


Follobaneprojektet

Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember

00E	Utgitt til driftsleder før spenningsetting	06.02.2023	SD	TANGEM	AKK
Revisjon	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. Av
Tittel: Follobaneprojektet Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember		Sider: 46	Produisert av: Jernbaneteknikk Elkraftsystem		
		Prod.dok.nr.:		Rev:	
		Erstatter:			
		Erstattet av:			
Prosjekt:	Follobaneprojektet	Dokumentnummer: UOS-00-A-91196		Revisjon: 00E	
		Drift dokumentnummer:		Drift rev.:	

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	4
1.1	HENSIKT	4
1.2	BAKGRUNN	4
1.3	ORGANISERING	4
1.4	OPPBYGNING	4
1.5	TERMINOLOGI / UTFYLLENDE BESKRIVELSE	4
2	FOLLOBANEN	5
2.1	BANESTREKNINGEN	5
2.2	STRØMFORSYNINGEN	5
3	OVERSIKT OVER HENDELSENE	7
3.1	SKADER	7
3.2	TIDSLINJE	7
3.3	OPPDELING AV UNDERSØKELSE	8
4	KRAFTKABLER	9
4.1	INNLEDNING	9
4.2	OBSERVASJONER	10
4.2.1	<i>Håndtering av kabelskjerm</i>	10
4.2.2	<i>Skjermkapasitet</i>	10
4.2.3	<i>Varmgang</i>	11
4.2.4	<i>Strøm i kabelskjerm</i>	13
4.2.5	<i>Andre observasjoner</i>	14
4.3	UMIDDELBARE VURDERINGER	14
4.4	FORELØPIGE KONKLUSJONER	14
5	KORTSLUTNINGER I TUNNELEN	16
5.1	INNLEDNING	16
5.2	OBSERVASJONER	16
5.2.1	<i>Kortslutning</i>	16
5.2.2	<i>Isolator</i>	17
5.2.3	<i>Skade i tunneltak</i>	18
5.2.4	<i>Andre observasjoner</i>	18
5.3	UMIDDELBARE VURDERINGER	18
5.4	FORELØPIGE KONKLUSJONER	19
6	TEKNISK ROM 53	20
6.1	INNLEDNING	20
6.2	OBSERVASJONER	20
6.2.1	<i>Utjevning</i>	20
6.2.2	<i>Brann</i>	20
6.2.3	<i>Andre observasjoner</i>	21
6.3	UMIDDELBARE VURDERINGER	22
6.4	FORELØPIGE KONKLUSJONER	22
7	KORTSLUTNINGSVERN OG KONTROLLANLEGG	23
7.1	INNLEDNING	23
7.2	OBSERVASJONER	23
7.2.1	<i>Kortslutninger/vernutførelser</i>	23
7.2.2	<i>Brannalarmer</i>	24
7.2.3	<i>Direkte innkobling</i>	25
7.2.4	<i>Forsinket utkobling</i>	25
7.2.5	<i>Gjentatt innkobling</i>	25
7.2.6	<i>Andre observasjoner</i>	25

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	3 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

7.3	UMIDDELBARE VURDERINGER.....	26
7.4	FORELØPIGE KONKLUSJONER.....	27
8	MULIG ÅRSAKSRESONNEMENT	29
8.1	OVERSIKT	29
8.2	KRAFTKABLENE	29
8.3	KORTSLUTNINGEN I TUNNELEN	29
8.4	KORTSLUTNINGSVERN OG KONTROLLANLEGG	30
8.5	TESTKJØRING 23. DESEMBER.....	31
8.6	USIKKERHETER	31
9	KONKLUSJON	33
9.1	DISKUSJON	33
9.2	KONKLUSJON	33
10	DOKUMENTINFORMASJON	34
10.1	ENDRINGSLOGG.....	34
10.2	REFERANSELISTE	34
10.3	VEDLEGGSLISTE	35
	VEDLEGG 1 MATERIELLE SKADER.....	36
	VEDLEGG 2 GROV TIDSLINJE	37
	VEDLEGG 3 VÆRFORHOLD.....	39
	VEDLEGG 4 OVERSIKT OVER VERNUTLØSNINGER.....	40
	VEDLEGG 5 OVERSIKT OVER TOG I TUNNELEN.....	42
	VEDLEGG 6 STRØM- OG SPENNINGSKURVER UTVALGTE KORTSLUTNINGER	43

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	4 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

1 INNLEDNING

1.1 Hensikt

Denne rapporten beskriver Bane NORs umiddelbare tekniske undersøkelser, vurderinger og foreløpige konklusjoner etter brannene i strømforsyningsanleggene med påfølgende stans i togtrafikken på Follobanen i desember 2022. Hensikten er å sette opp et årsaksresonnement som underlag for vurdering av tiltak og restrisiko for beslutning om spenningssetting, testkjøring og idriftsettelse i januar og februar 2023.

Vurdering av tiltak med restrisiko er gitt i eget dokument. Dersom det kommer frem nye observasjoner eller vurderinger kan det påvirke endelig konklusjon. Det er ikke hensikten med rapporten å identifisere bakenforliggende årsaker til hendelsene.

1.2 Bakgrunn

Follobanen består av to enkeltsporede jernbanetunneler (Blixtunnelen) mellom Oslo og Ski. Den ble åpnet for ordinær trafikk 11. desember 2022. 19. desember brøt det ut brann i strømforsyningsanleggene og banen ble deretter stengt. Anlegget utbedres, men under testkjøring 23. desember brøt det ut ny brann. Siden da har det ikke vært togtrafikk på banen.

1.3 Organisering

Bane NOR har overtatt jernbaneanlegget fra totalentreprenørene. Utbyggingsprosjektet Follobanen har overlevert prosjektet til forvaltningsorganisasjonen i Drifts- og teknologidivisjonen. Prosjektet har likevel etter hvert blitt tildelt ansvaret for undersøkelsene av hendelsene og gjenoppbyggingen anlegget, og har fått støtte fra forvaltningen.

1.4 Oppbygning

Rapporten beskriver tekniske observasjoner og foreløpige delkonklusjoner før det settes opp en mulig teknisk årsakssammenheng. Det er uungåelig at teksten i rapporten blir teknisk. Men det er intensjonen at rapporten skal kunne leses og forstås av personer uten dyp teknisk innsikt. Derfor gis det flere steder en kort teknisk beskrivelse av jernbaneanleggets oppbygning og virkemåte. Videre gis de fleste observasjonene og foreløpige konklusjonene titler som brukes som referanse videre i årsaksressonnementet.

1.5 Terminologi / Utfyllende beskrivelse

Brann	Uønsket eller ukontrollert forbrenningsprosess som kjennetegnes av varmeavgivelse ledsaget av røyk, flamme eller gløding.[1]
Elektrisk varmgang	Varme som oppstår i punkter eller ledere der strømmen som passerer, møter større motstand enn forutsatt. [1]

2 FOLLOBANEN

2.1 Banestrekningen

Follobanen består av Blix-tunnelen på 22 km som har to separate løp for togtrafikken mellom Oslo S og Ski stasjon. Ett løp er for tog Oslo-Ski (FB1) og det andre for tog Ski-Oslo (FB2), begge dimensjonert for 250 km/h. Banen er prosjektert og bygget gjennom tre parallelle totalentrepriser; Innføring Oslo S, Blix-tunnelen og Ski stasjon. Selve tunnelene er laget av tunnelboremaskiner og foret med betongelementer. Oversikt og tversnitt er vist i Figur 1.



Figur 1 Oversikt over Follobanen og tversnitt av Blix-tunnelen.

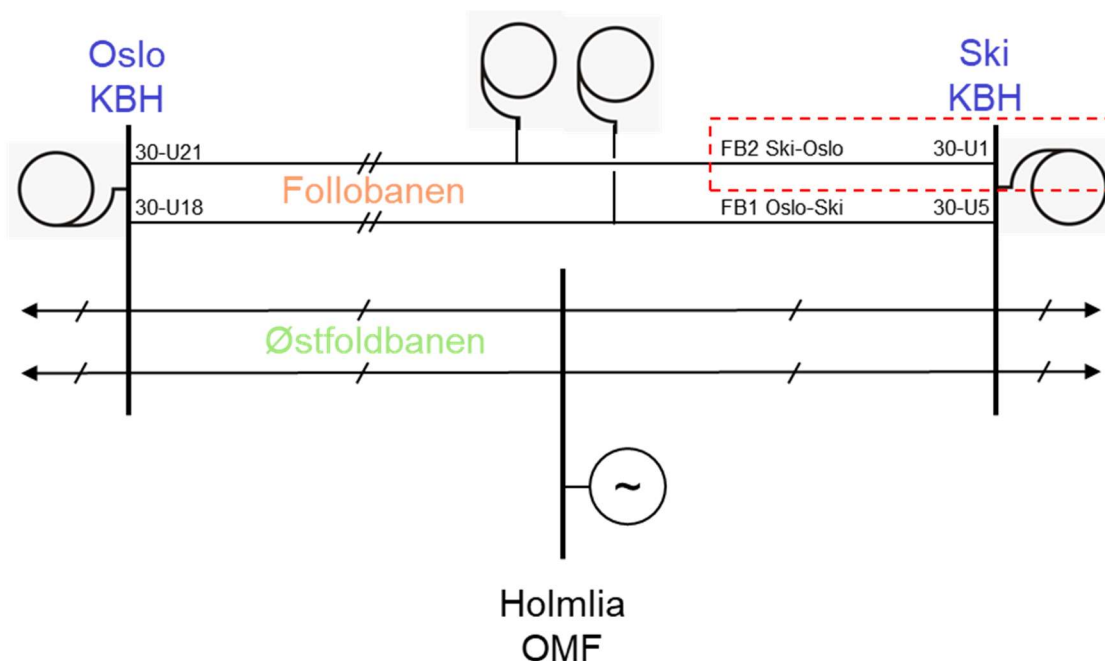
2.2 Strømforsyningen

Den elektriske kraften til fremdriften av togene på banen leveres fra eksisterende omformerstasjoner i Oslo-området og fordeles til de to tunnelløpene via kontaktlednings- og bryteranlegg i Oslo og Ski. Kontaktledningen med spenning på 15 kV 16 ⅔ Hz overfører den elektriske kraften til togene og er delt opp i seksjoner som forsynes fra et autotransformatoranlegg på 30 kV.

Autotransformatoranlegget består av to kraftledninger, positiv fase og negativ fase, for hvert tunnelløp samt autotransformatorene som er plassert i endene av tunnelen samt på Åsland i midten av strekningen som vist skjematisk i Figur 2. Follobanen består av to spor, FB1 og FB2. FB1 blir forsynt fra Ski via avgangen U5 og i Oslo ved avgangen U18. FB2 blir forsynt fra U1 i Ski og U21 i Oslo.

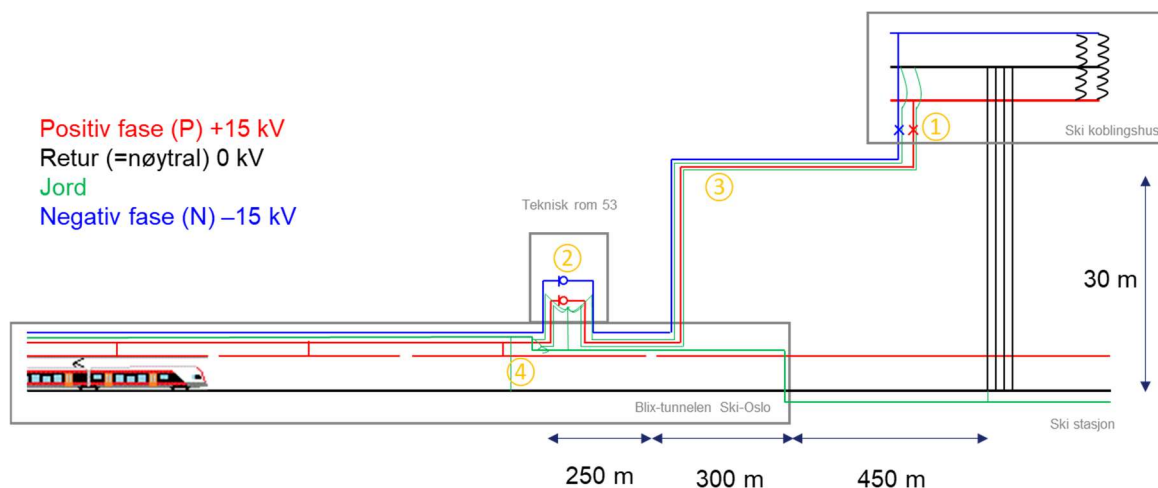
Løsningen muliggjør overføring av elektrisk kraft på dobbelt spenningsnivå med høy kapasitet, lavt spenningsfall og lave energitap. Kraftledningene i tunnelene er uisolerte liner (wire), og den elektriske forbindelsen mellom tunnelene og koblingsanleggene er høyspenningskabler med retur i kjøreskinner og hovedreturforbindelse (kabel). Brytere og annet teknisk utstyr etc. i tunnelen er plassert i egne tekniske rom.

Langs banen er det et jordingsanlegg som består av en sammenhengende jordline montert i taket i begge tunnelløpene. Denne er festet til samme hengemast som de to kraftledningene for autotransformatoranlegget. Jordlinene er koblet til kjøreskinnene for hver 250 m, og det er forbindelse mellom jordlinene i de to løpene hver 500m. En hensikt med jordingsanlegget er å utgjøre en definert strømvei ved kortslutning eller jordslutning.



Figur 2 Strømforsyningen til Follobanen med kobling til andre baner i Oslo og Ski. Strømforsyningen på Follobanen er tofasert (//) og andre baner er enfasert (/). Rød stiplet ramme er vist i Figur 3. Kanelbollene på figuren er grupper av autotransformatorer.

Strømforsyningen fra Ski til ett av sporene i Blix-tunnelen er vist i Figur 3 med angivelse av de ulike ledningssystemene. Teknisk rom 53 er plassert mellom de to sporene og på samme nivå, men er på tegningen plassert over for bedre oversikt.



Figur 3 Strømforsyning fra Ski til ett av sporene i Blix-tunnelen. Løsningen er lik for det andre sporet. Ski koblingshus, teknisk rom 53 og store deler av føringsveien mellom dem er felles for begge sporene. Tallene markerer steder det refereres til i teksten.

Infrastrukturinstallasjoner langs banen forsynes fra et eget fordelingsnett (22 kV 50 Hz trefase).

Nærmere informasjon om strømforsyningen til togene på Follobanen finnes i koblings skjemaene. Se referanse [2] og [3].

3 OVERSIKT OVER HENDELSENE

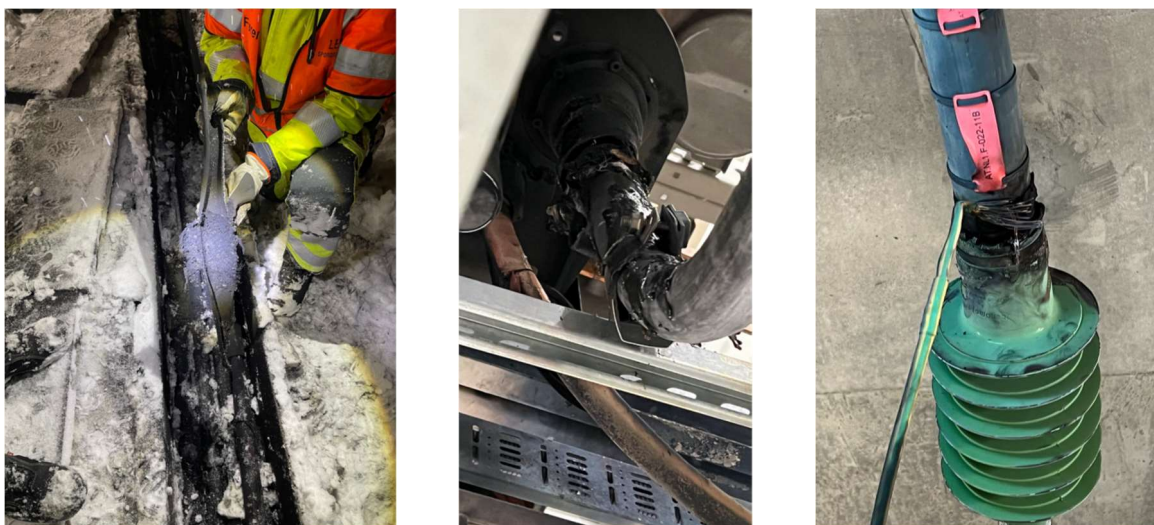
Første steg i undersøkelsene er å få oversikt over skadene og etablere en tidslinje for å identifisere hva som bør undersøkes videre.

3.1 Skader

Det har ikke vært registrert personskader. Detaljert liste over materielle skader er gitt i vedlegg 1 og er oppsummert:

- **Brann 19. desember:**
 - Brent endeavslutning i Ski koblingshus på kraftkabel til sporet Ski-Oslo
 - Brent kabelskjøt på kraftkabel mellom Ski koblingshus og sporet Ski-Oslo
 - Brente endeavslutninger i teknisk rom 53 på kraftkabler fra Ski koblingshus
 - Smeltede utjevningsforbindelser til manøvermaskin for kabelendebrytere i teknisk rom 53
- **Brann 23. desember:**
 - Brent nymontert kabelskjøt i Ski koblingshus på kraftkabel til sporet Ski-Oslo
- **Kortslutninger 15. til 23. desember:**
 - Lysbumerker på hengemast, isolator og tak i tunnelen spor Ski-Oslo
 - Delvis splintret bæreline i kontaktledning i tunnelen spor Ski-Oslo
 - Avskalling og nedfall av betongbiter (opptil 1 kg) fra tunneltaket spor Ski-Oslo
 - Brent endeavslutning i Ski koblingshus på kraftkabel til sporet Ski-Oslo

Figur 4 viser eksempler på skader.



Figur 4 Brente kabelskjøter og endeavslutninger

Mellom brannene 19. og 23. desember ble det elektriske utstyret reparert. Brannstedene er markert i Figur 3 med punkt ①, ② og ③. Kortslutningsstedet i tunnelen er punkt ④. Bilder av skader og plasseringer er gitt i referanser [4] og [5].

3.2 Tidslinje

En grov tidslinje for hendelsene samt identifisert relevant informasjon før og etter er gitt i vedlegg 2 og er oppsummert:

- **November 2021 til september 2022:** Flere tilfeller av feil på kraftkabler i forbindelse med Ski koblingshus og Ski stasjon (forsyner ikke Follobanen).
- **September 2022 til desember 2022:** Vurderinger av konsept for håndtering av kraftkablenes skjerm med konklusjon om overvåking og/eller oppdatere beregningsunderlag.

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	8 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

- **Desember 2022:** Prøvedrift fra 27. november og kommersiell drift av Follobanen fra 11. desember. Måling av strøm i kabelskjermer.
- **15.-19. desember 2022:** Tre utløsninger av kortslutningsvern for kontaktledningsanlegget i tunnellopet til spor Ski-Oslo som automatisk gjeninnkobles.
- **19. desember:** Ny permanent utløsning av kortslutningsvern samme sted. Brann i endeavslutning for kabel Ski koblingshus, kabelskjøt i kabelkanal og endeavslutninger for kraftkabler i teknisk rom 53. Feilsøking foretatt av leder for kobling indikerer kortslutning nær Ski. Kommersiell togtrafikk stopper.
- **19.-22. desember:** Skadet anlegg gjenoppbygges og tunnelen inspiseres.
- **22. desember:** Anlegget spenningsettes.
- **23. desember:** Laboratorieundersøkelse av de skadde kraftkablene viser elektrisk varmgang i kabelskjermen der kabelen er skjøtet.
- **23. desember:** Test av anlegget med et testtog i pendel Oslo-Ski begge tunnellop. Kortslutning i forsyningen til sporet Ski-Oslo med påfølgende brann i kabelskjøt i Ski koblingshus. Anlegget frakobles.
- **30. desember:** Kortslutningsstedet i negativ fase i tunnelen Ski-Oslo identifiseres.
- **2.-4. januar 2023:** Flere skader på kabler oppdaget.
- **11. januar 2023:** Feil på kraftkabel på Ski stasjon som ikke forsyner Follobanen og brann (røykutvikling) i Ski koblingshus.

Dette notatet konsentrerer seg om hendelsene knyttet til Blixttunnelen og Ski koblingshus desember 2022.

3.3 Oppdeling av undersøkelse

Undersøkelsene så langt indikerer at observasjonene knyttet til hendelsen kan grupperes etter forhold knyttet til

- kraftkablens skjerm (blant annet punkt ③ i Figur 3)
- kortslutninger i tunnelen (punkt ④ i Figur 3)
- teknisk rom 53 (punkt ② i Figur 3)
- kortslutningsvern og kontrollanlegg (punkt ① i Figur 3)

4 KRAFTKABLER

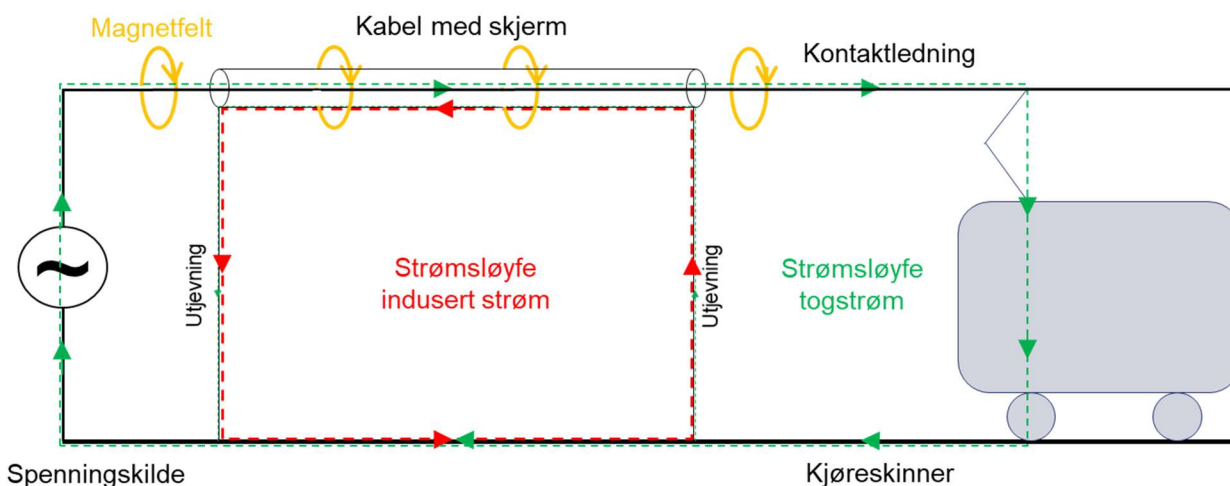
4.1 Innledning

En kraftkabel er en teknisk løsning for en kraftledning og som brukes der det ikke er hensiktsmessig med kraftline (wire) i luft. Kabelen har egen isolasjon som beskytter omgivelsene mot ledningens strøm og spenning. Isolasjonen beskyttes igjen av en metallisk skjerm mot mekaniske påkjenninger og i noen tilfeller også kjemiske påkjenninger, for eksempel vann. Se Figur 6. Den metalliske skjermen fordeler også det elektriske feltet jevnt og gir en sikker strømvei for rask verndeteksjon ved kortslutning.

Den metalliske skjermen er også elektrisk ledende og må utjevnes (koples til) omgivelsene for å unngå overspenninger og kortslutningsstrømvei. Det kan gjøres på to prinsipielle måter som begge er tillatt:

- **Jorde kabelskjermen i begge ender:** Da kan det oppstå en sluttet strømkrets gjennom skjermen og omgivelsene. Kabelskjermen og utjevningene må dimensjoneres for strømmen som kan gå i denne strømkretsen.
- **Jorde kabelskjermen i en ende og utisolere den i den andre:** Da forhindres en eventuell strømkrets gjennom skjermen. Kabelen må dimensjoneres for å håndtere spenningsoppbygging under normal drift og ved feilsituasjoner, samt overspenninger i anlegget som følge av koblinger eller atmosfæriske utladninger.

En strøm i kabelens leder vil omslutes av et magnetfelt (Ampères lov) som igjen inducerer (fremkaller) en elektromotorisk spenning i andre elektrisk ledende komponenter (Faradays induksjonslov). Påvirkningen er sterkest på komponenter nær kabellederen og som går parallelt med denne over lang avstand, for eksempel kabelskjerm (i egen eller parallelle kabler). Prinsippet er vist i Figur 5 med utjevning i begge ender. Den induserte strømmen i skjermen vil ha motsatt retning enn strømmen i lederen. Ved balansert strøm i tett forlegning, enten tur og retur eller lik strøm i positiv og negativfase, blir netto magnetfelt lite og induisert strøm i skjermen tilsvarende lav.



Figur 5 Magnetfelt rundt en strømførende leder inducerer en strøm i andre strømsløyfer, for eksempel kabelskjermen som er utjevnet i begge ender.

Induksjon til nærliggende parallelle ledere er en sterk kraft og kan gi opphav til strøm i skjerm når den er utjevnet i begge ender. Den induserte strømmen kan bli opp til 10-25 % av lederstrømmen i vanlig kraftforsyning. Se referanse [6]. Strømmen kan gi varmeutvikling som kan redusere kabelens kapasitet eller i verste fall skade kabelen. Skjermen består av koppertråder og ofte et vanninntregningslaminat av aluminium. I noen tilfeller er disse adskilt fra hverandre med et halvledende svellelag som medfører fare for dårlig forbindelse mellom dem. Spesielt viktig er god forbindelse i trådene og laminatet gjennom skjøter og endeavslutninger av kabelen. Dårlig forbindelse kan danne punkter med redusert strømføringsevne og dermed høy varmeutvikling. Det finnes metoder

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	10 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

for å sikre god forbindelse. Klem eller skarp bøy på kabelen kan også gi tilfeldige koblinger mellom disse lederne. Strømfordelingen er typisk 2/3 i trådene og 1/3 i laminatet ([6],[7]).

Den sluttede strømkretsen for en kraftkabel på jernbanen kan være gjennom jordingen til de elektriske anleggene, eller den dedikerte returstrømveien som slutter forsyningskretsen spenningskilde (generator/transformator)-kontaktledning-tog-kjøreskiner. På den måten kan den induerte strømmen i skjermen redusere strømmen i returkretsen og derfor oppfattes skjermstrømmen ofte som en returstrøm. I tillegg til den induerte strømmen i skjermen kan det flyte returstrøm gitt av strømdeling mellom skjermens motstand og den dedikerte returveiens motstand samt potensialstigning i returkretsen.

4.2 Observasjoner

4.2.1 Håndtering av kabelskjerm

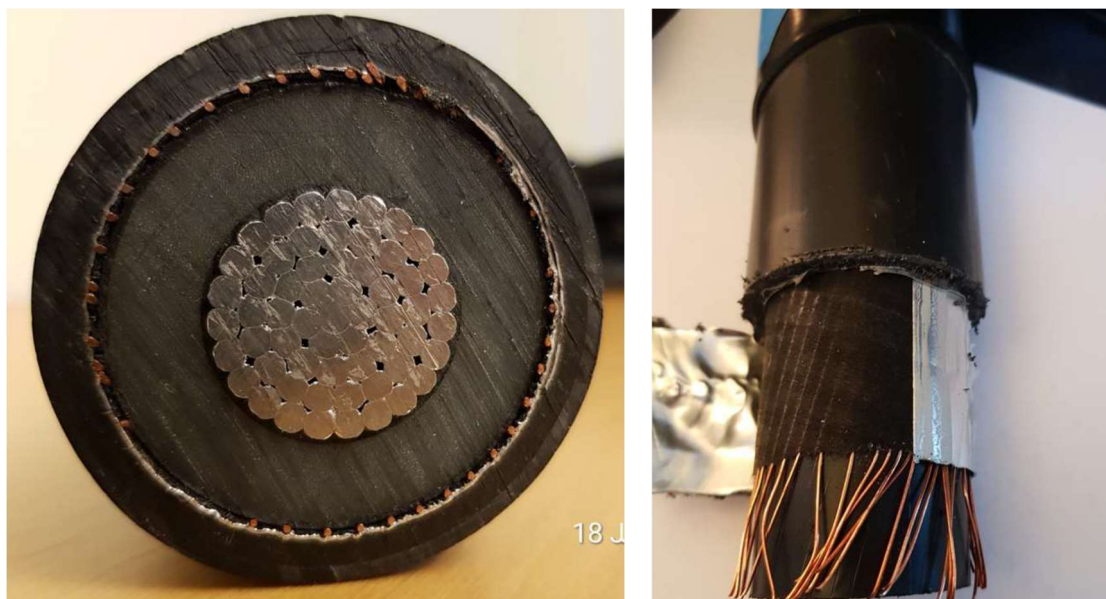
- Valgt håndtering:** Kraftkablene som brant hadde utjevnet skjerm til jordingsanlegget og dermed også returkretsen i både Ski koblingshus og teknisk rom 53.
- EMC-plan 1:** EMC-planen for Ski stasjon kartlegger kun hvor kablene er forlagt. Den vurderer ikke konseptet for høyspenningskablene, bare om utføringen er iht. konseptet. Se referanse [8].
- EMC-plan 2:** EMC-planen for tunnelen angir at magnetfelt fra ledningsanleggene kan påvirke andre tekniske installasjoner, men omtaler ikke valg av løsning for håndtering av kabelskjerm. Se referanse [9].
- Begrunnelse for valg:** Jording av skjerm i begge ender ble valgt fordi totalentreprenøren mente det var anbefalt for lange kabler og mente det var vanskelig å estimere induert spenning ved utisolering. Ulempen ved dette oppgis å være strøm i kabelskjermen bestående av en brøkdel av returstrømmen og en mulig induert strømkomponent som skyldes eksterne magnetfelt. Se referanse [10].
- Lengde:** Kraftkablene som brant var ca 1,2 km lange.
- Omfang av metode:** Jording av skjerm i begge ender er benyttet for alle kraftkablene for forsyning til tog på Blixtunnelen
- Sammenligning Oslo S:** Jording av skjerm i en ende og utisolering over overspenningsvern i den andre er valgt for kraftkablene i forsyningen til Blixtunnelen fra Oslo koblingshus. Se referanse [11].
- Sammenligning infrastrukturforstyrning:** Jording av skjerm i en ende og utisolering i den andre benyttet for kraftkablene for forsyning til infrastruktur i Blixtunnelen (22 kV trefase fordelingsnett).

4.2.2 Skjermkapasitet

- Kabelutforming:** Kraftkablene som var benyttet på Follobanen hadde 35 mm² skjerm som inkluderer både kobbertrådene og aluminiumslaminatet. Trådene og laminatet er adskilt av et tynt halvledende svellebånd. Se Figur 6 og datablad for kabelen [12].
- Beregnet tverrsnitt:** Kombinasjonen av 21 mm² samlet kobbertrådtverrsnitt og 14 mm² aluminiumslaminattverrsnitt gir tilsvarende resistans som oppgitt for kabelskjermen i databladet ([12]).
- Målt faktisk skjermverrsnitt:** Tverrsnittet for kobbertråder og aluminiumslaminat for kraftkabelen som er benyttet på Follobanen er forsøkt målt av tre ulike firma. Se Tabell 1. Til tross for måleusikkerhet indikerer resultatene at tverrsnittet av kobbertrådene er vesentlig mindre enn både 35 og 21 mm².

Tabell 1: Resultater fra tre ulike målinger av kabelens skjermverrsnitt. Diameter, tykkelse og lengde i mm. Tverrsnitt i mm².

	Kobbertråder			Aluminiumslaminat		
	Antall	Diameter	Tverrsnitt	Tykkelse	Lengde	Tverrsnitt
Firma 1	40	0,68	14,5	0,15	170	25,5
Firma 2	40	0,66	13,7	0,25	170	42,5
Firma 3			12			25



Figur 6 Snitt av kablen som er benyttet. Mellom kobbertrådene og aluminiumslaminatet er det et sort halvledende svellebånd.

4. **Endeavslutninger:** Inne i tunnelen er det benyttet kabelendeavslutninger som beskrevet i datablad, referanse [13], type SOT-362. Se referanse [14].

4.2.3 Varmgang

1. **Varmgang 1:** Undersøkelse av endeavslutninger i Ski koblingshus for kraftkabel til Blixstunnelen Ski-Oslo (U1) for begge faser viser skader på grunn av dårlig elektrisk forbindelse mellom aluminiumslaminatet og kobbertrådene. Det har oppstått svært høy temperatur når den induerte strømmen i laminatet har blitt overført til kobbertrådene i kabelenden. Se referanse [15] og Figur 7.

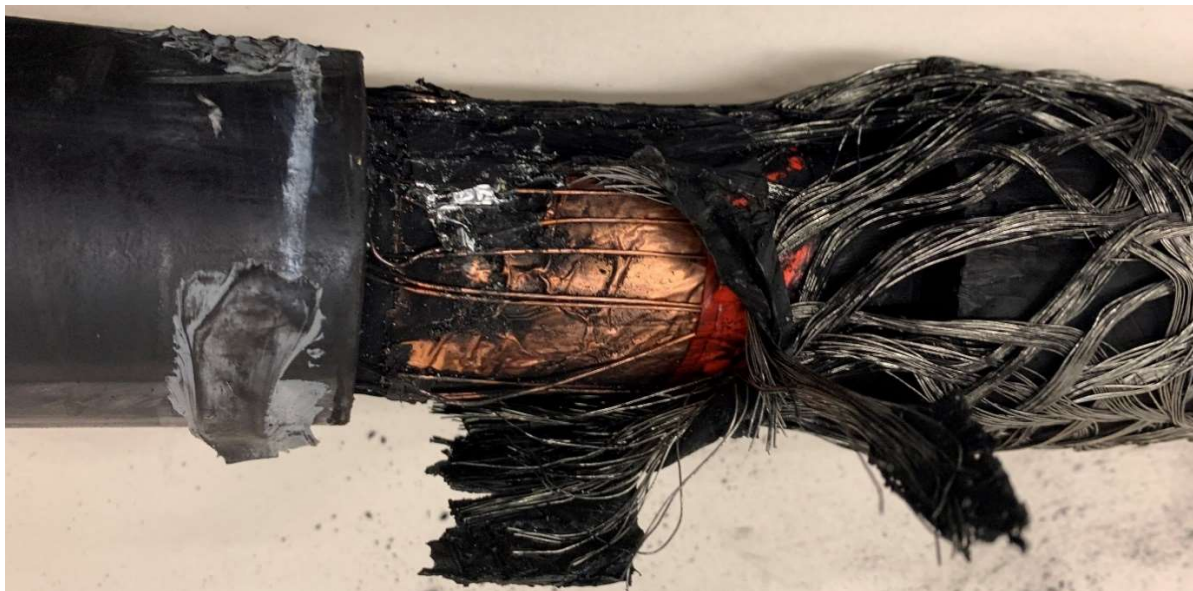


Figur 7 Ytterkappe på endeavslutning er tatt av og bildet viser til at alle kobbertrådene er brent av. Det sorte svellebandet er helt og hindret direkte elektrisk kontakt mellom skjermene. (Foto: SINTEF Energi AS)

2. **Varmgang 2:** Undersøkelse av de brente skjøtene viser at sammenkoblingen av skjermtråder gjennom skjøten var for tilfeldig og har ført til varmgang. Sammenkoblingen er gjort kun med PVC tape. Det finnes ikke en rullefjær eller andre mekanisk sterkere klemforbindelser i disse skjøtene. Se referanse [16] og Figur 8.
3. **Varmgang 3:** De brente endeavslutningene i teknisk rom 53 er ikke sendt til undersøkelse. For skader, se Figur 13.
4. **Varmgang pga. klammer:** Minst en kabelinnfesting i Ski koblingshus er observert med mulig stram klamring. Det kan gi et mekanisk trykk på kappen som vører til tilfeldig og udefinert

elektrisk kontakt mellom kobbertråder og aluminiumslaminat gjennom svellebåndet som gir varmgang. Se Figur 9.

5. **Tidligere hendelse:** I november 2021 fikk kraftkabelen inklusive endeavslutning i Ski koblingshus for positiv fase til sporet Ski-Oslo skader som følge av mangelfull sikring etter utrulling og før spenningssetting og idriftssettelse. Se referanse [17].



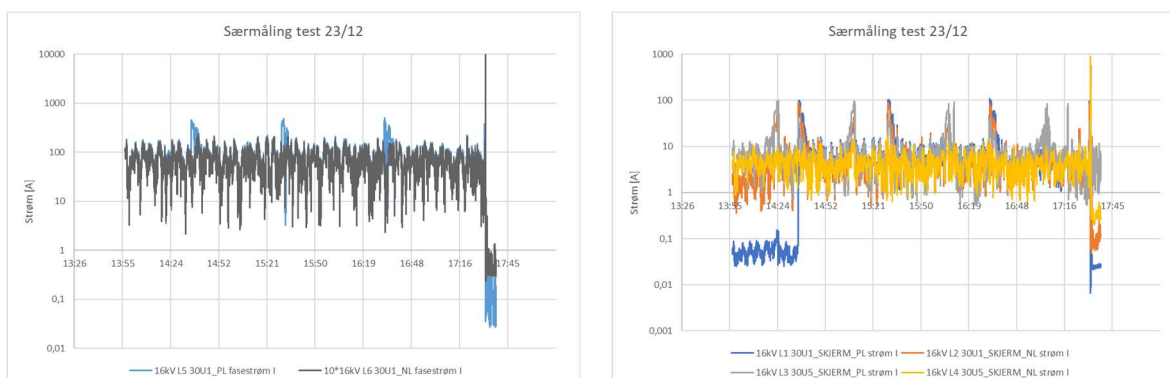
Figur 8 Den «friskeste» enden av en av de brente kabelskjøtene. (Foto: SINTEF Energi AS)



Figur 9 Stram klamring av kabel. Endeavslutningen på bildet er den som også er vist i Figur 7. Bildet er fra positiv fase for sporet Ski-Oslo i Ski koblingshus.

4.2.4 Strøm i kabelskjerm

1. **Forventet strøm i kabelskjerm:** Totalentreprenør for tunnelen har gjort beregninger som konkluderer med at skjermen vil føre i størrelsesorden 3 % av returstrømmen (tilsvarende fasestrømmen). Se referanse [10].
2. **Indusert strøm i kabelskjerm:** Ekstern tredjepart har påpekt at totalentreprenøren i sine beregninger ([10]) ikke hensyntar den induerte strømmen som skyldes magnetfeltet rundt lederen og at strømmen kan være betydelig. Se referanse [18]. Der er det også angitt at skjermene sannsynligvis kan håndtere slik betydelig strøm dersom anlegget er hensiktsmessig utført. Med hensiktsmessig forlegning menes her tett forlegning mellom tur og returstrøm, sammen med parallelle retur- eller jordledere i tett forlegning med høyspenningskablene.
3. **Driftsmåling strøm i kabelskjerm:** Målinger med håndinstrument i drift viser maksimal strøm i skjerm på 148,7 A med et gjennomsnitt på 34,1 A over 14 minutter. Måling utført 3. desember kl 11.24-11.38 i Ski koblingshus positiv fase til sporet Ski-Oslo (U1).
4. **Testkjøring:** Målinger under testkjøring 23. desember viser høyeste strøm i skjerm opp til 100 A ved en laststrøm på 400 A. Det tilsvarer i størrelsesorden 25 %. Når kabelen fører kortslutningsstrøm, er høyeste strøm i skjerm 900 A. Se Figur 10. Analyse av målingene viser høyest strøm i skjermen til positiv fase spor Ski-Oslo (U1) under last, men høyest strøm i skjermen til negativ fase samme spor under kortslutning.



Figur 10 Målt strøm i faseledere (positiv og negativ) for forsyning til sporet Ski-Oslo (U1) og skjermstrøm (høyre) for alle kraftkablene mellom teknisk rom 53 og Ski koblingshus under testkjøring 23. desember. Merk logaritmisk andreakse på figurene.

5. **Målt strøm i skjerm ikke som forventet 1:** Strømmen i skjermen til positivfase for spor Ski-Oslo er under testene 23. desember null frem til den plutselig våkner under første testtog. Se Figur 8 til høyre. Under de andre testtogene viser den plutselige dropp. I ettertid er det funnet skjult skade på endeavslutningen for kabelen i Ski Koblingshus. Det er også observert at disse plutselige droppene skjer når testtoget er på samme sted i Blix-tunnelen sporet Ski-Oslo, det vil si i nærheten av teknisk rom 53.
6. **Målt strøm i skjerm ikke som forventet 2:** Strømmen i skjermen til negativfase for spor Oslo-Ski følger under testene 23. desember ikke samme kvalitative forløp som de andre skjermstrømmene og responderer lite på forstyrrelser fra fasestrømmen. I ettertid er det funnet store lysbueskader på strømskinnen tilkoblet kabelendebryteren i teknisk rom 53 for denne fasen.
7. **Beregnet forventet induert strøm i kabelskjerm:** I forbindelse med dette undersøkelsesarbeidet er det beregnet at strømmen i den kabelskjermen som belastes mest vil være 24 % av strømmen i senterlederen. Dersom kabelen ikke er for varm på grunn av driftsstrøm, vil den termisk tåle å føre en dimensjonerende kortslutningsstrøm om anlegget er hensiktsmessig utført. Det gjelder også dersom kobbertrådene er redusert til 21 mm² og det ikke er forbindelse gjennom laminatet. Se referanse [7] som baserer seg på kablernes datablad [12].

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	14 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

8. **Driftsstrøm vs kortslutningsstrøm:** Under testkjøringen 23. desember måles det høyest strøm i skjermen til kabelen i positiv fase under belastning, men under kortslutning er strømmen høyest i skjermen til kabelen i negativ fase.

4.2.5 Andre observasjoner

- Forlegning:** Kraftkablene til begge spor og begge faser er forlagt i luft oppi felles kabelkanal langs Østfoldbanen (punkt ③ i Figur 3). I Blixtunnelen er kablene klamret i taket. Det er noen gjennomføringer inn og ut av bygg i rør.
- Returkrets:** Visuell kontroll av returkretsen mellom Ski koblingshus og teknisk rom 53 viste at anlegget er bygget som returkretsskjema [19] og [20] viser. Kun en løs tilkobling av overkast i en sporveksel ble identifisert. Se referanse [21].
- Kortslutningsdimensjonering:** Beregninger viser at kabelen som er brukt ikke tåler en direkte kortslutning fra senterlederen til skjermen uten at den blir for varm. Det gjelder all bruk av kabelen med et spenningsnivå på 15 kV mot jord i et direktejordet nett. Se referanse [7].
- Lastdimensjonering:** Termisk grenselast for kabelen i angitt forlegning er over 535 A. Det vil si den strømmen alle kablene i kabelkanalen kan belastes med kontinuerlig før en av dem når grensetemperatur på 90 °C. Se referanse [7].
- Overbelastningsevne:** Overbelastningsevnen i fem minutter ved en forbelastning på 250 A i hver kabel i kanalen er på i størrelsesorden 1500 A. Det vil si den strømmen som kabelen kan føre i fem minutter før den første lederen når en grensetemperatur på 90 °C gitt forbelastning under 250 A. Se referanse [7].

4.3 Umiddelbare vurderinger

- EMC-plan/tosidig skjermutjevning/reduert skjerm:** EMC-planene angir ikke hvilket konsept for håndtering av kabelskjermene som skal brukes. Det prosjekteres med tosidig utjevning, men byggingen tar ikke konsekvensene av det valget ved at:
 - Det velges kabel med redusert skjerm og svellebånd mellom kobbertråder og laminat.
 - Det velges skjøte- og endeavslutningsmetoder som ikke tar med laminatet.
 - Totalentreprenør ikke reagerer når det påpekes mangler i beregningene.
- Måleresultater:** Under testene 23. desember ble det målt fasestrømmer og skjermstrømmer. Mange av målingene lar seg forklare basert på elektrisk forståelse, men det er også noen måleresultater som umiddelbart har vært vanskelig å forklare:

4.4 Foreløpige konklusjoner

- Brann:** Brannene skyldes elektrisk varmgang i kabelskjøter og endeavslutninger.
- Feilmontasje 1:** Endeavslutningene i Ski koblingshus var utført på en måte som ikke sikret tilstrekkelig forbindelse mellom aluminiumslaminatet og skjermtrådene som var utjevnet til jord.
- Feilmontasje 2:** Kabelskjøtene var utført på en måte som ikke sikret tilstrekkelig forbindelse gjennom skjøten. I tillegg var forbindelsen mellom skjermtråder og laminat for tilfeldig. Se referanse [16].
- Feilmontasje 3:** Stram klamring av kabel i Ski koblingshus kan ha økt sannsynligheten for elektrisk varmgang.
- Redusert skjerm:** Kablene som var benyttet hadde ikke kontinuerlig kontakt mellom skjermtråder og vanninntrengingslaminat. Det gjør kablene ekstra sårbare for elektrisk varmgang og krever spesiell håndtering. Målinger indikerer i tillegg svært lavt tverrsnitt i kobbertrådene.
- Tosidig utjevning av kabelskjerm:** Utjevning av kabelskjermen til jord i begge ender gir opphav til en strøm i skjermen som både ved laststrøm og kortslutningsstrøm reduserer kabelens kapasitet og skal hensyntas ved prosjektering og bygging.
- Indusert strøm i skjerm:** Det er forventet høy indusert strøm i skjermen. Dersom utførelsen av skjøter og endeavslutninger er korrekt, så vil ikke aktuelle belastnings- og kortslutningsstrømmer føre til temperaturer i kabelen som overstiger grenseverdiene.

FollobaneprosjektetTeknisk årsaksresonnement etter
stoppende feil
i strømforsyningen 19. og 23. desemberSide: 15 av 46
Dok.nr: UOS-00-A-91196
Rev: 00E
Dato: 06.02.2023

8. **Uoppdaget feil:** Flere skader har det tatt lang tid å oppdage. Noen av skadene som er oppdaget lenge etter testene 23. desember kan være skader som ikke ble oppdaget etter brannen 19. desember.

5 KORTSLUTNINGER I TUNNELEN

5.1 Innledning

En elektrisk isolator skal hindre at det flyter strøm mellom to steder med ulik spenning, for eksempel en spenningssatt anleggsdel og omgivelsene. Dersom det ikke er god nok isolasjon kan det oppstå kortslutning. Luft er eksempel på en isolator. Ren luft isolerer bedre enn forurenset luft.

Hvor stor elektrisk spenning en isolator kan holde uten å kortslutte beskrives av holdfastheten. Den oppgis både for kontinuerlig driftsspenning og impuls spenning (for eksempel lynoverspenning).

Den mekaniske innfestingen en spenningssatt delen må være en isolator. Forurensning på overflaten av isolatoren reduserer holdfastheten dens. Isolatoroverflaten er derfor ofte laget med skjørt/folder for at forurensning ikke skal redusere isolatorens holdfasthet i forhold til luften rundt.

Kortslutninger i kontaktledningsanlegget oppstår jevnlig. I Bane NOR skjer det i gjennomsnitt 0,5 kortslutninger per kilometer kontaktledning per år (se referanse [22]). De aller fleste kortslutninger er sannsynligvis forbigående, for eksempel trær som blåser inntil, fugler som reduserer isolasjonsavstand, overslag på fuktige eller skitne isolatorer, eller andre dynamiske hendelser.

Dimensjonerende kortslutningsstrøm på Ski er 25 kA med termisk kortslutningstrøm etter 0,1 s på 30,0 kA og 18,6 kA etter 0,3 s.

5.2 Observasjoner

5.2.1 Kortslutning

1. **Lokalisering:** Det er funnet et kortslutningssted Blixtunnelen ca. 250 m inn løpet for sporet Ski-Oslo (ut fra Ski U1). Avstanden til teknisk rom 53 er ca. 25 m. Kortslutningsstedet er markert i Figur 3.
2. **Kortslutningsstedet:** Undersøkelse av kortslutningsstedet viser på Figur 11:
 - Kortslutning over isolator mellom line for negativ fase og hengemast i taket.
 - Mange fotpunkter for lysbuer mellom den spenningssatte delen av isolatoren og masta.
 - Ett hvitt pulver/belegg på negativisolator og positivisolator samt sot på negativisolator på siden mot Ski.
 - Brennmerker/sot i tunneltaket etter utblåsing mellom hengemasta og taket.
 - Rekke av avskallinger fra betongtaket mellom hengemasten og et lekkasjepunkt i skjøt mellom to betongelementer. Avstand mellom mast og lekkasjepunkt langs taket er ca. 70 cm.
 - Ingen skade eller brennmerker på langsgående jordleder som er opphengt i masta.
 - En av innfestingsboltene til masta har merker etter å ha vært i kontakt med betongelementets armering og har ført strøm.
 - I lekkasjepunktet mangler blant annet en bit på ca. 1 kg av elementet. Denne er funnet på bakken i nærheten og sendt til undersøkelse.
 - Lekkasjepunktet er 42 cm rett over line for negativfase. Det drypper ca. ett drypp i minuttet under befaringen i etterkant. På lina er det tydelig hvitt pulver/belegg.
 - Avstand fra dryppsted på negativ line til midt på negativ isolator er 52 cm.
 - I bærelina til kontaktledningen rett under masta er 6 av 19 kordeller røket. Det er et rent brudd uten tydelige merker av varme. Direkte avstand fra taket til bærelina er ca 110 cm. Bærelina er sent til undersøkelse.



Figur 11 Kortslutningssted ved hengemast F-022-09. Retning Ski til venstre og retning Oslo til høyre.

3. **Kortslutning 3:** Lokomotivfører på testtoget 23. desember rapporterte at han mistet spenningen og at han så venstre kraftline i taket pendle. Venstre kraftline er negativ fase.
4. **Kortslutning 5:** Måling av strøm og spenning er vist for kortslutningene i Vedlegg 6 Strøm- og spenningskurver utvalgte kortslutninger.

5.2.2 Isolator

1. **Isolasjonsholdfasthet:** Isolatorene har en nominell spenning på 25 kV og en isolasjonsholdfasthet på 95 kV ved 50 Hz og lynimpulsholdespenning på 250 kV. Se datablad referanse [23].
2. **Forurensning:** Isolatorene er undersøkt og funnet i orden. Før isolatorene kom frem til undersøkelse er det hvite og sorte stoffet (aktivt?) blitt tørket av. Det gjør at isolasjonsholdfastheten til isolatorene med forurensning ikke kunne testes. Se referanse [24] og Figur 12.



Figur 12 Isolator med hvitt og svart stoff på kortslutningsstedet (og fingermerker) til venstre. Isolator slik den kom frem til laboratoriet til høyre. (Foto: til høyre Bane NOR og til venstre SINTEF Energi AS)

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	18 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

3. **Forurensning side:** Isolatoren var forurenset på siden mot Ski. Det er mot normal kjøreretning for tog. Det vil si at forurensning med luftstrøm gitt av lufttrykk eller -sug fra tog vil treffe isolatoren på den siden.
4. **Alkalisk vann:** Prøve av vannet som drypper fra taket viser at det er svært elektrisk ledende og har høy pH-verdi (>11). Se referanse [25].
5. **Lekkasjer i nærheten:** Ca. 10 meter bortenfor kortslutningsstedet er det observert et annet lekkasjested som drypper direkte ned på line for positivleder. Der er det tilsvarende hvitt belegg/pulver og lina er skadet. Dette er identifisert flere steder i tunnelen. 30-40 meter i den andre retningen er det gjort tilsvarende observasjoner. Se referanse [26].
6. **Lekkasjer i tunnelen:** Det informeres om at tunnelen var tørr uten synlige lekkasjer i taket i frostsone ved idriftsettelse 11. desember. Tunnelventilasjonen har vært mye i bruk i perioden rundt overlevering, både for testing, øvelse og frisk luft.
7. **Renhet i tunnelen:** Ved kontroll av tunnelen i januar ble det blant annet bemerket at isolatorer og endeavslutninger var skitne. Se referanser [26] og [27].
8. **Overspenningsvern:** Det er ikke overspenningsvern for kontaktledningsanlegget (inklusive kabler) i Blixxtunnelen. Det er overspenningsvern på autotransformatorene på Åsland og selve koblingsanlegget i Ski

5.2.3 Skade i tunneltak

1. **Jordleder:** Den opphengte jordlederen ligger i en vugge på masta og er omsluttet av kuppalblikk. Jordlederen er 95 mm² kobber og vugga er beregnet for en aluminiumsleder 150 mm² tverrsnitt. Derfor er det benyttet et blikk imellom. Målinger i ettertid mellom hengemasta og jordlederen viser liten eller ingen overgangsmotstand. Det er heller ingen visuelle merker av lokal varmeutvikling. Se referanse [28].
2. **Strøm i tunnelvegg:** Det er ikke funnet spor etter at det har gått strøm i tunnelvegg eller skjøt mellom betongelementer ned til kjøreskinnene.
3. **Skade på betongelement:** Undersøkelse av betongelementet viser sorte brennmerker som antas å være brent fiberarmering. Fiberarmeringen av stål var også smeltet. Det utelukker frostspregning og tyder på høy temperatur. Se referanse [29].

5.2.4 Andre observasjoner

1. **Lekkasjer i tunnelen:** Prosjektet har i prosjektfasen erfart at det stedvis har dryppet vann med høy pH.
2. **Jording:** Bak betongelementene er det en injisert en fugemasse av sement, bentonitt og 64 % vann. Bentonitt er et tetningsmiddel med god elektrisk ledningsevne. Det har ikke lyktes å ta prøver av tetningsmiddelet, men det er sannsynlig at dette gir lav overgangsmotstand mellom elementene og sann jord utenfor tunnelen.
3. **Værforhold:** I driftsperioden frem til kortslutningene var det kuldegrader, ned til -15 °C rett før driftsforstyrrelsen og så regn rundt 0 °C 19. og 23. desember. Se Vedlegg 3 Værforhold.
4. **Videoovervåking:** Det er videoovervåking av inngangen til tverrpassasje 54. Dette kan ha fått med seg lysglimt fra lysbuene på kortslutningsstedet 50 meter bortenfor. Dessverre var filmen slettet før denne muligheten ble oppdaget.

5.3 Umiddelbare vurderinger

1. **Isolasjonsnivå:** Isolatoren på negativ faseleder på kortslutningsstedet var bygget for nominell spenning på 25 kV mens strømforsyningen på Follobanen er 15 kV mellom fase og jord. Lynimpulsholdespenningen til isolatoren var på 250 kV, mens impulsholdespenning for 15 kV systemer er 125 kV basert på EN 50124-1:2017. Signifikant høyere impulsholdespenning enn standarden angir vil gi høyere overspenninger på kontaktledningsanlegget og øke stressnivået på sårbare komponenter som kabler og transformatorer. Impulsspenning mellom senterleder og skjerm på 36-kV kabler er vanligvis 170 kV ([7]), men databladet for kabelen som er bruk angir ikke denne egenskapen. Det er ikke observert installert overspenningsvern for å håndtere overspenninger.

2. **Overslag:** Det observeres tydelige hakk i toppen av spenningens sinuskurve (toppunkt nummer 1, 9 og 12) før kortslutning i negativ fase (etter det 15. toppunktet) på den første kortslutningen 16. desember. Se Vedlegg 6 Strøm- og spenningskurver utvalgte kortslutninger. Kan det være tegn på et begynnende overslag? Kortslutningen er i negativ fase, men strømmen er unormalt høy i positivfase rett før.
3. **Overspenninger:** Isolatorne i tunnelen har høy holdfasthet. Overslag uten forurensing synes usannsynlig. Det er ikke observert overspenninger i måleutstyret i Ski eller Oslo koblingshus. Kraftkablene i tunnelen har vesentlig lavere holdfasthet og isolasjonen ville havarert før isolatoren ville kortsluttet.
4. **Skadet bærelina:** Det har vært vurdert to mulige årsaker til at kordeller i bærelina har røket:
 - a. **Nedfall fra lekkasjestedet i taket på bærelina:** Det er funnet en betongklump på ca 1 kg på bakken som har løsnet fra taket. Den kan ha truffet bærelina, eventuelt i høy hastighet på grunn av trykkrefter ved kortslutning eller sugkrefter fra togpassering.
 - b. **Drypp av smeltet stål:** Det er tydelige merker etter lysbue på hengemasta. Dette kan ha smeltet stål som har falt på bærelina og smeltet av kordellene.
 - o Innledende undersøkelser har ikke avdekket varme. Endelig resultat fra undersøkelse av bærelina foreligger ikke.

5.4 Foreløpige konklusjoner

1. **Kortslutninger:** Det er funnet et sted i tunnelen med tydelige spor etter flere kortslutninger og lysbuer.
2. **Drypp + sprut alkalisk vann:** På kortslutningsstedet er det et lekkasjepunkt i taket der det drypper vann som erfaringsmessig har høy pH-verdi. På line og isolator for negativ fase er det funnet hvitt belegg/pulver som sannsynligvis er salt.
3. **Redusert isolasjon:** Det holdes derfor som sannsynlig at forurensningen har redusert isolatorens holdfasthet og ført til overslag ettersom isolatoren for øvrig er funnet i orden. Forurensningen er funnet på siden mot dryppstedet.
4. **Skader i taket 1:** Avskallingen av betongelementet skyldes kortvarig høy varme. Varmen skyldes strømgjennomgang. Hvor stor andel av strømmen som har gått i betongen er fremdeles uklart. Det er ikke funnet holdepunkter som tilsier at det ikke har gått stor strøm i langsgående jordleder.
5. **Skader i taket 2:** Årsaken til avrøket kordeller i bærelina er ikke funnet.

6 TEKNISK ROM 53

6.1 Innledning

Det meste av teknisk utstyr langs Follobanen er plassert i tekniske rom mellom de to løpene av Blix-tunnelen. Disse fleste tekniske rommene fungerer også som tverrpassasjer mellom løpene og dermed rømningsvei.

Både for personsikkerhet og driftssikkerhet av teknisk utstyr er soneinndeling et prinsipp for å ha kontroll på spenningsforskjeller (potensialforskjeller), se referanse [30]. En konsekvens av prinsippet er at det kun er én utjevningsforbindelse fra en sone til omverden, det vi si overliggende sone og til slutt til sann jord.

6.2 Observasjoner

6.2.1 Utjevning

1. **Soneinndeling:** Soneinndelingsprinsippet er brutt i teknisk rom 53. Jordingsplanen viser kun én utjevning til omverden, dvs. til jordleder i tunnellopet for sporet Oslo-Ski. Det er likevel identifisert en egen utjevning mellom teknisk rom 53 og jordleder i tunnellopet for sporet Ski-Oslo som ikke er på jordingsplanen. I tillegg gir alle de utjevnedde skjermene til alle kraftkablene (8 stk.) i teknisk rom utjevning til hvert tunnellop og til Ski koblingshus. Dette er heller ikke vist på jordingsplanene [31] og [32].
2. **Utjevning konstruksjon:** Ikke i noen tekniske rom er det egne utjevningsforbindelser
 - a. mellom jordskinne og aluminiumskonstruksjon
 - b. internt i aluminiumskonstruksjonen i elokserte sammenføyninger og vinkler
 - c. mellom aluminiumskonstruksjonen og støtteisolatorer

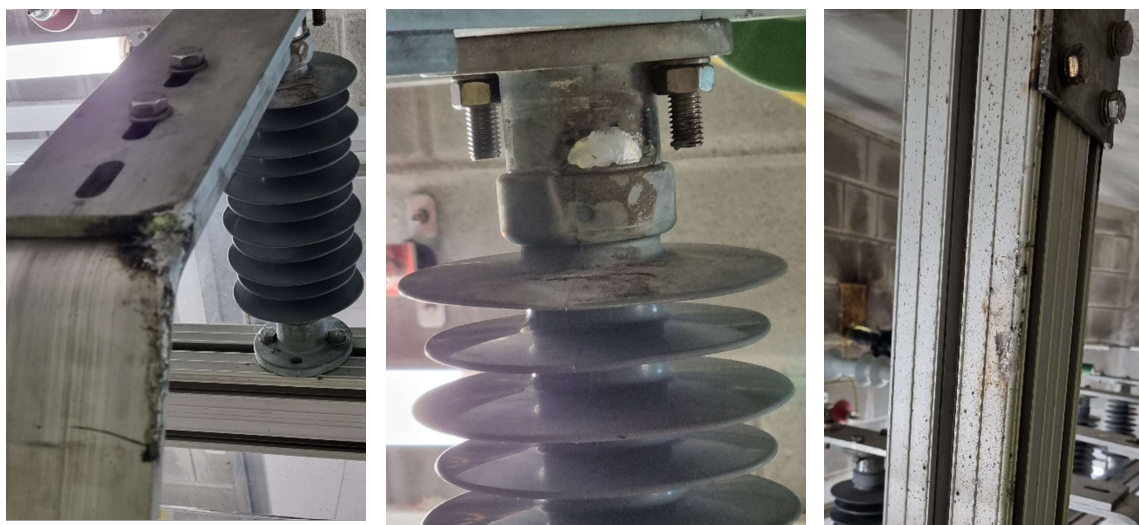
6.2.2 Brann

1. **Brannalarm:** Brannalarmen for teknisk rom 53 ble utløst 19. desember kl. 06.33.08. Da personell kom frem var rommet svært røyfyllt. Tilhørende brannalarmanlegg er skadet. Det er også sot i rommet.
2. **Avbrent utjevning:** Utjevningen av kabelskjerm for negativ fase til spor Ski-Oslo (U1) er brent av. Se Figur 13. I tillegg er det tydelige tegn på elektrisk varmgang på to av de tre andre endeavslutningene tilkoblet (kabelende-) bryter 05-267-L i teknisk rom 53.



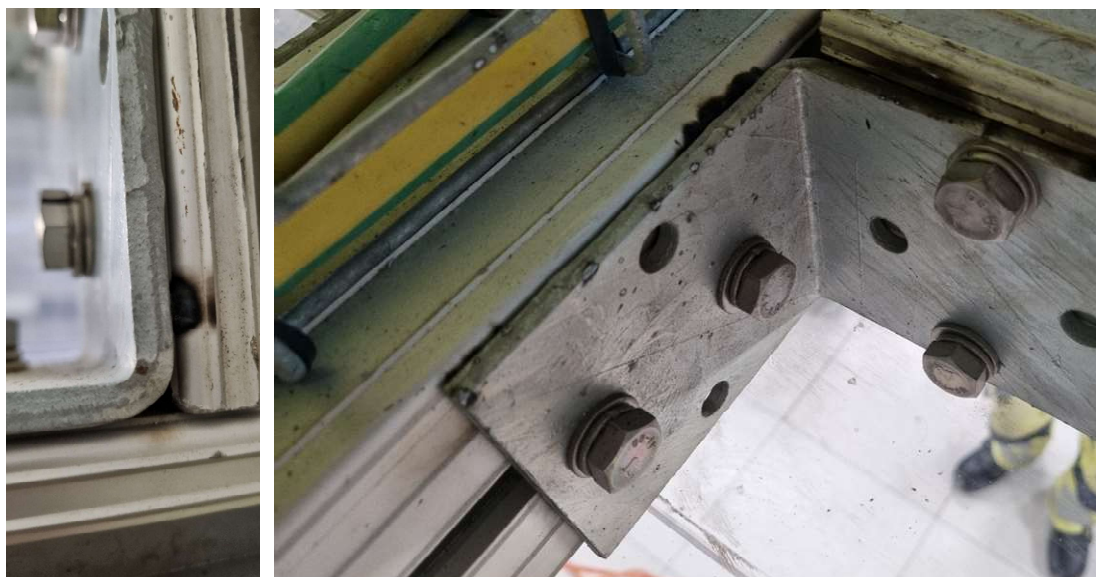
Figur 13 Avbrent utjevning mellom skjerm i negativ fase og jord.

3. **Lysbueaktivitet:** Det er merker etter omfattende lysbueaktivitet og overslag på isolatorer i teknisk rom 53. Merkene finnes både på isolatorene og strømskinnene til begge negativfasene (både U1 og U5) samt aluminiumskonstruksjonen som holder bryterarrangementet. Se Figur 14



Figur 14 Merker etter sannsynlig lysbueaktivitet i teknisk rom 53.

3. **Strømgjennomgang:** Aluminiumsbindeverket har brennmerker i skjøter og vinkler. Se Figur 15.



Figur 15 Brennmerker i skjøter og vinkler på aluminiumsbindeverket.

4. **Forurensing:** Det er observert forurensning på støtteisolatorene i bryterarrangementet i teknisk rom 53. Det er foreløpig uklart hva dette er (metallspon etter arbeid eller smeltet metall etter lysbuene) og når det kom (før, under eller etter hendelsene).

Se referanse [33].

6.2.3 Andre observasjoner

1. **Avstander:** Fra teknisk rom 53 til kortslutningsstedet er det i størrelsesorden 25 m. Blixtunnelen krysser Roåstunnelen (sammenkoblingsspor mellom Follobanen og Østfoldbanen) med 2-3 meters avstand. Avstanden fra Roåstunnelen til teknisk rom 53 er ca 300 m.

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	22 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

6.3 Umiddelbare vurderinger

1. **Utjevninger:** De manglende utjevningene i aluminiumskonstruksjonen kan ha gitt høy overgangsmotstand mellom aluminiumsprofilene via de elokserte aluminiumsvinklene.
2. **Brann:** Brannen kan ha startet ved elektrisk varmgang utjevningen av kabelskjermene. Under kortslutning er det målt (se 4.2.4) opp til 900 A i kabelskjermen. Den ene utjevningen er avbrent og har falt ned. Den kan ha trekt med seg en lysbue. Røyk fra brannen kan ha redusert luftas isolasjonsholdfasthet og lagt til rette for ytterligere overslag og lysbuer.

6.4 Foreløpige konklusjoner

1. **Utjevning:** Utjevningen av aluminiumskonstruksjonen er usikker
2. **Lysbueaktivitet:** Det har vært omfattende lysbueaktivitet. Det er sannsynlig at at avbrenningen av en kabelskjermutjevning har ført til lysbue.
3. **Indusert strøm i skjerm:** Indusert strøm i kabelskjermene til de åtte kraftkablene som utjevnes i teknisk rom 53 kan i sum ha ført til store strømmer i utjevningene og jordingsanlegget til rommet, både ved drift og kortslutning, og ført til brann.

7 KORTSLUTNINGSVERN OG KONTROLLANLEGG

7.1 Innledning

For å beskytte mot materielle skader (og personskader) ved kortslutning benyttes vern som detekterer kortslutninger og gir utløsesignal til effektbryter som er dimensjonert for å bryte kortslutningsstrømmer. Vernene er plassert i koblingsanleggene og har en reaktiv funksjon.

Følgende kortslutningsvern benyttes normalt:

- Overstrømsvern ($I>$) reagerer dersom målt strøm overstiger en forhåndsbestemt verdi for å beskytte anleggsdelen mot kortslutningsstrømmer/høye feilstrømmer.
- Hurtig overstrømsvern ($I>>$) reagerer hurtig dersom målt strøm overstiger en forhåndsbestemt verdi for å beskytte anleggsdelene mot høye kortslutningsstrømmer.
- Momentant overstrømsvern ($I>>>$) reagerer momentant dersom målt strøm overstiger en forhåndsbestemt verdi for å beskytte anleggsdelene mot svært høye kortslutningsstrømmer. Vernet brukes i Oslo-området.
- Underspenningsvern ($U<$) reagerer dersom målt spenning underskrider en forhåndsbestemt verdi for en lengre tid, typisk 0,5 s.
- Distansevern/underimpedansvern ($Z<$) reagerer uten tidsforsinkelse dersom kombinasjonen av målt strøm og spenning (dvs. impedans) tilsier kortslutning nærmere enn 80 % av distansen til neste vern ($Z1<$) og med tidsforsinkelse på 0,2 s dersom kortslutningen er mellom 80 og 120+ % av distansen til neste vern ($Z2<$).

Tid for klarering av en kortslutning er summen av:

- Vernets deteksjonstid som er kort for momentant overstrømsvern og noe lenger for andre kortslutningsvern: typisk en halvperiode, dvs. 30 ms
- Eventuell tidsforsinkelse for selektivitet (dvs. ikke løse raskt for feil som bedre kan klareres av andre vern nærmere feilen)
- Bryterens tid for å åpne og bryte strømmen: typisk en til to halvperioder, dvs. 30 til 60 ms.

Vernene overvåker kontinuerlig strøm og spenning. Dersom noen måleverdier er over grenseverdiene lagres måleverdiene og vernets vurdering av dem fortløpende. Disse feilskriverfilene kan brukes til å undersøke feilforløp.

I tillegg brukes følgende vernfunksjoner og automatikk:

- Automatisk gjeninnkobling av effektbryter for videre drift ved forbigående feil etter 5 s og eventuelt igjen etter ytterligere 30 s (for automatisk seksjonering ved sonegrensebryter)
- Linjetest (prøveinnkobling) før spenningssetting for å redusere gjentatte strømsjokk med full kortslutningsstrøm på anleggene ved gjentatte innkoblinger.
- Fasevern for ikke å sammenkoble kontaktledningsseksjoner som ikke er i fase.
- Bryterfeilvern (BFV) for å sikre utkobling dersom en effektbryter ikke kobler ut på utløsesignal fra vern gjennom en gjenutløsning av bryteren og dernest backuputløsning av alle andre effektbrytere tilkoplede samme samleskinne.

Ved kortslutning i kontaktledningen skal kontaktledningsseksjonen med feil raskest mulig identifiseres og frakobles for å opprettholde kraftforsyningen og togtrafikken for øvrig. Vernene rapporterer utløsning og ca. avstand til feilen til leder for kobling som fjernstyrer kontaktledningsbryterne. Leder for kobling feilsøker ved å seksjonere ledningsanlegget med bryterne og koble inn igjen effektbryter. Leder for kobling får også beskjed om brannalarmer i anlegget.

7.2 Observasjoner

Observasjonene i dette avsnittet er i stor grad basert på mer detaljerte undersøkelser i referanse [34].

7.2.1 Kortslutninger/vernuttønsninger

1. **Kortslutninger sporet Ski-Oslo:** Det har skjedd flere kortslutninger etter idriftsettelse av Follobanen. Se oversikt i Vedlegg 4 Oversikt over vernuttønsninger som er oppsummert med:
 - 16. desember 05.56: Forbigående kortslutning nær Ski i sporet Ski-Oslo

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	24 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

- 16. desember 09.24: Forbigående kortslutning nær Ski i sporet Ski-Oslo
 - 17. desember 21.38: Forbigående kortslutning nær Ski i sporet Ski-Oslo
 - 19. desember 06.32: Varig kortslutning nær Ski i sporet Ski-Oslo
 - 19. desember 06.33-07.00: Flere innkoblinger mot kortslutning som følge av automatisk gjeninnkobling og leder for koblings feilsøking etter den varige kortslutningen.
 - 23. desember 17.32: Varig kortslutning nær Ski i sporet Ski-Oslo
2. **Kortslutning negativ fase:** Kortslutningsstrømmen har vært størst i negativ fase fra Ski.
 3. **Forbigående og varige kortslutninger:** Kortslutningene har først vært forbigående før den har blitt varig 19. og 23. desember. Strøm- og spenningsmålinger for de første kortslutningene 19. og 23. desember er vist i Vedlegg 6 Strøm- og spenningskurver utvalgte kortslutninger.
 4. **Avstand til feil fra Oslo:** Kortslutningsvernet i Oslo indikerer avstand til feil i størrelsesorden 22 km. Det er nært Ski.
 5. **Avstand til feil fra Ski:** Kortslutningsvernet i Ski har ikke indikert avstand til feil. Det er funnet at lokalkontrollanlegget i Ski har sendt melding «Velg parametersett D» til fjernkontrollanlegget i stedet for «Trip: Sone 1, Distans = X km, Kortsl.strøm = Y kA». Leverandøren av kortslutningsvern i Ski har likevel funnet at vernet har indikert en avstand til feil på ca 1 km.
 6. **Kortslutninger sporet Oslo-Ski:** Kortslutningene har vært i negativ fase for sporet Ski-Oslo. Det har ikke vært observert vernutløsning på grunn av kortslutninger i forsyningen til sporet Oslo-Ski.
 7. **Tog i tunnelen:** På flere av kortslutningstidspunktene har det vært tog i nærheten av kortslutningsstedet. Se Vedlegg 5 Oversikt over tog i tunnelen.
 8. **Direkte innkobling:** Linjetest før spenningssetting har flere ganger gitt negativt resultat (indikert feilfri linje) og dermed tillatt direkte innkobling mot en feil.
 9. **Forsinket utkobling:** Klareringstid fra Ski koblingshus er lang, spesielt ved direkte innkobling etter første utkobling 19. desember står høy kortslutningsstrøm på lenge.
 10. **Gjentatt innkobling:** Det har vært mange manuelle og automatiske innkoblinger. Manuelle innkoblinger er en del av leder for koblings søk etter feilstedet.
 11. **Varig kortslutning:** Kortslutningen 23. desember var varig sett fra Ski koblingshus og medførte ingen automatiske innkoblinger derfra. Linjetesten ga positivt resultat (indikerte feil på linjen). Etter to mislykkede gjeninnkoblingsforsøk ble bryteren til sporet Ski-Oslo (SKI-30-U1-E) automatisk blokkert. Fra Oslo koblingshus ga linjetesten negativt resultat (indikerte feilfri linje).

7.2.2 Brannalarmer

1. **Brannalarm Ski koblingshus 1:** Brannalarmen i Ski koblingshus har løst flere ganger:
 - 19. desember 06.33.40: Brannalarm 1. etasje. «substation rom» (usikkert tidspunkt pga. feil innstilt klokke i brannalarmanlegget. Klokkeslettet hentet fra hendelsesliste i fjernkontroll)
 - 23. desember 16.36.19: Brannalarm 1. etasje. «substation rom». Avstilt manuelt etter inspeksjon kl. 17.12.20. (Tilsvarende klokkeslett i hendelseslista i fjernkontrollanlegget er 16.36.45, det vil si 26 sekunder senere.)
 - 23. desember 17.32.15: Brannalarm undeetasje. «cable rom kjeller» (fire sekunder før vernutløsning om klokken i brannalarmanlegget og vernene er synkrone. Klokken i brannalarmanlegget ble oppdatert/stilt etter 19. desember)
2. **Brannalarm teknisk rom 53:** Brannalarmen i teknisk rom 53 har løst en gang:
 - 2022-12-19 06.33.08
3. **Uklar stedsangivelse:** I hendelseslisten til fjernkontrollanlegget er brannalarm i Ski koblingshus angitt med sted «05-HK298 SKI TBN», det vil si nettstasjonen til infrastrukturfor syningen 22 kV i samme bygning, men annet rom (branncelle).
4. **Feilalarmer:** Elkraftsentralen Oslo rapporterer om en mengde feilalarmer og spesielt feil på brannalarmfunksjoner i lang tid.
5. **Tog i tunnelen:** Ved begge utløsningene av brannalarm 23. desember var det tog med høyt effekttrekk som nettopp hadde kjørt inn i tunnelen på sporet Ski-Oslo.

7.2.3 Direkte innkobling

1. **Linjetest lysbuestrøm:** Linjetesten i Ski og Oslo koblingshus spenningssetter kontaktledningsanlegget via en 3,3 k Ω resistor. Det gir en maksimal teststrøm på 16,5 kV / 3,3 k Ω = 5 A. Lysbue i 11 og 22 kV nett slukker ved strøm lavere enn i størrelsesorden 10 til 15 A, se referanse [35]. Prøvestrømmen er dermed ikke tilstrekkelig for å opprettholde en lysbue.
2. **Ikke eksplisitt linjetest for negativ fase:** Både Ski og Oslo koblingshus er bygget med tofaset koblingsanlegg og autotransformatorene tilkoblet samleskinnen. Begge har også prøving før spenningssetting kun på positiv fase. Det vil si at kontaktledningsanlegget ikke prøves for feil i negativ fase når det ikke spenningssettes en autotransformator, for eksempel dersom transformatorene på Åsland er seksjonert bort under feilsøking. Det har skjedd for fire av innkoblingene fra Oslo koblingshus, men ikke under noen av innkoblingene fra Ski koblingshus.
3. **Eksempel:** Ved automatisk gjeninnkobling fra Oslo mot feil ved Ski 23. desember 17.32 gir linjetesten negativt resultat (feilfri linje) mot en stående kortslutning som linjetesten i Ski har gitt positivt testresultat på.

7.2.4 Forsinket utkobling

1. **Manglende momentant overstrømsvern:** I Ski koblingshus er kortslutningene detektert av distansevernet Z1< og ikke momentant overstrømsvern I>>> som har kortere klareringstid. Ifølge releplanen ([36]) skal I>>> løse på 8,3 kA * $\sqrt{2}$ = 11,7 kA. Det viser feilskriverfilene at det ikke gjorde. Det er funnet at vernet er stilt inn på «single phase» og ikke «dual phase» og dermed ikke fungerer i negativ fase.
2. **Backuputløsning bryterfeilvernet:** Ved et tilfelle har bryterfeilvernet backuputløst for manglende åpning av effektbryter fra Ski koblingshus mot sporet Ski-Oslo (SKI-30-U1-E). Det har gitt forsinket utkobling og generert en stor mengde oppføringer i hendelseslista til leder for kobling.
3. **Bryterfeilvernet feilet:** I tilfellet over der bryterfeilvernet backuputløste, løste det ikke alle effektbryterne tilkoblet samleskinnen. Det førte til at det underspenningsvernet på samleskinna løste med ennå lenger utløsetid. Det er funnet feil på bryterfeilvernet.

7.2.5 Gjentatt innkobling

1. **Manglende avstand til feil-indikering:** Distansevernet i Ski for spor Ski-Oslo sin «avstand til feil»-indikering når ikke fram til leder for kobling på grunn av feilkonfigurering av melding som sendes til fjernkontroll. Det kan også gjelde kortslutningsstrømmens størrelse, samt strømfordeling mellom fasene. Leder for kobling får i stedet feilaktig beskjed om bytte av parametersett.
2. **Feilsøking:** Det har vært utført betjening og innkobling mot kortslutning fra Ski koblingshus i forbindelse med feilsøkingen i tunnelen selv etter at brannalarmen i Ski koblingshus og teknisk rom 53 er utløst.
3. **Automatisk gjeninnkobling:** Ved direkte innkobling mot feil på grunn av negativ linjetest, har vernet detektert kortslutning og startet ny gjeninnkoblingssekvens med automatisk gjeninnkobling etter fem sekunder. Det har økt antall kortslutningsstrømstøt og dermed kortslutningsbelastning.

7.2.6 Andre observasjoner

1. **Lav kortslutningsstrøm/reduert kortslutningsbelastning:** Under feilsøkingen 19. desember har det vært mange innkoblinger mot kortslutning og med forsinket utkobling. Typisk tid med kortslutning har vært femelperioder. Det tilsvarer 0,3 s. Kortslutningsstrømmens toppverdi fra Ski har vært 12 til 17 kA i negativ fase. Størrelsen på strømmen er lavere enn dimensjonerende kortslutningsstrøm for anlegget.
2. **Utkoblet negativfase:** Etter andre kortslutning 19. desember observeres ingen strøm i negativ fase til hverken U1 eller U5 fra Ski. Årsaken er at bryterfeilvernet også løste effektbryterne på avgangene til autotransformatorene i Ski.

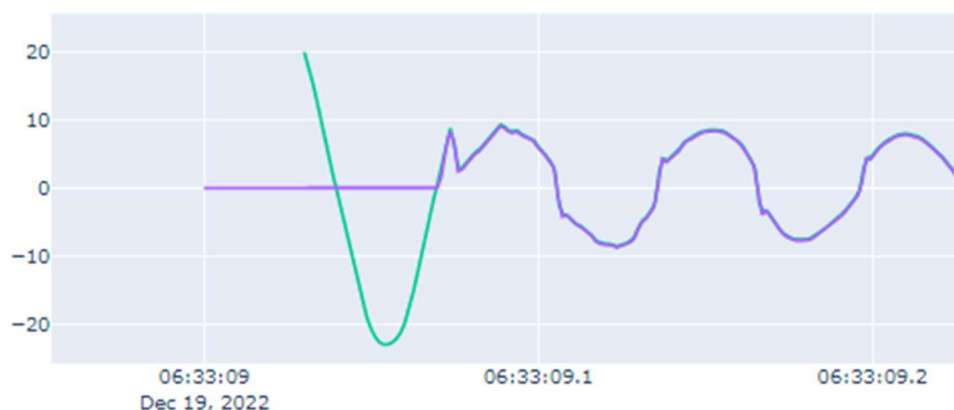
Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	26 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

3. **Utkoblet negativfase/reduisert kortslutningsbelastning:** Når bryterfeilvernet løser på backuputløsning 19. desember frakobles også autotransformatorene tilkoblet samleskinna i Ski. Det gjør at negativfasen under feilsøking ikke spenningssettes fra Ski under deler av feilsøkingen. Det har dermed redusert kortslutningspåkjenningen i negativ fase ved at kortslutningstrømmen er redusert. Det har også gitt indikering kortslutning i positiv fase.
4. **Høy strøm nøytralpunkt:** Det har vært et høyt antall alarmer om høy strøm i nøytralpunkt fra Oslo koblingshus i driftsperioden. Det er funnet at en alarmverdi i kontrollanlegget var stilt for lavt. Se referanse [34].
5. **Uselektive vern sporet Oslo-Ski:** Vern i Ski og Oslo koblingshus for sporet Oslo-Ski (SKI-30-U5-Z2< og OSLO-30-U18-Z2<) var frem til og med 19. desember innstilt for også å detektere feil på sporet Ski-Oslo.
6. **Forsinket automatisk gjeninnkobling/reduisert kortslutningsbelastning:** Automatisk gjeninnkobling etter utkobling fra vern skjer typisk etter 10 til 20 s, ikke 5 s som beskrevet i 7.1. Det kan ha redusert kortslutningspåkjenningen gjennom lenger nedkjølingstid enn forventet.
7. **Manglende automatisk gjeninnkobling/reduisert kortslutningsbelastning:** En observerer bare én slik automatisk gjeninnkobling, dvs. den etter 10-20 s, ikke den etter ytterligere 30 s. Det kan ha redusert kortslutningsbelastningen. Det er for øvrig ikke sonegrensebryter på Follobanen og automatisk gjeninnkobling for koordinering med denne kan derfor være unødvendig.

7.3 Umiddelbare vurderinger

1. **Kortslutningsutvikling:** Observasjoner fra strøm og spenningskurvene er at feilen endrer seg
 - o fra gjentatte «klover» på spennings sinusens topp (16. desember 05.56) som ikke gir utkobling
 - o via tydelige dropp i spenningen fra sinuskurvens topp som gir utkobling og automatisk innkobling (16. desember 09.24 til 19. desember 06.32)
 - o og tydelig dropp i spenningen rett etter spenningssetting ved nullgjennomgang (19. desember 06.33 og 06.37)
 - o til ingen dropp i spenningen etter spenningssetting, kun en konstant feil (19. desember 06.44 og ut dagen)
 - o nytt tydelig dropp i spenningen fra sinuskurvens topp til nær konstant null (23. desember 17.32)
 - o og til slutt ingen dropp i rett etter spenningssetting ved nullgjennomgang (23. desember 17.32)

Det kan tolkes som et overslag (kortslutning av isolasjon) som gjentas flere ganger og som blir tydeligere og tydeligere fra kun pickup som ikke gir vernutløsning til forbigående kortslutning som gir vernutløsning til varig kortslutning. Det er ikke funnet andre forklaringer en overslag som årsak til kortslutningen ved første automatiske gjeninnkobling 19. desember kl 06.33. Se Figur 16. Der er ikke sannsynlig at det skulle oppstå en tilfeldig feil kun millisekunder etter kortslutning. Den varige kortslutningen kan være skadede kabelskjøter og endeavslutninger.



Figur 16 Spenning i negativ fase målt på avgangene i Ski, lilla mot U1 sporet Ski-Oslo (som kobles inn ved nullgjennomgang) og turkis mot U5 Oslo-Ski (som var innkoblet). Tydelig dropp i spenningen for U1 ses når den når ca 9 kV.

2. **Kortslutningsbelastning:** Sammenligning av kortslutningsbelastning (se dimensjonerende kortslutningsstrøm i 5.1)
 - Termisk 0,1 s: Målt $18180+3770*2=25720$ A toppverdi tosidig fra Ski og Oslo i 1,5 perioder 23. desember kl 17.32.19. Det tilsvarer 18186 A RMS i 0,09 s. Dimensjonerende er 25 kA.
 - Termisk 0,3 s: Målt 15547 A ensidig fra Ski toppverdi i 4 perioder 19. desember kl 06.33.09. Det tilsvarer 12034 A RMS i 0,24 s. Dimensjonerende er 18,6 kA.
3. **Leder for kobling:** Leder for kobling har overvåket og feilsøkt i anlegget. Det kan ha blitt vanskeliggjort gjennom begrenset eller misvisende informasjon fra anleggene til fjernkontrollsentralen, for eksempel avstand til feil, kortslutningsstrøm og sted for brannalarm. [34] viser at det er et enormt signalomfang ved slike hendelser. Utløsningen av bryterfeilvernet har også gjort at anlegget er seksjonert, for eksempel frakobling av autotransformatorene. Det kan ha gjort at leder for kobling ikke har fått de testresultatene som var forventet under feilsøkingen.

7.4 Foreløpige konklusjoner

1. **Kortslutninger:** Det har vært klarert flere kortslutninger i negativ fase nær Ski i tunneløpet Ski-Oslo. Kortslutningene har først vært forbigående, så varige. Kortslutningsstrømmene har vært under dimensjonerende kortslutningstrøm.
2. Det er ikke undersøkt i denne rapporten hvorvidt disse forbigående kortslutningene før hendelsen 19. desember har vært fanget opp og fulgt opp som en del av den daglige driften.
3. **Brann:** Det har vært flere brannalarmer i Ski koblingshus som sammenfaller med kortslutninger eller togtrafikk i sporet Ski-Oslo. Det er også registrert en brannalarm på et tidspunkt der det ikke var kortslutning, men (test-) tog nettopp hadde passert inn i tunnelen.
4. **Direkte innkobling:** Både Ski og Oslo koblingshus spenningssetter kortslutning direkte etter at linjetesten har gitt negativt resultat (dvs. indikert feilfri linje) på grunn av
 - Mulig årsak er utilstrekkelig prøvestrøm til å opprettholde lysbue etter overslag
 - Manglende eksplisitt prøving av negativ fase når det ikke spenningssettes en autotransformator
5. **Forsinket utkobling:** Det har vært flere forsinkede utkoblinger:
 - Momentant overstrømsvern i Ski er feilkonfigurert og løser ikke til tross for kortslutningsstrøm over innstillingsverdien. I stedet løser distansevernet med lenger deteksjonstid og brytertid.
 - Ved ett tilfelle kobler ikke effektbryter ut på utløsesignal fra vernet. Bryteren må løses på ny fra bryterfeilvernet og underspenningsvernet med lenger deteksjonstid.
6. **Gjentatt innkobling:** Det har vært flere gjentatte innkoblinger:

Follobaneprosjektet

Teknisk årsaksresonnement etter
stoppende feil
i strømforsyningen 19. og 23. desember

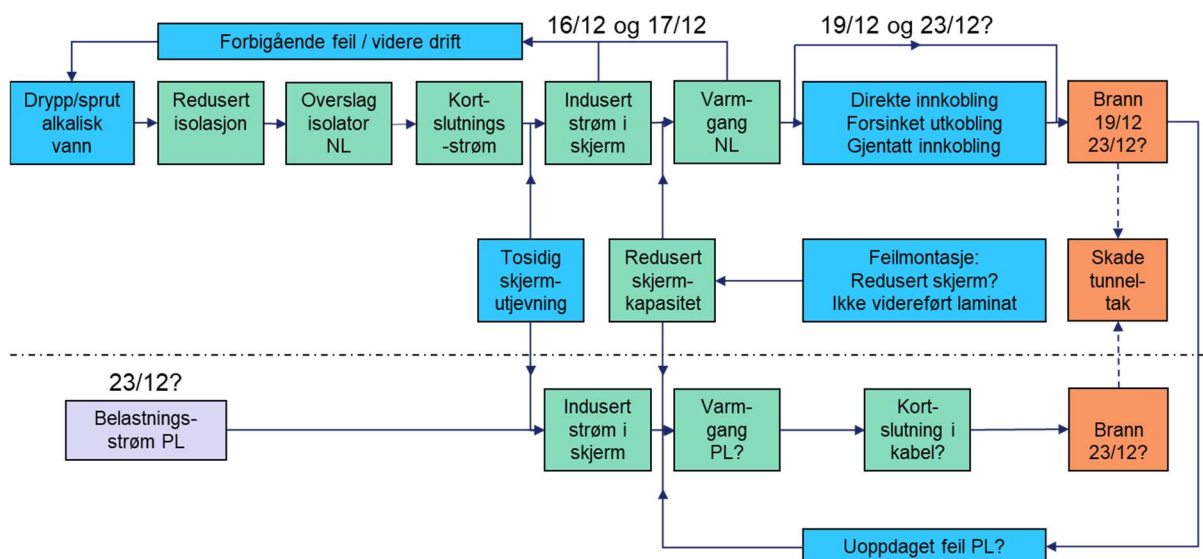
Side: 28 av 46
Dok.nr: UOS-00-A-91196
Rev: 00E
Dato: 06.02.2023

- Når linjen spenningsettes etter negativ linjetest (indikerer feilfri linje) og vernet likevel detekterer kortslutning og løser bryteren, startes en ny gjeninnkoblingssekvens. Det gir ytterligere innkoblinger med fare for direkte spenningssetting av kortslutningen.
- Det har vært flere innkoblinger i forbindelse med leder for koblings feilsøking. Feilsøkingen kan ha vært vanskeliggjort ettersom informasjon om avstand til feil fra Ski ikke ble sent riktig til fjernkontrollsentral og at riktig brannalarm ikke har kommet frem til leder for kobling.
- Direkte innkobling mot kortslutning har ført til utkobling og start av gjeninnkoblingssekvens.

8 MULIG ÅRSAKSRESONNEMENT

8.1 Oversikt

Oversikt over et mulig årsaksresonnement (hendelsesforløp) er skissert i blokkdiagram i Figur 17. Hver del av det er nærmere forklart i de etterfølgende avsnittene.



Figur 17 Blokkskjema over mulig årsaksresonnement (hendelsesforløp). Blå farge indikerer menneskelig valg. Turkis farge indikerer fysisk konsekvens. Rød/orange farge indikerer (topp-)hendelse. Lilla farge indikerer intensjon. Pilene angir rekkefølge på hendelser.

8.2 Kraftkablene

- Tosidig skjermutjevning:** Det foretas et valg av utjevning av kabelskjermene i begge ender. Det er kjent at en slik utjevning resulterer i indusert strøm i kabelskjermen ved last- og kortslutningsstrøm i kabelens leder.
- Feilmontasje:** Det foretas et valg av kabel med et gitt ledertverrsnitt på den metalliske skjermen. I tillegg er det valgt en kabel med et halvledende/halvisolerende lag mellom skjermtråder og vanninntregningslaminat. Kabelen monteres med tilfeldig skjermforbindelse over skjøtene og uten forbindelse av laminatet i skjøter og endeavslutninger.
- Redusert skjermkapasitet:** Valg av kabel og montasje av skjøter og endeavslutninger reduserer skjermens kapasitet (strømføringssevne) og gjør den sårbare for elektrisk varmgang.

8.3 Kortslutningen i tunnelen

- Drypp + sprut alkalisk vann:** Det er observert drypp av alkalisk vann fra taket ned på negativ line. Det er ikke testet, men antatt at en dråpe som faller 42 cm vil knuses og spre en sprut av av mindre dråper som kan lande på isolatoren. (Alternative muligheter er direkte drypp på isolatoren eller sprut etter luftturbulens fra passerende tog).
- Redusert isolasjon:** Det alkaliske vannet er svært elektrisk ledende. Det er observert et hvitt belegg som antas å være saltavsetning fra fordampet alkalisk vann både på isolatoren og på dryppstedet på lina (og andre steder). Det er sannsynlig at dette reduserer isolasjonsholdfastheten til isolatoren, eventuelt sammen med annen forurensning (støv?) i tunnelen. Belegget ble ikke testet ettersom isolatoren var ren før den ankom testlaboratoriet.
- Overslag:** På et tidspunkt er det nok vann og avsetning på isolatoren til at isolasjonsholdfastheten underskrider spenningen over den og det slår over en lysbue. En kompositisulator skal tåle kortslutningsstrøm på overflaten og overslaget etterlater få spor. Sort belegg på negativisolatoren kan være sot.

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	30 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

4. **Kortslutningsstrøm:** Et overslag over isolatoren gir en kort lysbue som kan blåse eller brenne bort det hvite belegget og gjenopprette tilstrekkelig isolasjonsholdfasthet. Kortslutningsvern klarer feilen og lysbuen slukker. Feilen er derfor forbigående, og effektbryter kobles automatisk inn igjen etter noen sekunder og anlegget driftes videre. Kortslutningsvernets indikasjon av avstand til feil stemmer med kortslutningsstedet i tunnelen.
5. **Indusert strøm i kabelskjerm:** Kortslutningsstrømmen fra overslaget i negativfasen inducerer en strøm i kabelskjermene. Størst er indusert strøm skjerm til negativfasen siden den er nærmest den lederen som fører størst kortslutningsstrøm.
6. **Varmgang:** Indusert strøm i skjerm med redusert kapasitet kan føre til elektrisk varmgang i første omgang. Over tid kan dette degenerere skjermen. Beregninger indikerer at selve skjermen har kapasitet nok til å overleve erfarte kortslutningsstrømmer. Dårlig forbindelse i skjøter og endeavslutninger utgjør erfaringsmessig (se [6]) en stor risiko.
 - a. **Gjentakelse:** Trinn 1 til 6 gjentar seg fra 16. til 19. desember slik oversikten over kortslutninger viser. Ettersom tunnelen var rapportert tørr ved åpning og anlegget er nytt, er det naturlig at det tar litt tid fra første drypp til isolasjonsholdfastheten er redusert tilstrekkelig for første overslag den 16.
 - b. **Brann:** Ved ett tidspunkt, nærmere bestemt 19. desember kl. 06.32 eller 06.33, etableres en varig kortslutning i negativfasen ettersom automatisk gjeninnkobling fører til ny vernutløsning. Ettersom overslag over isolatoren er forbigående, er det sannsynlig at den varige feilen etableres i kabelen til negativlederen på grunn av varmgang.

8.4 Kortslutningsvern og kontrollanlegg

1. **Direkte innkobling:** Etter vernutkobling 19. desember 06.32 gir linjetest negativt resultat (dvs. indikerer feilfri linje) og spenningssetter anlegget igjen automatisk. Det er ikke avklart
 - a. om det var en stående feil under linjetesten (for eksempel at kabelen er ødelagt av den første kortslutningen) og linjetesten dermed har feilet (ikke detektert feilen)
 - b. om isolasjonsholdfastheten fremdeles var redusert under linjetesten og linjetesten dermed har feilet (ikke detektert feilen)
 - c. om luften rundt feilstedet var ionisert og dermed lett kunne føre til gjentenning av lysbue ved spenningssetting
Umiddelbare vurderinger i 7.3 tyder på at overslag (dvs. alternativ b over).
2. **Forsinket utkobling:** Når effektbryteren (U1) i Ski kobles inn og spenningssetter negativfasen detekterer kortslutningsvernene kortslutning og kobler ut igjen. Utkoblingen er forsinket av minst to årsaker:
 - a. Det er distansevernet som detekterer feilen og ikke momentant overstrømsvern. Momentant overstrømsvern har kortere deteksjonstid og gir kortere brytetid enn distansevernet.
 - b. Ved ett tilfelle går bryteren ikke ut på signal fra distansevernet og feilen blir dermed klarert av bryterfeilvernet og underspenningsvernet som løser alle de andre effektbryterne tilkoblet samleskinna i Ski koblingshus.
3. **Brann:** Kl. 06.33 19. desember går brannalarmen i Ski koblingshus og teknisk rom 53. Det er usikkert om det er på grunn av den første kortslutningen kl. 06.32 eller den første automatiske og direkte gjeninnkoblingen med forsinket utkobling kl. 06.33. Tidspunktet for brannalarmen i Ski koblingshus er ikke så nøyaktig (sekunder mangler på grunn av feil innstilt klokke) og det kan være tidsforsinkelse mellom brann og brannalarm. Brannalarmen i teknisk rom 53 startet 06.33.08, ett sekund før gjeninnkoblingen om klokkene er synkronisert.
4. **Gjentatte innkoblinger:** Leder for kobling spenningssetter kontaktledningsanlegget for spor Ski-Oslo flere ganger for feilsøking. Linjetesten gir tilsynelatende fremdeles negativt resultat (dvs. indikerer feilfri linje) og innkoblingen er derfor direkte. Informasjon om feilen når ikke frem til leder for kobling. Heldigvis er autotransformatorene i Ski koblingshus koblet fra på grunn av bryterfeilvernet slik at feilen i negativfasen kun spenningsettes via positivfasen og dermed med lavere kortslutningsstrøm.

Follobaneprosjektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	31 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

8.5 Testkjøring 23. desember

For testkjøringen 23. desember finnes det to mulige årsaksresonnementer:

- Hendelsesforløpet er likt som beskrevet for 19. desember over.
- Et alternativt hendelsesforløp som følger:
 1. **Uoppdaget feil:** Etter brannen 19. desember ble det oppdaget og reparert flere skader. Nær to uker etter brannen 23. desember ble det oppdaget en skjult skade i en endeavslutning på kraftkabelen til positivfase der den termineres i Ski koblingshus for sporet Ski-Oslo (U1). Denne skaden kan ha oppstått 19. desember, men ikke blitt oppdaget.
 2. **Belastningsstrøm:** Under testkjøringen den 23. desember gikk det belastningsstrøm i anlegget. Det tok over en halvtime før målingen av strøm i skjermen til kraftkabelen for positiv fase til sporet Ski-Oslo (U1) våknet og ga resultater. Oppvåkningen påvirket målt strøm i de andre tre kabelskjermene. Under testene gir målingen på positiv skjerm til U1 flere uforklarlige dropp.
 3. **Indusert strøm i kabelskjerm:** Se kapittel 5.3 punkt 5. I tillegg er det målt høy strøm i kabelskjermen til positivfase på grunn av laststrøm.
 4. **Varmgang:** Skade på utjevningen til skjermen for positiv fase til U1 i Ski koblingshus og høy belastningsstrøm kan ha gitt varmgang. Ved tredje testtog som akselererer og trekker strøm på sporet Ski-Oslo går brannalarmen i Ski koblingshus. Forholdet undersøkes og alarmen stilles av etter 40 minutter. Varmgangen kan ha vært begrenset slik at den kjølte seg ned når belastningen avtok før det utviklet seg til en brann. Det kan også ha vært en falsk alarm, men ut fra omstendighetene regnes det foreløpig som mindre sannsynlig.
 5. **Brann:** Brannalarm utløses i Ski koblingshus fire sekunder før vern løser for kortslutning. Det kan være flere forklaringer på dette:
 - a. Kortslutningen indikeres nærmere Ski enn 19. desember: høyere kortslutningsstrøm fra Ski, lavere fra Oslo, Oslo koblingshus detekterer i sone 2 med marginalt lenger avstand til feil. I sum kan dette tyde på at kortslutningen er i Ski koblingshus og ikke i tunnelen som tidligere.
 - i. Det kan enten være den uoppdagede feilen i positivfasen. Det som taler mot det, er at en ville sett stor kortslutningsstrøm i positivfasen og utløsning på momentant overstrømsvern.
 - ii. Alternativt kan kortslutningen ha startet i skjøten som ble satt inn i kabelen for negativ fase i Ski koblingshus ved bytte av endeavslutning etter 19. desember. Denne brant også, og feilskriverfilene viser høy kortslutningsstrøm i negativfasen.
 - b. Alternativt kan hendelsesforløpet fra tidligere med isolatoroverslag ha gjentatt seg og ført til umiddelbar brann i ny endeavslutning i Ski koblingshus i negativfasen.
 6. **Skade i tunneltaket:** Skadene i tunneltaket (ødelagt betong, flammespor og delvis røket bæreline) ble først oppdaget ved inspeksjon en uke etter 23. desember. Tunnelen ble også inspisert mellom 19. og 23. desember, men uten funn av de nevnte skadene. Lokomotivfører på testtoget den 23. desember rapporterte også at han så venstre kraftline (negativleder) pendle. Det er et tegn på kortslutning. Lokfører har også passert kortslutningsstedet fire ganger denne dagen uten å rapportere om skader. Det er derfor sannsynlig at skadene i tunneltaket har oppstått 23. desember. Skadene må ha oppstått i ett tilfelle ettersom brudd i bæreline og avskalling av betongelementet skjer ikke gradvis.

8.6 Usikkerheter

Årsaksresonnementet forklarer ikke:

- **Skade i tunneltaket 1:** Hvorfor det gikk strøm i betongtaket i tunnelen.
- **Skade i tunneltaket 2:** Hvorfor kordeller i bærelina røk.
- **Skade i tunneltaket 3:** Hvorfor det er så mange fotpunkter for lysbuer i hengemasta til kraftlina.

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	32 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

- **Lysbueaktivitet:** Hvorfor det har vært omfattende lysbueaktivitet i teknisk rom 53 (mellom negativ faser og aluminiumkonstruksjon). Varmgang og avbrenning av utjevning som har ført til lysbue under gunstige røykforhold er en mulig forklaring.
- **Indusert strøm i skjerm:** Hvorfor skjermstrømmen til negativleder til sporet Oslo-Ski (U5) under testene 23. desember ikke responderer som de andre skjermstrømmene på endring i strøm til faselederne.
- **Kortslutninger:** Detaljer i kortslutningsforløpene under feilsøkingen 19. og 23. desember. Spesielt hva som var den årsaken til at kortslutningen den 19. desember ikke lenger var forbigående.
- **Brann:** Hvorfor det foregikk feilsøking og betjening av Ski koblingshus etter at brannalarmen hadde gått 19. desember. Har riktig informasjon kommet frem til leder for kobling? Dette bør undersøkes videre.
- **Annet:** Det har vært observert flere skader og problemer med kabler på Ski stasjon, både før og etter hendelsene 19. og 23. desember. Det er ikke undersøkt nærmere her.

Foreløpig vurderes lysbueskadene i tunneltaket og i teknisk rom 53 som følgeskader og ikke årsaker. Det kan ikke utelukkes at jording og utjevning sammen med overgangsmotstand og avstander til omgivelsene har hatt innvirkning. Det har vært omfattende lysbueaktivitet i rommet knyttet til negativfasene for begge sporene (matet over bryterfelt SKI-30-U1 og -U5), men det er ikke egne vernutløsninger for kortslutning i forsyningen til det sporet. Det er derimot identifisert et interessant forløp mot slutten av kortslutningen etter første automatiske gjeninnkobling 19. desember kl. 06.33. Rett før kl 06.33.09.3 bytter strømmen i negativ fase matet fra bryterfelt -U5 fase før den øker i størrelse. Det skjer tilsynelatende umotivert, dvs. ingen brytermanøvrering. Det kan være tidspunktet det tennes lysbuer i teknisk rom 53 etter at utjevningen av skjermen til kabel fra bryterfelt -U1 er brent av.

9 KONKLUSJON

9.1 Diskusjon

Rapporten beskriver observasjoner, umiddelbare vurderinger og foreløpige konklusjoner før den foreslår et årsaksresonnement. Det er knyttet flere usikkerheter til forhold som ikke er avklart. De fleste av disse er knyttet til detaljer i tidspunkter eller konsekvenser. For eksempel nå kortslutningen gikk fra å være forbigående til å være varig, hva som er årsaken til den omfattende lysbueaktiviteten i teknisk rom 53 og om overslag på isolatoren i tunnelen også var årsaken til feilen 23. desember.

Det er sannsynligvis ikke en enkelt hendelse som er årsak til brannene, men en kombinasjon av flere forhold. Det er mulig å konstruere et årsaksresonnement basert på observasjonene som er gjort. Det kan være at anlegget, til tross for utjevnet redusert kabelskjerm i begge ender og feilmontasje av skjøter og endemuffer tilsynelatende har tålt en eller flere kortslutninger. Men anlegget har ikke tålt den lange utkoblingstiden for første gjeninnkobling 23. desember. Tilsvarende viser beregninger i [7] at kortslutningsforløpet kun gir moderat termisk påkjenning og at anlegget med stor sannsynlighet derfor hadde tålt det opplevde kortslutningsforløpet dersom det hadde vært hensiktsmessig utført. Det vil si med tilstrekkelig kapasitet og forbindelse i kabelskjermen gjennom skjøter og endeavslutninger.

9.2 Konklusjon

Denne rapporten gir en oversikt over skadene og tidslinjen for de to stoppende feilene i Blixtunnelen på Follobanen 19. og 23. desember. Observasjoner om kabelskjerner, kortslutninger, kortslutningsvern og brannalarmer er gjennomgått og det er foreslått en mulig årsakssammenheng:

- **Kabelskjerner:** Valgt utjevning av kraftkablernes skjerm i begge ender, valg av kabelutforming og feilmontasje i skjøter og endeavslutninger har gjort at kabelen er sårbar for elektrisk varmgang gjennom dårlig kontakt.
- **Kortslutninger:** Drypp av alkalisk vann fra tunneltaket har sannsynligvis direkte eller indirekte redusert holdfastheten til negativlederens isolator og ført til flere forbigående kortslutninger.
- **Kortslutningsvern:** Kortslutningsvernene har gitt direkte innkobling, forsinket utkobling og gjentatte innkoblinger som kan ha ført til økt kortslutningsbelastning, spesielt for negativfasen.
- **Kombinasjonen** av kabelskjermenes utførelse og kortslutningene kan ha ført til skade på kabelen og dermed en varig kortslutning. Feilklareringen og -søkingen kan ha gitt ekstra påkjenning. Kombinasjonen er vist i Figur 18.

Det er fremdeles flere usikkerheter knyttet til detaljene i punktene over og til flere observerte skader i tunnelen og teknisk rom 53. Foreløpig **skadene i tunneltaket** og i **teknisk rom 53** vurdert som følgeskader og ikke årsaker.



Figur 18 Illustrasjon av kombinasjonen av forhold som kan ha vært avgjørende for hendelsen.

10 DOKUMENTINFORMASJON

10.1 Endringslogg

Rev.	Endring
00E	Til driftsleder før spenningssetting.

10.2 Referanseliste

- [1] Kollegiet for brannfaglig terminologi. Publisert på kbt.no.
- [2] Bane NOR «Kontaktledning-koblings skjema Ski St.», EH-008326-000 revisjon 020 datert 2022-12-06
- [3] Obrascón Huarte Lain S.A. «Follobaneprosjektet – 2x15 kV Strømforsyning skjema SKI STASJON», UOS-90-R-56000 revisjon 10D datert «som bygget» 2022-08-04
- [4] Bane NOR presentasjon «TPS incident 19122022 and TPS incident 23122022», unummerert dokument datert uten dato
- [5] Bane NOR presentasjon «48 timers rapport – Brann i koblingshus Ski samt i CP 53 19.12.2022», unummerert dokument til Synergisak 679911
- [6] Sintef Energiforsking prosjektnotat «Feiltyper og feilmekanismer i skjermtilkoblinger», AN.16.14.65 versjon 1.0 datert 2017-04-19 publisert på www.ren.no
- [7] Norconsult rapport «Follobaneprosjektet – Beregning og vurdering av elektriske og termiske forhold for matekabler med utjevnet eller utisolert skjerm eller tett forlagt returleder», UOS-90-A-75129 revisjon 00E datert 2023-01-25
- [8] Bane NOR rapport «Follobaneprosjektet – Ski stasjon, EMP-Plan, EPC Ski Fase 40», UOS-90-A-91171 revisjon 01E datert 2022-07-19
- [9] Acciona Ingenieria/Cowi rapport «Electromagnetic Compatibility Plan (EMCPLAN) Follobanen», document uten nummer datert 2021-10-13
- [10] Acciona Ghella Joint Venture rapport «Follobaneprosjektet – utfordringer ved bruk av lange forsyningskabler», Follobaneprosjektet Blixtunnelen UFB-30-A-65610 revisjon 00D datert 2022-10-27
- [11] InfraNord/Atkins fagnotat «Hovedbanen Oslo S – Banestrømforsyning - Fagnotat», dokument UOS-10-A-85381 revisjon 08D / EH-022703-000 revisjon 000 «Som bygget» datert 2022-05-19
- [12] Cablete datablad «Product specification», dokument EPM72622 datert 2018-07-27
- [13] NKT datablad «SOT SCL 12-36 kV», UFB-30R-68378 revisjon 06D / EH-024956-000 revisjon 000 «Som bygget» datert 2022-11-25
- [14] Acciona Ghella Joint Venture tegning «Follobaneprosjektet –Kabelterminering, Plan og detaljer, Type 2», UFB-30R-66103 revisjon 01D / EH-024825-000 revisjon 000 «Som bygget» datert 2022-11-10
- [15] SINTEF Energi AS brev «Dissection of Two Cable Terminations» til Bane NOR datert 2023-01-29
- [16] SINTEF Energi AS epost «RE: Undersøkelser av skjøter og plugg» til Bane NOR datert 2022-12-23
- [17] Bane NOR presentasjon «Incident on TPS HV cable at Technical Buidling North», unummerert og udatert document.
- [18] Norconsult rapport «Follobaneprosjektet – Helhetlig vurdering av strømdistribusjon i returstrømkretsen», Follobaneprosjektet Innføring Oslo S UOS-10-A-75401 versjon 01E datert 2022-11-28.
- [19] Obrascón Huarte Lain S.A. «Follobaneprosjektet – Returkretsdiagram SKI STASJON», UOS-80-R-56252 revisjon 11D datert «Som bygget» 2022-12-01
- [20] Acciona Ghella Joint Venture rapport «Follobaneprosjektet – Returkretsskjema Blixtunnelen», UFB-30-R65702 revisjon 02D datert «Som bygget» 2022-09-12

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember	Side:	35 av 46
		Dok.nr:	UOS-00-A-91196
		Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

- [21] Bane NOR dokument «Sjekkliste returledninger TBN – CP53», unummerert dokument datert 2022-12-28
- [22] Bane NOR rapport «Vurdering av vernbarrierer ved kortslutning», EH-025417-000 revisjon 002 datert 2022-06-30
- [23] POINSA datablad «Support-feeder-1270-rigid», document CODE:32.025G.04.03._C138_ datert 2018-10-02
- [24] SINTEF Energi AS brev «Dissection of a support insulator» til Bane NOR datert 2023-01-23
- [25] Eurofins Environment Testing Norway midlertidig analyserapport, document nummer PR-23-MM000041-01 EUNOMO-00361739, prøve nr 439-2023-01160136 datert 2023-01-19
- [26] Bane NOR notat «Feilsøking banestrømforsyningsanlegget Blix-tunnelen», unummerert dokument datert 2023-01-10
- [27] Bane NOR presentasjon «Insulator Inspection Blix tunnel», unummerert dokument datert 2023-01-27
- [28] Bane NOR notat «Undersøkelser av kortslutningssted ved mast EH-MAS-0088764 i Blix-tunnelen den 9. og 13. januar 2023», unummerert dokument datert 2023-02-02
- [29] Bane NOR notat «Avskallinger i betongsegment ved km 22+316 og 22+324 i FB2», unummerert dokument datert 2023-01-15
- [30] NTNU lærebok «Elektromagnetisk sameksistens i jernbaneanlegg» «Kapittel 3 Elektromagnetisk topologi»
- [31] Acciona Ghella Joint Venture rapport «Follobaneprojektet – Tverrfaglig jordingsplan BLIXTUNNELEN KM 20,400-23,000», UFB-30R-68022 revisjon 05D / EH-024926-000 revisjon 000 «Som bygget» datert 2022-12-21
- [32] Acciona Ghella Joint Venture rapport «Follobaneprojektet – Jordingsplan tverrforbinding KM 22,355», UFB-30R-68378 revisjon 06D / EH-024956-000 revisjon 000 «Som bygget» datert 2022-11-25
- [33] Bane NOR notat «Befaringsnotat 15/1-2023», unummerert dokument under arbeid.
- [34] Bane NOR rapport «Follobaneprojektet – Feilanalyse av vernutkoblinger, driftsmeldinger og målinger etter stoppende feil i strømforsyningen 19. og 23. desember», UOS-00-A-91198 revisjon 00C datert 2023-02-01
- [35] Norges Vassdrag- og Energidirektorat sommerprosjekt «Systemjording», datert 2017-08-07. Publisert på www.nve.no
- [36] Siemens Mobility «Follobaneprojektet – Ski koblingshus releplan AC 15 kV 16,7 Hz», UOS-10-R-86256 revisjon 02C / BE-600769-000 revisjon 003 datert 2022-10-18

10.3 Vedleggsliste

1. Oversikt over materielle skader
2. Grov tidslinje
3. Værforhold
4. Oversikt over vernutløsninger
5. Oversikt over tog i tunnelen
6. Strøm- og spenningsmålinger for utvalgte kortslutninger

VEDLEGG 1 MATERIELLE SKADER

- Hendelse 2022-12-19:
 - Brent endeavslutning kraftkabel negativ fase tilkoplebryter 30-U1-E i Ski koblingshus mot teknisk rom 53 i Blixtunnelen. Skiftet. Brennermerker på festemateriell kabelbru.
 - Brent utjevning av kabelskjerm negativ fase tilkoplebryter 30-U1-E i Ski koblingshus mot teknisk rom 53. Skiftet.
 - Brent skjøt av kraftkabel negativ fase forlagt kabelkanal langs jernbanespor mellom bryter 30-U1-E i Ski koblingshus og bryter 05-267-L i teknisk rom 53. Skiftet.
 - Brent endeavslutning for kraftkabel negativ fase tilkoblet bryter 05-267-L i teknisk rom 53 mot Ski koblingshus (EH-LED-002967). Skiftet.
 - Brent endeavslutning for kraftkabel positiv fase tilkoblet bryter 05-267-L i teknisk rom 53 mot Ski koblingshus (EH-LED-002966). Skiftet.
 - Brent endeavslutning for kraftkabel negativ fase tilkoblet bryter 05-267-L i teknisk rom 53 mot tunnelen (EH-LED-002965). Skiftet.
 - Smeltet utjevning av motor til manøverskap for bryter 05-267-L og 05-266-L i teknisk rom 53. Skiftet.
 - Omfattende lysbueemerker på aluminiumskonstruksjon for bryterarrangement i teknisk rom 53. Flere av punktene kan klassifiseres som skade på grunn av smelting og sprut av aluminium.
 - Lysbueskade på strømskinne til negativ fase for bryter 05-266-L i teknisk rom 53.
 - Lysbueskade på jordskinne i bryterarrangement i teknisk rom 53.
 - Utløst sikring strømforsyning og smeltet utjevning manøvermaskin motor for bryter 05-267-L og 05-266-L i teknisk rom 53.
 - Ødelagt brannsentral i tverrpassasje 54 som også omfatter teknisk rom 53.
- Hendelse 2022-12-23:
 - Brent ny skjøt av kraftkabel negativ fase forlagt under bryterfelt i Ski koblingshus mellom bryter 30-U1-E og bryter 05-267-L i teknisk rom 53. Skiftet. Brent hull i kabelbru.
 - Kraftkabel negativ fase mellom bryter 30-U5-E og bryter 05-267 i teknisk rom 53 skadet av brann i nabokabel i Ski koblingshus. Skjøtet.
 - Sotet strømtang for midlertidig måling av strøm i kraftkabel positiv fase til bryter 30-U1-E i Ski koblingshus
- Ubekreftet tidspunkt:
 - Smeltet endeavslutning av kraftkabel positiv fase tilkoblet bryter 30-U1-E i Ski koblingshus mot teknisk rom 53 U1. Skiftet.
 - Skjøt i kraftkabel negativ fase mellom bryter 30-U5-E i Ski koblingshus og bryter 0266-L i teknisk rom 53 observert med varmgang. Skiftet.
- Kortslutninger 2022-12-15 til 23 i Blixtunnelen Ski-Oslo km 22,5:
 - Bæreline ved hengemast 022-05 for kontaktledning splintret 6 av 19 kordeller. Skal skjøtes.
 - Hengemast F-022-09 for kraftledning har merker etter mulig lysbue. Skal skiftes.
 - Isolator negativfase i hengemast F-022-09 for kraftledning sannsynlig overslag uten skade. Skal skiftes.
 - Betongtak i tunnel over F-022-09 har svimerker og avskalling sannsynligvis på grunn av strømgjennomgang. Nedfalt betongklump på et ca en kilo sannsynligvis på grunn av montasjeskade.

Oppdatert 2023-01-20 11.29 SD

Follobaneprojektet

Teknisk årsaksresonnement etter
stoppende feil
i strømforsyningen 19. og 23. desember

Side: 37 av 46
Dok.nr: UOS-00-A-91196
Rev: 00E
Dato: 06.02.2023

VEDLEGG 2 GROV TIDSLINJE

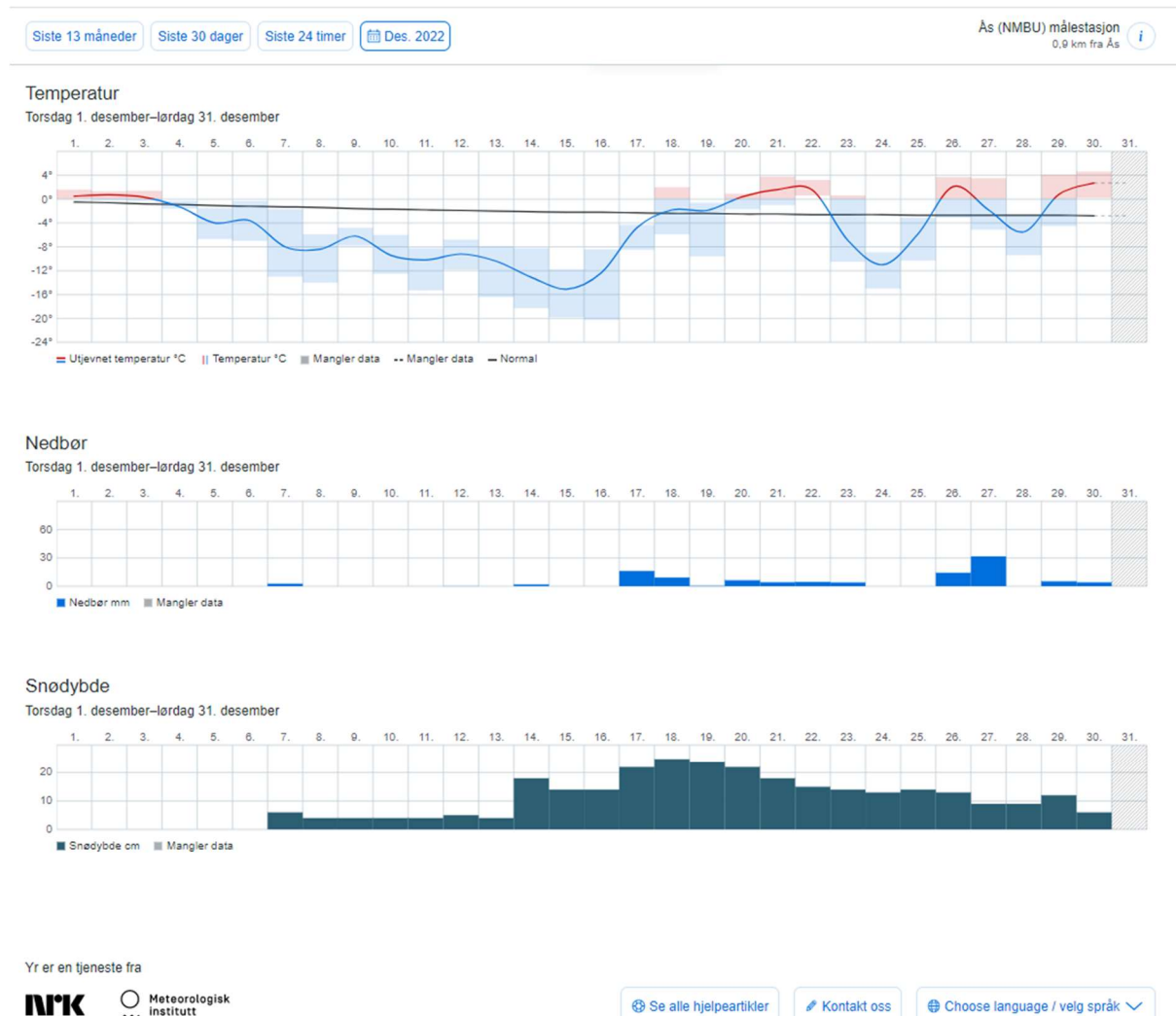
Tidspunkt	Type	Beskrivelse	Kommentar
2021-11-17	Tidligere hendelse	Varmgang i kabler SKI-30-U1/U5 pga overslag mellom utisolert skjerm og konstruksjonen til GIS-anlegget.	Synergi #638279 og #638380
2022-07-25?	Tidligere hendelse	Varmgang i kabler og smeltet endeavslutning i mast 23 på SKIO-30-U3 eller -U7.	Synergi?
2022-08-12	Tidligere hendelse	Kabelskjøt på SKI-30-U4 Kråkstad på Ski stasjon kortslutter, vern løser korrekt	Synergi #665948? Strømløst Ski-Kråkstad den 11/8
2022-08-18	Endringsforslag	Mottatt endringsforslag til TRV om å ikke tillate utjevning av skjerm til matekabel i begge ender pga. erfarte hendelser på Ski	Endringsforslag 3372
2022-10-27	Rapport	Som bygget rapport fra om utjevning av kabelskjerm i begge ender	UFB-30-A-65610_00D_001
2022-11-28	Rapport	Rapport fra indikerer høye strømmer i skjerm som er utjevnet i begge ender.	UOS-10-A-75401_01E
2022-11-27	Test	Testkjøring Blixtunnelen starter	
2022-12-03 11.24	Test	Måling av nesten 150 A i kabelskjerm	
2022-12-06 20.22	Test	Måling av strøm i kabelskjerm	
2022-12-08	Vernutløsning	Kun Pickup	
2022-12-09	Test	Testkjøring Blixtunnelen stopper	
2022-12-11 05.	Drift	Blixtunnelen driftssatt	
2022-12-15 02.25.35	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo GIK	Ikke kortslutning, men innkoblingsstrøm fra autotransformator
2022-12-16 05.56.09	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo GIK	
2022-12-16 09.24	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo GIK	
2022-12-17 21.38	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo GIK	
2022-12-18 13.33	Vernutløsning	Pickup vern tunneløp Ski-Oslo	
2022-12-19 06.32.54	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo. Bryterfeilvern aktivert.	Synergi #679911
2022-12-19 06.33.??	Brannalarm	Brannalarm i Ski koblingshus	
2022-12-19 06.33.08	Brannalarm	Brannalarm i teknisk rom 53	
2022-12-19 06.33.09	Vernutløsning	Automatisk gjeninnkobling direkte mot kortslutning	
		Feilsøking og identifiserer feil nær Ski.	
2022-12-19 07.25	Vernutløsning	Mulig overlast tunneløp Oslo-Ski	
		Identifiserte skader repareres	
	Test	Anlegget spenningssettes	
2022-12-23	Test	Testtog begynner kjøringen	
2022-12-23 16.36	Brannalarm	Brannalarm utløses Ski koblingshus	
2022-12-23 17.12	Brannalarm	Avstilles etter inspeksjon	

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	38 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

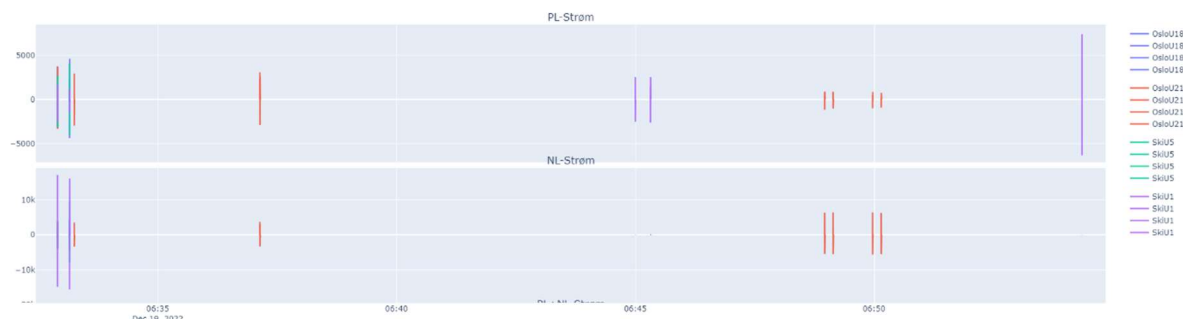
Tidspunkt	Type	Beskrivelse	Kommentar
2022-12-23 17.32.15	Brannalarm	Brannalarm utløses Ski koblingshus	
2022-12-23 17.32.19	Vernutløsning	Kortslutning tunneløp Ski-Oslo.	
2022-12-23 19.35.16	Brannalarm	Avstilles	
2022-12-28	Observasjon	Visuell kontroll av returkretsen mellom teknisk rom 53 og autotransformatorene i Ski koblingshus	Egen rapport finnes.
2022-12-30	Observasjon	Det oppdages splintret bæreline, kortsluttet isolator og nedfalt betongbiter i tunnelen matet av SKI-30-U1-E	
2023-01-02	Observasjon	Avdekker at kabelskjøt på kraftkabel mellom Ski koblingshus og sporet Oslo - Ski (U5) med varmgang	
2023-01-04	Observasjon	Det oppdages skadet endeavslutning på positivleder tilkoblet SKI-30-U1	
2023-01-11	Vernutløsning	Kortslutning på kabel på Ski stasjon matet fra SKI-15-U6.	Synergi #682224
2023-01-26	Observasjon	Det høres partielle utladninger i kraftkabler mellom Ski koblingshus og Østfoldbanen mot Oslo.	

VEDLEGG 3 VÆRFORHOLD

Ås (NMBU) målestasjon er ca. 8 km fra Blixtunnelens ende i Ski.



VEDLEGG 4 OVERSIKT OVER VERNUTLØSNINGER



Figur 19 Oversikt over kortslutninger 19. desember mellom kl 06.30 og 07.00 med tidspunkt og kortslutningsstrømmens toppverdi. Figuren viser utskrift fra kortslutningsvernenes feilskriverfiler.

Tidspunkt i desember 2023	Vern [Stasjon-spenningsnivå-avgang-vernfunksjon]	Kortslutnings-Strøm (pos./neg. fase) [A toppverdi]	Klarerings-tid (pos./neg. fase) [perioder]	Indikert avstand til feil [km]	Hendelse
15. 02.25.35	SKI-30-U1-I>	2500 / 2500	>8		Innkoblingsstrøm fra autotransformator
16. 05.56.09	SKI-30-U1-Z1<	2361 / 15970	1		Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
16. 05.56.09	OSLO-30-U21-I>>>	6800		22,7	Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
16. 09.24.26	SKI-30-U1-Z1<	2500 / 16200	1,5		Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
16. 09.24.26	OSLO-30-U21-I>>>	?	?	22,7	Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
17. 21.38.57	SKI-30-U1-Z1<	8000 / 14000	1,5		Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
17. 21.38.57	OSLO-30-U21-Z1<	?	?		Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
18. 13.33.42	(SKI-30-U1-?)	(250 / 750)	(1)		(Kun pickup)
18. 13.34.02	(SKI-30-U1-?)	(500 / 700)	(1)		(Kun pickup)
18. 13.35.21	(SKI-30-U1-?)	(800 / 800)	(1)		(Kun pickup)
18. 13.35.37	(SKI-30-U1-?)	(900 / 900)	(1)		(Kun pickup)
19. 06.32.54	SKI-30-U1-Z1<	2400 / 17020	1,5		Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
19. 06.32.54	OSLO-30-U21-Z2<	3422 / 3688	5	19,5	Kortslutning med automatisk gjenninnkobling
19. 06.32.54	SKI-30-U5-Z2<	2687 / 3290	1,5		Kortslutning FB2 med automatisk gjenninnkobling

Follobaneprosjektet

Teknisk årsaksresonnement etter
stoppende feil
i strømforsyningen 19. og 23. desember

Side: 41 av 46
Dok.nr: UOS-00-A-91196
Rev: 00E
Dato: 06.02.2023

Tidspunkt i desember 2023	Vern [Stasjon-spenningsnivå-avgang-vernfunksjon]	Kortslutnings-Strøm (pos./neg. fase) [A toppverdi]	Klarerings-tid (pos./neg. fase) [perioder]	Indikert avstand til feil [km]	Hendelse
19. 06.32.54	OSLO-30-U18-Z2<	3776 / 4014	1,5		Kortslutning FB2 med automatisk gjeninnkobling
19. 06.33.09	SKI-30-U1-BFV++	1700 / 15547	4		Automatisk gjeninnkobling mot kortslutning
19. 06.33.09	OSLO-30-U18-Z2<	4400 / 4200	5	22,5	Kortslutning med automatisk gjeninnkobling
19. 06.33.15	OSLO-30-U21-Z2<	2900 / 3500	5	19,5	Automatisk gjeninnkobling mot kortslutning
19. 06.37.08	OSLO-30-U21-I>	3000 / 3500	7		Kortslutning
19. 06.44.59	SKI-30-U1-Z1<	2543 / 5	5		Manuell innkobling mot kortslutning
19. 06.45.18	SKI-30-U1-Z1<	2527 / 5	5		Automatisk innkobling mot kortslutning
19. 06.48.57	OSLO-30-U21-Z2<	906 / 6260	5	19,5	Manuell innkobling mot kortslutning
19. 06.49.08	OSLO-30-U21-Z2<	868 / 6320	5	19,5	Automatisk innkobling mot kortslutning
19. 06.49.57	OSLO-30-U21-Z2<	830 / 6350	5	19,5	Manuell innkobling mot kortslutning
19. 06.50.08	OSLO-30-U21-Z2<	740 / 6200	5	19,5	Automatisk innkobling mot kortslutning
19. 06.54.20	SKI-30-U1-Z1<	7404 / 5	1		Manuell innkobling mot kortslutning?
19. 07.25.34	SKI-30-U5-I>>	962 / 967			Innkoblingsstrøm fra autotransformator i SKI
19. 07.25.34	OSLO-30-U18-?	1070 / 1028/			Innkoblingsstrøm fra autotransformator i SKI
23. 17.32.19	SKI-30-U1-Z1<	3350 / 18180	1,5		Kortslutning med automatisk gjeninnkobling
23. 17.32.19	OSLO-30-U21-Z2<	3670/ 3770	7	21,8	Kortslutning med automatisk gjeninnkobling
23. 17.32.39	OSLO-30-U21-Z2<	4003 / 5015	4,5	21,8	Automatisk innkobling mot kortslutning
23. 17.38.46	OSLO-30-U21-I>>>	6209 / 6806	0,5		Manuell innkobling mot kortslutning
23. 17.39.56	OSLO-30-U21-Z2<	3505 / 4330	5	22,4	

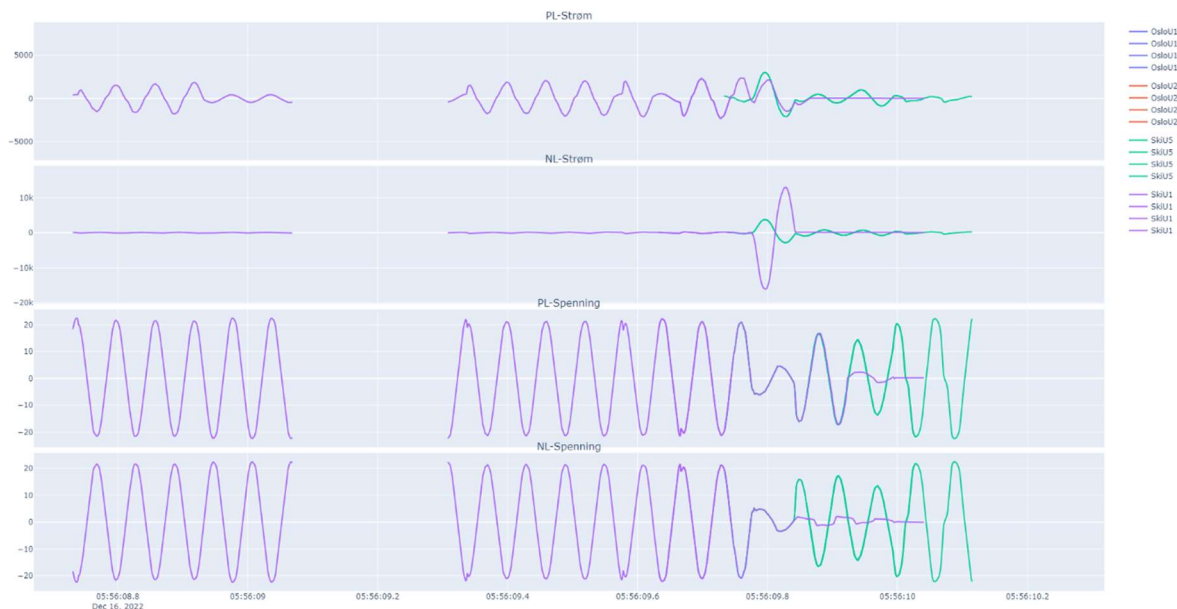
Follobaneprojektet

Teknisk årsaksresonnement etter
stoppende feil
i strømforsyningen 19. og 23. desemberSide: 42 av 46
Dok.nr: UOS-00-A-91196
Rev: 00E
Dato: 06.02.2023**VEDLEGG 5 OVERSIKT OVER TOG I TUNNELEN**

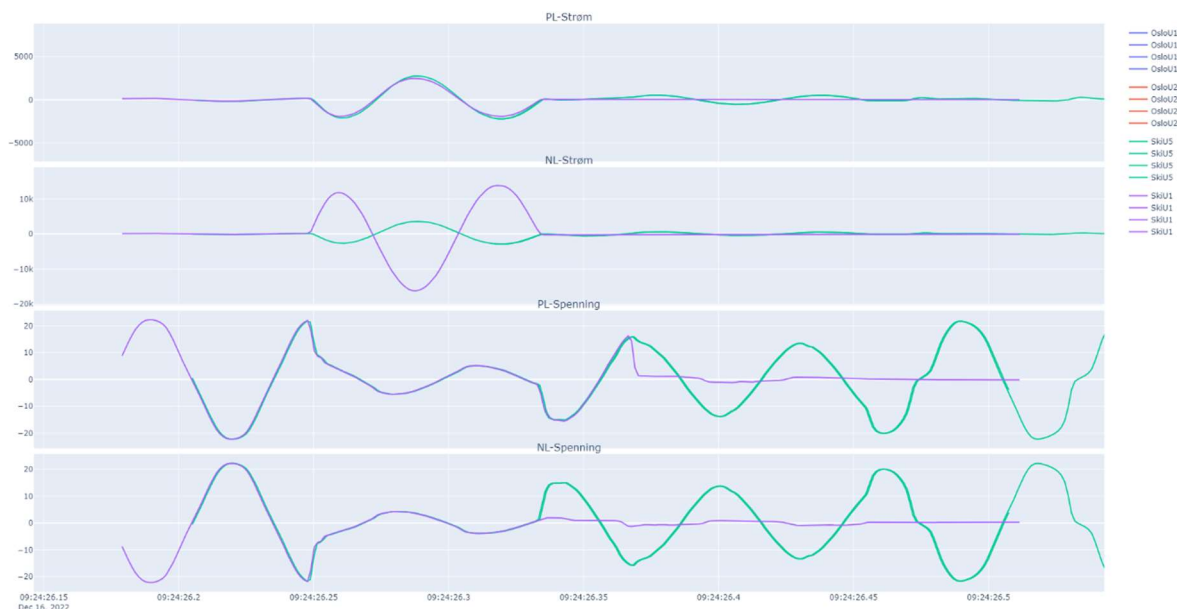
Tid for vernutløsning	Tog til stede	Omtrent km fra Oslo
(15/12 kl. 02:25)	(Ikke tog i tunnelen)	
16/12 kl. 05:56	1106 var på vei ut av Ski stasjon	22
16/12 kl. 09:24	1120 2822 var på vei ut av Oslo S	22 1
17/12 kl. 21:38	134	4
18/12 kl. 13:33	1136 118	3 19
19/12 kl. 06:33	1108 104	1 11
(19/12 kl. 07:25)	(Ikke tog i tunnelen)	
23/12 kl. 17:32	Testtog 8	18 (ref. lokfører)

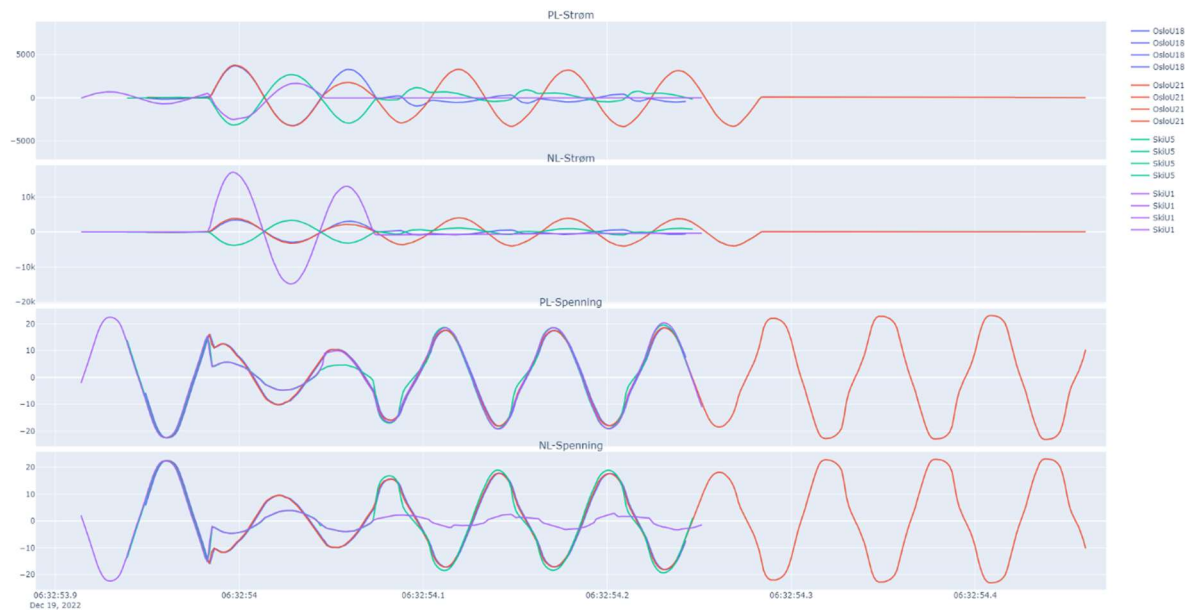
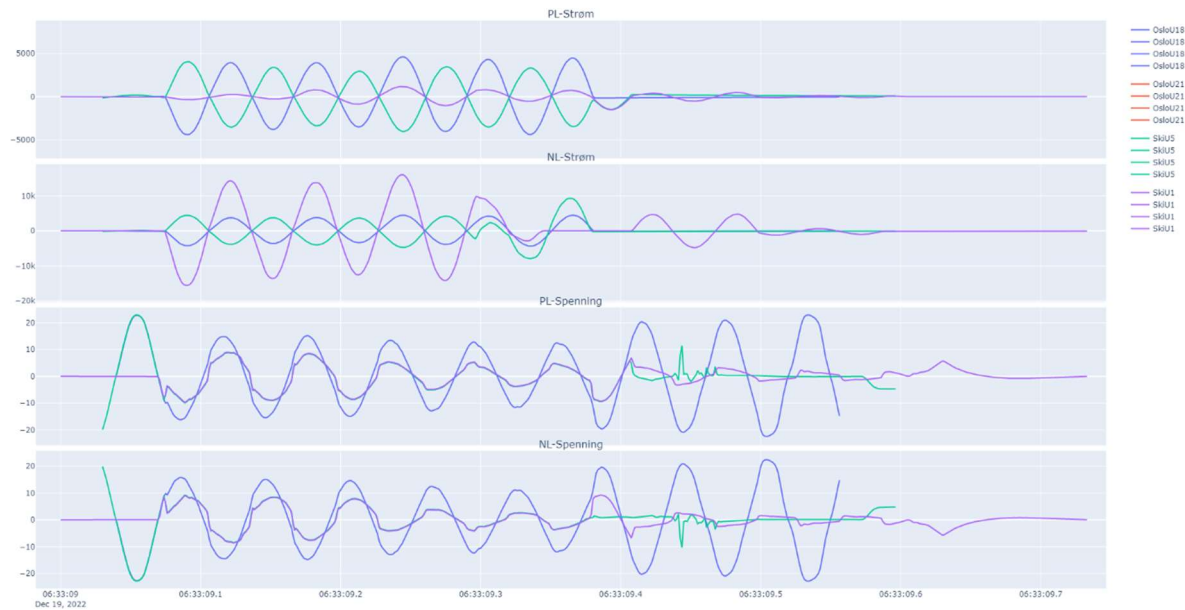
VEDLEGG 6 STRØM- OG SPENNINGSKURVER UTVALGTE KORTSLUTNINGER

2022-12-16 05.56.09 Feil som ble koblet ut og var borte ved automatisk gjeninnkobling
Feilskriverfil i Oslo koblingshus overskrevet.



2022-12-16 09.24.26 Feil som ble koblet ut og var borte ved automatisk gjeninnkobling
Feilskriverfil i Oslo koblingshus overskrevet.

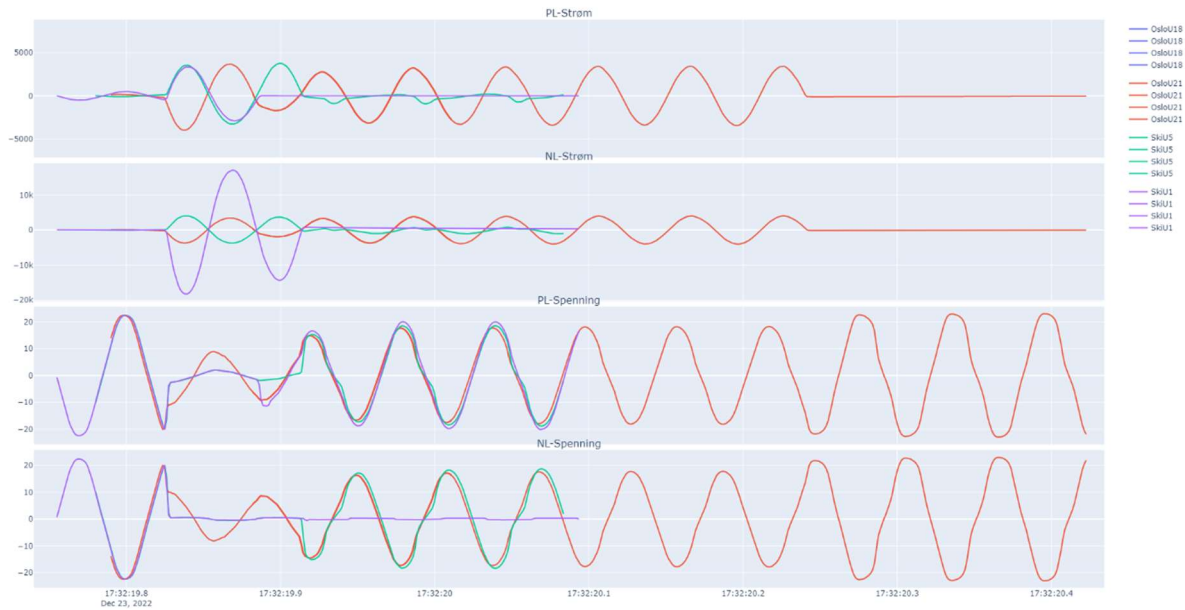


2022-12-19 06.32.54 Første kortslutning denne dagen**2022-12-19 06.33.09 Automatisk gjeninnkobling etter første kortslutning**

Strøm og spenning for OSLO-30-U21 er ikke vist ettersom bryteren på dette tidspunktet lå ute og først ble automatisk gjeninnkoblet senere.

Follobaneprojektet	Teknisk årsaksresonnement etter	Side:	46 av 46
	stoppende feil	Dok.nr:	UOS-00-A-91196
	i strømforsyningen 19. og 23. desember	Rev:	00E
		Dato:	06.02.2023

2022-12-23 17.32.20 Første kortslutning denne dagen



2022-12-23 17.32 Forbelastning før kortslutning

