SINTEF Energi AS
Postadresse:
Postboks 4761 Sluppen
7465 Trondheim

Sentralbord: 73597200
Telefaks: 73597250

energy.research@sintef.no
www.sintef.no/energi
Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Prosjektnotat

Feiltyper og feilmekanismer i skjerm-tilkoplinger

IPN - Pålitelige Skjermtilkoblinger i kabelanlegg.

VERSJON
1.0

DATO
2017-04-19

FORFATTERE
Hans Lavoll Halvorson, Harald Kulbotten, Jens Lervik, Jan Tore Benjaminsen

OPPDRAGSGIVER
REN AS

OPPDRAGSGIVERS REF.
Marius Engebrethsen

PROSJEKTNR
502001245

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:
48 + vedlegg

SAMMENDRAG
Dette prosjektnotatet er det første delresultatet i IPN prosjektet Pålitelige Skjermtilkoblinger i Kabelanlegg, og har til hensikt å danne grunnlag for det videre arbeidet i prosjektet ved å beskrive bakenforliggende og grunnleggende informasjon om problemstillingen.

Notatet beskriver typiske nettstrukturer og elektriske påkjenninger for kabelanlegg i Norge i kapittel 2 og 3. De mest vanlige kabeltypene og skjermtilkoblingsmetodene er beskrevet i kapittel 4 og 5. Videre tar notatet for seg flere eksempel på feiltyper og feilmekanismer i skjermtilkoblinger hentet fra hendelser i det norske kraftnettet i kapittel 6. I kapittel 7 er aktuelle normer og anbefalinger på dette temaet gjennomgått.

Prosjektet har hatt til hensikt å innhente flere hendelser enn de som er beskrevet i notatet, men har dessverre fått liten respons i fremstøt mot bransjen. Feiltypene og feilmekanismene som er beskrevet er dermed basert på saker fra SINTEF Energi sitt eget arkiv.

UTARBEIDET AV
Hans Lavoll Halvorson

SIGNATUR Hans L Halvorson

GODKJENT AV
Jan Tore Benjaminsen

SIGNATUR Jan T. Benjaminsen

PROSJEKTNOTAT NR
AN 16.14.75

GRADERING
Fortrolig

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2017-04-19	Første versjon

SINTEF

Innholdsfortegnelse

1 INNLEDNING 5

2 NETTSTRUKTUR 6

2.1 Struktur i kraftnettet 6

2.2 Feilstrømmer ved jordfeil 7

2.2.1 Feilstrømmen med isolert nøytralpunkt 7

2.2.2 Feilstrømmen ved spolejordet nøytralpunkt 7

2.2.3 Feilstrømmen ved direkte jordet nøytralpunkt 8

2.3 Feilstrømmer ved kortslutning mellom faseledere 8

3 INDUSERTE SKJERMSTRØMMER 9

3.1 Innledning 9

3.2 Skjermstrømmer i normal drift 9

3.2.1 Eksempler på induserte strømmer 9

3.3 Skjermstrømmer ved jordfeil og belastning på kabelskjerm 12

3.4 Skjermstrømmer ved kortslutning mellom faser 12

4 KABELDESIGN 14

4.1 Bakgrunn 14

4.2 Skjermen og laminatets hensikt 14

4.3 Definisjon av skjermkvadrat 14

4.4 Kabeltyper 16

4.4.1 TXSE/TXSP 16

4.4.2 TSLE 16

4.4.3 TSLF 16

4.5 Tilgjengelige kabeldesign 17

4.6 Fremtidige kabeldesign 17

5 METODER FOR SAMMENKOBLING AV AL-LAMINAT/KOBBERSKJERM I VANNTETTE PEX KABLER 18

5.1 Rullefjærer 18

5.2 Lodding 18

5.3 Kontaktblikk under laminat 19

5.4 Klemmeringer 19

6 EKSEMPLER PÅ FEIL 21

6.1 Feileksempel 1 21

6.1.1 Disseksjon av ikke havarert skjøt 21

6.1.2 Undersøkelser av kabel ... 24
6.1.3 Disseksjon av havarerte faser ... 24
6.1.4 Disseksjon av "riktig montert" skjøt ... 25
6.1.5 Diskusjon og konklusjon ... 25
6.2 Feileksempel 2 ... 27
6.2.1 Observerte kabelfeil ... 29
6.2.2 Beregnede strømmer i aluminiumslaminat og kobberskjerm ... 29
6.2.3 Konklusjoner ... 29
6.3 Feileksempel 3 ... 30
6.3.1 Vurderinger ... 31
6.4 Feileksempel 4 ... 32
6.4.1 Strømmer i laminat og kobberskjerm ... 32
6.4.2 Disseksjon ... 33
6.4.3 Sannsynlig feilforløp ... 36
6.4.4 Tiltak ... 37
6.5 Feileksempel 5 ... 37
6.5.1 Bilder ... 38
6.5.2 Målinger på anlegget ... 41
6.6 Feileksempel 6 ... 41
6.7 Oppsummering feil ... 41

7 Feilsøking ... 42
7.1 Visuell kontroll ... 42
7.2 Kappetest ... 42
7.3 Termografering ... 42
7.4 Beregninger og målinger av induserte strømmer og spenninger ... 42

8 AKTUELLE STANDARDER OG NORMER ... 43
8.1 CENELEC ... 44
8.2 IEC ... 44
8.3 Nasjonale anbefalinger ... 44
8.4 CIGRÉ ... 45
8.5 Testing av kontakt ... 45

9 LITTERATURREFERANSER ... 46

10 VEDLEGG A – ENSIDERS OPPSUMMERING TIL PROSJEKTMEDLEMMENE ... 48

1 INNLEDNING

I Norge er det utbredt med PEX kabelkonstruksjoner med aluminiumslaminat som vanntettende medium over skjermtrådene. Normal praksis er å jorde skjermen i begge endepunkter av kabelanlegget. Avhengig av belastning og forlegningsmetode induseres det strømmer i laminat og skjerm i størrelsesorden 5-35 % av lederstrømmen. Induserte strømmer er størst ved store ledertverrsnitt med høy elektrisk belastning på kabelanlegget[1-3].

Strømfordelingen mellom Cu-skjerm og Al-laminat er viktig. Ved beregninger og laboratoriemålinger er det vist at i ugunstige tilfeller kan strømfordelingen mellom Cu-skjerm og Al-laminat bli et problem. Spesielt gjelder dette for kabler med store ledertverrsnitt (>240 mm^2), flat forlegning og høy belastning.

Det er derfor svært viktig å sikre god elektrisk kontakt mellom laminat og skjermtråder i skjøter og endemuffer. Dersom det ikke er tilstrekkelig kontakt mellom laminat og skjerm i endepunktene eller i skjøtene, kan det ved tilfeldig kontakt mellom laminat og skjerm oppstå punktvis høy strøm, varmgang, akselerert aldring og havari. Kabel-klemmer som presser laminat og skjermtråder sammen kan skape tilfeldig elektrisk kontakt mellom lagene og være en årsak til varmgang. Det er avgjørende å velge en god metode med høy kvalitetsmessig utførelse for å unngå problemer[3-6].

Bakgrunnen for problemet ligger i det halvledende båndet som benyttes mellom Cu-skjerm og Al-laminatet. Uten skade i dette båndet vil strømmen i Al- laminatet øke etter hvert som man går lengre inn på kabelen. Hvis kabelen er lang, vil fordelingen av jordstrømmen i Cu-skjermen og Al-laminatet midt på kabelen være bestemt av den elektriske ledningsevnen i Cu-skjermen og Al- laminatet; ca. 1/3 av jordstrømmen i Al-laminatet og 2/3 i Cu-skjermen.

Ved feil i det separerende båndet, nær en diskontinuitet i Al-laminatet (endeavslutning, skjøt, annet brudd i Al-laminatet), vil disse ideelle forholdene ikke være tilfredsstilt. I verste fall kan feilen bli av en slik art at det oppstår en tilfeldig kontakt mellom Al-laminatet og én Cu-tråd. Dette går bra hvis belastningen er lav. I en høylast periode kan dette imidlertid gå veldig galt.

Det viser seg at kunnskap om problemstillingen med varmgang i laminattilkoblinger varierer i kraftbransjen. Noen er godt kjent med problemet siden de selv har opplevd havari, men det er generelt liten erfaringsutveksling.

Det finnes i dag heller ingen internasjonale eller norske normer eller standarder som stiller krav til testing av slike sammenkoblinger av Al-laminat og kobberskjerm. Det finnes noen nasjonale normer [7, 8], og CIGRE har utgitt en anbefaling [9].

Dette arbeidsnotatet beskriver typiske nettstrukturer og elektriske påkjenninger for kabelanlegg i Norge i kapittel 2 og 3. De mest vanlige kabeltypene og skjermtilkoblingsmetodene er beskrevet i kapittel 4 og 5. Videre tar notatet for seg flere eksempel på feiltyper og feilmekanismer i skjermtilkoblinger hentet fra hendelser i det norske kraftnettet i kapittel 6. I kapittel 7 er aktuelle normer og anbefalinger på dette temaet gjennomgått.

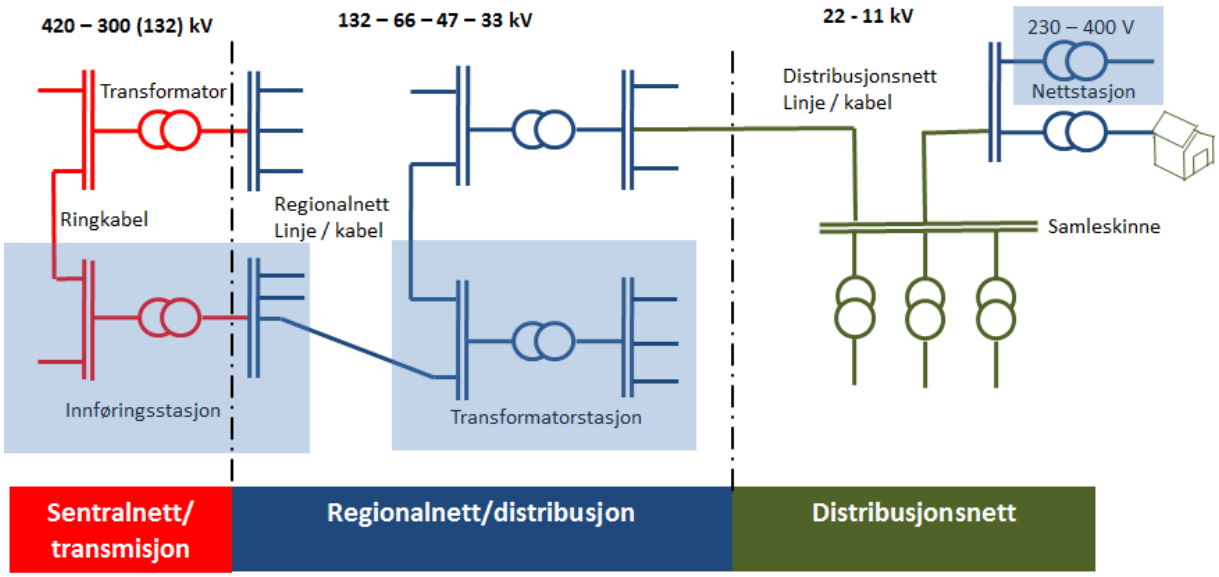
2 NETTSTRUKTUR

2.1 Struktur i kraftnettet

Det norske kraftsystemet er delt inn i flere ulike nivåer[10]. Tradisjonelt har det vært en trenivåinndeling i Norge; distribusjonsnettet, regionalnettet og sentralnettet. Sentralnettet representerer de høyeste spenningsnivåene (420 kV, 300 kV og noe 132 kV), regionalnettet mellomspenningene (33, 47, 66, 110 og 132 kV) og distribusjonsnettet (0.23 kV, 0.4 kV, 11 kV, 22 kV og noe 132 kV kabelanlegg i byer).

Større produksjonsanlegg knyttes til sentral- eller regionalnettet, mens mindre produksjonsanlegg tilknyttes regional- eller distribusjonsnettet. Tilsvarende kobles gjerne større kraftintensiv industri på sentral- eller regionalnettet. Noe næring knyttes direkte på regionalnettet, mens alminnelig forbruk til husholdning, tjenesteyting og industri vanligvis er tilknyttet distribusjonsnettet.

Kraftnettet består av radialer og masket nett. Et masket nett er anlegg med flere tilførselsmuligheter, mens radialer er enkeltstående linjer, som kobles til ett punkt i nettet. Radialer kan både være produksjonsradialer (linje fra et produksjonsanlegg til nettet) og forbruksradialer (linje fra et forbruksuttak til nettet). Hoveddelen av sentralnettet og deler av regionalnettet består av masket nett. Se også Figur 2.1.



Figur 2.1: Nettstruktur i Norge[10]

For distribusjonsnettet er det en økende andel av kabel, og der det i praksis brukes spolejordet nett (Petersen-spole). Alternativt er direkte-jordet eller isolert nullpunkt. Feilstrømmen[11, 12] vil være forskjellig for de ulike systemene:

- *Direkte jording:* Direkte jording av nullpunktet tvinger nullpunktet til å opprettholde sin posisjon, slik at spenningsøkning på de friske fasene ikke oppstår ved en enpolt jordfeil. Metoden fører imidlertid til store feilstrømmer. Lysbuen som oftest oppstår på feilstedet slukkes ved at man hurtig kobler ut linjen, for deretter raskt å koble den inn igjen (GIK).

- *Isolert nullpunkt:* I et nett med isolert nullpunkt vil feilstrømmene i hovedsak bestemmes av spenningsnivå og kapasitiv avledning fra nettet. Større utstrekning på nettet vil gi større kapasitiv

avledning, som gir mindre nullsystemimpedans, slik at feilstrømmene øker. Disse vil være mindre enn det som er tilfellet ved direkte jording, og det er større sjanse for at lysbuen slukker seg selv. Hvis ikke må feilen kobles fra på samme måte som ved direkte jordet nett. Ulempen er at man her har mindre kontroll med spenningene på de friske fasene, og kan ved lav lysbuemotstand nærme seg linjespenningen. På grunn av dette er ofte direktejordet nett brukt på de høyeste spenningsnivåene, mens isolert og spolejordet nett er brukt på lavere spenningsnivåer.

- *Spolejording:* Nøytralpunktet i transformatoren kan også jordes gjennom en induktans, eller en såkalt Petersenspole. Prinsippet går ut på å koble en spole i nullpunktet som skal kompensere for den kapasitive avledningen i nettet, slik at nullsystemimpedansen øker. Dette fører til at feilstrømmene blir enda mindre, og muligheten for selvslukking øker betraktelig. Petersenspolen kan reguleres enten trinnvis eller kontinuerlig. Dette blir gjort for å kunne regulere kompenseringen ved koblinger og andre endringer i nettet. Spolejording fører til at en større andel av de forbigående jordfeil kan håndteres uten driftsavbrudd.

2.2 Feilstrømmer ved jordfeil

2.2.1 Feilstrømmen med isolert nøytralpunkt

Når det oppstår jordfeil i et nett med isolert nøytralpunkt som system jord er det bare kapasitansene i nettet som representerer en tilbakevei for feilstrømmen, og vil være uavhengig av posisjonen. Det vil flyte en kapasitiv ladestrøm i feilstedet, som er et resultat av feilstrømmen i hele det galvanisk sammenhengende nettet.

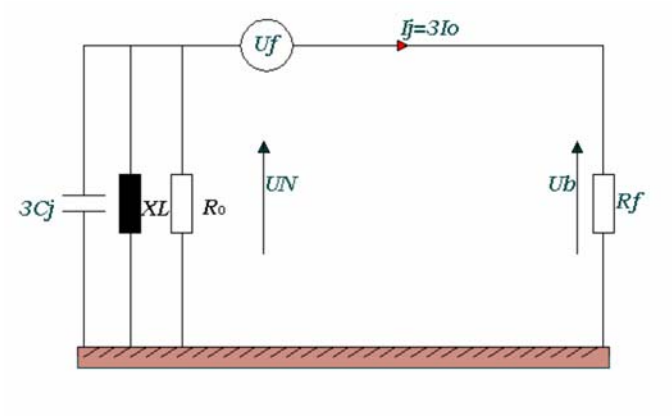
Et kabelnett karakteriseres ved store kapasitanser til jord. Som en rimelig verdi kan en sette driftskapasitansen, C, til 0,3µF/km for 22 kV kabelnett, med fasespenning, U_0 = 12,7 kV. Jordfeilstrømmen, I_j, for en 10 km lengde (l) kan finnes av:

$$I_j = 3 * U * \omega * C * l$$

Dette gir en feilstrøm på ca. 36 A. Sammenlignet med tilsvarende luftnett er dette ca. 60 ganger større.

2.2.2 Feilstrømmen ved spolejordet nøytralpunkt

Om man kobler en spole mellom jord og forsynings-transformatorens nøytralpunktpunkt, kan i teorien feilstrømmen reguleres til null. Når det oppstår en jordfeil i et nett med spolejordet nullpunkt vil tilbake veien for feilstrømmen gå gjennom transformatorens nullpunkt, se Figur 2.2.



Figur 2.2: Ekvivalent modell for nett med spolejordet nøytralpunkt. Ub er spenning over feilsted.

Nullstrømmen vil fordele seg utover radialen, og når spole drives i resonans er strømmen ideelt lik null i feilstedet (om vi ser bort ifra de ohmske bidragene fra nett og spole). Nullstrømmen på linjen er størst ved samleskinne og avtar til omtrent null på enden. Ved samleskinne er det ikke mulig å avdekke radial med feil, for på alle avganger har nullstrømmen samme størrelse og retning. Dette kan løses ved bruk av parallell resistans over spolen. Dette vil øke den ohmske strømkomponenten og dermed unngå resonans.

Jordfeilstrømmen, I_j, for en kabel med lengde l, fasespenning U, driftskapasitans C, og spolens induktans L kan finnes av:

$$I_j = 3 * U * (j\omega * C * l - j\frac{1}{3 * \omega * L})$$

og der spoleinduktans bestemmes ved (dvs. overkompensering):

$$\omega * C < \frac{1}{3 * \omega * L}$$

2.2.3 Feilstrømmen ved direkte jordet nøytralpunkt

Ved jordfeil i direkte jordet nett, vil feilstrømmen være avhengig av hvor feilen oppstår (størst feilstrøm ved transformator). Langt høyere feilstrømmer vil opptre sammenlignet med nett med isolert eller spolejordet nullpunkt, og 10-talls kA kan forekomme.

2.3 Feilstrømmer ved kortslutning mellom faseledere

Forholdene ved kortslutning mellom faser vil være ubetydelig påvirket av hvordan tilkobling av nullpunktet er utført. Lokasjon av feil vil ha stor betydning for strømnivå og vil være lavest lengst ute på radialen. Maksimale kortslutningsstrømmer kan være opptil 10-talls kA.

3 INDUSERTE SKJERMSTRØMMER

3.1 Innledning

Ett- eller topunkts jording av kabelskjerm vil medføre ulike påkjenninger på skjermer for enleder kabler i normal drift: Med ett-punkts jording vil det ikke induseres strømmer i skjermene, i motsetning til for to-punkts jording, der induserte strømmer i skjermen forårsakes av magnetfeltet fra strømmen i lederen (kapasitive ladestrømmer vil være betydelig lavere enn de induserte strømmene). Kabelskjermer skal normalt være tilkoblet jord i begge ender, for å unngå høye spenninger ved termineringspunkter. Dersom ett-punkts jording skal benyttes, skal det settes opp skilt med opplysning om dette ved den andre enden, og kabelskjermen må i den ujordede enden være avskjermet mot berøring[13]. Da må det utføres beregninger og tiltak for å ivareta tilstrekkelige betingelser for den isolerte enden. Eventuelt må installeres overspenningsbeskyttelse (avledere) i tilfelle dette er påkrevet.

3.2 Skjermstrømmer i normal drift

Nivå for de induserte strømmene ved topunkts jording av skjermen er svært avhengig av om kabler er lagt i trekant eller flat forlegning. Typiske verdier er:

- For trekant forlegning induserte skjermstrømmer ca. 10% av forsyningsstrøm for skjermtverrsnitt på 21 mm^2.
- I flat forlegning blir de induserte strømmene ca. 25% i skjermen (med en kabeldiameters lysåpning), med et ekvivalent Cu-tverrsnitt på 21 mm^2 for skjermen.
- Generelt kan sies at indusert skjermstrøm er proporsjonal med skjermtverrsnitt opp til 100 mm^2.

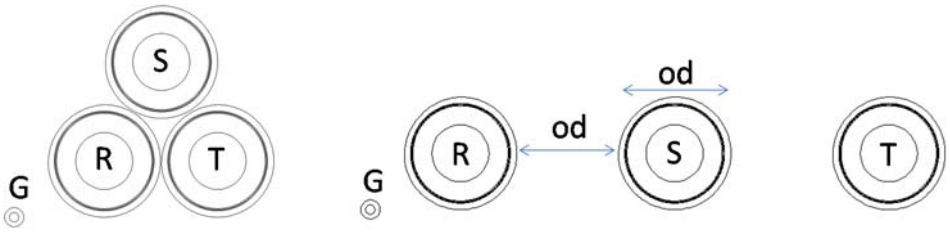
For kabler med laminat og trådskjerm vil den induserte strømmen fordele seg, bestemt av ledningsevnen for de enkelte skjermene. Det vil si at dersom laminatet utgjør 40% av den totale ledningsevnen og 60% i trådskjermen, vil den induserte strømmen fordele seg tilsvarende. Dette innebærer at ved skjøter og termineringer der laminatet avsluttes, må de 40% av laminat-strømmen videreføres i trådskjermen. Dette betyr at trådskjerm-tverrsnittet bør økes på disse stedene for å sikre god nok strømføringsevne[14].

3.2.1 Eksempler på induserte strømmer

I det følgende er det vist hvordan skjermstrømmer varierer med konfigurasjon av forlegning. I disse beregningene er det benyttet to enleder kabel-typer:

- TSLF 11 kV, 400 mm^2 Al-leder
- TSLF 66 kV, 1000 mm^2 Al-leder

Begge kabeltypene har et 0,2 mm aluminiumslaminat over kopperskjermen (trådskjerm) med en tynn folie mellom skjermene. Kopperskjermens tverrsnitt for 11 kV-kabel er 35 mm^2 og 50 mm^2 for 66 kV-kabelen, mens al-laminatets tverrsnitt er henholdsvis 27 og 45 mm^2. Beregninger er utført på både flat og trekant-forlegning, se Figur 3.1. Kablene er lagt ved 1 m nedgravingsdybde. Like ved kablene er det lagt en isolert jordleder med 50 mm^2 Cu-tverrsnitt for begge kabelforlegningene, i en avstand av 3 cm til nærmeste kabel.



Figur 3.1: Kabelforlegningene i flat og trekant-formasjon. G er isolert jordleder. Avstand mellom kablene i flat forlegning er lik kabelens ytre diameter.

Resultatene fra beregningene er vist i **Feil! Fant ikke referansekilden.** for 11kV-forlegningen, og i Tabell 3.2 for
66 kV-forlegningen. De induserte skjermstrømmene i tett trekant blir nært symmetriske (separat jordleder har ubetydelig innflytelse for strømfordelingen). I flat forlegning vil induserte strømmer i skjermene være forskjellige, med maksimum- og minimumsverdier være på de ytre fasene, med midtfasens skjermstrøm på ca. gjennomsnittlig verdi. Generelt er de induserte strømmene betydelig større i flat forlegning enn i tett trekant. Dette gjelder dermed også den totale varmeutviklingen.

Tabell 3.1: Resultater fra beregninger på 11 kV forlegning i flat og trekant formasjon, se Figur 3.1. Laststrøm på 400 A. Separat jordleder 50 mm^2

Forlegning med 11 kV kabel, 400 mm^2	**Tett trekant**	**Flat**
Totale tap (jordet skjerm) [W/m]	49	60
Totale tap (åpen skjerm) [W/m]	44	42
Indusert strøm i trådskjerm [% av lederstrøm]	9	16 - 22
Indusert strøm i al-laminat [% av lederstrøm]	4	7 - 10
Indusert strøm i jordleder [% av lederstrøm]	7	18
Indusert spenning (åpen skjerm), [V/km]	23	40 - 52

Tabell 3.2: Resultater fra beregninger på 66 kV forlegning i flat og trekant-formasjon, se Figur 3.1. Laststrøm på 600 A. Separat jordleder 50 mm^2.

Forlegning med 66 kV kabel, 1000 mm^2	**Tett trekant**	**Flat**
Totale tap (jordet skjerm) [W/m]	60	85
Totale tap (åpen skjerm) [W/m]	49	41
Indusert strøm i trådskjerm [% av lederstrøm]	13	19 – 27
Indusert strøm i al-laminat [% av lederstrøm]	6	10 – 14
Indusert strøm i jordleder [% av lederstrøm]	7	13
Indusert spenning (åpen skjerm) [V/km]	31	55 – 72

Forhold ved åpen skjerm

Som det fremgår av tabellene, er indusert spenning vesentlig lavere ved tett trekant enn for flat forlegning. For tett trekant er spenningen godt under 50 V/km for begge kabeltypene, mens det ved flat forlegning vil kunne oppstå spenninger over 50 V/km. Den induserte spenningen vil være uavhengig av skjermtverrsnittet.

Skjermtverrsnittets betydning for indusert strøm

Den induserte skjermstrømmen er tilnærmet proporsjonal med skjermtverrsnittet når dette er mindre enn 100 mm^2. Det vil si at ved lavere skjermtverrsnitt vil varmeutviklingen i skjermen også reduseres. Beregningene viser også at fordeling av den induserte strømmen mellom laminatet og koppertrådskjermen er bestemt av det relative forholdet mellom ledningsevnen for hver av disse og den totale ledningsevnen for parallell-koblingen mellom laminat og trådskjerm. Dersom forholdet i ledningsevne mellom laminat og trådskjerm er 1:2, vil ca. 33% av indusert strøm gå i laminatet og 67% i trådskjermen.

Ved en halvering av skjermtverrsnittet (for både laminat og trådskjerm) for 66 kV-kablene i flat forlegning, vil strømmen i skjermen bli redusert fra 19% (se Tabell 3.2) til ca. 10%. Ved en ytterligere reduksjon på 50% av skjermtverrsnittet, blir skjermstrømmen redusert fra 10% til 5%. Det må kontrolleres at skjermtverrsnittet er tilstrekkelig for at kabelen tåler de termiske påkjenningene ved en eventuell kortslutning/feil.

Strømovergang mellom laminat og trådskjerm

Når trådskjerm og laminat er sammenkoplet overalt hvor det foretas koplinger av skjermen ved endene og forbikoblinger over skjøter etc., vil det i en eventuell tilfeldig kontakt mellom laminat og trådskjermen utenom sammenkoplingene overføres en ubetydelig del av strømmen som går over i trådskjermen. I spesielle tilfeller hvor det f.eks. er kraftig press på kabelen som under klammer, kan trådskjermen på noen plasser komme i direkte kontakt med laminatet. En del av strømmen i laminatet kan da gå over i trådskjermen og medføre risiko for overtemperatur. Denne problemstillingen bør derfor undersøkes nærmere i prosjektet.

Kabelkonstruksjonen har vanligvis en båndering (slått tett eller åpen) mellom kopperskjerm og laminat. Det er tidligere utført målinger på slike kabelkonstruksjoner. Disse målingene viste at bånderingen har en viss ledningsevne, og induserte strømmer kan dermed overføres via bånderingen[3, 15]. Ut fra beregninger med målte verdier på resistiviteten for "bånderingslaget", er det funnet at strømovergangslengden kan variere fra noen titalls meter opp til km. I dette tilfellet (uten sammenkobling mellom trådskjerm og laminat) vil den induserte strømmen i laminatet være avhengig av lengden mellom termineringene. Det vil si at den induserte strømmen som går i laminatet, kan bli nært opptil verdien som når laminatet er sammenkoblet med trådskjermen, forutsatt at avstanden mellom termineringene er minst det dobbelte av strømovergangslengden. Dersom det f.eks. oppstår en direkte kontakt mellom tråder i kopperskjerm og laminatet (pga. hull, skader i bånderingen), kan hele den induserte strømmen gå via et fåtall koppertråder og føre til høy varmeutvikling og havari. Dette kan oppstå på flere steder (spesielt overgangssonene er utsatt) og er observert på kabelføringer som har fått feil og gjennomslag.
Tidligere utførte målinger på overgangsmotstanden mellom laminat og trådskjerm på to fabrikater med heldekkende båndering viste overgangslengder på 100 - 300 m[3, 15].

Brudd i jordleder

Eventuelt brudd i jordleder vil gi marginal påvirkning på skjermstrømmene, men de induserte skjermstrømmene vil øke noe (og størst økning i kabel nærmest jordleder). Imidlertid vil den induserte spenningen ved bruddstedet i jordlederen måtte vurderes. For 66 kV-kablene i flat forlegning blir den induserte spenningen ca. 8 V/km, dvs. litt under 10% av verdien for den induserte spenningen i skjermene. Den induserte spenningen i jordleder reduseres med økende avstand til kablene.

Effekt av revolvering av kabel eller skjermer

Dersom det utføres revolvering av hele kabelen, vil dette ikke utligne de induserte strømmene i skjermene. Både for tett trekant og flat forlegning vil de induserte strømmene bli like store og omtrent midlere verdi av de angitte strømverdiene i Tabell 3.1 og Tabell 3.2. For å oppnå ingen indusert skjermstrøm, må det foretas en revolvering av skjermene på minst to steder langs forlegningen (dvs. ved 1/3 og 2/3 av total lengde). Dette utføres ved å lage brudd i skjermene (laminat og trådskjerm) på disse stedene. På første bruddsted kobles R-fasens skjerm til S-fasens skjerm, S-fasens skjerm til T-fasens skjerm, og T-fasens skjerm til R-fasens skjerm for neste seksjon. Ved neste bruddsted for skjermene utføres tilsvarende kobling av skjermene.

Ved å utføre krysskobling av kabelskjermene kan transiente forhold (f.eks. lyn) føre til overspenninger. Det kan derfor være nødvendig å installere avledere i disse krysskoblings-punktene. Transiente analyser bør utføres hvis det er aktuelt å utføre krysskoblinger.

3.3 Skjermstrømmer ved jordfeil og belastning på kabelskjerm

Jordfeil kan f.eks. skje ved gjennomslag leder-skjerm på grunn av feil i kabelisolasjonen eller ved direkte jordslutning faseleder-jord i termineringer. Når det oppstår jordfeil i et nett med isolert nøytralpunkt som systemjord, er det bare kapasitansene i nettet som representerer en tilbakevei for feilstrømmen og vil være uavhengig av posisjonen, se kapittel 2.2.1. Denne feilstrømmen vil addere seg vektorielt til de induserte skjermstrømmene (beregnet ut fra belastningsstrømmene). Dermed kan feilstrømmene føre til større belastning på tilkoblinger av skjermene.

Tilfellet i Tabell 3.1 viser at skjermstrømmene kan bli fra 50 til 130 A, avhengig av forlegningsmåte. Feilstrømmen vil gi forskjellig påvirkning på de induserte strømmene langs kablene. Feilstrømmen vil øke med lengden av forlegningen. Som vist i kapittel 2.2.1, er feilstrøm 36 A hvis lengden er 10 km, dvs. 3,6 A/km. Dermed vil feilstrømmene ha liten betydning for belastning på skjermene og skjermtilkoblingene for kabellengder under 2 km.

For nett med spolejordet nullpunkt vil feilstrømmene vanligvis bare bli noen få ampere og dermed ha liten betydning for belastning på skjermene og skjermtilkoblingene. Dermed vil de induserte skjermstrømmene bli avgjørende for belastning på skjermene og skjerm-tilkoblingene.

3.4 Skjermstrømmer ved kortslutning mellom faser

Ved trefase kortslutning vil kortslutningsstrømmene kunne bli flere titalls kA. De induserte skjermstrømmene er proporsjonale med kortslutningsstrømmene, se verdier gitt i Tabell 3.1 og Tabell 3.2 for de to valgte eksemplene. Er kortslutningsstrømmen 40 kA, kan de induserte skjermstrømmene bli hhv. ca. 5 og 12 kA for trekant og flat forlegning ved 11 kV-kabel-føring. For 66 kV-kabelføringen blir verdiene hhv ca. 8 og 16 kA.
For kortslutning mellom to faser vil det bli tilsvarende induserte strømmer i skjermene som ved trefase kortslutning på de to fasene som fører kortslutningsstrømmen, mens den induserte strømmen i skjermen til den feilfrie fasen vil være betydelig mindre.

De høye induserte skjermstrømmene som kan oppstå ved kortslutning, må det tas hensyn til ved dimensjonering av skjermer og skjermtilkoblinger. Dette bør også tas med i prosedyrer for testing av skjermtilkoblinger. Ved innstilling av vern bør disse forholdene også tas hensyn til, da skjermene kan bli en dimensjonerende faktor.

Indusert spenning ved åpne skjermer er også et viktig aspekt å ta hensyn til, som vist i beregningene ovenfor. For tett trekant er spenningen godt under 50 V/km for begge kabeltypene vist i eksemplene, mens det ved flat forlegning vil spenningen kunne bli over 50 V/km (ved normale driftsforhold). Ettersom indusert spenning er

proporsjonal med fasestrømmen, vil 50 V/km ved normal drift tilsvare ca. 3 kV/km for en kortslutningsstrøm på 40 kA. Bruk av avledere vil derfor kunne være nødvendig ved åpne skjermer.

4 KABELDESIGN

4.1 Bakgrunn

Den historiske utviklingen av 12/24 kV kabel for kraftdistribusjon i Norge har gått fra papirisolert massekabel (før 1980), via den første generasjon PEX-isolert kabel, TXSE (fra 1970 til 1990), deretter den aksielt og radielt vanntette konstruksjonen TSLE (fram til 2004) og til dagens TSLF som i tillegg har halvledende ytterkappesjikt for kappetesting.

TXSE har fullverdig kobberskjerm (uten laminat) og slipper problemstilling rundt fordeling av skjermstrømmer i forbindelse med endeavslutninger og skjøter. Dette designet ble utdatert på slutten av 90-tallet på grunn av krav til radiell og aksiell vanntetting. TSLE og TSLF har nesten helt identiske design, de skilles kun av at TSLF har et ytre halvledende sjikt i ytterkappen som muliggjør kappetesting. Det halvledende PE-sjiktet har noe lavere termisk resistivitet enn isolerende PE, noe som gir dette designet marginalt bedre termiske egenskaper enn TXSE og TSLE (lik total kappetykkelse).

4.2 Skjermen og laminatets hensikt

Krav til både radiell og aksiell vanntetting medfører en utfordring når det gjelder dimensjonering og håndtering av kabelens skjerm. Skjermen består dels av snodde kobbertråder over isolasjons-skjermen, dels av et heldekkende aluminiumslaminat under ytterkappen. Skjermens oppgaver er flere; den skal definere det elektriske feltet over isolasjonen, den skal drenere kabelens ladestrømmer og den skal sikre returvei for eventuelle feilstrømmer ved kortslutning (forhindre berøringsfare). Strømbelastningen på skjermen avhenger av hvordan den er koblet. Dersom skjermen er jordet bare i den ene enden vil man unngå induserte skjermstrømmer i normal drift, men få større indusert spenning på skjermen i ujordet ende (mulig berøringsfare). Ved kabelfeil vil hele feilstrømmen måtte følge skjermen til jordet ende, hvilket medfører fare for overbelastning og utskifting av hele kabellengden. Dette kan unngås med å legge en parallell bar jordleder sammen med distribusjonskabelen. Dersom skjermen er jordet i begge ender vil man få sirkulerende skjermstrømmer i normal drift (hvilket reduserer kabelens belastningsevne), men redusere indusert spenning (som vil være størst midt mellom skjermjordingene). Ved feil vil feilstrømmen dele seg mot hver ende av kabelen og dermed redusere belastningen på skjermen. En annen utfordring er fordeling av skjermstrøm mellom kobbertråder og aluminiumslaminat i forbindelse med kabelterminering og skjøter.

Den aksielle vanntettingen (svellebåndet) mellom skjermtrådene og aluminiumslaminatet er snodd med åpen fuge for å sikre jevnlig kontakt mellom tråder og laminat. Tidlige design av TSLE (før ca. 1996) hadde heldekkende, halvledende svellebånd mellom skjermtrådet og laminat. Dette designet har en potensiell fare for overbelastning på enkelt- skjermtråder ved tilfeldig kontakt mellom tråd og laminat nær ender og skjøter. Generelt for TSLE/TSLF er det ved endeavslutninger og skjøter viktig at laminatet er tilstrekkelig jordet eller sammenkoblet med skjermtrådene, ellers vil skjermtrådene lett kunne bli overbelastet (både i normal drift ved jording av skjerm i begge ender og ved feiltilfeller). Utstyr og prosedyrer for terminering og skjøter er derfor essensielt for å ivareta kabelens sikkerhet. Skjermens dimensjonering, jording og håndtering har derfor stor betydning for belastningsevnen.

4.3 Definisjon av skjermkvadrat

For kabel bygget etter CENELEC HD620[16] og vedlegg K (Norge) skal skjermkvadratet designes etter minimumskrav (skjerm-kvadrat og skjerm-resistans) som vist i Tabell 4.1 og Tabell 4.2. Dersom det er elektrisk kontakt mellom skjermtråder og metallisk laminat, kan laminatets konduktans medregnes som en del av skjermens konduktans. Dette betyr at kabel-leverandøren har en viss frihet ved utførelse av kabelskjermen. Kabel kjøper må være observant på dette ved lesing av kabelens datablad.

Tabell 4.1: Minimumskrav skjermkvadrat etter CENELEC HD620, vedlegg K[16].

Conductor cross-section mm²	Metal screen – minimum cross-section mm²		
	12 kV	24 kV	36 kV
25	16	16	-
35	16	16	-
50	16	16	25
70	16	16	25
95	25	25	25
120	25	25	35
150	25	25	35
185	35	35	35
240	35	35	35
300	35	35	35
400	35	35	35
500	35	35	35
630	35	50	50

Tabell 4.2: Minimumskrav skjermresistans etter CENELEC HD620, vedlegg K[16].

Area of screen mm²	Resistance of screen @ 20 °C maximum Ω/km
16	1,15
25	0,727
35	0,524
50	0,387

4.4 Kabeltyper

4.4.1 TXSE/TXSP

Figur 4.1: TXSE/TXSP

Kabelen er trippelekstrudert med PEX-isolasjon og halvledende leder- og isolasjonsskjerm. Det er langsgående vanntetting kun på ledernivå. Kabelen har ingen diffusjonssperre. Ytre kappe er PE (TXSE) eller PVC (TXSP).

Nexans Norge: standard design mellom ca. 1970 og 1990.

4.4.2 TSLE

Figur 4.2: TSLE

Kabelen er trippelekstrudert med PEX-isolasjon og halvledende leder- og isolasjonsskjerm. Den har langsgående vanntetting med svellebånd med åpen fuge for å gi kontakt mellom skjermtråder og laminat (samt på ledernivå). Kabelen har diffusjonssperre i form av langsgående aluminiumslaminat med limt overlapp. Ytre kappe er PE (isolerende).

Nexans Norge: standard design mellom ca. 1990 og 2004. Lukket svellebånd før 1996.

4.4.3 TSLF

Figur 4.3: TSLF

Kabelen er trippelekstrudert med PEX-isolasjon og halvledende leder- og isolasjonsskjerm. Langsgående vanntetting består av svellebånd med åpen fuge for å gi kontakt mellom skjermtråder og laminat. Kabelen har diffusjonssperre i form av langsgående aluminiumslaminat med limt overlapp. Ytre kappe består av to-sjikt PE med indre sjikt isolerende (hvit) og ytre sjikt halvledende (sort) for kappetesting (muliggjør testing om ytterkappen er uskadet etter utlegging).

Nexans Norge: standard design siden 2004.

4.5 Tilgjengelige kabeldesign

Historisk sett har det vært få kabel-leverandører til det norske markedet. I nyere tid er det flere leverandører som kan levere mellomspent kabel til norske nettselskap, enten direkte eller gjennom grossist. Dette setter større krav til tekniske spesifikasjoner av produktet som ønskes kjøpt. Det er verdt å merke seg at kabel som er spesifisert etter HD620, også må få spesifisert hvilket land da standarden dekker 10 land som alle har en nasjonal variasjon i spesifikasjonen. Det norske vedlegget for HD620 er vedlegg K.

Eksempel på internasjonale leverandører av kabel er:

- Nexans
- Prysmian – Draka Norsk Kabel
- Prysmian Finland
- Prysmian – Draka Kabel Sverige
- NKT (Falun)
- NKT (Danmark/Tyskland)
- ABB HVC (NKT fra 2017?)
- General Cable
- Telefonika
- Fulgor (Hellenic)
- Cabelte (Portugal)
- HES Kablo (Tyrkia)

4.6 Fremtidige kabeldesign

[Kapittel er ikke skrevet enda]

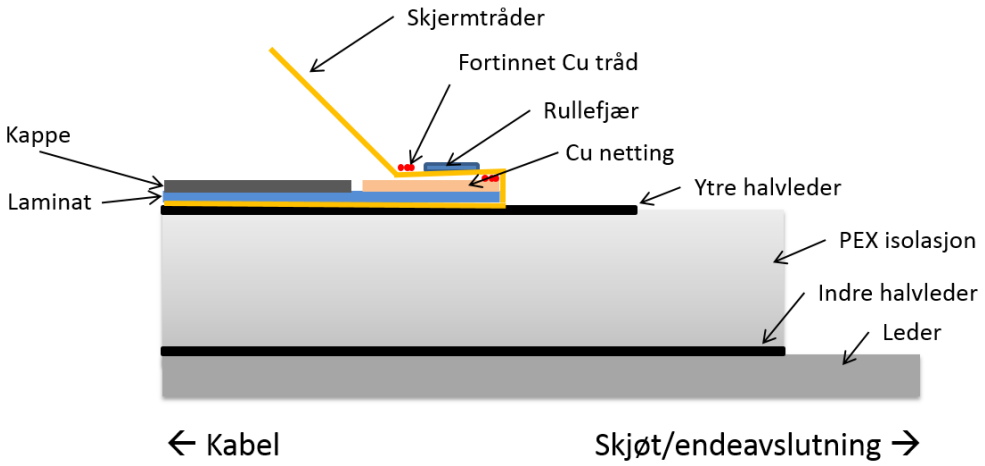
5 METODER FOR SAMMENKOBLING AV AL-LAMINAT/KOBBERSKJERM I VANNTETTE PEX KABLER

SINTEF Energi har igjennom flere prosjekter og disseksjoner fra drift opparbeidet erfaring med varmgang og havari grunnet dårlig kontakt mellom laminat og skjermtråder; se bl.a. [3, 5, 6, 17]. Ulike metoder for å koble sammen laminat og skjermtråder er benyttet fra de ulike leverandørene av kabler, skjøter og endemuffer. De mest vanlige metodene er[18]:

- Rullefjærer
- Lodding
- Kontaktblikk
- Klemmeringer

5.1 Rullefjærer

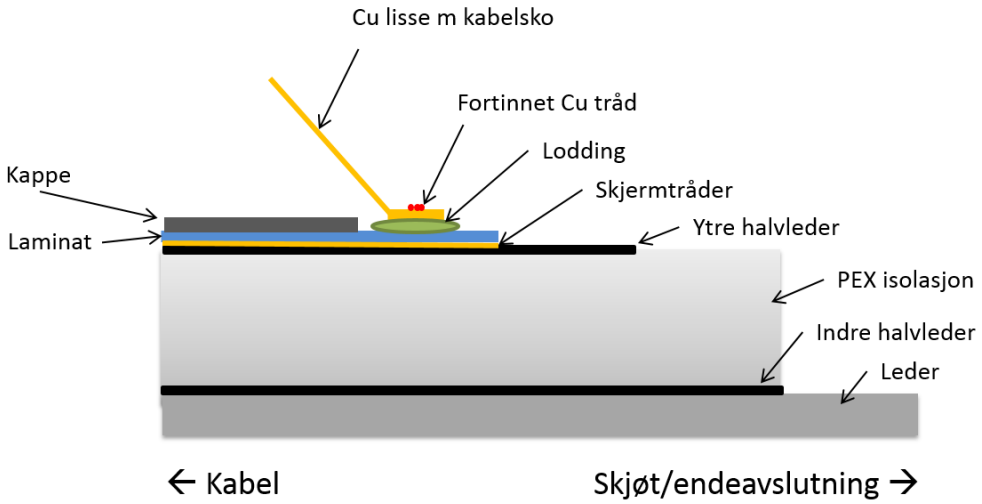
Laminatet avdekkes forsiktig ved hjelp av varme og vaskes og klargjøres. En Cu-netting eller kontaktblikk legges på oversiden av laminatet og surres fast med fortinnet Cu-tråd eller lignende. Skjermtrådene brettes så tilbake over nettingen/kontaktblikket. En eller flere rullefjærer/fjærklemmer legges over nettingen/ kontaktblikket for å holde konstant press inn mot laminatet. Skjermtrådene føres ut av skjøten/endemuffen.



Figur 5.1: Skisse for tilkobling på laminat ved hjelp av rullefjærer.

5.2 Lodding

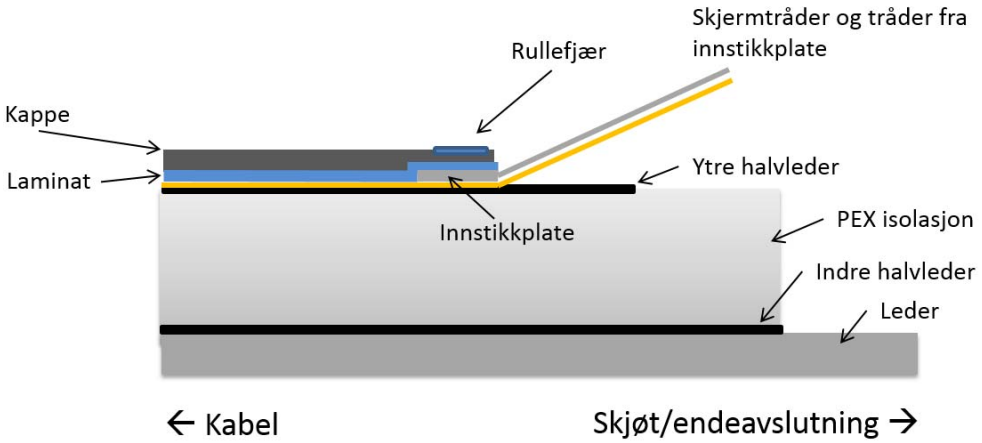
Laminatet avdekkes forsiktig ved hjelp av varme og vaskes og klargjøres før lodding. Alle rester av PE-kappen og lim som finnes mellom PE-kappen og Al-laminatet, må fjernes. En Cu-lisse surres fast til laminatet ved hjelp av fortinnet Cu-tråd eller lignende, før kontakten gjøres permanent ved hjelp av lodding. Det kreves høy presisjon og bruk av fluss-syre for å få god heft mellom lodding og laminat. Man må unngå å skade kabelhalvlederen under laminatet med for høy varme. Cu-lissen kobles sammen med skjermtrådene ved hjelp av press-hylse eller lignende.



Figur 5.2: Skisse for tilkobling på laminat ved hjelp av lodding.

5.3 Kontaktblikk under laminat

Laminat og PE-kappe snittes til flere rektangulære segment langs kabelens omkrets og løftes forsiktig opp fra skjermtrådene. Innstikk-blikk legges mellom laminat og skjermtråder med piggene ut mot laminatet. Deretter klemmes segmentene mot blikkene slik at piggene perforerer laminatet. Ved hjelp av fjærklemmer, teip og krympeslanger holdes den elektriske kontakten permanent. Skjermtrådene kobles mot kontaktblikkenes tråder ved hjelp av en press-hylse eller lignende utenfor skjøten/endemuffen.

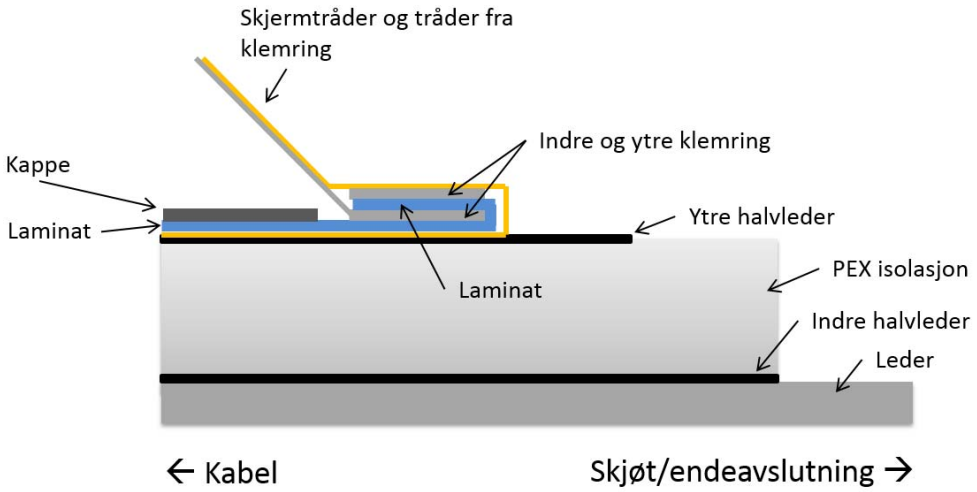


Figur 5.3: Skisse for tilkobling på laminat ved hjelp av kontaktblikk.

5.4 Klemmeringer

Laminatet avdekkes forsiktig ved hjelp av varme. Deretter må laminatet vaskes og klargjøres før snitting i rektangulære segment langs hele omkretsen. Segmentene brettes tilbake og legges over en metallring som er parkert nedenfor. En ny ring plasseres over laminatet og klemmer dermed laminatet mellom de to metallringene. Den ene metallringen er utstyrt med lange lisser. Disse lissene føres ut av skjøten/muffen

sammen med skjermtrådene. Skjermtrådene kobles mot metallringens tråder ved hjelp av en press-hylse eller lignende utenfor skjøten/endemuffen.



Figur 5.4: Skisse for tilkobling på laminat ved hjelp av klemmeringer.

6 EKSEMPLER PÅ FEIL

SINTEF utførte i 2016 en spørreundersøkelse blant partnere i prosjektet Pålitelige Skjermtilkoblinger i kabelanlegg for å innhente informasjon om hendelser og feil på skjermtilkoblinger. Det ble også utført en spørreundersøkelse blant norske nettselskap og elkraft-entreprenører (REN AS sin kundeliste). Dette gav dessverre ingen resultat. Prosjektet har opprettet en internasjonal CIRED arbeidsgruppe med tema skjermtilkoblinger. En spørreundersøkelse internasjonalt er derfor aktuelt å gjennomføre på et senere tidspunkt.

Følgende eksempel på feil er hentet fra SINTEF sine arkiv.

6.1 Feileksempel 1

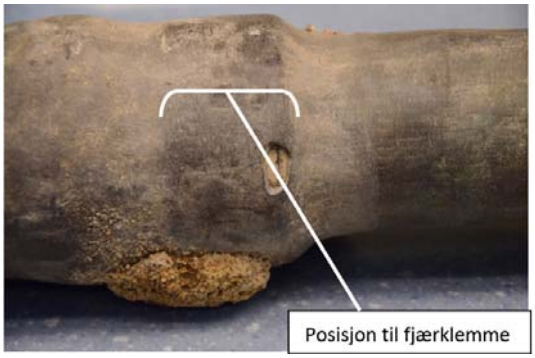
[19] SINTEF Energi fikk i 2014 tilsendt flere sett med skjøter, der 3 hadde havarert. Skjøtene var for 24 kV PEX isolert kabel (TSLF), 1x630 mm^2.

Havaristedene var lokalisert til endene av skjøtekroppen, nær fjærklemmene. De havarerte skjøtene var svært ødelagte etter havari. En tilsendt skjøt som ikke hadde havarert bar tegn på at det hadde vært varmt rundt fjærklemmen på begge sider av skjøtekroppen. Større mengder sand var smeltet inn i ytre kappe på hver side av skjøten på og rundt stedet hvor fjærklemmen var lokalisert, se Figur 6.1. Det ble gjennomført en grundig analyse (bilder, disseksjon, mikroskopi, DSC) av denne skjøten siden den var intakt. Målingene viser at det har vært temperaturer i området 104-106 °C nær ytre halvleder.

6.1.1 Disseksjon av ikke havarert skjøt

Figur 6.1 viser sand lokalisert på ytre kappe på den ene siden av skjøtekroppen. Det har vært svært varmt slik at relativt store mengder sand i et tykt lag har smeltet fast på kappen og medført at kappen også har sprukket opp. Dette ble observert på begge sider av skjøtekroppen på og i nærheten av posisjonen til fjærklemmen.

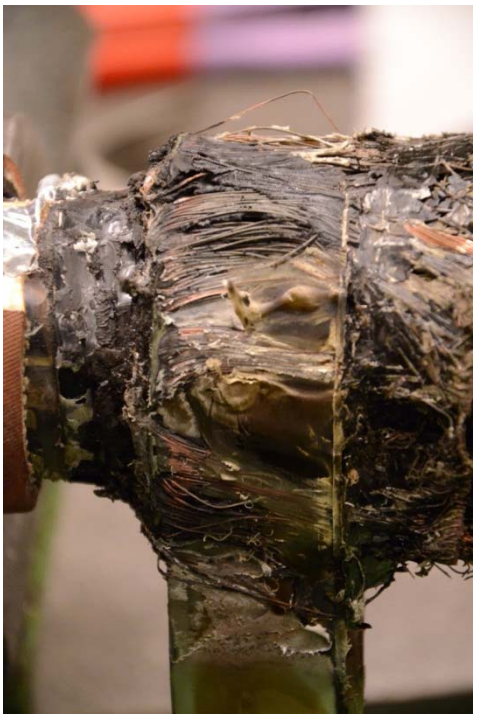
Figur 6.1: Fastsmeltet sand på kappen (delvis oppsprukket kappe).



Figur 6.2: Fastsmeltet sand på kappen og fjærklemmens posisjon.

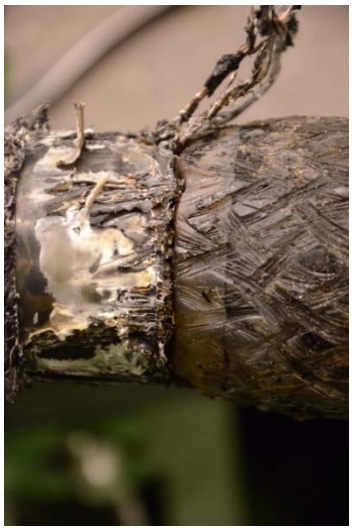
Som vist i Figur 6.3 og Figur 6.4, var det mye smeltet materiale (kappemateriale fra kabel) i og rundt skjermnettet til skjøten. Kanten av fjærklemmen var montert ca. 40 mm fra kanten av halvlederavtaket som er i henhold til montasjeanvisningen.

Figur 6.3. Den ytre fjærklemmen fjernes

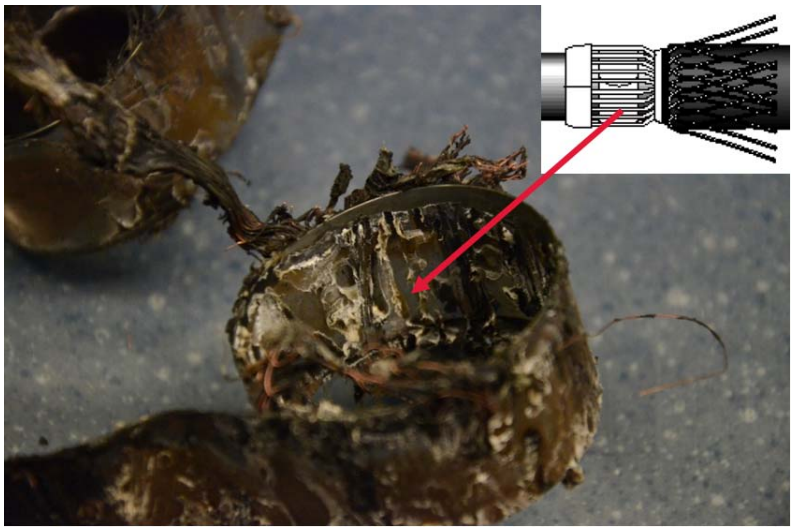


Figur 6.4. Smeltet plastmateriale rundt skjermtrådene til skjøten.

Figur 6.5 viser overflaten av den lille fjærklemmen som er montert rett på kabelkappen og innsiden av ytre fjærklemme som er montert utenpå den lille fjærklemmen. Ifølge montasjeanvisningen skal kabelens skjermtråder bøyes tilbake over den lille fjærklemmen som vist i Figur 6.6. Deretter skal skjermnettet til skjøten legges over skjermtrådene til kabelen før den store fjærklemmen monteres utenpå den lille fjærklemmen. **Dette var ikke gjort**. I denne montasjen er den store fjærklemmen montert på den lille fjærklemmen over kabelens skjermtråder ca. to runder for deretter å legge skjøtens skjermnett over den store fjærklemmen. Dette fører til at kontakten mellom skjermnettet til skjøten og skjermtrådene til kabelen blir dårligere. Hvor mye dårligere er vanskelig å anslå uten separate tester/beregninger.

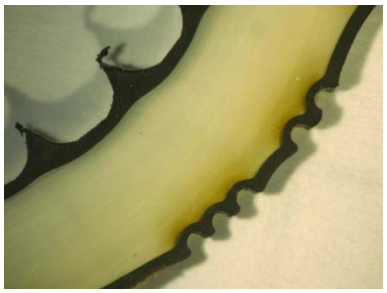


Figur 6.5. Den lille (innerste) fjærklemmen der kabelskjermtråder vises samt mye smeltet materiale.

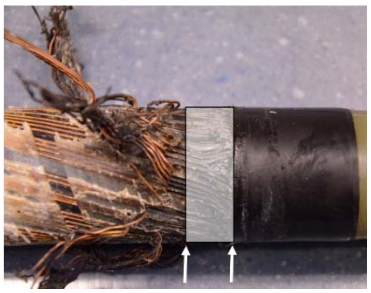


Figur 6.6. Den ytre fjærklemmen der innsiden som har ligget mot den lille fjærklemmen vises.

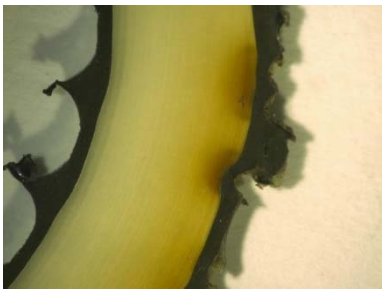
Figur 6.7 viser snitt gjennom kabelisolasjonen i posisjonen der fjærklemmen var plassert. Det er tydelig at skjermtrådene for kabelen har blitt presset ned i halvlederen til kabelen og inn i isolasjonen til kabelen. Det ser ut for at halvlederen er intakt men deformert. Dette fører til en elektrisk feltforsterkning. Det er også tydelig forskjell på de to posisjonene med hensyn til oksidasjon (grad av misfarging). Ved posisjonen i kanten av fjærklemmen nærmest halvlederavtaket skal all strømmen gå i kobberskjermen til kabelen fordi aluminiumslaminatet avsluttes her. Det vil gå mindre strøm i kobberskjermen i resten av kabelen da aluminiumslaminatet vil lede en betydelig del av strømmen.



Figur 6.7. Snitt fra Figur 6.8 (venstre for fjærklemme, lengst fra halvlederavtak)



Figur 6.8. Kabel etter at skjøt og utstyr er fjernet. Piler indikerer hvor fjærklemmen var plassert.



Figur 6.9. Snitt fra Figur 6.8 (laminatkutt, høyre for fjærklemme, nærmest halvlederavtak)

De brune sonene i PEX-isolasjonen i Figur 6.9 tyder på høy effektutvikling i kobberskjermen. Det er også ujevn brunfarge rundt omkretsen samt grad av mekanisk deformasjon av halvleder og isolasjon som tyder på at skjermstrømmen ikke har vært jevnt fordelt.

Deformasjonen av halvlederen og PEX – isolasjonen fører ikke til et umiddelbart havari. Det er sannsynlig at havariet skjer først når oksidasjonen i PEX-kabelen er blitt kritisk. Da vil det dannes mikrosprekker i PEX isolasjonen i de brune områdene på grunn av kraftig oksidasjon og deretter initieres det delutladninger. Dette vil være starten på havari av kabelen.

6.1.2 Undersøkelser av kabel

Figur 6.10 viser kabelen uten ytre kappe og laminat. Det er viklet et svellebånd langsgående rundt kabelen med en fuge (åpning) på ca. 4-5 mm. Bredden på båndet er 40 mm så fugen utgjør 10 %. Det er i dette området at det er kontakt mellom laminat og skjerm og som skal sørge for en jevn strømfordeling. I seksjonen vist i Figur 6.10 har skjermtrådene blitt presset delvis ned i ytre halvleder.

Figur 6.10: Kabel uten ytre kappe og laminat.

I det tekniske databladet til kabelen er det beskrevet at det ikke er nødvendig med separat jording av aluminiumslaminatet i skjøter og endeavslutninger på grunn av denne langsgående fugen.

6.1.3 Disseksjon av havarerte faser

Det ble utført disseksjon for en havarert trefaseskjøt. Som vist i Figur 6.12 og Figur 6.13 er havariet lokalisert nær fjærklemmene. Disseksjonen avdekket det samme som ble observert for "ikke havarert skjøt" (Figur 6.1): Skjermnettet til kabelen er ikke plassert på skjermtrådene til kabelen slik det er beskrevet i montasjeanvisningen.

Figur 6.11: Havarert trefaseskjøt

Figur 6.12: Gjennomslag i kabel.

Figur 6.13: Gjennomslag skjøt.

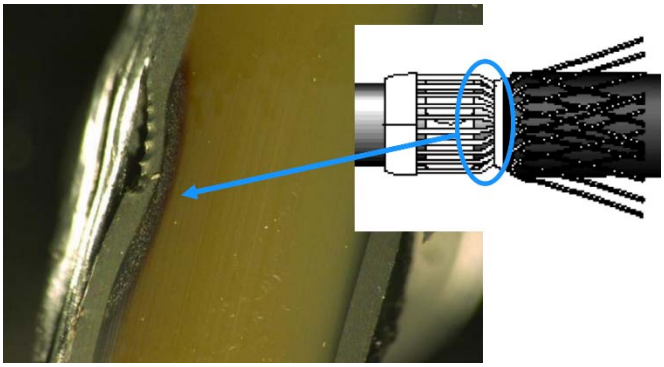
6.1.4 Disseksjon av "riktig montert" skjøt

For sammenligning er det utført disseksjon av en fase der det ved inspeksjon av kappeoverflate (utside av skjøt) tilsynelatende ikke ser ut til å ha vært spesielt varmt: Det er ingen sand som har smeltet fast til kappen. Etter at ytre kappe er fjernet og den store fjærklemmen er avdekket, er det fortsatt ingen tegn til varmgang (smeltet kappe/misfarging). Det viste seg at i dette tilfellet er det ingen feilmontasje. Kabelens skjermtråder er bøyd tilbake over den lille fjærklemmen, og skjermnettet til skjøten er lagt over skjermtrådene til kabelen før den store fjærklemmen er montert utenpå den lille fjærklemmen.

6.1.5 Diskusjon og konklusjon

Kabelen har havarert på grunn av varmgang i sammenkoblingen mellom skjermnettet til skjøten og skjermen til kabelen. Ifølge montasjeanvisningen skal kabelens skjermtråder bøyes tilbake over den lille fjærklemmen. Deretter skal skjermnettet til skjøten legges over skjermtrådene til kabelen før den store fjærklemmen monteres utenpå den lille fjærklemmen. **Dette er ikke gjort**. I denne montasjen er den store fjærklemmen montert på den lille fjærklemmen over kabelens skjermtråder ca. to runder for deretter å legge skjøtens skjermnett i den store fjærklemmen. Deretter er resten av den store fjærklemmen montert. Det er usikkert hvor kritisk denne feilen er, men den kan resultere i en betydelig større kontaktmotstand (fjærklemmen er i rustfritt stål). Dette er kritisk når strømmen i skjermen er relativ stor.

I databladet for kabelen er det beskrevet at man ikke trenger å gjøre spesielle tiltak for sammenkobling av aluminiumslaminatet og skjermtrådene til kabelen i skjøtepunktet. All strøm vil overføres til skjermtrådene i kanten av den lille fjærklemmen. I og med at tverrsnittet av Al-laminatet og kobberskjermen til kabelen er den samme, vil det være en 40 % økning i strømtettheten i kobberskjermen i dette punktet. Figur 6.14 viser at dette stedet er spesielt utsatt for oksidasjon på grunn av temperaturøkningen/forhøyet strømtetthet når kontakteringen er montert feil. Strømfordelingen mellom kordelene i jordskjermen har heller ikke vært jevn i dette punktet.



Figur 6.14: Kraftig oksidasjon av PEX isolasjon lokalisert til avslutning av aluminiumslaminatet til en av fasene som har havarert.

Det ble ikke observert noen indikasjon på varmgang for den av skjøtene som var korrekt montert i henhold til montasjeanvisningen.

6.2 Feileksempel 2

[5, 6] I perioden 2006 til 2008 ble et nytt 24 kV PEX isolert 1x1200 mm^2 Al kabelanlegg installert i et kraftanlegg i fjell. Totalt 17 trekantforlegninger fra 7 generatorer til transformatorer ble installert, uten skjøter. Kablene ble lagt på horisontale kabelstiger i luft over flere hundre meter, i "snaked" formasjon, klamret til kabelstigene. Kablene som ble valgt for dette anlegget benytter aluminiumslaminat som radiell vanntetting. I denne konstruksjonen er det et halvledende bånd og isolerende svellebånd i såkalt interlock utenpå ytre halvleder. Kopperskjermen (trådskjerm) ligger utenpå disse båndene. Mellom kopperskjermen og aluminiumslaminatet ligger det et halvledende nylonbånd på cirka 0,7 mm. Aluminiumslaminatet har en tykkelse på ca. 0,2 mm, noe som tilsvarer et ekvivalent kobbertverrsnitt på 38 mm^2. Kobberskjermtrådene hadde et ekvivalent tverrsnitt på 50 mm^2.

Etter en kort periode i drift får man full kortslutning rett i underkant av en endeavslutning, nært der aluminiumslaminatet er avsluttet og skjermen er jordet. I første omgang blir hendelsen feilaktig tilskrevet knivkutt. Endeavslutningen ble erstattet og anlegget satt i drift på nytt.

Med ny oppmerksomhet på kabelanlegget ble det oppdaget begynnende feil i form av bobler og smelting i ytterkappen under klammer. Alle funn ble gjort i området 0-25 m fra kabelendene. Smeltede kabler ble fortløpende erstattet med nye kabler pluss skjøt. Fortsatt ble det detektert nye områder med smelting, men nå i forbindelse med skjøtene. Termisk overbelastning ble feilaktig vurdert til å være årsaken.

Figur 6.15: Havari like under endeavslutningen.

Figur 6.16: Havari på kabel.

Figur 6.17: Smelting og utbuling av ytre kappe ved kabelklammer.

I utgangspunktet ble bare skjermtrådene jordet i hver ende av kabelanlegget. Laminatet ble ikke jordet. Etter utførelse av reparasjoner og innskudd av skjøter og nye endeavslutninger, ble laminatet heller ikke jordet.

Etterhvert skjønte man at problemstillingen lå i at det ikke var god elektrisk kontakt mellom laminat og skjerm i kabelen, og at dette heller ikke ble oppnådd ved skjøter og endeavslutninger. Det ble etter anbefaling fra kabelprodusenten besluttet å jorde laminatet ved alle skjøter og endeavslutninger ved hjelp av loddemetode. Figur 6.18 viser hvordan kabelsko er bendslet og loddet fast til kabelens aluminiumslaminat, hvor kabelsko med tilhørende leder utgjør en forbindelse enten over en skjøt, eller til jord ved kabelens endeavslutning. Dette ble utført ved 102 endeavslutninger og 17 skjøter.

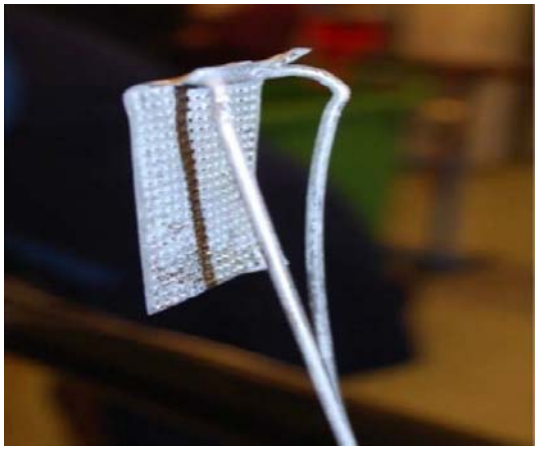
Figur 6.18: Bendsling og lodding av kabelsko til aluminiumslamiat (delvis utført)

Flere av loddingene feilet etter relativt kort tid i drift. Dette manifesterte seg i smeltet ytterkappe over loddingene. På dette tidspunktet hadde man også opprettet målinger for alle skjerm og laminatjordinger for å overvåke strømmen. Når en laminatstrømmåling endret seg eller gikk til null kunne man anta at loddingen var blitt dårlig. Strømmen fant da igjen veien til jord gjennom skjermtrådene og nye varme punkt kunne oppstå.

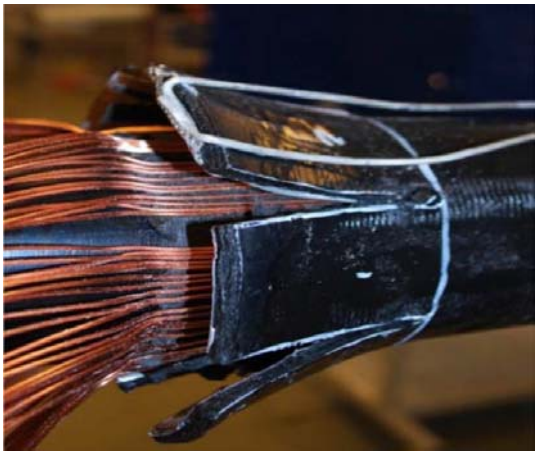
Figur 6.19: Brent og smeltet laminatlodding.

På grunn av kombinasjonen med relativt store strømmer i skjerm og laminat, samt en praktisk vanskelig løsning for laminatkontakt ble det besluttet å isolere den ene kabelenden fra jord med avledere for å redusere skjermstrømmene til 0. Samtidig skulle man gå over til innstikkplater som laminatkontakt ved alle skjøter og

endeavslutninger. Dette ble vurdert til å være en enklere og mer robust metode for utførelse på anlegget. Metoden består av å splitte aluminiumslaminatets omkrets inn i flere seksjoner, brette dem ut og legge en ru innstikksplate på innsiden. Laminatet blir deretter presset mot innstikkplatene ved hjelp av fjærklemmer for å perforere oksidasjonslaget og oppnå en god elektrisk kontakt.



Figur 6.20: Kontaktblikk



Figur 6.21: Kontaktblikk plassert under laminat.

6.2.1 Observerte kabelfeil

Det oppstod flere ulike feil på dette kabelanlegget. Kabelfeil som følge av høy overgangsmotstand i loddet sammenkoblingspunkt mellom aluminiumslaminat og kabelsko. Det ble videre observert kappefeil, som følge av tilfeldig etablerte kontaktpunkt mellom aluminiumslaminat og kobberskjermtråder. Tilfeldige kontakt ble eksempelvis etablert ved at kabel ble påtrykt ytre press som følge av kabelklammer eller bøy i kabelen.

6.2.2 Beregnede strømmer i aluminiumslaminat og kobberskjerm

For den aktuelle forlegningen med kablene forlagt i tett trekant i tre grupper, viste beregningene at de induserte strømmene i hver kopperskjerm var cirka 14 % og i hvert aluminiumslaminat cirka 7 % av lederstrømmet. Det vil si henholdsvis 130 A og 65 A for den aktuelle lederstrømmen i anlegget på 900 A.

I de tilfeller hvor det er dårlig elektrisk forbindelse mellom kopperskjerm og aluminiumslaminat, kan en risikere at hele den induserte strømmen på 65 A i aluminiumslaminatet går via en av kopperskjerm- tråd på 1 mm^2 og dermed føre til høy varmeutvikling. Strømovergangen kan i dette tilfellet skje under en kabelklammer eller i endene eller skjøtene hvor aluminiumslaminatet er avsluttet veldig nær skjermtrådene.

For å redusere problemene som kan oppstå med induserte strømmer kan det være aktuelt å frakople kopperskjerm og aluminiumslaminat i en ende og beholde jordingen i den andre enden.

6.2.3 Konklusjoner

De underliggende årsakene til problemene ble etterhvert funnet. Disse var i korthet følgende:

- Manglende god elektrisk forbinding mellom aluminiumslaminat og kobberskjerm hadde ført til varmgang med påfølgende skade påført kablenes ytterkappe flere steder i kabelanlegget, og i noen tilfeller også kabelens PEX-isolasjon.

- Den ettermonterte forbindingen av aluminiumslaminat og kobberskjermtråder ved hjelp av loddemetoden (kabelprodusentens anbefalte metode) var ikke pålitelig nok og det oppsto varmgang pga. for høy overgangsmotstand i flere sammenkoblingspunkt. Dette førte til nye skader på kablenes ytterkappe og PEX-isolasjon.
- Kabelanleggets generelt sett meget store (omkring 200 A) skjermstrøm var en betydelig utfordring.

6.3 Feileksempel 3

[3, 20] I et kabelanlegg var ca. 7,5 km med 3 enlederkabler forlagt flatt i jord med varierende senteravstand (ca. 6 – 10 cm). Kabeltype 24 kV TSLE med 400 mm^2 aluminiumsleder, koppertråd skjerm og vanntetting med aluminiumslaminat. Kopperskjermene var jordet i begge ender og var forbikoplet i skjøtene. Det var ca. 500 m avstand mellom hver skjøt i anlegget og totalt 63 kabelskjøter. Aluminiumslaminatet var ikke koplet til koppertrådskjermene og heller ikke jordet. En separat jordleder lå innenfor 1 m avstand til kabelforlegningen. Kabelen ble satt i drift i februar 2006. Første feil oppstod etter ca. 11 måneder; totalt 6 feil er rapportert frem til november 2014. Ved inspeksjon er det observert flere synlige skader på kablenes ytterkapper, og disse indikerer at det har vært høy varmeutvikling i kopperskjermen/aluminiumslaminatet på disse stedene.

Figur 6.22: Kabel i grøft, flat forlegning, punkt med smeltet ytterkappe markert med hvite sirkler.

Figur 6.23: Eksempel på smeltet ytterkappe.

Figur 6.24: Eksempel på smeltet ytterkappe og smeltet dekkebord.

Figur 6.25: Havari ved skjøt.

Kabelkonstruksjonen hadde en båndering mellom kopperskjerm og laminat. Det er tidligere målt på kabler av tilsvarende konstruksjon[15]. Disse målingene har vist at bånderingen har en viss ledningsevne og induserte strømmer kan dermed føres mellom bånderingen og kopperskjermen selv om laminatet ikke er jordet. Ut fra beregninger med aktuelle verdier på resistiviteten for "bånderingslaget", er det funnet at lengden på strømovergangen kan variere fra noen titalls meter opp til km. Den induserte strømmen som går i laminatet, kan bli av samme størrelse som når laminatet er jordet. Dersom det oppstår en kontakt mellom kopperskjerm og laminat (pga. hull, skader i bånderingen), kan hele den induserte strømmen gå via et fåtall koppertråder og føre til høy varmeutvikling og havari. Dette kan oppstå på flere steder.

I anlegget var dekkbord lagt direkte på kablene. Dekkbordet vil ha relativt liten betydning for temperaturforholdene om dette er plassert tett inntil eller i 0,3 m avstand så lenge kablene er omgitt av fyllmasse og det ikke er oppstått luftlommer rundt kablene. Dersom det har oppstått luftlommer rundt kablene når dekkbordene ligger direkte på kablene, vil varmeavledningen bli dårligere. Luftlommene vil føre til høyere kabeltemperatur, men disse må være relativt store for å forårsake betydelig øking av kabeltemperaturen. I tilfellet med ca. 1 m overdekning hvor det er hulrom mellom undersiden av dekkbordene ned til halvveis på kablene og resten av kablene er omgitt av fyllmasse, viser beregninger at kabeltemperaturen ved 400 A øker med bare ca. 6 °C i forhold til om det ikke er hulrom.

Ut fra skadene ser det ut til at dekkbordene har medført mekaniske belastninger som har presset laminatet og kopperskjermen sammen, dermed skapt kontakt mellom laminat og koppertrådskjerm. I disse kontaktpunktene kan det oppstå høye temperaturer pga. strømovergang, noe som har ført til at dekkbordene og kabelkappen er smeltet sammen. Dette kan være tilfellet ved skjøtene (overlapp) mellom dekkbordene.

Bånderingen kan ha hatt åpninger fra produksjonen eller fått det under montasje. Ved dissekering av nye kabler er det sett at bånderingen ikke alltid er hel, og dermed kan det i utgangspunktet være elektrisk kontakt mellom laminat og kopperskjerm[15].

6.3.1 Vurderinger

Driftserfaringene med bruken av laminatskjerm har vist at denne kabelkonstruksjonen har enkelte svakheter når det gjelder induserte strømmer i skjerm/laminat, som fører til at lokal overoppheting kan forekomme i tilfeldige kontaktoverganger mellom kopperskjerm og laminat. Dette problemet er sterkt påvirket av utførelse av kabelskjøter, der det er viktig å sørge for en god elektrisk kobling mellom skjerm og laminat over skjøten. Forskrifter for elektriske forsyningsanlegg [13] omhandler ikke denne type kabler spesifikt. Det er også hevdet at det ikke gis krav til jording av laminatet i denne forskriften. Imidlertid har veiledningen til forskriften, "Veiledning til forskrift om elektriske forsyningsanlegg", §4-4 Utstyr og kabler, følgene ordlyd som omhandler jording:

> *Koplingspunkter og avslutninger for kabler Kabelskjermer og armeringer av ledende materiale samt ledende beskyttelsesrør for kabler uten metallisk skjerm eller armering skal vanligvis jordes i begge ender. Enlederkablers skjerm, armering e.l. av ledende materiale tillates jordet bare i den ene enden når dette er ønskelig av hensyn til reduksjon av tapene i skjerm/armering el. Når kabelskjerm m.v. er jordet i kun den ene enden, skal det settes opp skilt med opplysning om dette ved den andre enden, og kabelskjermen må i den ujordede enden være avskjermet mot berøring.*

Dette må tolkes slik at "...skjerm, armering e. l. av ledende materiale..." også omfatter laminatet. Med bakgrunn i resultater fra beregninger som er vist i foregående kapittel, og med erfaringer fra mange kabelinstallasjoner, må det gis gode anbefalinger om hvordan utførelse av skjerm/laminat skal gjøres for å sikre en god kontaktovergang. Dette gjelder både forbindelse mellom laminat og kopperskjerm og kobling over skjøten. De induserte strømmer i skjerm blir betydelig redusert ved å forlegge kablene i trekant i stedet for flat forlegning, og dette bør gi en sikrere kabelforlegning. Retningslinjer for utførelse av skjøter må følges nøye, slik at det ikke oppstår problemer med varmgang i kontaktpunkt laminat/skjerm langs kabelen. Det foreligger pr dato ikke noen klare betingelser og årsaker for at varmgang oppstår i enleder kabelforlegninger, slik at dette bør følges opp med å utvikle generelle anbefalinger for denne type installasjoner.

I tillegg til å følge montasjeanvisningen for skjøter og endeavslutninger bør det foretas tilstrekkelig opplæring av utførende personell. Ved skjøter og endeavslutninger koples kopperskjermen sammen med laminatet og tilkoples forbikoblingslederen ved skjøtene og jordlederen ved endeavslutningene. Koplingene må dimensjoneres for å overføre strømmen i laminatet til kopperskjermen og den totale strømmen i

kopperskjerm og laminat. Tverrsnittet på forbikoblingslederen/jordlederen må dimensjoneres for å overføre den totale induserte strømmen både under normal drift og feil (kortslutning og jordfeil).

6.4 Feileksempel 4

[21] To endeavslutninger har havarert etter ca ett års drift ved et aluminium smelteverk. Kabelanlegg ble driftsatt i august 2001. Endemuffene var montert på en ca 200 meter lang 145 kV PEX-kabel. Kabelen som er benyttet er en TSLE 145 kV PEX-kabel med aluminiumsleder med tverrsnitt 1000 mm^2. Tverrsnittet av kobberskjermen er 35 mm^2, og et to-lags svellebånd er plassert mellom denne skjermen og et 0,2 mm tykt aluminiumslaminat som radiell vanntetting. Kobbertrådene i skjermen har ikke kontakt med hverandre i kabelen (ingen "motspiral"). Kappe-materialet er av PE og 4 mm tykt. Det er i tillegg ekstrudert et ytre ledende lag på kappen for kappetesting.

Endeavslutningene er laget av EPDM gummi og har en geometrisk feltstyring. De er plassert i et oljefylt kompositthus.

Kabelskjermen er koblet til jord i hver ende av kabelen.

Netteieren har ikke rapportert noen driftsforstyrrelser i forkant av havariene.

Figur 6.26. Endeavslutning er sterkt nedsotet etter havari

Figur 6.27. Muffekropp og tjærepapp fjernet.

6.4.1 Strømmer i laminat og kobberskjerm

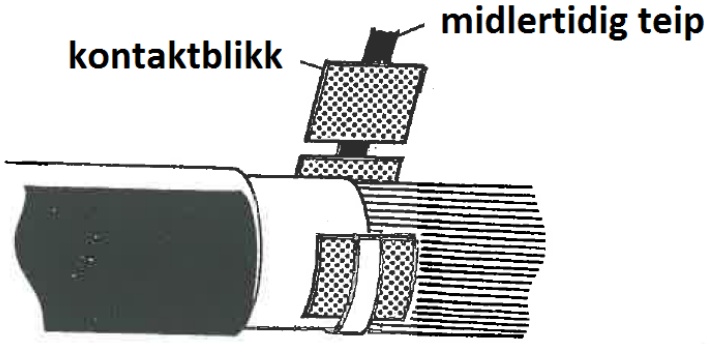
Typisk last på kabel i normal drift vil være ca 0,7 til 0,8 kA. Det totale tverrsnittet av jordskjermen er 35 mm^2 (68 tråder) og tverrsnittet av det 0,2 mm tykke laminatet er på 52 mm^2.

Ved beregninger under forutsetning av at kablene ligger i flat forlegning med en lysåpning på 10 cm, vil de induserte strømmene for en slik kabel bli ca 140 A for både skjerm og laminat i ytterfasene der strømmene vil fordele seg omtrent likt. Dette betyr at hver skjermtråd fører over 2 A i kontinuerlig drift dersom strømfordelingen mellom trådene er jevn. Trådene har ikke elektrisk kontakt mellom seg bortsett fra i endene (forutsatt at skjermtrådene er feilfrie og ligger korrekt plassert på kabelen). Foreløpige målinger av skjermstrømmen i kabelen (50 Hz) viser at totalstrømmen i skjerm og laminat er ca. 300 A, dvs. 150 A i

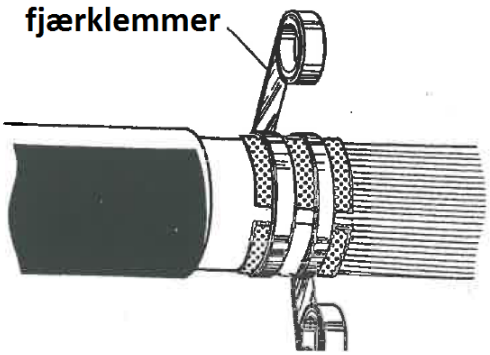
skjerm og 150 A i laminat. Dersom avstanden mellom fasene økes, vil også de induserte strømmene i skjerm og laminat øke.

6.4.2 Disseksjon

Det ble ikke observert noen skade eller svakheter i selve endeavslutningene. Begge havariene har oppstått i kanten av aluminiumslaminatet, der laminatet kobles sammen med kobberskjermen via 5 blikk av rustfritt stål samt to fjærblad.



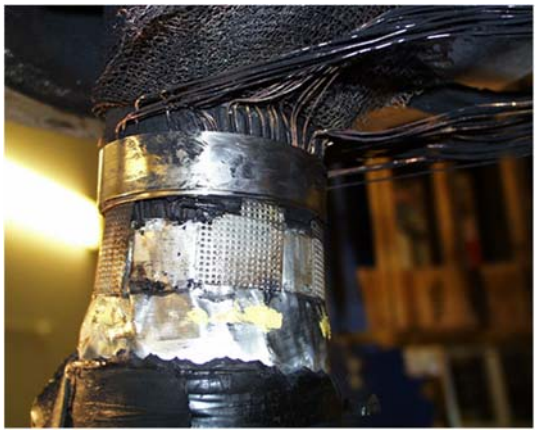
Figur 6.28: Montasjeanvisning (delvis) av kontaktblikk på laminat og skjermtråder.



Figur 6.29: Montasjeanvisning (delvis) av kontaktblikk på laminat og skjermtråder.

Det vil være totalt ca. 15-20 skjermtråder i kabelens omkrets som er plasserte mellom blikkene, og kan få (en dårlig) elektrisk kontakt i kanten / spissen i enden av laminatet. Dette skyldes at svellebåndet isolerer skjermtrådene fra laminatet nesten helt frem til avslutningen av laminatet.

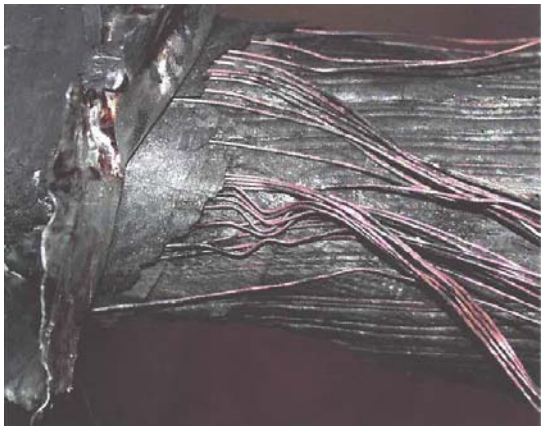
Figur 6.30: Gjennomslag med senter mellom fjærklemmer.



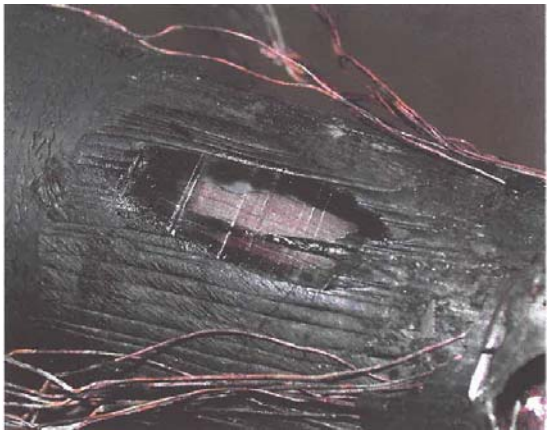
Figur 6.31: Plassering av fjærklemme og kontaktblikk (motsatt side av gjennomslag). En fjærklemme er fjernet.

Det er observert at i hvert punkt der svellebåndet er mekanisk ødelagt pga. kraftig bøying av skjermtråder i kabelen, er det blitt dannet en (dårlig) elektrisk kontakt med laminatet. På de trådene som ikke er koblet til kontaktblikkene er dette observert nær kanten av laminatet (der blikkene er plassert), og i tillegg lengre inn på kabelen. På de stedene som er observert, har dette medført en temperaturøkning med påfølgende erodering av ytre halvleder, eller smelting av enkelte skjermtråder ned i ytre halvleder. I noen av tilfellene

kan dette skyldes de store feil-strømmene som følge av havariet. Imidlertid tyder det på at det sannsynligvis er ved kontinuerlig drift at erosjonen av ytre halvleder (med temperaturøkning) har inntruffet. Det er også observert at skjermtråder har gått gjennom ytre halvleder og inn i PEX-isolasjonen.



Figur 6.32: Enkelte kobbertråder i skjermen var bøyd og plassert delvis oppå hverandre.

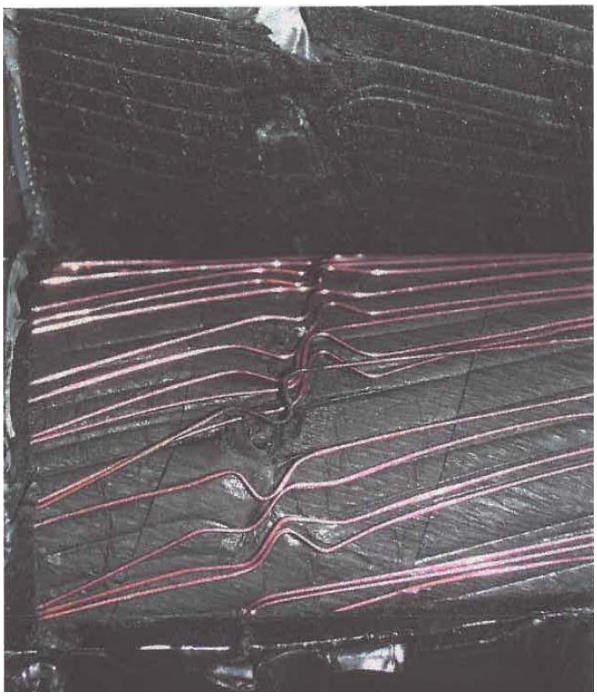


Figur 6.33: I dette området er ytre halvleder skjært bort, da det ble observert at en tråd var brent inn i ytre halvleder. Dette er plassert i kanten av avslutningen av laminatet.

Det er også observert at skjermtrådene ikke er plassert med jevn avstand i mellom seg. Dette kan medføre en ujevnt fordelt indusert strøm i kobbertrådene, med en påfølgende ujevn strømtetthetet i laminatet. Dette kan føre til spenningsvariasjoner mellom skjerm og laminat langs kabelen.

Det ble observert ca 5 runde "bobler" på kabelens ytre kappe som vist i Figur 6.34. Kappen ble skjært bort rundt defekten. Det ble observert at flere tråder (ca 4) var kraftig bøyd og lå oppå hverandre. Dette har trolig medført at svellebåndet ble mekanisk skadet og en (dårlig) elektrisk kontakt mellom laminat og kobberskjerm ble dannet. Enkelte tråder er delvis smeltet inn i ytre halvleder. Det ble også observert at noe av ytre halvleder også er delvis erodert bort (se Figur 6.35).

Figur 6.34: Utbuling (bobler) av smeltet ytterkappe.



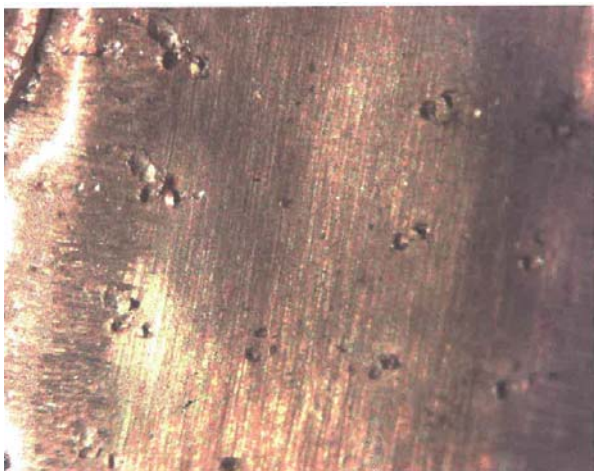
Figur 6.35: Flere skjermtråder er kraftig bøyd og ligger delvis oppå hverandre. Det kan observeres skade i svellebåndet som følge av dette. Enkelte tråder er delvis smeltet inn i ytre halvleder.

Det ble observert flere mekaniske skader på svellebånd, som medførte kontakt mellom laminat og kableskjerm og følgelig en lokal høy temperaturstigning.

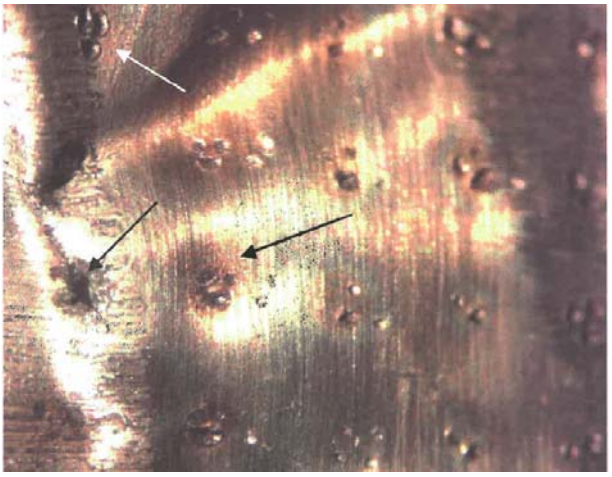
Det ble gjennomført videre analyser av kabelen med skade på ytre halvleder. Kabelisolasjonen ble ”spiralisert” (radielt kuttet) med en tykkelse på 1 mm. Det ble observert skade på isolasjonen som følge av at det hadde vært en høy temperatur i kontaktpunktet mellom laminat og kabelskjerm. Enkelte tråder hadde smeltet gjennom ytre halvleder og forårsaket skade på isolasjonen. Det ble ikke detektert en begynnende feil i dette området (elektrisk trevekst), men en slik ujevnhet kan føre til at levetiden til kabelen blir betydelig redusert.

Det ble også observert skader på ytre halvleder i nærheten (ca 10 cm fra feilstedet) som ikke hadde skadet PEX-isolasjonen. Skaden var sannsynligvis forårsaket av en temperaturøkning som følge av en lokal høy temperatur i kontaktpunktet mellom kabelskjerm og laminat. Lengre unna (20 cm) var skaden mindre.

Figur 6.36 viser spor i aluminiumslaminatet som følge av mekanisk press på kontaktblikket av fjærbåndet. I dette tilfellet kan det ikke observeres at det i noen av kontaktpunktene har vært høy temperatur. Figur 6.37 viser imidlertid at det har vært høy temperatur i kontaktpunktene mellom blikk og laminat (se piler). Det har også vært så høy temperatur at det har forårsaket skade (hull) i laminatet. Mykningstemperaturen for aluminium er ca. 150°C.



Figur 6.36: Aluminiumslaminat i sonen der kontaktblikket var plassert. Kontaktpunktene fra blikkene observeres som små "sår" i overflaten.



Figur 6.37: Enkelte kontaktpunkter mellom laminat og blikk har blitt svært varme under drift. (se piler)

6.4.3 Sannsynlig feilforløp

Det er to fjærblad som presser kontaktblikkene ned mot laminatet og kobberskjermen. Hensikten med dette trykket er å sørge for god kontakt mellom laminat og skjermtråder. Det ene fjærbladet sitter i kanten av avslutningen av laminatet. Det andre fjærbladet sitter ca. 1 cm fra det første. Som nevnt vil 15-20 tråder som er plassert mellom kontaktblikkene ikke bli tilkoblet laminatet via blikk. Det kan også tenkes at dersom noen av jordtrådene var kraftig bøyd (som er observert nær laminatkanten), vil ikke blikket være i tilstrekkelig kontakt med nabo-kobbertråden ved kanten av laminatet (under blikket).

Dette vil medføre en dårlig elektrisk kontakt i kanten av laminatet, gnistdannelse og påfølgende erosjon / smelting av skjermtråder ned i ytre halvleder pga den forhøyde, lokale temperaturen. Fra feilanalysen ble det observert at en slik dårlig elektrisk kontakt mellom kobbertråd(er) og laminat kan forårsake en betydelig temperaturøkning, da kappematerialet rett ovenfor et slikt område ble delvis smeltet. Enkle beregninger av effektutviklingen i en slik kontakt viser at vesentlig varme kan oppstå i kontakten selv ved relativt lave kontaktmotstander (~10 mohm).

Kontaktblikkene som danner kontakt med kobberskjerm og laminat kan ifølge leverandøren uproblematisk føre en strøm på 10 A hver. Leverandøren har heller ikke sett noen problem med strømmer opp til 25 A. Dersom de innledende målinger av skjermstrømmene stemmer, kan hvert blikk føre ca 30 A . Det er usikkert om kontaktblikkene kan føre denne strømmen. I tillegg ble det observert at for havari nr. 2 hadde ett blikk kun delvis kontakt med laminatet og ett hadde ikke kontakt. Dette kan medføre at temperaturen kan øke i dette området når kontaktblikket får en øket strømbelastning.

I området ved laminatkanten vil en slik dårlig kontakt føre til temperaturøkning. Både ytre halvleder og PEX-isolasjonen vil da mekanisk bli betydelig mykere. På grunn av det relativt kraftige trykket fra fjærbladene vil sannsynligvis skjermtråder smelte inn i isolasjonen, eller føre til en betydelig erosjon inn i isolasjonen som følge av gnistdannelse. Dette ble observert ved tilleggsanalysen av kabelen, der en kraftig erosjon av ytre halvleder og delvis ned i PEX-materialet hadde forekommet. Dette er meget sannsynlig en følge av lengre tids drift, og ikke en følgeskade av feilstrømmen ved havariet. Elektrisk trevekst kan starte fra slike defekter, og dermed føre til et begynnende havari av kabelen.

6.4.4 Tiltak

Det kritiske området for denne kabelen er den overgangen der aluminiumslaminatet avsluttes og kobles sammen med kabelskjermen. Det er ikke tilstrekkelig slik det er vist i montasjeanvisningen å koble sammen laminat og kabelskjerm ved bruk av kontaktblikk når kabelen er jordet i begge ender. Montasjen bør sikre at hver eneste skjermtråd er i god elektrisk kontakt med laminatet.

Feilanalyse av kabelen viste at det i tillegg kan være andre steder på kabelen der laminat og skjerm har (dårlig) kontakt som følge av skade på svellebåndet og som kan medføre gnistdannelse.

Dersom kabelen jordes kun i en ende, vil totalt indusert strøm bli null, med påfølgende reduksjon av fare for gnistdannelse. Det kan imidlertid oppstå induserte strømmer i kobberskjerm og laminat, som kan medføre betydelige potensialdifferanser mellom laminatet og kobberskjermen. Dersom svellebåndet er skadet, og det er metallisk kontakt mellom laminat og skjerm, kan en slik feilstrøm føre til gnistdannelse og overoppheting. For denne kabelen er det påvist skade på svellebåndet flere steder på kabelen (ca. to meter kabel er analysert og ca. 5 slike skader er funnet).

6.5 Feileksempel 5

[22] I en 66 kV stasjon med 4 kabelavganger har det havarert to 72 kV GIS endeavslutninger siden montasjen i 1995. Den første, montert på en 800 mm^2 AL PEX kabel, havarerte etter ca. 5 år i drift (2000). Den andre, montert på en 150 mm^2 AL PEX kabel havarerte etter ca. 22 år i drift (2016). Felles for alle kablene er at aluminiumslaminat fikk jording etter-installert etter ca. 1 år i drift. Dette ble utført med loddemetode. Laminatet og skjermtrådene hadde i utgangspunktet bare kontakt gjennom et halvledende bånd langs med kabelen.

Ødeleggelsene under havariforløpet var så kraftige at eventuelle spor etter primærårsaken var fullstendig bortbrent. Kraftig elektrisk erosjon har ødelagt kabelens ytre halvleder og den innvendige lakken som utgjør indre halvleder i stresskonusen i avslutningen. Selve havariet oppstod der stresskonusen begynner å avlaste det elektriske feltet; her hadde den innvendige elektriske erosjonen skadet silikonisolasjonen slik at partielle elektriske utladninger hadde oppstått.

De svært kraftige innvendige skadene på både kabelen og endeavslutningen tyder imidlertid på at selve havariet er en sekundæreffekt fra en annen aldringsmekanisme. Den elektriske forbindelsen mellom kobberskjermen og aluminiumslaminatet var svekket av oksidasjon. Tilfeldig kontakt mellom kobberskjermen og aluminiumslaminatet i kappeavtaket ser ut til å være bakgrunnen for havariet.

En observasjon var at alle kordelene i jordskjermen unntatt fem stk. var brent av. Dette kan skyldes selve feilen dersom den har utviklet seg over lang tid. Men mer sannsynlig er at det er en sammenheng mellom feilen og koblingen mellom kobberskjermen og aluminiumslaminatet. Under disseksjonen av sammenkoblingen, observerte SINTEF at loddingen hadde begynt å bli dårlig. Oksidasjon av sammenkoblingen mellom den fortinnede kabelskoen og aluminiumslaminatet ble observert. I tillegg ble det observert at ytre halvleder på kabelen under sammenkoblingspunktet var skadet. Dette tyder på at kontakten har begynt å bli dårlig. Da kan kappeavtaket bli et kritisk sted der tilfeldig elektrisk kontakt mellom kobberskjerm og aluminiumslaminat kan gi kraftig varmgang og skade på kabelen.

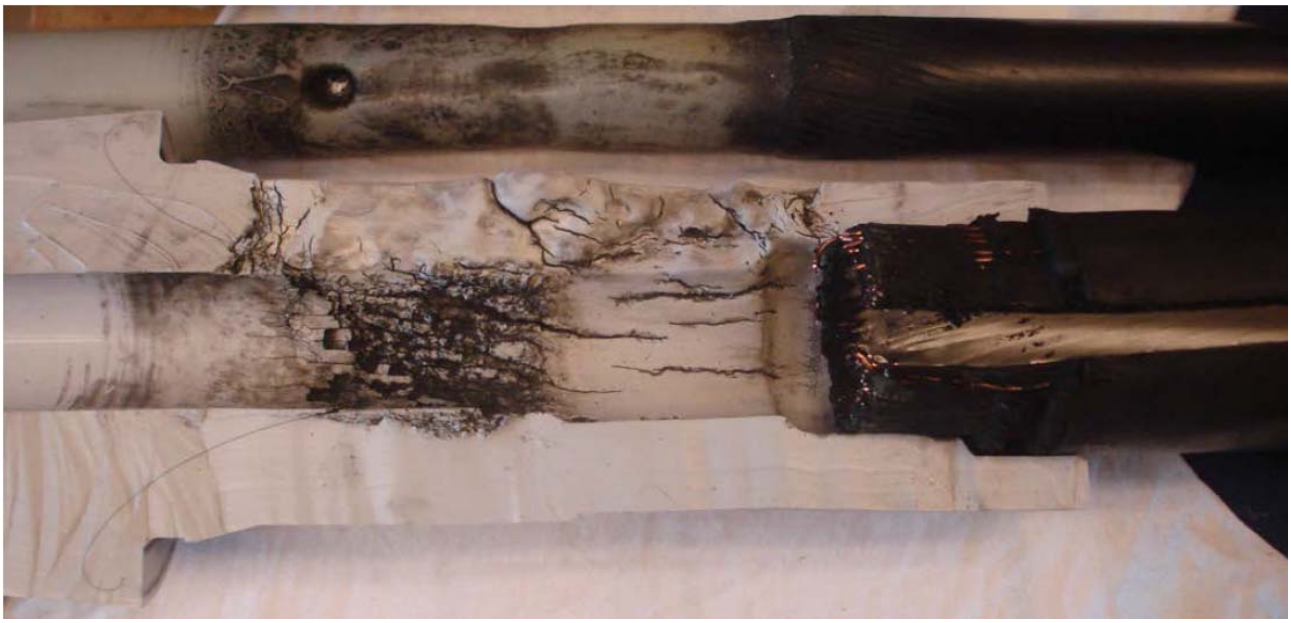
Det er indikasjoner på silikonkroppen at det har vært varmt i kappeavtaket, men det er ikke noe bevis da skadene på resten av silikonkroppen (stresskonusen) også er meget omfattende. Det er dessverre ikke mulig å avgjøre rekkefølgen under hendelsesforløpet med sikkerhet.

Selve havaristedet i endeavslutningen er lokalisert langt opp i stresskonusen; i et område der den

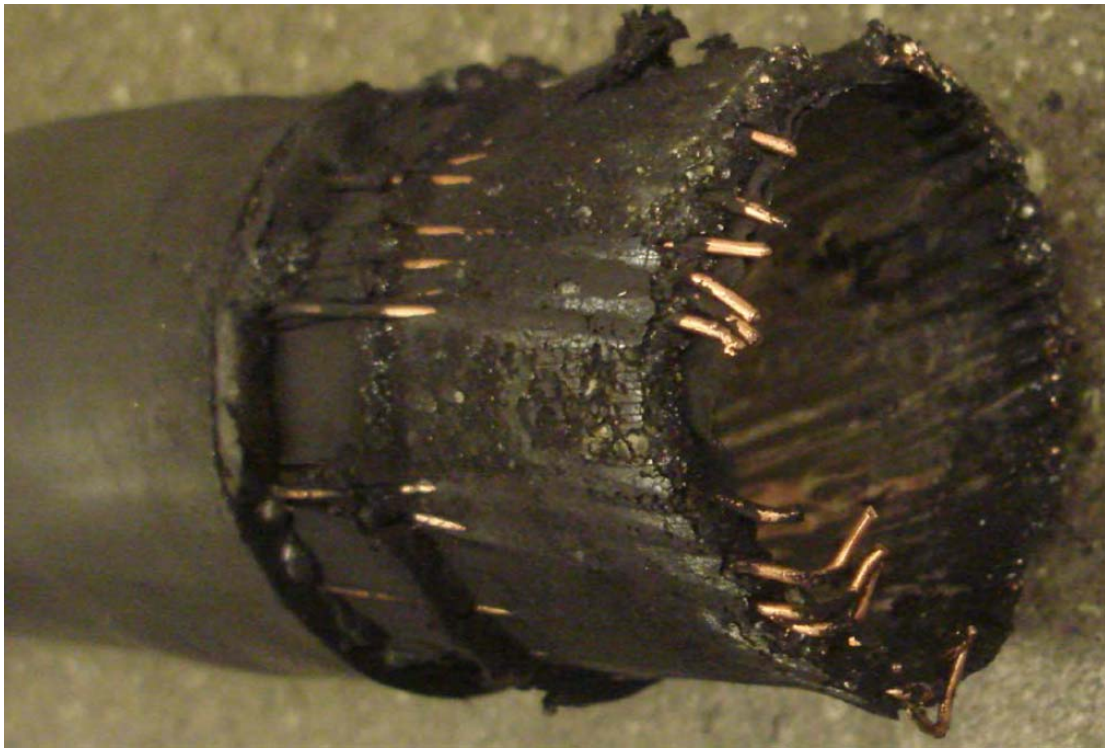
elektriske feltavlastningen akkurat har begynt. Prinsipielt skal ikke dette stedet være det mest kritiske, men erosjonssporene innvendig i silikonkroppen danner sprekker i silikonisolasjonen, dermed vil det oppstå partielle elektriske utladninger i hulrommene som dannes. PEX isolasjonen vil dermed raskt skades dersom utladningene pågår på et fast punkt over tid. Det er dessverre ikke mulig å fastslå om det er feilmontasje eller tilfeldig kontakt mellom kobberskjerm og aluminiumslaminat som forårsaket dette havariet. Men indikasjonene tyder på at tilfeldig kontakt mellom kobberskjerm og aluminiumslaminat har medvirket til havariet.

6.5.1 Bilder

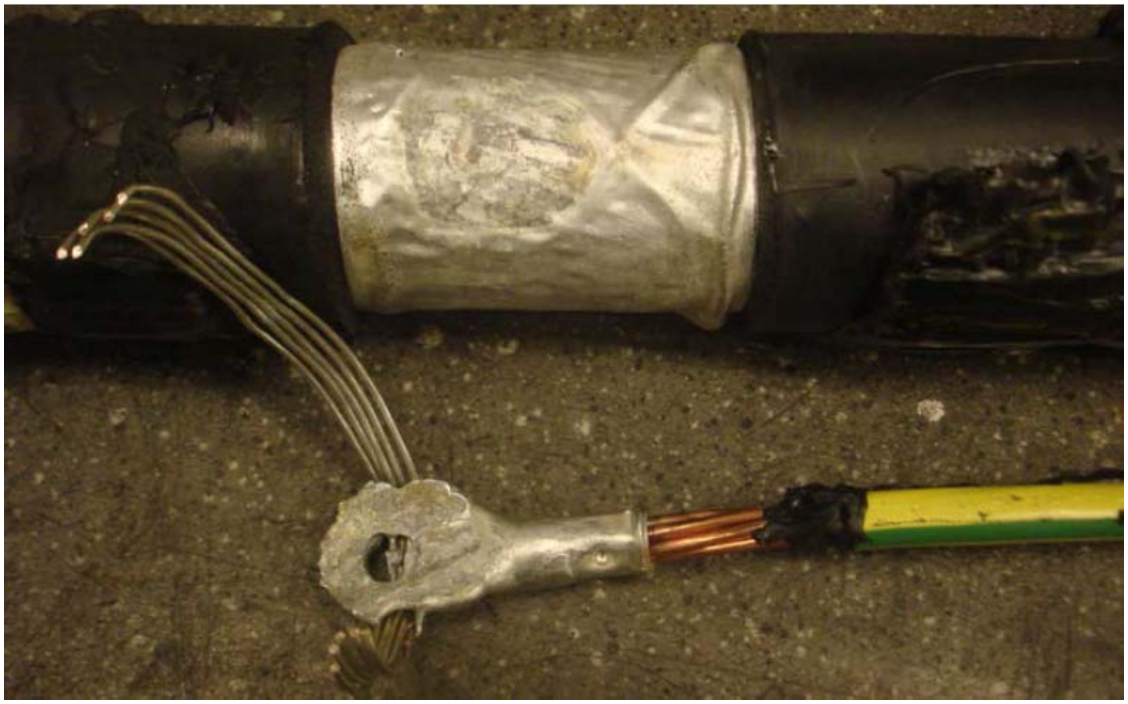
Figur 6.38: Kabelens ytre halvleder var brent bort helt ned til kappeavtaket. Man observerer også tydelige avtrykk fra jordtrådene i ytre halvlder; ca 5 cm innover kabelen (rød pil).



Figur 6.39: Ytre halvleder på kabelen er brent fullstendig bort i et området over kappeavtaket. Endeavslutningen er forsøkt plassert slik den var montert før havariet.



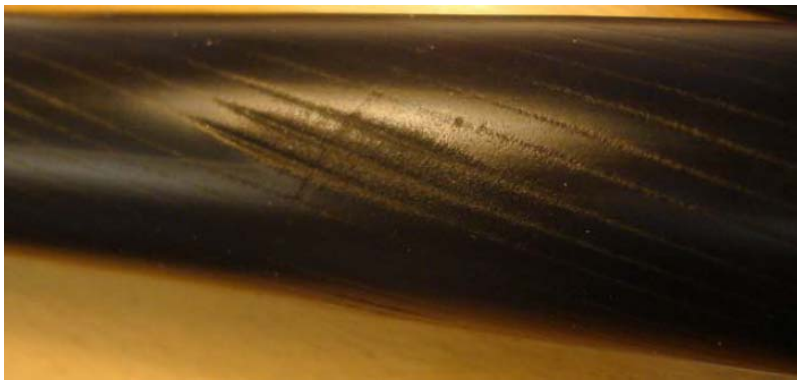
Figur 6.40: Ytre kappe etter at kappen med sin kobberskjerm er tatt av kabelen. Alle kobbertrådene unntatt 5 stk. var fullstendig avbrent før disseksjonen startet.



Figur 6.41: Bendsling (klippet) og kabelsko løsnet lett fra laminatet da heften var dårlig.

Figur 6.42: Nærbilde av kabelskoens loddeflate etter at den løsnet. Det er lite rent metall som kan lede strøm.

Figur 6.43: Overflaten av aluminiumslaminatet etter at kabelskoen falt av. Man ser at korrosjonen av aluminium er godt i gang.



Figur 6.44: Under koblingspunktet (kabelskoen) hadde det begynt å utvikle seg varme. Ytre halvleder var noe skadet av varmeutviklingen.

6.5.2 Målinger på anlegget

Det ble foretatt målinger av skjermstrømmen som flyter i koblingskablene mellom kobberskjermen og aluminiumslaminatet etter utskiftning av endeavslutningene. De grønne verdiene henviser til utbedret laminatjording. Som man ser av tabellen er det sannsynlig at flere av de resterende laminatjordingene er dårlige da det går liten strøm igjennom dem sammenlignet med de nyetablerte koblingene, og forventet strømverdi i laminatet. Laminatstrømmen finner sannsynligvis veien til jord via skjermtrådene, med ukontrollerbar varmeutvikling som mulig resultat.

Tabell 6.1. Måling av lederstrøm og laminatstrøm på anlegg. Alle verdier er avrundet til nærmeste hele ampere.

	Avgang 1				**Avgang 2**				**Avgang 3**				**Avgang 4**			
	Last	**L1**	**L2**	**L3**	**Last**	**L1**	**L2**	**L3**	**Last**	**L1**	**L2**	**L3**	**Last**	**L1**	**L2**	**L3**
Res.1	136	42	1	2	63	12	1	1	86	1	5	1	287	4	19	3

6.6 Feileksempel 6

[kapittel ikke skrevet enda]

6.7 Oppsummering feil

Som vist i eksemplene over har det skjedd flere hendelser tilknyttet feil i skjermtilkoblinger. Det er vanskelig å bedømme nøyaktig antall da hendelser kan være hemmeligstemplet, dysset ned eller praktisk talt ikke forstått og dermed feilaktig tilskrevet andre årsaker. Omfanget av feilene er sannsynligvis ikke tallrike, men de er svært dyre når de først oppstår. Siden feil i skjermtilkoblinger fortsatt skjer etter ca. 25 års erfaring med vanntette konstruksjoner, er det sannsynlig at kunnskap om problemstillingen er lite kjent blant kabel/utstyrs produsenter, installatører og eiere selv om jording av laminat er normal praksis ved 145 kV nivå og høyere. Hovedårsakene til at det skjer feil i skjermtilkoblinger er sannsynligvis:

- Ingen internasjonal standard for testing av skjermtilkoblingers strømføringsevne
- Dårlig design
- Uklar/vanskelig/villedende installasjonsprosedyre
- Dårlig håndtverk
- Mangel på kunnskap hos produsenter, grossister og kunder
- Uforutsett store strømmer i skjerm og laminat

7 Feilsøking

Feilforløpet for skjermtilkoblinger kan ofte være svært raske (timer og dager etter første spenningssetting). For andre anlegg er tiden lengre (måneder og år) Noen relativt enkle metoder kan bidra til å avdekke feilene før de blir alvorlige. Dette temaet vil man komme tilbake til i prosjektets arbeidspakke 4 "Feilsøking". Følgende kan sies om feilsøking etter skjermtilkoblingsfeil innledningsvis.

7.1 Visuell kontroll

For anlegg som er installert i luft og man har tilgang til å utføre visuell kontroll kan man se etter smelting, siging og bobledannelse i ytterkappen, gjerne i forbindelse med klammer eller bendslinger som i praksis klemmer laminat og skjerm tettere sammen. I områder hvor kabelen er sterkt bøyd vil man også kunne få sammentrykking av laminat og skjerm.

7.2 Kappetest

For kabler med ledende ytre sjikt for kappetest, vil man detektere hvorvidt ytterkappen har skader ved å påføre en spenning mellom kappe og skjerm. Punktering av kappen på grunn av smelting vil dermed bli synlig ved bruk av metoden. Dette kan være gunstig for kabler forlagt i tett trekant, der visuell undersøkelse av området inni trekanten og under kabelen er vanskelig.

7.3 Termografering

Termografering vil kunne måle små temperatur-endringer på overflaten av kappen til kabelen dersom den ikke er nedgravd. Det kan tenkes at enkelte kontaktpunkt ikke har tilstrekkelig temperatur til å danne "blærer" i kappen, og det vil derfor være nødvendig å benytte et mer fintfølende instrument. For skjøter må man skille mellom temperaturer som oppstår i midten av skjøten (knyttet til lederskjøten) og temperaturer ved ytterkanten av skjøten (skjermtilkoblingene). Det er en forutsetning at kabelen er relativt høyt belastet under disse målingene.

7.4 Beregninger og målinger av induserte strømmer og spenninger

Dersom det ikke er gjort i prosjekteringsfasen, kan det gjennomføres beregninger av induserte strømmer i skjerm og laminat for å vurdere om nivået overgår det utstyret er beregnet for. Man kan også vurdere effekten av å kun jorde kabelen i en ende (dvs beregne spenningsøkningen i laminat og skjerm). Dette vil danne grunnlag for en eventuell vurdering om en slik løsning kan foretrekkes. I vurderingen bør det også tas hensyn til at det kan finnes skade på svellebåndet, slik at det er direkte kontakt mellom kobberskjerm og laminat.

Det kan gjennomføres målinger av skjermstrømmer ved normal drift for å verifisere beregningene av skjermstrøm. Spenningsoppbygging i laminat og skjerm kan også måles for kabelanlegg der en ende er isolert.

8 AKTUELLE STANDARDER OG NORMER

For oppbygging og testing av kabel og utstyr til distribusjonsnett er aktuelle standarder og normer listet i Tabell 8.1. En ulempe for mellomspenning standardene sammenlignet med høyspenning standardene er at kabel og utstyr blir testet hver for seg. Dette er trolig en medvirkende årsak til at skjermtilkoblinger blir lite behandlet i normene, da de tilhører det fysiske grensesnittet mellom de to komponentene.

Tabell 8.1. Oppsummering av tilgjengelige normer og anbefalinger for tester av skjermtilkoblinger

Org.	Nummer	Tittel	Årstall	Kommentar
IEC	61442	Test methods for accessories for power cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)	2005	Beskriver metoder for kortslutningstester. Gjelder utstyr alene. Kun feilsituasjon simuleres i test.
CENELEC	HD 605	Electric cables - Additional test methods	2008	Beskriver kortslutningstest og jordslutningstest. Gjelder kabel alene. Kun feilsituasjon simuleres i test.
CENELEC	HD 620 S2:2010	Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3,6/6(7,2)kV up to and including 20,8/36(42)kV	2010	Beskriver de generelle og spesielle design kriteriene for kabel. Gjelder bare kabel.
IEC	60502-4	IEC 60502-4 Ed. 3.0: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)	2011	Beskriver kravene til kortslutningstest (2xIsc) og visuell undersøkelser. Gjelder utstyr alene. Kun feilsituasjon simuleres i test.
IEC	60502-2	Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV Um = 36 kV)	2014	Beskriver de generelle og spesielle design kriteriene for kabel. Gjelder bare kabel.
CENELEC	HD 629.1 S3	Test requirements on accessories for use on power cables of rated voltage from 3,6/6(7,2) kV up to 0,8/36(42) kV Part 1: Cables with extruded insulation	2015	Gjelder bare utstyr. Kun feilsituasjon simuleres i test.
CIGRÉ	TB446	Advanced Design of Metal Laminated Coverings: Recommendation for Tests, Guide to Use, Operational Feed Back	2011	Gjelder for kabelsystem > 36 kV. Kortslutningstest (5 x Isc) for kabel, skjøt og endemuffe i serie + visuell undersøkelse anbefales.

Nasjonale normer				Relevante tester kan være beskrevet i nasjonale normer. Mangler komplett oversikt.

8.1 CENELEC

I CENELEC standarden [16] for design av kabel HD620 del K (Norge) står følgende: "*Provided there is electrical contact between the wire screen and the metallic tape its conductance may be regarded as part of the metallic screen*". Nominelt kvadrat av skjermen skal være lik verdiene gitt i Tabell 4.1. Skjerm-resistansen skal ikke overstige verdiene gitt i Tabell 4.2. Standarden stiller ikke krav til kvaliteten på den elektriske kontakten mellom de metalliske lagene.

I CENELEC standarden [23] HD605 for test av kabel beskrives kortslutningstest og jordslutningstest for kabelens skjerm.

I CENELEC standarden [24] HD629 for test av utstyr står det følgende om endeavslutninger og skjøter: "Test: Thermal Short Circuit (screen). Test requirements: 2 Short circuits at I_{sc}, No breakdown. This test is only required for accessories that are equipped with a connection to, or adaptor for, the metallic screen of the cable."

Ingen av CENELEC normene involverer test av skjermtilkoblingens maksimale strømføringsevne, eller belastningsevne over tid.

8.2 IEC

I IEC standarden 60502-2 [25] for design av kabel er det ingen spesielle krav til tester.

I IEC standarden 60502-4 [26] for utstyr står følgende for skjøter og endeavslutninger: " Test: Thermal Short Circuit (screen). Test requirements: 2 Short circuits at Isc, No visible deterioration. This test is only required for accessories that are equipped with a connection to, or adaptor for, the metallic screen of the cable. Thermal short-circuit may be combined with the dynamic short-circuit."

Test metoden er beskrevet i 61442 [27]. Der står at kortslutningstrømmen I_{sc} og tiden t skal avtales mellom produsent og kjøper, slik at de faktiske kortslutningskreftene i nettverket blir hensyntatt. Kabel-lederen skal varmes opp til over driftstemperatur før testen utføres. Mellom de to kortslutningene skal kabelskjermen få anledning til å kjøle seg ned til mindre enn 10 K over temperaturen til foregående kortslutning.

Ingen av IEC normene involverer test av skjermtilkoblingens maksimale strømføringsevne, eller belastningsevne over tid.

8.3 Nasjonale anbefalinger

I Frankrike jobbes det med å oppgradere en nasjonale stanadard for tilkoblinger mot aluminiumslaminat. Arbeidet har pågått over noen år, og blir ledet av forskningsavdelingen til EDF. Oppgraderingen skal baseres på tester og resultat fra skjermtilkoblinger [4, 7, 28, 29].

IEEE 1142(2009) [8] er en amerikansk guide for valg, testing, bruk og installasjon av kabler med radiell og langsgående vanntetting. Den anbefaler at metalliske komponenter i radielle vanntettingsystem alltid skal jordes. Det vises til at halvledende taper eller isolerende lag mellom skjermtråder og laminat kan forhindre jording av dette laget. For MV vises det til kontaktblikk og klemmemekanismer for å oppnå kontakt som brukt av EDF i Frankrike. For HV vises det til sveising eller lodding som kontakteringsmetode, noe som er en "kunst" som krever erfaring og trening.

Det eksisterer sannsynligvis flere nasjonale standarder da det benyttes laminatkabel i flere land.

8.4 CIGRÉ

Historisk sett har CIGRÉ fokusert på kabelsystem med merkespenning over 36 kV. Flere aspektene er sannsynligvis gjeldende for distribusjonsnettnivå. TB446 [9] inneholder anbefalinger og brukererfaring med laminatkabel og skjermtilkoblinger. Brosjyren har en gjennomgang og vurdering av tidligere anbefalinger og eksisterende normer. I tillegg foreslår brosjyren noen nye tester for skjermtilkoblinger implementert i IEC normene for høyspenning.

Testen utføres på kabel, skjøter, endeavslutninger og alle skjermtilkoblinger simultant. Den gjennomføres som en kortslutningsprøve hvor strømmen flyter gjennom kabelskjermen, skjermtilkoblingen og lederen til jord. Det skal utføres 5 kortslutninger. Ledertemperaturen skal holdes stabilt ved 90 til 95 °C i 2 timer før testen. Kabelskjermen skal tillates å kjøle ned til innen 5 K av temperatur før test. Testen evalueres med en visuell undersøkelse. Anbefalingene har foreløpig ikke blitt tatt inn i høyspenning standardene [30, 31].

Brosjyren hevder videre at termiske sykler er beskrevet i typetestprogrammet til høyspennings standardene. Utvidelse av type-test, rutine-test eller tester etter installasjon er ikke vurdert å være nyttig. Det understrekes at termiske sykler fra typetestprogrammet til høyspenningsstandarden ikke tester strømgrensene for skjermtilkoblingene.

Basert på driftserfaring sier TB446 at uavhengig av kabeldesign (åpent eller lukket design) bør det være god elektrisk kontakt mellom skjermtråder og laminat gjennom hele levetiden til kabelen. Dette kan oppnås enten ved kontakt ved kabelutstyret eller underveis langs kabelens utstrekning. Videre anbefales det ikke å benytte rullefjær eller press-kontakt løsninger for strømmer over 200 A. Skjermtråder bør heller ikke buntes da dette kan føre til varmgang. Press-kontakt løsninger kan benyttes når kablene er ensidig jordet siden strømbelastningen da er tilnærmet null. I kabelanlegg med spenning over 150 kV er forventet kortslutningsytelse så stor at press-kontakt løsninger ikke er anbefalt.

TB476 [32] inneholder praktiske anbefalinger rundt arbeid med skjermtilkoblinger.

8.5 Testing av kontakt

IEC standard for testing av trykk og mekaniske konnektorer 61238-1 [33] kan være nyttig for testing av skjermtilkoblinger. Metoden involverer termiske sykler, kortslutningstester og måling av resulterende kontakt-resistans. Dette vil være relevant for simulering av normal drift og feilpåkjenninger for skjermtilkoblinger.

9 LITTERATURREFERANSER

[1] Faremo, Benjaminsen, Steen, Olsen, “Evaluation of Aspects Important for the Long Term Service Performance of Axial and Radial Watertight XLPE Cables,” Jicable, 1999.

[2] Faremo, “Vanntette PEX-kabler i fordelingsnettet,” *Xergi,* vol. 4-98, 1998.

[3] Lervik, Solheim, Kvaale, Snarteland, “XLPE Cables with Aluminium Laminated Sheath,” Jicable, Versailles, 2015.

[4] Tourcher, Fortin, Tambrun, “Connection to MV Longitudinal Aluminium Screen,” Jicable, 2015.

[5] Sivertsvoll, Rønningen, Faremo, Lervik, Hønsi, Wilnes, Jacobsen, Halvorson, "Problemstillinger knyttet til folieskjermede enlederkabler ved store kabelstrømmer." pp. 235-247. NEF Teknisk Møte 2014

[6] Sivertsvoll, Rønningen, Faremo, Lervik, Hønsi, Wilnes, Jacobsen, Halvorson, “Watertight Cable Designs in Hydropower Generation Plants,” Jicable, Versailles, 2015.

[7] AFNOR, "NF C33-014: Insulated cables and their accessories for power systems Screen tape for single-core cables of rated voltages from 6/10 (12) kV to 18/30 (36) kV," AFNOR, Paris La Défense, France, July 1995.

[8] IEEE, 1142, *Guide for the selection, testing, application, and installation of cables having radial-moisture barriers and/or longitudinal water blocking*, 2009.

[9] WG_B1.25, *TB 446 Advanced Design of Metal Laminated Coverings: Recommendation for Tests, Guide to Use, Operational Feed Back,* 978-2-85873-135-0, Cigré, 2011.

[10] Energi, Norge. "Nettstruktur og organisering," 17.februar, 2017; https://www.energinorge.no/fagomrader/stromnett/kraftsystemet/nettstruktur-og-organisering/.

[11] Delbekk, “Jordslutningsvern i høgspente (opptil 24 kV) fordelingsnett,” Energi og Miljø, NTNU, 2003.

[12] Guldal, “Jordfeildeteksjon i spolejorda distribusjonsnett,” Energi og Miljø, NTNU, 2007.

[13] NEK, FEF *Forskrift om elektriske forsyningsanlegg med veiledning*, 2006.

[14] IEC 60287, *Electric cables - calculation of the current rating*, 2006.

[15] Lervik, *AN 19.30.65 Strøm- og potensialfordeling mellom Al-laminat og Cu-skjerm*, 1994.

[16] CENELEC HD620 S2, *Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3,6/6(7,2)kV up to and including 20,8/36(42)kV*, 2010.

[17] Eberg, Hvidsten, Bergset, “Assessment of Overheating in XLPE MV Cable Joints by Partial Discharge Measurements,” Jicable, Versailles, 2015.

[18] SINTEF ENERGI, “Metoder for sammenkobling av Al-laminat/kobberskjerm i vanntette PEX kabler,” in INFO-BLAD, 2015.

[19] Hvidsten, *AN14.14.19. Disseksjon av havarerte skjøter for Skagerak Elektro*, SINTEF Energi, 2014.

[20] Lervik, *AN 15.14.09 Vurdering av Grunnåi-kabelen*, SINTEF Energi, 2015.

[21] Hvidsten, *AN 02.14.39 Feilanalyse av to (...) 145 kV PEX-endeavslutninger havarert i drift ved Hydro Aluminium (Sunndalsøra).* , SINTEF Energi, 2002.

[22] Faremo, "502001535 Undersøkelser av havarert 72 kV (...) avslutning," 2017.

[23] CENELEC HD605 S2, *Electric Cables Additional Test Methods*, 2008.

[24] CENELEC HD 629.1 S2, *Test requirements on accessories for use on power cables of rated voltage from 3,6/6(7,2) kV up to 20,8/36(42) kV Part 1: Cables with extruded insulation*, 2015.

[25] IEC 60502-2, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV Um = 36 kV)*, 2014.

[26] IEC 60502-4, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)*, 2011.

[27] IEC, "61442 ed.2.0," *Test methods for accessories for power cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)*, 2005.
[28] Tourcher, Tambrun, “Connection to MC cable aluminium screen”, Jicable, Versailles, 2011.
[29] Tourcher, Tambrun, “Connection to MV cable aluminium screen”, CIRED, Stockholm, 2013.
[30] IEC, "60840," *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) - Test methods and requirements*, 2011.
[31] IEC, "62067," *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (Um = 170 kV) up to 500 kV (Um = 550 kV) – Test methods and requirements*, 2011.
[32] B1.22, *TB476 Cable Accessory Workmanship on Extruded High Voltage Cables*, CIGRÉ, 2011.
[33] IEC, "61238-1 Ed.2.0," *Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 30 kV (Um = 36 kV) – Part 1: Test methods and requirements*, 2003.

10 VEDLEGG A – ENSIDERS OPPSUMMERING TIL PROSJEKTMEDLEMMENE

[Kapittel er ikke skrevet enda]

SINTEF

Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no