerte sporfeltene på strekningen. Dersom de viser tegn til å bli påvirket av forstyrrelser fra returstrømmer, bør det vurderes tiltak. Aktuelle tiltak er:

- Forbedringer i returkretsen slik at mindre returstrøm går i jordet kjøreskinne.
- Bruk av enkeltisolert sporfelt type 2

Basert på vurderingene i denne rapporten forventes det imidlertid ikke slike påvirkninger.

Anbefaling 2: Mating til Kongshavntunnelen bør endres.

- Sugetransformator 4.1 bør fjernes.
- Normal mating til Kongshavntunnelen bør være fra Oslo koplingshus via KL-kiosk 4.

Det er her anbefalt å gjøre begge disse endringene, men de kan ved behov gjennomføres uavhengig av hverandre.

Anbefaling 3: Langsgående jordledere med 120 mm² aluminium i kabelkanal som er koplet til øvrig returkrets i bare en ende, bør inspiseres regelmessig, spesielt etter kortslutninger med stor strøm. Det kan vurderes å utbedre ved å kople «åpne» ender av langsgående jordledere i kabelkanal til nærmeste jordet kjøreskinne.

Anbefaling 4: Det bør verifiseres med bedre beregning og/eller måling at strøm i kabelskjerm ved jording i begge ender ikke fører til uakseptabel termisk belastning av kabelen.

Anbefaling 5: Det er anbefalt målepunkter for verifisering av beregnet strømfordeling mellom ledere i returkretsen ved måling. Måling bør gjøres i en testsituasjon med kjent total strømbelastning for kretsen.

Anbefaling 6: Jordingsskjema UOS-10-R-85229 og UOS-10-R-85239 bør oppdateres slik at forbindelse mellom langsgående jordleder i kabelkanal og kjøreskinner blir fjernet ved km 1,965 og km 2,000 for hhv. sporene FB1 og FB2.

Anbefaling 7: Det bør følges med på koplinger med C-press mellom langsgående jordleder i aluminium og utjevningsforbindelser i kopper, spesielt den første perioden. Ved tegn til korrosjon ved kontaktpunktene bør koplingene byttes.

Anbefaling 8: Sammenkoplinger mellom kjøreskinner/filterimpedanser og jordledere bør framgå både av returkretsskjemaer og av jordingsplaner. Jordingsplanene UOS-10-R-85228, UOS-10-R-85229 og UOS-10-R-85239, og returkretsskjemaet UOS-10-R-86122, bør vise slike sammenkoplinger mellom langsgående jordleder og filterimpedanser ved dobbeltisolert sporfelt.

Anbefaling 9: Returkretsskjemaet UFB-30-R-65700 revisjon 02C bør oppdateres med korrigeret retningsangivelse for detalj A og detalj D.

11 DOKUMENTINFORMASJON

11.1 Endringslogg

Rev.	Endring
00E	Første utgave
01E	- Returskinne og jordforbindelse med returkretsen i Kongshavntunnelen er fjernet fra ICH A. Det er lagt inn egen beskrivelse av dette i nytt avsnitt 5.1. Alle steder i rapporten som henviser til disse har blitt oppdatert. - Funnet ny feil i returkretsskjema, oppdatert kapittel 9 og lagt til ny anbefaling. - Mindre språklige forbedringer.

11.2 Referanseliste

- [1] Bane NOR: *Teknisk regelverk*, versjon 15.09.2022. Nettadresse: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside>.
- [2] DSB: *Forskrift om elektriske forsyningsanlegg, FEF*, 2006. FOR-2005-12-20-1626
- [3] NEK EN 50122-1:2011 *Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1: Protective provisions against electric shock*.
- [4] NEK EN 50121:2017 *Railway applications – Electromagnetic compatibility*.
 - a. Part 1: General
 - b. Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world
 - c. Part 3-1: Rolling stock – Train and complete vehicle
 - d. Part 3-2: Rolling stock – Apparatus
 - e. Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus
 - f. Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus
- [5] BanePartner: *Vernstudie – Teoretiske undersøkelser*, 2002
- [6] Jernbaneverket: *Kortslutningstester Jærbanen*, 2013
- [7] Bane NOR: *Teknisk spesifikasjon for sugetransformatorer*. Nettadresse: <https://trv.banenor.no/ts/Kontaktledning/Sugetransformator>. Avlest dato: 12.08.2022.
- [8] Kießling, Puschmann, Schmieder: *Fahrleitungen elektrischer Bahnen*, 3. Auflage. Publicis Publishing, 2014. ISBN 978-3-89578-407-1
- [9] Bane NOR: *Teknisk spesifikasjon for filterimpedanser*. Nettadresse: <https://trv.banenor.no/ts/Kontaktledning/Filterimpedanser>. Avlest dato: 12.08.2022.
- [10] NEN 62.75: *Norske normer for kraftkabler – Belastningstabeller*, 1975.
- [11] Bane NOR: *Network statement, 2022*. Nettadresse: <https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=2022>. Avlest dato: 12.08.2022.
- [12] IEC 60287: *Electric cables: Calculation of the current rating* (flere deler)
- [13] NEK IEC 60853: *Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables* (flere deler)
- [14] NEK 440:2022 *Elektriske kraftinstallasjoner*.
- [15] AGJV, Acciona Ghella: *Follobanen, Tunnel. TPS. Challenges with long Auto transformer supply cables*. 2018.

12 VEDLEGG

Vedlegg 1: Dokumentliste

Vedlegg 2: Oversiktstegning over returkrets og jordingsanlegg

Vedlegg 3: Datablad måleinstrument Fluke 1736

VEDLEGG 1: DOKUMENTLISTE

Liste over dokumenter mottatt fra Bane NOR som er lagt til grunn ved utarbeidelse av denne rapporten.

Document ID	Current Revision	Title	FDV No.	FDV Rev.	Oversendt
UFB-30-R-65000	NA	UFB-30-R-65000_ELECNOR_220527_R04 - Midlertidig jordingsanlegg i Blixtunnelen			2022-09-17
UFB-30-R-65001	NA	UFB-30-R-65001_ELECNOR_220527_R08 - Midlertidig jordingsanlegg i Blixtunnelen			2022-09-17
UFB-30-R-65700	02C	Follobanen, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Banestrømforsyning, Returkretsskjema, Kontaktledning, Kobling til sporkrets, Plan og detaljer, Km 1,450 - 10,211	EH-024897-000	000	2022-09-17
UFB-30-R-68001	04C	Follobanen, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Jording og utjevning, Tverrfaglig jordingsplan, Km 1,550 - 2,380	EH-024819-000	000	2022-09-17
UOS-10-A-85372	07D	Hovedbanen Oslo S, Elektro høyspenning, Jordingsanlegg, Fagnotat	EH-022702-000	000	2022-09-17
UOS-10-N-85180	03D	Hovedbanen Oslo S, Trafobygg ved Militærrampa, (TB-T) HK502, Elektro høyspenning, Jordingsstruktur, FB1 Km 1,527	EL-024595-000	000	2022-09-17
UOS-10-N-85189	03D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen, Teknisk bygg Militærrampa, HK502, Elektro høyspenning, Spornivå, Jordingsstruktur, FB1 Km 1,527	EH-022419-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-75010	07D	Hovedbanen Oslo S, Loenga, Elektro høyspenning, Jording, Oversiktstegning, Teknisk bygg Militærrampa, ØB, FB-spor og Loenga	EH-022377-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85224	07C	Hovedbanen Oslo S, Forbindelse Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, Spor? Km 0,900 - 1,100	EH-023452-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85225	07D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1 Km 1,033-1,260	EH-023453-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85226	08D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1 Km 1,180 - 1,390	EH-023621-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85228	08D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1 Km 1,580 - 1,770	EH-023384-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85229	07D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen og Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1, ØB2 Km 1,750 - 1,950	EH-022905-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85230	10D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen og Forbindelsestunnel Blix-Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 1,950 - 2,150	EH-022893-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85231	08D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen og Sydhavna adkomsttunnel, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 2,150 - 2,350	EH-022892-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85232	08D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen og Sydhavna adkomsttunnel, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 2,350 - 2,550	EH-022891-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85233	08D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen og Sydhavna adkomsttunnel, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 2,550 - 2,700	EH-022890-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85234	09D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 2,700 - 2,830	EH-023380-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85235	06D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 2,900 - 3,275	EH-022910-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85236	06D	Hovedbanen Oslo S, Blixtunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1 Km 1,390 - 1,580	EH-023385-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85237	06D	Hovedbanen Oslo S, Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB2 Km 1,375 - 1,575	EH-023379-000	000	2022-09-17

Document ID	Current Revision	Title	FDV No.	FDV Rev.	Oversendt
UOS-10-R-85238	04D	Hovedbanen Oslo S, Loenga, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, ØB1 Km 1,575 -1,757	EH-022902-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-85239	06D	Hovedbanen Oslo S, Blixunnelen, Elektro høyspenning, Tverrfaglig jordingsplan, FB1 Km 1,920 - 2,250	EH-022909-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-86131	03D	Hovedbanen Oslo S, Forbindelse Oslo S - Blixunnelen, Blixunnelen, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Returkretsskjema, FB1 Km 0,950-1,100	EH-023410-000	000	2022-09-17
UOS-10-R-86132	04D	Hovedbanen Oslo S, Blixunnelen og Kongshavntunnelen, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Returkretsskjema, FB1 og ØB1 Km 1,100 - 1,650, ØB2 Km 1,100 - 3,200{CR}	EH-023409-000	000	2022-09-17
UOS-10-X-91003	00C	Hovedbanen Oslo S, Oversikt over nye områdenavn, Plan, ØB2, Km 0,700 - 1,300			2022-09-17
UOS-10-X-91004	00C	Hovedbanen Oslo S, Oversikt over nye områdenavn, Plan, ØB2, Km 1,300 - 2,100			2022-09-17
UOS-10-X-91005	00C	Hovedbanen Oslo S, Oversikt over nye områdenavn, Plan, ØB2, Km 1,800 - 2,700			2022-09-17
UOS-30-N-85194	07D	Hovedbanen Oslo S, Forbindelsestunnel Blix-Kongshavntunnelen vest, HK504, Elektro høyspenning, Jordingsstruktur, ØB2 Km 2,010	EH-022879-000	000	2022-09-17
UOS-80-R-56252	10D	Østfoldbanen V L (Oslo S) - Ski, Ski stasjon, Elektro høyspenning, Kontaktledning, Returkretsskjema, Km 21,350 - 23,800			2022-09-17
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_001	EH-900108-000_000_001		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_002	EH-900108-000_000_002		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_003	EH-900108-000_000_003		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_004	EH-900108-000_000_004		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_005	EH-900108-000_000_005		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_006	EH-900108-000_000_006		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_007	EH-900108-000_000_007		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_008	EH-900108-000_000_008		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_009	EH-900108-000_000_009		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_010	EH-900108-000_000_010		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_011	EH-900108-000_000_011		2022-09-30
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_012	EH-900108-		2022-09-30

Document ID	Current Revision	Title	FDV No.	FDV Rev.	Oversendt
			000_000_012		
N/A		Vernstudie - BanePartner- EH-900108-000_013	EH-900108-000_000_013		2022-09-30
N/A		Kortslutningstest Jærbanen - 201100043-34 Referat	N/A		2022-09-30
N/A		Kortslutningstest Jærbanen - 201100043-34 Testbeskrivelser	N/A		2022-09-30
N/A		Kortslutningstest Jærbanen - 201100043-42 E-post	N/A		2022-09-30
N/A		Kortslutningstest Jærbanen - 201100043-42 Rapport med kommentarer fra Siemens	N/A		2022-09-30
N/A		Returkretsskjema - Trakta - EH-009286-000_000_001	EH-009286-000_000_001		2022-09-30
UOS-10-R-86133	02D	Returkretsskjema - UOS-10-R-86133_02D_001 med kommentar	N/A		2022-09-30
UOS-10-R-86141	01C	Returkretsskjema - UOS-10-R-86141_01C_001 med kommentar	N/A		2022-09-30
UOS-10-R-86141	02D	Returkretsskjema - UOS-10-R-86141_02D_001	EH-023545-000	001	2022-10-01
UOS-10-R-86142	02D	Returkretsskjema - UOS-10-R-86142_02D_001	EH-023546-000	001	2022-10-01
UOS-10-R-86153	03D	Returkretsskjema - UOS-10-R-86153_03D_001	EH-022577-000	001	2022-10-01
UFB-30-A-65609	00E	Follobanen, Tunnel. TPS. Challenges with long Auto transformer supply cables			2022-10-20

Videre er følgende tegninger fra elkraftportalen lagt til grunn:

Tegningsnr.	Tegning
EH-013558-000_000	Returkretsskjema Oslo S Hovedbanen
EH-015256-000_001	Returkretsskjema Oslo S Drammenbanen
EH-013541-000_001	Returkretsskjema Oslo S Gjøvikbanen
EH-022989-000_007	Koplingsskjema Oslo S Koblingshus, bryterkiosker, AT-trafo
EH-022988-000_007	Koplingsskjema Oslo S Blixunnelen
EH-008177-000_012	Koplingsskjema Oslo S Loenga
EH-008322-000_003	Koplingsskjema Loenga Ljan

Det er i tillegg lagt til grunn mottatt returkretsskjema som viser Østfoldbanen, tilkopling til Oslo S og påkopling for Kongshavntunnelen på Østfoldbanen. Skjemaet er en scannet tegning uten nummer, og med håndtegnede markeringer.

TECHNICAL DATA

Fluke 1736 and 1738 Three-Phase Power Loggers



KEY MEASUREMENTS

Automatically capture and log voltage, current, power, harmonics and associated power quality values

FLUKE CONNECT® COMPATIBLE*

View data locally on the instrument, via Fluke Connect mobile app and desktop software or through your facilities' WiFi infrastructure.

CONVENIENT INSTRUMENT POWERING

Power instrument directly from the measured circuit

HIGHEST SAFETY RATING IN THE INDUSTRY

600 V CAT IV/1000 V CAT III rated for use at the service entrance and downstream

More visibility, reduced uncertainty and better power quality and energy consumption decisions

The Fluke 1736 and 1738 Three-Phase Power Loggers built with Fluke Connect® mobile app and desktop software compatibility give you the data you need to make critical power quality and energy decisions in real-time. The ideal test tools for conducting energy studies and basic power quality logging, the 1736 and 1738 automatically capture and log over 500 power quality parameters so you have more visibility into the data you need to optimize system reliability and savings.

An optimized user interface, flexible current probes, and an intelligent measurement verification function that allows you to reduce measurement errors by digitally verifying and correcting common connection errors makes setup easier than ever and reduces measurement uncertainty. Access and share data remotely with your team via the Fluke Connect® app so you can maintain safer working distances and make critical decisions in real-time, reducing the need for protective equipment, site visits and check-ins. You can also quickly and easily chart and graph measurements to help identify issues and create detailed reports with the included Fluke Energy Analyze Plus software package.

- Measure all three phases and neutral with included 4 flexible current probes.
- Comprehensive logging: More than 20 separate logging sessions can be stored on the instruments. In fact, all measured values are automatically logged so you never lose measurement trends. They can even be reviewed during logging sessions and before downloading for real-time analysis.
- Capture dips, swells, and inrush currents: includes event waveform snapshot and high resolution RMS profile, along with date, timestamp and severity to help pinpoint potential root causes of power quality issues.
- Bright, color touch screen: Perform convenient in-the-field analysis and data checks with full graphical display.
- Optimized user interface: Capture the right data every time with quick, guided, graphical setup and reduce uncertainty about your connections with the intelligent verification function.
- Complete "in-the-field" setup through the front panel or Fluke Connect App: no need to return to the workshop for download and setup or to take a computer to the electrical panel.

*Not all models are available in all countries. Check with your local Fluke representative.

- Fully integrated logging: Connect other Fluke Connect devices to the Fluke 1738 to simultaneously log up to two other measurement parameters, virtually any parameter available on a Fluke Connect wireless digital multimeter or module.*
- Energy Analyze Plus application software: Download and analyze every detail of energy consumption and power quality state of health with our automated reporting.

*Not all models are available in all countries. Check with your local Fluke representative.

Applications

Load studies: verify electrical system capacity before adding loads

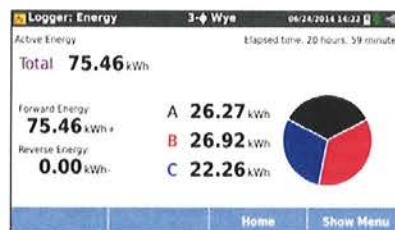
Energy assessments: quantify energy consumption before, and after improvements, to justify energy saving devices

Harmonics measurements: uncover harmonic issues that can damage or disrupt critical equipment

Voltage and current event capture: monitor for dips, swells and inrush currents that cause false resets or nuisance circuit breaker tripping

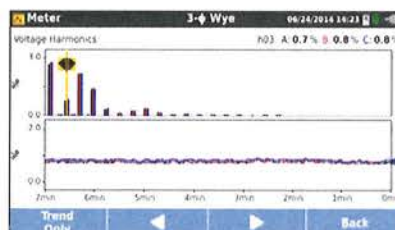
Log the most common parameters

Designed to measure the most critical three-phase power parameters, the 1736 and 1738 can simultaneously log rms voltage, rms current, voltage and current events, voltage and current THD, voltage and current harmonics up to the 50th harmonic, active power, reactive power, power factor, active energy, reactive energy, and more. With enough memory for more than a year of data logging, the 1736 and 1738 can uncover intermittent or hard-to-find issues that might otherwise have been missed.

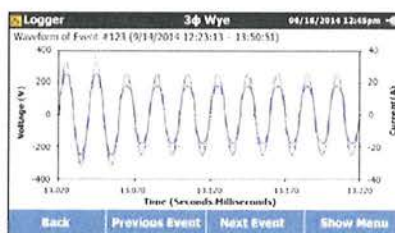


Conduct multiple studies with one instrument; download while studies are in progress via USB stick or Fluke Connect mobile app.

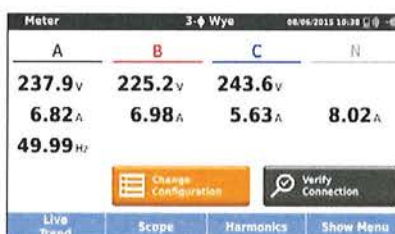
Suitable for NEC 220 load studies



Discover the source of voltage and current distortion that may be affecting your equipment



Capture voltage events and inrush currents with pre-defined thresholds



Simple setup means all available measured parameters are automatically selected during logging so you can be sure you have the data you need, even before you know you need it

Easy to use

The four current probes are connected separately; the instrument automatically detects and scales the probes. The thin current probes are designed to easily get through tight conductor spacing and are easily set to 150 or 1500 A for high accuracy in nearly any application. An innovative tangle-free flat voltage lead makes connection simple and reliable and the instrument's intelligent 'Verify Connection' feature automatically checks to make sure the instrument is connected correctly and can digitally correct common connection issues without having to disconnect measurement leads.

The detachable power supply can be conveniently and safely powered directly from the measured circuit – no more searching for power outlets or having to run multiple extension cords to the logging location.

Meter				3-φ Wye	06/24/2014 14:25
A	B	C	Result		
237.9V	237.1V	237.5V	↻		
▲6.60A	▲6.73A	▼5.61A	X		
1.51kW	1.55kW	-1.26kW			
Detected phase mapping: Voltage: 1-A 2-B 3-C Current: 1-A 2-B 3-C*					
Correct Digitally		Auto Correct		Generator Mode	
				Back	

Intelligent verification function that digitally corrects most common measurement connections

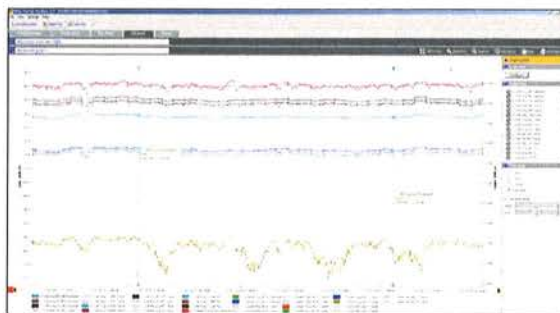
Data downloading couldn't be easier or more flexible:

- Download directly to a USB flash drive that plugs directly into the USB port of the instrument
- View measurements remotely via the Fluke Connect mobile app and desktop software, helping you maintain safer working distances and reducing the need for personal protective equipment and unnecessary site visits and check-ins*

*Not all models are available in all countries. Check with your local Fluke representative.

Analysis and Reporting

Capturing logged data is just one part of the task. Once you have the data, you need to create useful information and reports that can be easily shared and understood by your organization or customers. Fluke Energy Analyze Plus software makes that task as simple as possible. With powerful analysis tools and the ability to create customized reports in minutes you'll be able to communicate your findings and quickly solve problems so you can optimize system reliability and savings.



Quickly and easily compare any measured parameter



Specifications

Accuracy			
Parameter	Range	Max. resolution	Intrinsic accuracy at reference conditions (% of reading + % of full scale)
Voltage	1000 V	0.1 V	± (0.2 % + 0.01 %)
Current	i17xx-flex 1500 12"	150 A	± (1 % + 0.02 %)
		1500 A	± (1 % + 0.02 %)
	i17xx-flex 3000 24"	300 A	± (1 % + 0.03 %)
		3000 A	± (1 % + 0.03 %)
	i17xx-flex 6000 36"	600 A	± (1.5 % + 0.03 %)
		6000 A	± (1.5 % + 0.03 %)
i40s-EL clamp	4 A	± (0.7 % + 0.02 %)	
	40 A	± (0.7 % + 0.02 %)	
Frequency	42.5 Hz to 69 Hz	0.01 Hz	± (0.1 %)
Aux input	± 10 V dc	0.1 mV	± (0.2 % + 0.02 %)
Voltage min/max	1000 V	0.1 V	± (1 % + 0.1 %)
Current min/max	defined by accessory	defined by accessory	± (5 % + 0.2 %)
THD on voltage	1000 %	0.1 %	± 0.5
THD on current	1000 %	0.1 %	± 0.5
Voltage harmonics 2nd ... 50th	1000 V	0.1 V	≥ 10 V: ± 5 % of reading < 10 V: ± 0.5V
Current harmonics 2nd ... 50th	defined by accessory	defined by accessory	≥ 3 % of current range: ± 5 % of reading < 3 % of current range: ± 0.15 % of range
Unbalance	100 %	0.1 %	± 0.2

Intrinsic uncertainty ± (% of reading + % of range) ¹					
Parameter	Influence quantity	iFlex1500-12 150A/1500A	iFlex3000-24 300A/3000A	iFlex6000-36 600/6000A	i40s-EL 4A/40A
Active Power P Active Energy E _a	PF ≥ 0.99	1.2 % + 0.005 %	1.2 % + 0.0075 %	1.7 % + 0.0075 %	1.2 % + 0.005 %
Apparent Power S Apparent Energy E _{ap}	0 ≤ PF ≤ 1	1.2 % + 0.005 %	1.2 % + 0.0075 %	1.7 % + 0.0075 %	1.2 % + 0.005 %
Reactive Power Q Reactive Energy E _r	0 ≤ PF ≤ 1	2.5 % of measured apparent power			
Power Factor PF Displacement Power Factor DPF/cosφ	-	± 0.025			
Additional uncertainty in % of range ¹	V _{P-N} > 250 V	0.015 %	0.0225 %	0.0225 %	0.015 %

¹Range = 1000 V × I range

Reference conditions:

- Environmental: 23 °C ± 5 °C, instrument operating for at least 30 minutes, no external electrical/magnetic field, RH < 65 %
- Input conditions: Cosφ/PF=1, Sinusoidal signal f=50 Hz/60 Hz, power supply 120 V/230 V ± 10 %.
- Current and power specifications: Input voltage 1 ph: 120 V/230 V or 3 ph wye/delta: 230 V/400 V Input current: I > 10 % of I range
- Primary conductor of clamps or Rogowski coil in center position
- Temperature coefficient: Add 0.1 × specified accuracy for each degree C above 28 °C or below 18 °C

Electrical specifications
Power supply

Voltage range	100 V to 500 V using safety plug input when powering from the measurement circuit 100 V to 240 V using standard power cord (IEC 60320 C7)
Power consumption	Maximum 50 VA (max. 15 VA when powered using IEC 60320 input)
Efficiency	≥ 68.2 % (in accordance with energy efficiency regulations)
Maximum no-load consumption	< 0.3 W only when powered using IEC 60320 input
Mains power frequency	50/60 Hz ± 15 %
Battery	Li-ion 3.7 V, 9.25 Wh, customer-replaceable
On-battery runtime	Four hours in standard operating mode, up to 5.5 hours in power saving mode
Charging time	< 6 hours

Data acquisition

Resolution	16-bit synchronous sampling
Sampling frequency	10.24 kHz at 50/60 Hz, synchronized to mains frequency
Input signal frequency	50/60 Hz (42.5 to 69 Hz)
Circuit types	1- ϕ , 1- ϕ IT, split phase, 3- ϕ delta, 3- ϕ wye, 3- ϕ wye IT, 3- ϕ wye balanced, 3- ϕ Aron/Blondel (2-element delta), 3- ϕ delta open leg, currents only (load studies)
Data storage	Internal flash memory (not user replaceable)
Memory size	Typical 10 logging sessions of 8 weeks with 1-minute intervals and 500 events ¹

Basic interval

Measured parameters	Voltage, current, aux, frequency, THD V, THD A, power, power factor, fundamental power, DPF, energy
Averaging interval	User selectable: 1 sec, 5 sec, 10 sec, 30 sec, 1 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min
Averaging time min/max values	Voltage, Current: Full cycle RMS updated every half cycle (URMS1/2 according to IEC61000-4-30) Aux, Power: 200ms

Demand Interval (Energy Meter Mode)

Measured parameters	Energy (Wh, varh, VAh), PF, maximum demand, cost of energy
Interval	User selectable: 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, off

Power quality measurements

Measured parameter	Voltage, frequency, unbalance, voltage harmonics, THD V, current, harmonics, THD A, TDD
Averaging interval	10 min
Individual harmonics	2nd ...50th harmonic
Total harmonic distortion	Calculated on 50 harmonics
Events	Voltage: dips, swells, interruptions, current: inrush current
Triggered recordings	Full cycle RMS updated every half cycle of voltage and current (Urms1/2 according to IEC61000-4-30) Waveform of voltage and current

¹The number of possible logging sessions and logging period depends on user requirements.

Electrical specifications cont.
Standards Compliance

Harmonics	IEC 61000-4-7: Class 1 IEEE 519 (short time harmonics)
Power quality	IEC 61000-4-30 Class S, IEC62586-1 (PQI-S device)
Power	IEEE 1459
Power quality compliance	EN50160 (for measured parameters)

Interfaces

USB-A	File transfer via USB flash drive, firmware updates, max. supply current: 120 mA
WiFi	File transfer and remote control via direct connection or WiFi infrastructure
Bluetooth	Read auxiliary measurement data from Fluke Connect® 3000 series modules (requires 1738, or 1736 upgrade option)
USB-mini	Data download device to PC

Voltage inputs

Number of inputs	4 (3 phases and neutral)
Maximum input voltage	1000 V _{rms} , CF 1.7
Input impedance	10 MΩ
Bandwidth	42.5 Hz - 3.5 kHz
Scaling	1:1 and variable
Measurement category	1000 V CAT III/600 V CAT IV

Current inputs

Number of inputs	4, mode selected automatically for attached sensor
Input voltage	Clamp input: 500 mV _{rms} /50 mV _{rms} ; CF 2.8
Rogowski coil input	150 mV _{rms} /15 mV _{rms} at 50 Hz, 180 mV _{rms} /18 mV _{rms} at 60 Hz; CF 4; all at nominal probe range
Range	1 A to 150 A/10 A to 1500 A with thin flexible current probe i17XX-flex1500 12" 3 A to 300 A/30 A to 3000 A with thin flexible current probe i17XX-flex3000 24" 6 A to 600 A/60 A to 6000 A with thin flexible current probe i17XX-flex6000 36" 40 mA to 4 A/0.4 A to 40 A with 40 A clamp i40s-EL
Bandwidth	42.5 Hz - 3.5 kHz
Scaling	1:1 and variable

Auxiliary inputs

Number of inputs	2
Input range	0 to ± 10 V dc, 1 reading/s
Scale factor	Format: mx + b (gain and offset) user configurable
Displayed units	User configurable (7 characters, for example, °C, psi, or m/s)

Wireless connection

Number of inputs	2
Supported modules	Fluke Connect® 3000 series
Acquisition	1 reading/s

Environmental specifications

Operating temperature	-10 °C to +50 °C (14 °F to 122 °F)
Storage temperature	-20 °C to +60 °C (-4 °F to 140 °F), with battery: -20 °C to +50 °C (-4 °F to 122 °F)
Operating humidity	10 °C to 30 °C (50 °F to 86 °F) max. 95 % RH 30 °C to 40 °C (86 °F to 104 °F) max. 75 % RH 40 °C to 50 °C (104 °F to 122 °F) max. 45 % RH
Operating altitude	2000 m (up to 4000 m derate to 1000 V CAT II/600 V CAT III/300 V CAT IV)
Storage altitude	12,000 m
Enclosure	IP50 in accordance with EN60529
Vibration	MIL-T-28800E, Type 3, Class III, Style B IEC 61010-1
Safety	IEC Mains Input: Overvoltage Category II, Pollution Degree 2 Voltage Terminals: Overvoltage Category IV, Pollution Degree 2 IEC 61010-2-031: CAT IV 600 V / CAT III 1000 V
Electromagnetic compatibility (EMC)	EN 61326-1: Industrial CISPR 11: Group 1, Class A Korea (KCC): Class A Equipment (industrial broadcasting and communication equipment) USA (FCC): 47 CFR 15 subpart B. This product is considered an exempt device per clause 15.103
Temperature coefficient	0.1 x accuracy specification/°C

General specifications

Color LCD display	4.3-inch active matrix TFT, 480 pixels x 272 pixels, resistive touch panel
Warranty	Instrument and power supply: Two-years (battery not included) Accessories: one-year Calibration cycle: two-years
Dimensions	Instrument: 19.8 cm x 16.7 cm x 5.5 cm (7.8 in x 6.6 in x 2.2 in) Power supply: 13.0 cm x 13.0 cm x 4.5 cm (5.1 in x 5.1 in x 1.8 in) Instrument with power supply attached: 19.8 cm x 16.7 cm x 9 cm (7.8 in x 6.6 in x 3.5 in)
Weight	Instrument: 1.1 kg (2.5 lb) Power supply: 400 g (0.9 lb)
Tamper protection	Kensington lock slot

i17xx-flex 1500 12" Flexible Current Probe specifications

Measuring range	1 to 150 A ac/10 to 1500 A ac
Nondestructive current	100 kA (50/60 Hz)
Intrinsic error at reference condition*	± 0.7 % of reading
Accuracy 173x + iFlex	± (1 % of reading + 0.02 % of range)
Temperature coefficient over operating temperature range	0.05 % of reading/°C 0.09 % of reading/°F
Working voltage	1000 V CAT III, 600 V CAT IV
Probe cable length	305 mm (12 in)
Probe cable diameter	7.5 mm (0.3 in)
Minimum bending radius	38 mm (1.5 in)
Output cable length	2 m (6.6 ft)
Weight	115 g
Probe cable material	TPR
Coupling material	POM + ABS/PC
Output cable	TPR/PVC
Operating temperature	-20 °C to +70 °C (-4 °F to 158 °F) temperature of conductor under test shall not exceed 80 °C (176 °F)
Temperature, non-operating	-40 °C to +80 °C (-40 °F to 176 °F)
Relative humidity, operating	15 % to 85 % non-condensing
IP rating	IEC 60529:IP50
Warranty	One-year

* Reference condition:

- Environmental: 23 °C ± 5 °C, no external electrical/magnetic field, RH 65 %
- Primary conductor in center position

Model features

	1736 Power Logger			1738 Power Logger		
	FLUKE-1736/B	FLUKE-1736/EUS	FLUKE-1736/INTL	FLUKE-1738/B	FLUKE-1738/EUS	FLUKE-1738/INTL
Model	Power logger basic version	Power logger (EU and US)	Power logger (International)	Power logger advanced version	Power logger advance version (EU and US)	Power logger advanced version (International)
Functions						
PQ Health (EN50160 analysis)	Opt.	Opt.	Opt.	•	•	•
IEEE 519 reporting	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.
Fluke Connect® module support (up to 2 modules**)	Opt.	Opt.	Opt.	•	•	•
Recording						
Trend	•	•	•	•	•	•
Waveform Snapshots + RMS profile	Opt.	Opt.	Opt.	•	•	•
Communication						
USB (mini B)	•	•	•	•	•	•
WiFi download of instrument data	•	•	Opt.	•	•	Opt.
WiFi download via WiFi access point (requires registration)**	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.
Included Accessories						
WiFi only adapter**	-	•	-	-	-	-
WiFi and BLE adapter**	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	•	Opt.
USB flash drive (4GB)	•	•	•	•	•	•
USB Cable	•	•	•	•	•	•
3PHVL-173 Flat Cable	•	•	•	•	•	•
1x red, 1x black 0.1m cable	•	•	•	•	•	•
1x red, 1x black 1.5m lead	•	•	•	•	•	•
Alligator clips	4	4	4	4	4	4
C173x Soft Case	•	•	•	•	•	•
Color Coding set	•	•	•	•	•	•
173x-Hanger kit	Opt.	Opt.	Opt.	•	•	•
MPI-Magnet Probe	Opt.	Opt.	Opt.	4	4	4
i173X-flex1500 12"	Opt.	4	4	Opt.	4	4
Line cord	EU, UK, US, AU, BR	EU, US, UK	EU, UK, US, AU, BR	EU, UK, US, AU, BR	EU, US, UK	EU, UK, US, AU, BR
Compatible Optional Accessories						
173X- AUX analog adapter	•	•	•	•	•	•
i17XX-flex1500 12" Current Probe	•	•	•	•	•	•
i17XX-flex3000 24" Current Probe	•	•	•	•	•	•
i17XX-flex6000 36" Current Probe	•	•	•	•	•	•
i40s-EL Current Clamp	•	•	•	•	•	•
IEEE 519 reporting opt	•	•	•	•	•	•
1736 to 1738 upgrade (1736/UPGRADE)	•	•	•	-	-	-

* Modules not included

** Not all models are available in all countries. Check with your local Fluke representative.



Ordering information**

- FLUKE-1736/B Power Logger, Basic version (excludes current probes)
- FLUKE-1736/EUS Power Logger, EU and US version (includes current probes)
- FLUKE-1736/INTL Power Logger, International version (includes current probes)
- FLUKE-1736/WINTL Power Logger, International wireless version (includes current probes)
- FLUKE-1738/B Power Logger, Advanced version (excludes current probes)
- FLUKE-1738/EUS Power Logger, EU/US Advanced version (includes current probes)
- FLUKE-1738/INTL Power Logger, International advanced version (includes current probes)
- FLUKE-1738/WINTL Power Logger, International wireless version (includes current probes)

Fluke-1736 includes:

Instrument, power supply, voltage test leads, alligator clips (4x), 12 in 1,500A flexible current probe (4x), soft case, Energy Analyze Plus software, WiFi adapter**, line cords, color coding set and documentation on USB flash drive

Fluke 1738 includes:

Instrument, power supply, voltage test leads, alligator clips (4x), 12 in 1,500A flexible current probe (4x), soft case, Energy Analyze Plus software, magnetic hanging strap, magnetic voltage probes (4x), WiFi/BLE adapter**, line cords, color coding set and documentation on USB flash drive

**Not all models are available in all countries. Check with your local Fluke representative.

**See it. Save it. Share it.
All the facts, right in the field.**

Fluke Connect® with ShareLive™ video call is the largest system of software and wireless test tools that lets you stay in contact with your entire team without leaving the field*. The Fluke Connect software is compatible with the following devices: iPhone models 4S and up running iOS 8.0 or higher, iPad Air and iPad Mini (2nd generation) in an iPhone frame on iPad and iPod Touch (5th generation), HTC One and One M8 running Android 4.4.x or higher, LG G3 and Nexus 5 running Android 4.4.x or higher, Samsung Galaxy S4 running Android 4.3.x or higher, Samsung Galaxy S5 running Android 4.4.x or higher and works with over 30 different Fluke products – the largest system of connected test tools in the world. And more are on the way. Go to the Fluke website to find out more: www.flukeconnect.com.

*Within provider's wireless service area.

Download the app at:



Smartphone wireless service and data plan not included with purchase.



All trademarks are the property of their respective owners. Smart phone, wireless service and data plan not included with purchase. First 5 GB of storage is free. Compatible with iPhone 4x and up running iOS 7 or higher, iPad (in an iPhone frame on iPad) and Galaxy S4, Nexus 5, HTC One running Android™ 4.4.x or higher. Apple and the Apple logo are trademarks of Apple Inc. registered in the U.S. and other countries. App Store is a service mark of Apple Inc. Google Play is a trademark of Google Inc.

Fluke Connect is not available in all countries.

Fluke. Keeping your world up and running.®

Fluke Corporation
PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.
Fluke Europe B.V.
PO Box 1186, 5602 BD
Eindhoven, The Netherlands

For more information call:
In the U.S.A. (800) 443-5853 or
Fax (425) 446-5116
In Europe/M-East/Africa +31 (0) 40 2675
200 or
Fax +31 (0) 40 2675 222
In Canada (800)-36-FLUKE or
Fax (905) 890-6866
From other countries +1 (425) 446-5500 or
Fax +1 (425) 446-5116
Web access: <http://www.fluke.com>

Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.

©2015 Fluke Corporation. Specifications subject to change without notice. Printed in U.S.A. 8/2015 6006033A-en