

	L2	Zwart/groene verkleuring aan bovenzijde; gele aanslag aan zijkant
	L3	-
Veld 5: Maagdtheater	L1	Gele aanslag aan onderzijde; zwart/groene aanslag aan bovenzijde
	L2	Duidelijke boomvormige ontlading <sup>8</sup>
	L3	Zwarte aanslag aan onderkant stift; geen tracking, mogelijk lichte sproei vanaf onderkant stift

### Waarnemingen railgeleiders

- Op het uiteinde van de fase L3 rail van veld Transformator 1 is een duidelijk boogspoor zichtbaar. De zeskantbouten van de beugel die is aangebracht om een railverlenging naar een volgende bak mogelijk te maken zijn deels afgesmolten (Foto 5-11). Tegenover dit raileinde zit de stalen plaat die de raildoorvoer afdekt. Hierop zijn ook vlamboogsporen waargenomen. Vergelijkbare, maar kleinere vlamboogsporen zijn aangetroffen op de railkoppeling van fase L3 van het naastliggende veld Transformator 2. Bij nadere inspectie van de raildoorvoer van fase L3 van veld Transformator 3, zijn hierop ook kleine vlamboogsporen aangetroffen op het koperen aansluitvlak op de railgeleider.

- De uiteinden van de raildoorvoerisolatoren van fase L3 fasen van alle velden in de rechterbak vertonen ontledingssporen (zie bijvoorbeeld Foto 5-12). Het betreft de velden:
  - Magnefix
  - Transformator 3
  - Transformator 2
  - Transformator 1.

Deze sporen lijken minder op de boomvormige structuren op de bovenzijde (zie bijvoorbeeld foto #35, Bijlage E) maar lijken eerder te duiden op een doorslag met aanzienlijke stroomsterkte en verhitting, waardoor het giethars barsten is gaan vertonen. Na schoonmaken zijn de overeenkomende boogvoetpunten op de bakwand van het railcompartiment aangetroffen en, ingeval van de afgebeelde fase L3 doorvoer van veld Magnefix, op de binnenzijde van het toegangsluik dat zich hier bevindt.

- Op een aantal isolatiekokers van de fase L3 railkoppelingen is bezinksel ('sludge') waargenomen. Na schoonmaken wordt een (vrijwel) volledig doorslagkanaal zichtbaar (foto #47, Bijlage E). Ook hier zijn boomvormige structuren aangetroffen. Dit duidt erop dat het doorslagkanaal ontstaan is als gevolg van de aanwezigheid van deelontladingen.

<sup>8</sup> Reeds bij eerder bezoek vastgesteld en daarom gedemonteerd voor mogelijk verder onderzoek



**Foto 5-11 Railkoppeling op uiteinde rail fase L3**



**Foto 5-12 Doorslagspoor op onderzijde raildoorvoerisolator**

#### **Waarnemingen bak**

- De coating op de bodem van het railcompartiment en rondom de kabeldoorvoeren van de rechterbak is chemisch aangetast (bijv. Foto 5-13). Er is sprake van
  - bruine verkleuring
  - blaasvorming
  - onthechting

De coating kan met behulp van een droge doek of licht schrapen zeer eenvoudig van het oppervlak verwijderd worden. Het onderliggende metaal is niet geoxideerd, maar vertoont wel een vlekkerig/wolkvormig patroon vanwege de onthechting van de coating. Op de verticale bakdelen is een dergelijke degradatie van de coating nergens waargenomen.

Voor de linker bak lijkt de degradatie van de coating zich voornamelijk te beperken tot een klein gebied rond de fasen L2 en L3 van veld 5 (Maagdtheater, Foto 5-14). De bodem van het railcompartiment is voor deze bak niet geïnspecteerd. Wat verder opvalt is dat de coating op verticale bakdelen niet of nauwelijks is aangetast.



**Foto 5-13 Vlekkerige en wolkvormige aantasting van de coating op de bodem van het rechter railcompartiment**



**Foto 5-14 Blaasvorming en bruine verkleuring van de coating rondom de kabeldoorvoeren van fasen L2 en L3 van veld 5**



### Waarnemingen kabeldoorvoeren

- Een aantal kabeldoorvoeren vertoont radiale sporen rondom het prikcontact, vermoedelijk door chemische veroudering. Tevens zijn er op sommige isolatoroppervlakken degradatiesporen aangetroffen en vertoont het isolatoroppervlak een aantasting in de vorm van een sinaasappelhuid. (Foto 5-15).
- De kabeldoorvoer van fase L2 van het veld HVS-1 vertoont een doorslagspoor dat over ca. 270° rondom het isolatoroppervlak loopt (Foto 5-16).



**Foto 5-15 Radiale sporen op de kabeldoorvoerisolator rondom het contact**



**Foto 5-16 Doorslagspoor op de kabeldoorvoerisolator van fase L2 van veld HVS-1**

## 5.2 Bevindingen laagspanningsrek

Hieronder zijn de belangrijkste bevindingen kort weergegeven. Het onderzoek heeft zich met name gericht op het laagspanningsrek behorende bij Transformator 3, omdat dit de meeste schade vertoont. De laagspanningsrekken van Transformator 1 en 2 vertoonden alleen oppervlakkige roet- en corrosie.

Voor een volledig overzicht van alle bevindingen met ondersteunend fotomateriaal wordt verwezen naar Bijlage C, tabel C-10.

### Waarnemingen

- Ook na het verwijderen van vuil en aanslag zijn geen boogvoetpunten op het laagspanningsrek aangetroffen.
- Na de visuele inspectie zijn alle laagspanningszekeringen losgenomen en doorgemeten. Alle zekeringen zijn nog intact. Dit betekent dat er geen kortsluitstromen of langdurige overbelastingen zijn opgetreden in de betreffende velden.



**Foto 5-17 Overzicht laagspanningsrek station Hoogstraat**

### 5.3 Bevindingen transformatoren

Op de drie transformatoren zijn geen bijzonderheden aangetroffen. Er zijn geen sporen van lekkage, verkleuring en uitzetting.

De gele kappen over de eindsluitingen zijn gesmolten. Nadere analyse wijst uit dat dit te wijten is aan de hitte van de brand in het station. Transformator T1 vertoont sterke smeltsporen in de 10kV-kabeleindsluiting, zie volgende paragraaf.

### 5.4 Bevindingen onderzoek kabeleindsluitingen

De kabeleindsluitingen zijn in maart 2019 onderzocht in het laboratorium van DNV GL. De belangrijkste bevindingen worden hier kort weergegeven. Voor een volledig overzicht van alle bevindingen met ondersteunend fotomateriaal wordt verwezen naar Bijlage F.

De drie kabeleindsluitingen van transformator 1, 2 en 3 zijn geïsoleerd met bitumen, een teerachtige substantie (zie Foto 5-18). Om de eindsluitingen inwendig te kunnen onderzoeken is in een grote oven op 120 °C het bitumen vloeibaar gemaakt zodat het uit de eindsluiting kan vloeien (Foto #48 in Bijlage F).

Na het verwijderen van het bitumen zijn de eindsluitingen te onderzoeken. In de eindsluitingen van transformator 1 en 2 zijn geen afwijkingen geconstateerd. In die van transformator 3 is een kleine beschadiging aangetroffen op een stuk kunststof om de geleider van fase L1. Vanwege de nog steeds aanwezige bitumen, was in eerste instantie niet eenduidig vast te stellen of dit een op zichzelf staande beschadiging is (niet gerelateerd aan een doorslag in de eindsluiting) dan wel een beschadiging ten gevolge van een storing (kortsluiting) in de eindsluiting.

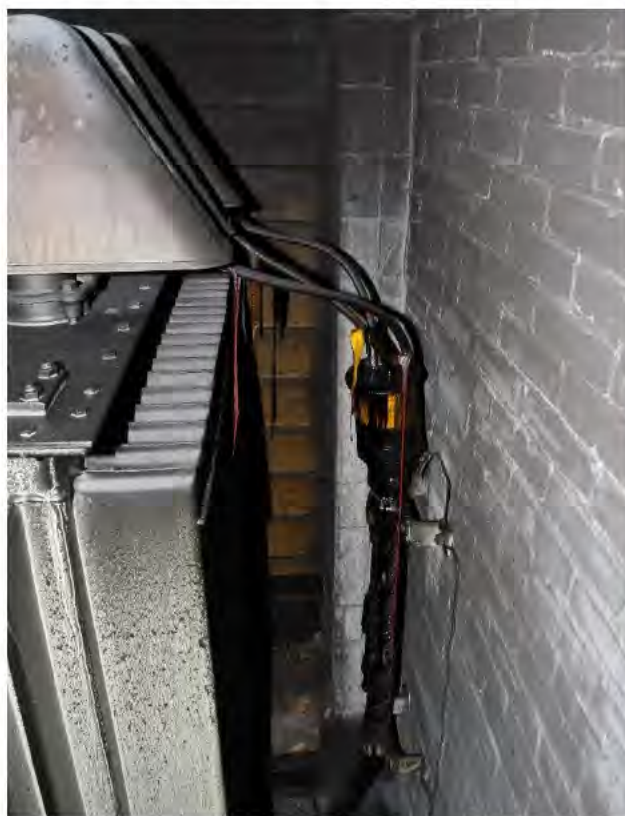
Om die reden is vervolgens de eindsluiting van transformator 3 een tweede maal verwarmd in een oven bij een hogere temperatuur (200 °C). Na deze poging bleek de plek met de potentiële beschadiging nog steeds deels bedekt met bitumen. Verder onderzoek heeft echter aangetoond dat het deel van de eindsluiting onder de gele koker met epoxy (giethars) geïsoleerd is. Dit giethars smelt niet maar kan wel mechanisch verwijderd worden. Na het verwijderen van giethars rondom de plek met de vermoedelijke beschadiging (zie Foto 5-19 en foto's #50 en #51 in Bijlage F) is gebleken dat er geen sporen zijn die duiden op een kortsluiting in de eindsluiting.

Hoewel niet alle epoxy kon worden verwijderd is het naar mening van DNV GL zeer onwaarschijnlijk dat een eventuele doorslag binnen het epoxy materiaal kan optreden zonder duidelijk zichtbare uiterlijke



beschadigingen. Epoxy is een hard, massief, materiaal en toont bij een interne doorslag doorgaans overduidelijke beschadigingen aan de buitenzijde (breuken, barsten, weggeslagen materiaal). De afwezigheid daarvan maakt het zeer waarschijnlijk dat de beschadiging het gevolg is van mechanische schade tijdens montage.

Concluderend: de kabeleindsluitingen van transformatoren 1, 2 en 3 vertonen geen schade die te relateren is aan de oorzaak van deze storing.



**Foto 5-18 Kabeleindsluiting van Transformator 1**



**Foto 5-19 Binnenzijde van de eindsluiting van Transformator 3 na verwijderen bitumen 1) is de kabelisolatie, 2) is de bitumen isolatie van de eindsluiting, 3) zijn de oneffenheden als gevolg van snij, hak en breekwerkzaamheden tijdens ontmanteling.**

## 5.5 Analyse van oliequaliteit en lekkage

De kwaliteit van een olie-gevulde schakelinstallatie hangt sterk samen met de kwaliteit van de olie en met eventuele lekkage van olie. Bij de inspecties in station Hoogstraat is olie waargenomen buiten de schakelkolommen. Om te onderzoeken of dit een gevolg is van de storing of mogelijk heeft bijgedragen aan de storing is nader onderzoek gedaan naar de kwaliteit van de olie, en naar de mogelijkheid van olie lekkage.

### 5.5.1 Olieanalyse

Er zijn drie oliemonsters genomen uit de COQ-installatie, en vervolgens geanalyseerd in het DNV GL olielaboratorium. Het betreft monsters uit de volgende delen van de installatie:

- 1 de rechterbak van de COQ-installatie (met onder meer de transformatorvelden)
- 2 de schakelkolom van fase L1 / transformatorveld 3 die geen kortsluiting heeft afgeschakeld
- 3 de schakelkolom van fase L2 / transformatorveld 3 die de eerste kortsluiting heeft afgeschakeld.

De resultaten van de olieanalyse worden hieronder weergegeven, in de latere paragrafen besproken.

Omschrijving monsternummer : 314556

bak rechts, Enexis Coq

Water *	IEC 60814	83	mg/kg
Uiterlijk	IEC 60422/ISO 2049	helder	
Kleurnummer	IEC 60422/ISO 2049	1.5 - 2.0	
Vaste verontreinigingen	IEC 60422/ISO 2049	aanwezig	
Zuurgetal *	IEC 62021-1	0.05	g KOH/kg
Corrosieve eigensch. tov Cu, 150 °C	IEC 62535	Niet Corrosief	

Omschrijving monsternummer : 314557

BoZ, Tr.3 L1, schakelaar, helder

Uiterlijk	IEC 60422/ISO 2049	helder	
Kleurnummer	IEC 60422/ISO 2049	0.5 - 1.0	
Vaste verontreinigingen	IEC 60422/ISO 2049	afwezig	
Zuurgetal *	IEC 62021-1	0.03	g KOH/kg

Omschrijving monsternummer : 314558

BoZ, Tr.3, L2, schakelaar, troebel

Uiterlijk	IEC 60422/ISO 2049	troebel	
Kleurnummer	IEC 60422/ISO 2049	afwijkend / groenige kleur	
Vaste verontreinigingen	IEC 60422/ISO 2049	aanwezig	
Zuurgetal *	IEC 62021-1	0.03	g KOH/kg

\*Analyse uitgevoerd via methode geaccrediteerd conform ISO 17025

## 5.5.2 Oliepeil en oliekwiteit

Bij aanvang van het nader onderzoek aan de COQ-schakelaars in het DNV GL laboratorium op 30 januari 2019 is vastgesteld dat 2 schakelkolommen in het geheel geen olie meer bevatten.

Op 19 februari 2019 is ten behoeve van de inspectie van het railsysteem de schakelaar van veld Markt uit de COQ-installatie gehesen en na inspectie weer teruggeplaatst. Tijdens latere inspecties op 21 maart 2019 is dezelfde schakelaar uit de installatie gehesen en is waargenomen dat er verse olie op het oppervlak van alle drie de fasen van de onderliggende raildoorvoerisolator aanwezig was. Op alle overige isolatoren in de installatie is alleen een droog residu aangetroffen.

Om na te gaan in hoeverre een dergelijke lekkage gangbaar is, en of er een mogelijke relatie is tussen olie lekkage en de opgetreden storing, is op 21 maart 2019 het olieniveau van alle in station Hoogstraat aanwezige schakelkolommen gepeild (dat wil zeggen dat de hoogte van het olieniveau ten opzichte van de bodem van de schakelkolom is gemeten. Daarbij is tevens de kwaliteit van de olie visueel beoordeeld. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel. Hieruit blijkt dat:

- bij alle schakelkolommen olie lekkage uit de schakelkolom is waargenomen
- de olie in alle schakelaars helder is behalve in die van de velden transformator 2 en 3.



**Tabel 5-3 Oliepeil en -kwaliteit schakelkolommen op site. De hoogte kan niet vertaald worden naar het oliepijl voor de storing**

Veld	Fase	Oliepeil [cm]	Beoordeling olie
HVS-1	L1	25	Helder
	L2	54	Helder
	L3	6	Helder
Markt	L1	12	Helder
	L2	50	Helder
	L3	3	Helder
Keizerstraat	L1	0	Helder <sup>9</sup>
	L2	15	Helder
	L3	4	Helder
Stulemeyerlaan	L1	3	Helder
	L2	0	Helder <sup>9</sup>
	L3	22	Helder
Magnefix	L1	23	Helder
	L2	2	Helder
	L3	21	Helder
Maagdtheater <sup>10</sup>	L1	Niet gemeten >0	Helder
	L2	Niet gemeten >0	Helder
	L3	Niet gemeten >0	Helder
Transformator 1 <sup>10</sup>	L1	<20	Helder
	L2	<20	Helder
	L3	Niet gemeten >0	Helder
Transformator 2 <sup>10</sup>	L1	<50	Zwart
	L2	<50	Honingkleurig
	L3	0	Niet vast kunnen stellen
Transformator 3 <sup>10</sup>	L1	<50	Zwart
	L2	<50	Zwart
	L3	<2	Zwart

## 5.5.3 Olie en onderhoud

### 5.5.3.1 Afkeurcriteria

Bij normale bedrijfsvoering zal in de schakelkolommen koolvorming in de olie optreden als gevolg van het afschakelen van normale bedrijfsstromen en (incidentele) kortsluitingen. Wanneer de olie echter significant vervuild wordt door koolvorming is het blus- en isolatiegedrag van de schakelaar niet meer gegarandeerd en moet de olie vervangen worden. Enexis hanteert daarbij als afkeurcriterium voor olie in de schakelkolommen /6/:

- 3 maal afschakelen van een kortsluiting, óf
- een donkerbruine of zwarte kleur van de olie (kleurgetal >2.5), óf
- zwevende draden of vlokken in de olie.

In de originele handleiding van de COQ O-<sup>1</sup>/<sub>4</sub>-10 worden andere afkeurcriteria voor schakel- en isolatieolie gehanteerd (/9/, /10/):

- doorslagveldsterkte <80 kV/cm, óf
- verlieshoek (tan δ) van het Coqolite >10%, óf
- olie volledig ondoorzichtig door koolvorming.

<sup>9</sup> Er was nog een klein residu om dit vast te stellen met een pijlstok die nat was van de olie uit de schakelkolom. Het residu was helder.

<sup>10</sup> Dit veld is naar DNV GL getransporteerd en daar onderzocht. Hierbij is het olieniveau niet gepeild. Het oliepeil kan geschat worden op basis van de hoeveelheid olie die uit de kolommen afgepompt is.

### 5.5.3.2 Oliepeil

#### Bevindingen

- Ten aanzien van het oliepeil adviseert de leverancier, COQ, om de oliestand in de bak en de schakelkolommen elke 5 jaar te controleren (/9/, /10/).
- Enexis schrijft voor de oliestand in de bak en de schakelkolommen te controleren tijdens het 3<sup>e</sup> orde periodiek onderhoud (waarvan het interval onbekend is) en bij het doorstromen van de transformatorvelden (3-jaarlijks).

#### Analyse DNV GL

Uit de onderhoudsorders (/4/) blijkt dat op 1-3-2010 periodiek onderhoud is gepleegd aan de velden Transformator 1, 2 en 3, en dat deze op 24-2-2016 doorgestroomd zijn. Voor het doorstromen is hier een 3-jaarlijks interval aangegeven. Het voorgeschreven interval voor periodiek onderhoud is noch uit /4/ noch uit /6/ te herleiden. Beide onderhoudstaken zijn sinds 2004 éénmaal opgenomen in de onderhoudsorders, maar wel beperkt tot de drie transformatorvelden. Hieruit kan geen consistent interval afgeleid worden.

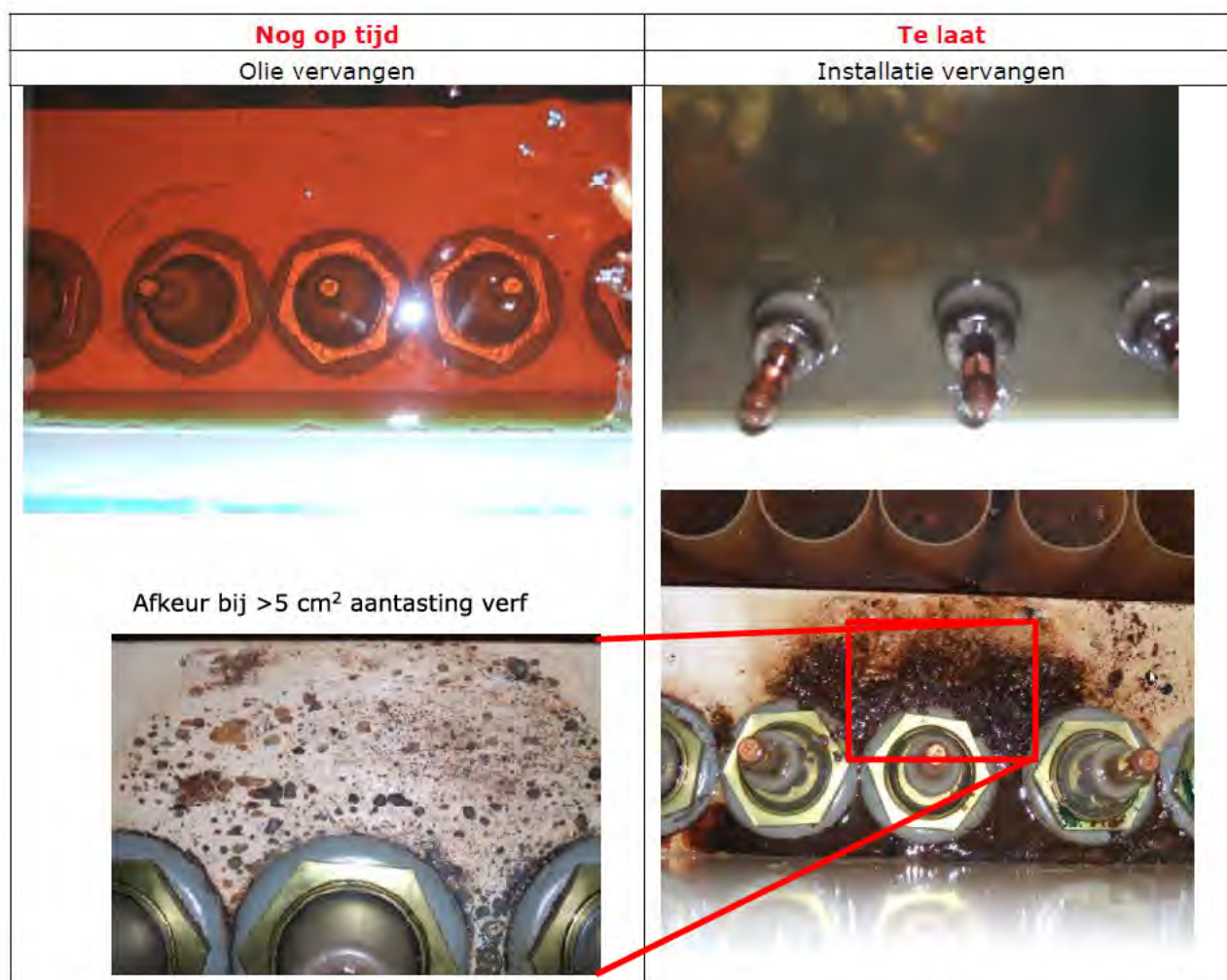
Zowel bij het doorstromen als bij het periodiek onderhoud aan de schakelaars dienen de schakelaars gelicht te worden om de 'controle van bak en schakelaar' uit te voeren /6/. Hierbij dient tevens geïnspecteerd te worden op de aanwezigheid van drab en roest conform onderstaande figuur.

Resumerend kan gesteld worden dat het oliepeil in de schakelaars van de velden Transformator 1,2 en 3 én het oliepeil in de bak<sup>11</sup> in de periode vanaf 2010 vermoedelijk met een 6-jaarlijks interval gecontroleerd zijn. Verdere informatie over controle van oliestanden is niet beschikbaar.

---

<sup>11</sup> Omdat beide bakdelen met elkaar in verbinding staan is het oliepeil links en rechts identiek





**Figuur 65-3 Visuele inspectie drab en roest in COQ-installatie volgens Enexis voorschrift /6/**

### 5.5.3.3 Oliebemonstering en analyse

#### Bevindingen

- De leverancier, COQ, adviseert om ten minste elke 5 jaar <sup>12</sup> een monster van de isolatieolie te nemen en dat te beoordelen op doorslagspanning, vochtgehalte en kleurgetal; zo nodig dient de olie verversst te worden. Bij een te hoog vochtgehalte wordt een tan-δ meting aan Coqolite isolatie geadviseerd.
- Enexis voert een eigen beleid:
  - bepaling van de zuurgraad wordt niet van toepassing geacht voor COQ-installaties
  - bepaling van de doorslagspanning wordt niet toegepast omdat de omgevingscondities bij de monsternamen een te grote invloed zouden hebben op de gevonden doorslagwaarde
  - bepaling van het vochtgehalte in olie wordt niet toegepast omdat deze te veel af zou hangen van de olietemperatuur en omgevingstemperatuur. Een visuele inspectie op de aanwezigheid van drab en roest wordt afdoende geacht om het vochtgehalte te beoordelen
  - aanvullend wordt gesteld dat dak-lekkage een groot risico op 'inwatering' bij COQ-installaties inhoudt. Na constatering en reparatie van dak-lekkage wordt daarom altijd een visuele inspectie op de aanwezigheid op water in de installatie uitgevoerd

<sup>12</sup> Voor zeer stoffige en/of vochtige omgevingen wordt jaarlijkse monsternamen aanbevolen

- conform voorschrift /6/ dient donkerbruine of zwarte olie vervangen te worden. Hierbij wordt een kleurgetal  $>2.5$  gehanteerd.

### Analyse DNV GL

Op basis van de beschikbare informatie kan alleen aannemelijk gemaakt worden dat de olie in de schakelkolommen van velden Transformator 1, 2 en 3 in 2010 en 2016 visueel geïnspecteerd is op verkleuring. Hierbij zou de rechterbak geïnspecteerd dienen te zijn op de aanwezigheid van drab, verfaantasting en/of roest. DNV GL kan conform onderhoudsvoorschrift /6/ niet vaststellen of dit gebeurd is. Enexis hanteert als afkeurcriterium dat drab of verfaantasting  $>5 \text{ cm}^2$  beslaat.

Na een dak-lekkage dient een visuele inspectie op de aanwezigheid op water in de installatie uitgevoerd te worden. Onbekend is of dit gebeurt door de hoeveelheid water in de installatie vast te stellen (aan de hand van het grensvlak water-olie op de bodem), of dat dit gebeurt met de eerder omschreven controle op drab of roest. Op 22-1-2011 is een dak-lekkage vastgesteld, welke op 16-3-2011 gerepareerd is. De onderhoudshistorie vermeldt niet of hierbij gecontroleerd is op de aanwezigheid van water in de COQ-installatie.

### 5.5.3.4 Aanwezigheid van vocht of water in de isolatie

#### Bevindingen

- De leverancier, COQ, schrijft voor om bij een hoog vochtgehalte in de olie, of bij twijfel aan de integriteit van de installatie, de  $\tan\delta$  van de Coqolite isolatie te meten /9/ en /10/. Bij een  $\tan\delta$  waarde hoger dan 10% dient te installatie gedroogd of vervangen te worden.
- Enexis acht een  $\tan\delta$  meting niet zinvol en ligt dat uitvoerig toe in haar voorschrift /6/. De meting vereist dat de isolatie uit de installatie verwijderd wordt, hetgeen tijdrovend is. Daarnaast is er volgens Enexis geen duidelijk verband tussen de gevonden  $\tan\delta$  en de (rest)levensduur van de isolatie. Als alternatief hanteert Enexis een visuele beoordeling op aantasting en verkleuring zoals door kruipsporen. Dit zijn in de filosofie van Enexis concrete signalen, en omdat het om een traag degradatieproces gaat is er voldoende reactietijd om te interveniëren.

### Analyse DNV GL

Er wordt niet beschreven in documentatie of de aanbevolen visuele beoordeling op aantasting en kruipsporen alleen op Coqolite isolatie wordt toegepast of ook op de railisolatoren. Vanwege de aanwezigheid van de Coqolite kokers is het zicht op deze isolatoren beperkt. Als er slechts 1 schakelaar gelicht is, is de lichtinval op de raildoorvoerisolatoren zeer beperkt en moet er wel zeer gedetailleerd geïnspecteerd worden om dit vast te stellen. In tegenstelling tot de beoordeling op drab/roest zijn er geen richtlijnen of voorbeelden gegeven welke mate van aantasting toelaatbaar is.

Ook is voor periodiek onderhoud en doorstromen niet gespecificeerd dat er een controle op aanwezigheid van water of vocht dient plaats te vinden op eender welke wijze. Daarmee is niet bekend of een visuele inspectie op kruipsporen – als alternatief voor een  $\tan\delta$  meting – daadwerkelijk periodiek plaatsvindt.

Tevens dient opgemerkt te worden dat de Coqolite isolatie van het gehele railcompartiment niet visueel geïnspecteerd kan worden tijdens onderhoud. Het railcompartiment bevindt zich onder een metalen tussenschot. Alleen na verwijdering van het tussenschot kan de rail geïnspecteerd worden. Hiervoor dient de volledige installatie uit bedrijf genomen te worden en grotendeels gedemonteerd te worden. Dit is niet beschreven in de onderhoudsprocedure van Enexis en COQ. Een degradatie of kruipspoorvorming in dit compartiment kan met het beschreven inspectie- en beoordelingsregime van Enexis niet vastgesteld worden.



#### 5.5.4 Beoordeling van de oliekwaliteit

Na monsternamen van de vervuilde olie uit de schakelkolom van fase L2 van veld Transformator 3 is vastgesteld dat na enkele dagen de zwarte koolverontreiniging op de bodem is neergeslagen, en dat de overige olie vrijwel kleurloos is. Bij een kleurbepaling conform IEC 60422 wordt deze olie 'troebel' bevonden met een afwijkend groene kleur. De olie is echter niet verzuurd (0.03 g KOH/kg). Het oliemonster was te klein om een test op de aanwezigheid van corrosief zwavel uit te voeren, om te verifiëren of de groenige kleur door koperaantasting veroorzaakt kan zijn.

Ook bij de eerste bemonstering van isolatieolie in de installatie was deze slechts lichtgeel verkleurd (foto #7 in /8/) terwijl de olie in de bak geheel ondoorzichtig was (foto #3 in Bijlage C). Een analyse van deze olie conform IEC 60422 levert de beoordeling 'helder' op met kleurgetal 1.5-2.0. Dit is net onder de afkeurnorm van Enexis.

Het is dus zeer wel mogelijk dat één of meer van de volgende situaties optreedt:

- Bemonstering van de olie in de schakelkolom leidt niet tot afkeur, terwijl er wel een afzetting van kool en mogelijk andere vervuiling op de bodem aanwezig is
- Kool en andere vervuiling die zich op de bodem van de schakelkolom verzamelen zijn al naar buiten gelekt ten tijde van de monsternamen van de olie.

Er zijn bij Enexis gevallen bekend waarbij waargenomen is dat door de oliestroming die ontstaat bij het lichten van een COQ-schakelaar er een zwarte sliert vervuilde olie uit de Coqolite koker 'getrokken' wordt. Het is echter de vraag of dit altijd optreedt als de vervuiling zich aan de onderzijde van de isolator bevindt, met name wanneer de vervuiling zich hecht aan het oppervlak en de schakelaar langzaam omhoog gehesen wordt.

Het vochtgehalte van de olie in de COQ-installatie is door DNV GL bepaald op 83 mg/kg. Dit is zeer hoog in vergelijking met de eisen voor kwalitatief goede olie. IEC 60422 classificeert olie als slecht voor installaties > 16 kV bij een vochtgehalte van meer dan 40 mg/kg. Bij goede olie licht het verzadigingspunt omstreeks 50 mg/kg bij circa 20 °C. Bij lagere temperaturen ligt dit punt beduidend lager. Rekening houdend met de temperatuur tijdens bemonstering van circa 3 °C moet er rekening gehouden worden met een verzadigingspunt bij 25-30 mg/kg.

Een hoger gemeten vochtgehalte dan het verzadigingspunt zou betekenen dat de olie sterk verouderd en/of verontreinigd is. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat de monsternamen geruime tijd na de storing is gedaan. De olie is zeer waarschijnlijk in contact gekomen met blusmiddelen en de buitenlucht, en is tijdens de storing blootgesteld aan het effect van de vlambogen. Het is aannemelijk dat dit de verontreiniging en het vochtgehalte beïnvloed heeft.

## 6 ANALYSE VAN HET STORINGSVERLOOP

In dit hoofdstuk wordt het storingsverloop geanalyseerd op basis van de bevindingen weergegeven in de hoofdstukken 4 en 5. Het is niet mogelijk om met volledige zekerheid het storingsverloop vast te stellen daarom laat deze analyse het meest waarschijnlijke storingsverloop zien volgend uit de ontvangen informatie en het schade onderzoek. In het volgende hoofdstuk worden vervolgens de hypothesen geformuleerd en getoetst voor de oorzaak die aan het verloop ten grondslag ligt. Dit leidt tezamen tot de meest waarschijnlijke verklaring van het storingsverloop in hoofdstuk 8.

Op 12 november 2018 zijn vanaf circa 05:00 's ochtends aardfouten geregistreerd in het voedingsgebied van HVS-1. De intensiteit van deze aardfouten was dermate dat een storingsteam op pad is gegaan om de locatie van deze aardfouten op te sporen.

Aangekomen bij het middenspannings- station Hoogstraat om circa 6:27 uur, zijn door monteurs 'borrel'- en 'sproei'-geluiden waargenomen. Deze leken afkomstig te zijn van de het railcompartiment van de COQ-schakelinstallatie (type O-1/4-10) die in deze ruimte is opgesteld.

Vervolgens is besloten om de COQ-installatie voor inspectie uit bedrijf te nemen. Om de laagspanningspanelen, waarmee verbruikers worden gevoed, van spanning te kunnen blijven voorzien werd eerst opdracht gegeven om een noodstroomaggregaat ter plekke te laten komen.

Terwijl de monteurs buiten de ruimte wachtten op het noodstroomaggregaat trad om 09:55 nog éénmaal een aardfout op in het voorzieningsgebied achter transformator T2 in 150/10kV-station Woensdrecht. Om 10:10 vindt de eerste kortsluiting plaats die gepaard gaat met een knal en een drukgolf waarbij stof en vuil door de kieren rond de gesloten toegangsdeur naar buiten werd geblazen.

### 6.1 De eerste kortsluiting


De bevindingen laten zien dat de eerste kortsluiting werd ingeleid met een initiële fase-aardfout op fase L3 in de COQ-installatie op station Hoogstraat, die vervolgens overging in een driefasen-fout. De fout tussen fasen L2 en L3 werd na 120 ms automatisch afgeschakeld, de fout op fase L1 20 ms later.

De locatie van deze kortsluiting ligt aan de bovenzijde van de CT-kernen van de velden Transformator 2 en 3. Dit kan worden geconcludeerd op basis van:

- de aangetroffen vlamboogsporen in de installatie
- de afbrand op de schakelstiften van de fasen L2 en L3 van veld Transformator 3, en fase L1 van veld Transformator 2
- de videobeelden en informatie van Inspectie SZW geven aan dat na de eerste explosie alle verbruikers achter transformatoren 2 en 3 spanningsloos raakten, terwijl de verbruikers achter transformator 1 nog spanning hadden
- het feit dat het veld Maagdtheater nog in de stand IN stond na het incident.

Uit eigen waarnemingen in de installatie gedurende het onderzoek en gesprek met Enexis medewerkers tijdens het eerste of tweede bezoek ter plaatse leidt DNV GL af dat, voorafgaand aan de eerste kortsluiting, gedurende langere tijd vrij intensieve ontladingen hebben opgetreden langs de rail(doorvoer)isolatoren van fasen L1 en L3 van veld transformator 3. De boogvoetpunten zijn ook aan de binnenkant van de Coqolite koker aangetroffen. De Coqolite kokers om de schakelaar-polen zijn hierdoor beschadigd geraakt en zijn gaan 'gassen' (gasvormige ontledingsproducten komen vrij en vormen gasbellen). De ontledingsproducten en gasbellen zijn opstegen in de richting van de CT-doorvoer. Vanwege de verticale Pertinax isolatieschotten hebben de verontreinigingen zich niet snel verdeeld in de installatie. Mogelijk is dit 'gassen' ook in meer of mindere mate opgetreden bij andere





railisolatoren waar duidelijke ontladingssporen zijn aangetroffen, onder andere fase L1 van veld Transformator 2.

De CT-doorvoer is isolatie-technisch gezien waarschijnlijk het zwakste punt in de installatie. Bij een voldoende mate van 'gassen' kan hier een doorslag optreden. Op basis van de bouwwijze kunnen ontledingsproducten en gasbellen uit de fase L1 van veld transformator 3 ook relatief makkelijk de CT van fase L2 bereiken, zeker als de ruimte tussen de Coqolite koker en de schakelkolom aan deze zijde iets groter is. Op dezelfde wijze kunnen gasbellen van fase L1 van veld Transformator 2 de CT van fase L3 van veld transformator 3 bereiken, en visa versa.

Dit leidde in veld Transformator 3 tot een doorslag tussen de geleider die door de CT van fase L3 loopt en het geaarde pijpje van de oliedemping tussen fasen L3 en L2. Dit heeft binnen een halve periode geleid tot doorslagen van fase L2 veld Transformator 3 naar aarde, via hetzelfde geaarde pijpje, alsook tot een fase-aarde-kortsluiting op de CT-doorvoer van fase L1 van veld Transformator 2. De facto ontstond zo een driefasen-kortsluiting in de installatie.

## 6.2 De tweede kortsluiting

Door deze interne kortsluiting werd de elektrische integriteit van de installatie aangetast. Het afgebrande koper stolde in de olie tot koperkorrels (zie bijv. foto #32, Bijlage E) die, samen met andere verontreinigingen uiteindelijk naar de bodem zakten.

Omdat de afdekplaat van het railsysteem ('railplaat' in Figuur 3-4) aan de uiteinden een driehoekige opening heeft (dat wil zeggen bij fase L3 van veld transformator 1 en bij fase L1 van veld Magnefix), zal op deze locaties materiaal in het railcompartiment terechtkomen, met name op de bodem en op de stalen afdekplaat van de raildoorvoer die zich onder deze driehoekige opening bevindt.


Het is aannemelijk dat hier één of meerdere doorslagen tussen fase L3 van de onderste railgeleider en de geaarde omhulling hebben plaatsgevonden: de tweede kortsluiting. Op basis van de registraties en de kortsluitduur kan aangenomen worden dat deze tweede kortsluiting door het voedende veld op HVS-1 afgeschakeld is. Dit is consistent met de waarneming dat er buiten de velden Transformator 2 en 3 geen verdere aanwijzingen voor een afgeschakelde kortsluiting aangetroffen zijn.

Uit het feit dat buiten die velden geen verdere aanwijzingen voor een afgeschakelde kortsluiting aangetroffen zijn wordt afgeleid dat de kortsluiting veroorzaakt is door – ten minste - een combinatie van de volgende waargenomen vlamboogsporen:

- 1 de fase-aarde-fout op fase L1 van veld Transformator 3 ter hoogte van de onderzijde van de schakelkolom
- 2 de fase-fase-fout tussen fasen L1 en L2 van veld Transformator 3 ter hoogte van de onderzijde van de schakelkolom
- 3 de fase-aarde-fout op fase L3 van de railgeleiders van de velden Transformator 1, 2 en 3
- 4 de fase-aardfouten op fasen L2 en L3 van veld Transformator 1 ter hoogte van de bovenzijde van de CT
- 5 de fase-aardfout op fase L3 van veld Maagdt theater ter hoogte van de bovenzijde van de CT.

De velden transformator 2 en transformator 3 waren als gevolg van de eerste sluiting al uitgeschakeld. De enige andere locatie waar sporen van een langdurige aardfout tussen fase L3 en aarde zijn waargenomen is op de railkoppeling van veld Transformator 3 (foto #38, Bijlage E). Dit bevestigt dat de tweede kortsluiting daar begonnen is.

Omdat het sterpunt via een impedantie geaard is, zorgde de aardfout op fase L3 voor een spanningsstijging op de fasen L1 en L2. Na 10 ms ontstond een 3-fasige kortsluiting. Dat is het moment



waarop de waargenomen sluiting tussen de onderkant van de schakelaar-polen van L1 en L2 van veld transformator 3 is ontstaan. Deze beide polen bevinden zich op dat moment nog in Coqolite kokers die mogelijk zwaar beschadigd waren als gevolg van het eerdere 'gassen'. Het is mogelijk dat de spanningsverhoging van L1 en L2 als gevolg van de aardfout op L3 voldoende is om een doorslag te bewerkstelligen, zie Figuur 4-3.

Op het moment dat een 3-fasige kortsluiting ontstaat, zal de spanningsverhoging van L1 en L2 wegvallen. Het wordt mogelijk geacht dat hierdoor de boog tussen de schakelaar-polen L1 en L2 weer is gedoofd, waarna een fase-aarde-fout tussen fase L1 en de bakwand is opgetreden (zoals waargenomen in foto #13). Dit is immers een veel korter pad voor de lichtboog dan het pad naar fase L2 waarop zich de - weliswaar beschadigde - Coqolite kokers bevinden.

Als de koker van fase L1 door de boog naar aarde zodanig beschadigt raakt dat deze in zijn geheel afbreekt en naar boven gedreven wordt, is het mogelijk dat na 400 ms de boog naar fase L2 opnieuw ontsteekt. De zwarte aftekening op de kolom heeft dezelfde contouren als het breukvlak (foto #15, Bijlage C) dus het is aannemelijk dat dit tijdens de kortsluiting gebeurd is. Als de breuk van de Coqolite koker van fase L2 ook door de fase-aarde-fout op L1 ontstaan is, dan is de dubbele isolerende barrière van beide kokers op dat moment niet meer aanwezig. Het opnieuw ontsteken van de boog tussen fasen L1 en L2 is dan nog waarschijnlijker.

## 6.3 De explosie

De beschreven 2-fasefout dan wel 3-fasenfout leidt tot een drukopbouw, en na 700 ms barst de rechterbak van de COQ-installatie open en wordt olie in de ruimte verneveld<sup>13</sup>. Hierdoor daalt het olieniveau in de installatie met ca. 24 cm, en wordt de ruimte gevuld met een ontbrandbaar olie-lucht mengsel.

Op de schakelaars van velden transformator 1 en Maagdtheater zijn op de CT-geleiders eveneens doorslagen naar aarde zichtbaar. Deze hebben echter niet tot een afschakeling van het betreffende veld geleid. De meest voor de hand liggende conclusie is dat deze lichtbogen in een latere fase van de tweede kortsluiting ontstaan zijn. Hierdoor worden deze eveneens door het voedend veld op HVS-1 afgeschakeld voordat de betreffende veldbeveiliging ingrijpt. Het is niet waarschijnlijk dat de selectiviteit onjuist heeft gefunctioneerd. De schakelaar van transformator 1 is getest en werkte naar behoren. Daardoor is het waarschijnlijk dat deze schakelaar tijdens de storing ook correct functioneerde.

Zoals beschreven is de meest waarschijnlijk verklaring dat de kortsluitingen relatief laat kwamen, vlak voor het aflopen van de staffeltijd van de beveiliging in HVS-1. Hierdoor heeft de beveiliging van beide afgaande velden geen gelegenheid gehad om af te schakelen. Hierbij dient ook in ogenschouw genomen te worden, dat de energie voor het uitschakelcommando uit de kortsluitstroom gehaald wordt. Indien deze voortijdig weggenomen wordt, kan de schakelaar niet uitschakelen.

Het is onwaarschijnlijk dat een explosie ontstaat als gevolg van een lichtboog in de olie. De explosie is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van het optreden van lichtbogen in de latere fasen van de tweede kortsluiting, nadat de ruimte gevuld was met een nevel van olie.

---

<sup>13</sup> Er wordt zeer veel energie toegevoerd in de installatie ten tijde van de kortsluiting. De vlamboog bereikt temperaturen in de orde grote van 10.000 K. Er wordt dus snel druk opgebouwd in de vorm van gas. Deze druk zorgt ervoor dat een mengsel van gas en olie zicht uit de spleet geperst wordt. Dit levert een nevel op. Het feit dat er een steekvlam opgetreden is bevestigt dat er een nevel is. Dit wordt ook bevestigd doordat er nauwelijks olieplekken zijn waargenomen op de grond en in de kelder.

## 7 STORINGSHYPOTHESEN

De volgende faalhypothesen zijn opgesteld en onderzocht:

- 1 externe invloeden:
  - a overspanningen in het net
  - b kortsluiting in de kabeleindsluiting van de MS/LS-transformatoren
  - c verstoring vanuit het laagspanningsnet
- 2 interne oorzaken:
  - a vocht in olie
  - b lekkage verontreinigde olie uit schakelkolommen
  - c chemische incompatibiliteit
  - d imperfecties isolatiemateriaal.

In de volgende paragrafen worden deze hypothesen uitgewerkt.

Hierbij wordt allereerst een omschrijving van de hypothese gegeven. Dit is een beschrijving van het mechanisme hoe de geformuleerde hypothese tot een falen zou kunnen leiden in het geval dat deze op zou treden. Hierna volgt een analyse of de faalhypothese daadwerkelijk op heeft kunnen treden op basis van de beschikbare informatie. Hieruit volgt de waardering; dit is de kans dat het faalmechanisme van de betreffende hypothese daadwerkelijk de oorzaak kan zijn van de storing. Hierin worden de volgende classificaties toegepast:

- zeer onwaarschijnlijk
- onwaarschijnlijk
- mogelijk
- waarschijnlijk
- zeer waarschijnlijk.

De faalhypothese, of combinatie van faalhypothesen die het meest waarschijnlijk tot de storing geleid heeft, wordt als hoofdstoringsoorzaak aangewezen.

### 7.1 Overspanningen in het net

#### Omschrijving hypothese

Door een tijdelijke spanningsverhoging als gevolg van een gebeurtenis in het net ontstaat een diëlektrische doorslag in de schakelinstallatie.

#### Analyse

Tijdelijke overspanningen kunnen ontstaan door:

- a schakelen van vermogensschakelaars elders in het net
  - b blikseminslag in of nabij een installatie die middels een kabel met de gefaalde installatie verbonden is.
  - c éénfase-aarde kortsluitingen in het 10kV-net
  - d onjuiste regeling van de voedende hoogspanningstransformator.
- 
- a Uit de eventlijst zijn de schakelhandelingen bestudeerd van een week voorafgaand aan de storing tot aan de storing. De eerste geregistreerde schakelhandelingen in het betreffende deelnet zijn de afschakelingen van de kortsluitstromen tijdens de eerste explosie om 10:12:00 (zie hoofdstuk 4.2). Voorafgaand aan de storing zijn geen schakelhandelingen geregistreerd. Schakelhandelingen van aangesloten klanten worden door Enexis niet geregistreerd. Gezien de aard van dit net, in het centrum van Bergen op Zoom, met voornamelijk huishoudelijke en klein zakelijke klanten, is het



zeer onwaarschijnlijk dat (grote) klanten voldoende hoge schakeloverspanningen kunnen creëren om tot de genoemde schade te leiden.

- b Op de incidentdatum zijn in de wijde omgeving van Bergen op Zoom en Woensdrecht geen blikseminslagen opgetreden (zie hoofdstuk 4.4).
- c Uit de storingsgegevens van Enexis blijkt dat er naast de 10kV-storing in de COQ-installatie geen andere 10kV-storingen zijn opgetreden in het netdeel. De aardfout-meldingen kunnen allen toegeschreven worden aan de storing in de COQ-installatie.  
Alvorens een intermitterende aardfout op een kabel tot een falen van de isolatie in een schakelinstallatie leidt, moet er langdurig en veelvuldig een intermitterende fout optreden op de kabel(mof). Alle voedende kabels die op de COQ-installatie Hoogstraat waren aangesloten zijn ter hoogte van de gevel gekapt. Na de storing zijn deze kabels weer gebruikt om een tijdelijk onderstation van spanning te voorzien zonder dat er aardfouten opgetreden zijn. Dit is ook een bevestiging dat er in de 10kV-kabels nabij het station Hoogstraat geen kabelstoringen aanwezig zijn.
- d Er is geen melding aangetroffen van een te hoge spanning in het 10kV-deelnet. Het DMS SCADA-systeem van Enexis geeft meldingen bij te hoge of te lage spanningen, welke in de registratielijst niet zijn waargenomen. Dat betekent dat de bedrijfsspanning op het moment van storing binnen de normale bandbreedte lag, welke ruim onder het gespecificeerde isolatieniveau van de COQ-installatie (17,5 kV) lag.

De kans op het optreden van een (tijdelijke) overspanning in het net die hoger ligt dan de isolatiespanning van de COQ-installatie is daarmee zeer klein en derhalve is het zeer onwaarschijnlijk dat een overspanning de storing kan hebben ingeluid.

#### **Beoordeling**

Zeer onwaarschijnlijk.

## **7.2 Fout in kabeleindsluiting**

### **Omschrijving hypothese**

Door een fout in de kabeleindsluiting van een 10kV-transformator in station Hoogstraat ontstaat een kortsluiting met een falen van de COQ-installatie als gevolg.

### **Analyse**

Onderzoek aan de kabeleindsluitingen toont aan dat hierin geen fout is opgetreden. Er is weliswaar een mogelijke beschadiging in de rode fase (fase L1) van transformator 3 aangetroffen, maar gebleken is dat dit een op zichzelf staande beschadiging is die geheel door giethars omsloten is. Bij een interne fout (kortsluiting) zou er een lichtboog van binnen dit giethars naar buiten zijn opgetreden. Hiervan zou dan ook duidelijk zichtbare schade aan de buitenkant van het giethars waarneembaar moeten zijn. Dit is echter niet aangetroffen (zie hoofdstuk 5.4). Het is daarmee zeer onwaarschijnlijk dat er een kortsluiting in de kabeleindsluiting heeft plaatsgevonden.

### **Beoordeling**

Zeer onwaarschijnlijk.

## **7.3 Verstoring vanuit laagspanningsnet**

### **Omschrijving hypothese**

Door een verstoring in het LS-net achter één van de transformatoren van Hoogstraat is de storing veroorzaakt, bijvoorbeeld door het optreden van een fout in het bijbehorende laagspanningsrek in de ruimte Hoogstraat.

## Analyse

Een mogelijke aardfout in het LS-net achter station Hoogstraat is daags na het incident vastgesteld. Het is niet volledig uit te sluiten dat zo'n fout zich voor de storing op station Hoogstraat ook voor heeft gedaan. Het laagspanningsnet is star geaard, hetgeen betekent dat bij een kortsluiting naar aarde in het laagspanningsnet normaalgesproken de beveiliging (smeltveiligheid) zal aanspreken<sup>14</sup>. Dit zal geen negatief effect hebben op de 10kV-COQ-installatie. Indien er echter een kortsluiting met een hoge impedantie ontstaat, kan een situatie ontstaan waarbij de beveiliging niet aanspreekt. In dat geval kan de transformator overbelast raken. Op 10kV-niveau heeft dit echter geen effect op de spanningshuishouding, doordat de transformator als "Dyn" is geschakeld; de driehoekswikkeling aan de 10kV-zijde, in combinatie met een geaard sterpunt aan de laagspanningszijde, voorkomt een schadelijke spanningsverschuiving. Er zijn ook geen aanwijzingen dat een transformator overbelast is geraakt.

Het enige laagspanningsrek dat schade vertoont is het laagspanningsrek van transformator 3. Hierop zijn echter geen sporen gevonden die duiden op een vlamboog. Ook zijn alle LS-zekeringen van dit rek doorgemeten en geen enkele zekering is aangesproken. De laagspanningsrekken van transformator 1 en 2 vertonen geen zichtbare sporen van beschadigingen. Het is dus zeer onwaarschijnlijk dat er brand ontstaan is in het laagspanningsrek in de ruimte Hoogstraat.

Bij een kortsluiting in het LS-net zou het betreffende transformatorveld uitgeschakeld worden door de wisselstroombeveiliging. Daarmee wordt de stroomtoevoer naar de kortsluitlocatie onderbroken en is een volgende afschakeling onwaarschijnlijk.

Tenslotte duiden alle aangetroffen sporen in de COQ-installatie op een langdurig degradatie-mechanisme in de olie. Dit is niet consistent met een incidentele verstoring in het LS-net.

## Beoordeling

Zeer onwaarschijnlijk.

## 7.4 Vocht in olie

### Omschrijving hypothese

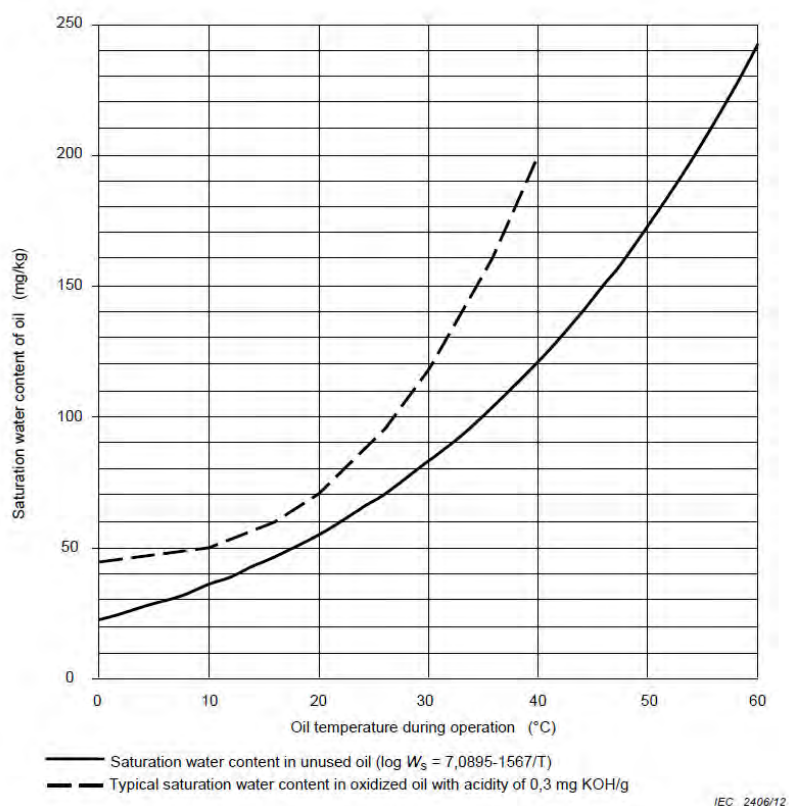
Door overmatig vocht in olie kan een interne kortsluiting optreden tussen geleidende delen van de installatie met verschillend spanningsniveau.

### Analyse

Voor de rechterbak van de COQ-installatie is het vochtgehalte bepaald van het oliemonster dat op 13-12-2018 genomen is. Het vochtgehalte hiervan bedraagt 83 mg/kg, terwijl er geen vrij water is aangetroffen in de olie. De gemeten waarde is zeer hoog. De internationale norm IEC 60422 beschrijft dat voor schakelinstallaties met vergelijkbare spanningsspecificaties als deze COQ-installatie een vochtgehalte van meer dan 40 mg/kg slecht is. De gemeten waarde is hoger dan het saturatiepunt voor olie in goede conditie. Het saturatiepunt is het vochtgehalte waarbij de olie geen water meer kan opnemen (100% relatieve vochtigheid). Indien meer water aanwezig is, zal dit niet meer opgelost worden en blijft of wordt dit vrij water, met (sterke) verlaging van de isolatiekwaliteit van de olie als gevolg. Het saturatiepunt is afhankelijk van de olietemperatuur, de mate van veroudering van de olie, zoals bijvoorbeeld door oxidatie en afhankelijk van de mate van verontreiniging. Ter illustratie is een figuur overgenomen uit IEC 60422-2013 die de relatie aangeeft tussen de temperatuur en het saturatiepunt enerzijds en ook de invloed van oxidatie van de olie. Als de meting van het vochtgehalte representatief is, kunnen hieruit twee conclusies getrokken worden:

<sup>14</sup> Het afgaande veld is gezekerd en er is ook een backup beveiliging tussen de transformator en het laagspanningsrek. Geen van de zekeringen is aangesproken.

- de olie is erg vochtig. Het vochtgehalte is beduidend hoger dan het saturatiepunt voor gezonde olie
- de olie is sterk gedegradieerd.




**Figuur 7-1 Relatie tussen saturatiepunt van olie, temperatuur en oxidatie. Bron IEC 60422-2013**

Hierbij dient in ogenschouw genomen te worden dat het oliemonster ruim na de storing (1 maand) is genomen, en dat serieus betwijfeld moet worden of de meting representatief is voor de situatie voorafgaand aan het incident. Er moet met de volgende invloeden rekening gehouden worden:

- meerdere kleine ontladingen en vlambogen (aardfouten) en minimaal twee grote vlambogen. Deze fenomenen verouderen en oxideren de olie. Het is niet bekend in welke mate dit het saturatiepunt beïnvloedt, maar er mag zeker verwacht worden dat het saturatiepunt van de olie beduidend verhoogd wordt
- effect van blussen. Tijdens het blussen van de brand in het station is er gebruik gemaakt van bluspoeder. De invloed van het poeder is niet geheel bekend, maar zal de olie verontreinigen. Door deze verontreiniging is het te verwachten dat het saturatiepunt van de olie verhoogd wordt. Zuivere olie neemt zeer slecht water op om die reden ligt het verzadigingspunt voor water zeer laag. Bij verontreinigingen zal de olie meer water op kunnen nemen en komt het verzadigingspunt hoger te liggen. Het bluspoeder is een vorm van verontreiniging die dit kan veroorzaken
- de COQ-installatie is niet hermetisch afgesloten. Dat betekent dat de olie rechtstreeks in contact staat met de buitenlucht. Zeker na de explosie is er een kier ontstaan, waardoor er meer ruimte is voor contact met de buitenlucht.

Omdat meting van het vochtgehalte onvoldoende uitsluitsel geeft over de waarschijnlijkheid van deze hypothese is via andere wegen onderzocht of de aanwezigheid van vocht een mogelijke oorzaak kan zijn voor de storing.





De isolatie-olie van de schakelinstallatie staat in contact met de buitenlucht. Hierdoor kan het vochtgehalte in de olie fors fluctueren met veranderende omgevingscondities (temperatuur, luchtvochtigheid). De toegepaste isolatie-olie is hygroscopisch, maar kan slechts in beperkte mate zelf vocht opnemen. Een overmaat aan vochtabsorptie uit zich dan op één of meer van de volgende wijzen:

- 1 uitscheiden van het overmaat aan vocht in de onderzijde van de installatie ('vrij water')
- 2 absorptie van het overmaat aan vocht door andere hygroscopische onderdelen, met name de Coqolite isolatie.

Bij langdurig optreden van fenomeen 1 zal corrosie van metalen delen en andere vocht-gerelateerde aantasting plaatsvinden op de bodem van de installatie. Dit is niet waargenomen tijdens de inspecties. Er is weliswaar blaasvorming van de verflaag op de bodemplaten van de installatie waargenomen, maar onder de verflaag is geen corrosie aangetroffen. De blaasvorming van de verflaag is daarmee niet verklaarbaar door langdurige afzetting van vrij water.

Er is wel een grote hoeveelheid bezinksel ('sludge') aangetroffen op de bodem van de installatie. Sludge wordt veroorzaakt door oxidatie van olie en wordt versterkt door de aanwezigheid van vocht. Een overmaat aan vocht kan dus ook sludge veroorzaken. Het is niet bekend wanneer de aangetroffen sludge is ontstaan. Onderhoudsgegevens geven hier geen informatie over. De sludge kan veroorzaakt zijn door het genoemde fenomeen, maar kan ook veroorzaakt zijn door de vlambogen tijdens de storing, en door het blussen na de storing, doordat bluspoeder zich relatief makkelijk door kieren kan verspreiden.

Bij fenomeen 2 zal het Coqolite het vocht opnemen en hierdoor uitzetten en vervormen. Coqolite is een isolatiemateriaal dat samengesteld is uit papier en hars. Coqolite kan tot 30 volume% aan water opnemen, mits blootgesteld aan vrij water. In het bijzonder de laag gelegen Coqolite delen zoals de afschermkokers van de railkoppelingen van de fase L3, zouden dan sporen van wateropname moeten vertonen. Dit is echter niet vastgesteld. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen grote hoeveelheid vrij water in de COQ-installatie aanwezig was. Op een aantal Coqolite kokers is wel sludge aangetroffen met boomvorming ontladingen. Dit is een sterke aanwijzing dat de sludge aanwezig was voor dat de storing ontstond.

De onderhoudshistorie van het station Hoogstraat toont aan dat zich in het verleden dak-lekkage heeft voorgedaan. De COQ-installatie is niet hermetisch afgesloten, en bij dak-lekkage kan water op de installatie terecht komen en, uiteindelijk, in de installatie belanden. Indien de hoeveelheid water beperkt is, kan de olie dit opnemen en later weer afstaan. Bij grotere hoeveelheden kan sludge ontstaan. Het is echter niet bekend of er daadwerkelijk sprake is van lekkage op de COQ-installatie.

Al met al kunnen voor de waargenomen sludge vorming in de COQ-installatie drie oorzaken onderkend worden:

- 1 natuurlijke oxidatie, versneld door vocht. Dit proces vindt voornamelijk plaats op het grensvlak tussen de olie en de lucht. Hierbij zal olie oxideren en zal de sludge zal naar beneden zakken. Dit heeft tot effect dat alle horizontale delen van de installatie bedekt worden met sludge. Omdat het vochtgehalte in de olie ongeveer uniform verdeeld zal zijn, zal de sludge vorming over de gehele installatie relatief uniform verlopen
- 2 verontreiniging door (deel)ontladingen. Tijdens het borrelen en sproeien zijn er veel kleinere en grotere ontladingen geweest, op onder andere de rail isolatoren en de Coqolite kokers. Hierbij ontstaan lokaal hoge temperaturen waardoor de olie deels ontleedt en oxideert. Hierbij komen restproducten vrij die zich verzamelen in een vorm van sludge. Deze sludge zal ook geleidende delen bevatten, zoals koolstof en metaaldeeltjes. Verwacht kan worden dat de sludge opgebouwd wordt rondom de (deel)ontladingen

- 3 verontreiniging door kortsluitingen. Gedurende de twee grotere kortsluitingen hebben grote vlambogen gestaan in de olie. Hetzelfde fenomeen doet zich voor als bij (deel)ontladingen (punt 2), maar nu in versterkte mate. Door de drukgolf zal de sludge zich bovendien meer verspreiden door de installatie. De beide kortsluitingen hebben in de rechterbak plaatsgevonden. Om die reden zal het merendeel van de sludge in deze bak gevormd zijn, maar door de druk zal de sludge ook naar de andere bak gestuwd worden via het railcompartiment.

De sludge die is aangetroffen in de installatie is min of meer gelijkmatig verdeeld over beide compartimenten. Dit duidt op het eerste mechanisme, natuurlijke oxidatie, mogelijk versneld door vocht. Het is dus waarschijnlijk dat de olie door een hoog vochtgehalte is verouderd. De aangetroffen verfaantasting op de bodemplaten is in de rechterbak weliswaar sterker aanwezig dan in de linkerbak, maar dit kan worden verklaard doordat de sludge die ontstaat door ontladingen en vlambogen chemisch agressiever is.

Rest de vraag hoe vocht op de railisolatoren tot ontladingen kan leiden. Hierbij spelen twee factoren een rol:

- de railisolatoren hebben een relatief hoge veldsterkte in vergelijking met andere componenten. Hierdoor is er een grotere kans op ontladingen
- bij temperatuurswisselingen van de installatie zal het saturatiepunt van de olie veranderen: warmere olie neemt meer vocht op dan koude olie. Indien de olie afkoelt kan de olie dichtbij of onder het saturatiepunt komen, waardoor er een verlaging van de doorslagsterkte optreedt en, afhankelijk van de temperatuurswisseling, mogelijk condensatie ontstaat. Beide effecten hebben een sterk veld-verstorend effect en kunnen lokaal het ontstaan van ontladingen bevorderen. Uiteindelijk kunnen die uitgroeien de boomvormige ontladingen zoals waargenomen.

Het is opmerkelijk dat de verschijnselen niet voor alle velden zijn aangetroffen, hoewel alle raildoorvoeringen dezelfde spanning voeren en aan dezelfde olie zijn blootgesteld. De hypothese wordt mogelijk geacht maar verklaart op zichzelf niet alle waarnemingen.

### **Beoordeling**

Mogelijk.

## **7.5 Lekkage schakelkolommen**

### **Omschrijving hypothese**

Door lekkage komt (mogelijk vervuilde) olie uit de schakelkolom terecht in de Coqolite koker die het railcontact omsluit. Dit kan leiden tot degradatie van de zich hier bevindende isolatoren en uiteindelijk tot een doorslag.

### **Analyse**

Voor vrijwel alle schakelkolommen is in meer of mindere mate olielekkage vastgesteld (zie paragraaf 5.5.2). De enig mogelijke uitzondering hierop is fase L2 van veld HVS-1.

In de meeste schakelkolommen is de olie 'helder, zonder sporen van koolstofvorming'. Bij drie schakelkolommen is een significante vervuiling (koolstofvorming) van de olie vastgesteld. Het gaat om de schakelkolommen in:

- fase L2 - Transformator 3
- fase L3 – Transformator 3
- fase L1 – Transformator 2.

Dit kan mogelijk verklaard worden doordat deze schakelaars tijdens de eerste explosie op een kortsluiting op de CT-zijde van de schakelaar zijn afgeschakeld<sup>15</sup>. Bij afschakeling van een kortsluiting wordt de olie verontreinigd met de ontledingsproducten van de vlamboog die daarbij in de schakelaar ontstaat, het betreft onder andere koolstofvorming in de olie en ook geleidende koperdeeltjes die afgebrand zijn van de schakelaarcontacten. Dit is een normaal verschijnsel en onderdeel van het ontwerp van dit type installatie. Bij elke schakelhandeling ontstaan deze ontledingsproducten, waarbij de hoeveelheid onder andere afhankelijk is van de af te schakelen stroomsterkte. Bij kortsluitstromen zijn er dus relatief veel restproducten, bij normale belastingstromen zullen weinig restproducten in de olie terechtkomen. Opgemerkt moet worden dat deze restproducten geleidende deeltjes bevatten en de isolatie eigenschappen van de olie negatief beïnvloeden. Om die reden moet de olie in de schakelkolom na een aantal, veelal drie, kortsluitingen vervangen worden.

Uit de onderhoudsmeldingen en onderhoudsorders (/4/, /5/ en paragraaf 3.7.1) valt op te maken dat er in de 13 jaar voorafgaand aan het incident slechts éénmaal periodiek onderhoud en doorstromen heeft plaatsgevonden aan de drie transformatorvelden. Een inspectie van de olie in de schakelaar is onderdeel van beide onderhoudstaken conform de beoordelingsmatrix van Enexis (/6/). In dit kader is op 24-02-2016 voor het veld transformator 3 de onderhoudsmelding 'Olie is bijgevuld' gedaan. Er wordt in de door DNV GL ontvangen onderhoudshistorie geen enkele melding gemaakt dat er olie is vervangen. DNV GL acht het waarschijnlijk dat de olie inderdaad is bijgevuld en niet vervangen.

Dit betekent:

- dat er sprake was van olieverlies, vermoedelijk door lekkage
- dat eventuele verontreinigingen in de olie aanwezig zijn gebleven.

Zelfs indien de olie wel vervangen is conform het voorschrift /6/, dan is het nog onzeker in hoeverre verontreinigde residuen uit de bluskamers verwijderd kunnen worden. De bluskamers hebben geen aftapopening, waardoor de oude olie alleen middels afpompen of het kantelen van de schakelaar verwijderd kan worden. Bij deze manier van olie verwisselen blijft er een significante hoeveelheid residu in de bluskamers achter. Alleen herhaaldelijk spoelen met schone olie zou dit residu kunnen verwijderen. Deze werkmethode is echter niet beschreven in het onderhoudsprogramma.


Doordat de schakelkolommen niet hermetisch afgesloten zijn, kan verontreinigd residu in contact komen met de isolatieolie in de bak van de COQ-installatie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de schakelkolom op de prikcontacten wordt geplaatst op de doorvoeringen naar het railcompartiment (raildoorvoeren). Deze prikcontacten en doorvoeringen zijn omhuld met een Coqolite koker, waardoor verontreinigd residu uit de schakelaar kolom zich kan ophopen op het isolatieoppervlak van de raildoorvoeren. Deze verontreiniging heeft een lokaal verstorend effect waardoor oppervlakte ontladingen kunnen ontstaan. Het betreft hiermee een proces dat eigen is aan het ontwerp van de COQ-installatie, en dat mogelijk leidt tot versnelde degradatie van kritieke componenten, in dit geval de railisolatoren.

De boomvormige ontladingssporen op de raildoorvoeren zijn aangetroffen op de volgende velden:

- Transformator 1
- Transformator 2
- Transformator 3
- Maagdtheater
- Keizerstraat.

<sup>15</sup> Bij normale bedrijfsvoering treedt in de schakelkolommen koolstofvorming op als gevolg van het afschakelen van normale bedrijfsstromen en (incidentele) kortsluitingen. Daarom moet de oliequaliteit regelmatig gecontroleerd worden (zie hoofdstuk 5.4 voor meer informatie over oliequaliteit en de controle daarvan).





De eerste vier velden staan doorgaans in normaal bedrijf en voeren belasting. Van deze velden mag verwacht worden dat ze gedurende de levensduur van de installatie een aantal keer belastingstroom of een kortsluitstroom geschakeld hebben. Veld Keizerstraat voert normaal geen belasting in de huidige netconfiguratie, omdat het veld als netopening functioneert. Naar verwachting wordt er dan minder vaak geschakeld met dit veld. Het is echter mogelijk dat in het verleden dit veld wel belastingstromen of kortsluitstromen heeft geschakeld. De kans dat dit bij de hier niet genoemde velden gebeurt is kleiner.

Het betreft:

- GCD Markt: Deze schakelaar zal zeer waarschijnlijk alleen stroomloos schakelen, omdat de belasting afgeschakeld wordt voordat de schakelaar bediend wordt
- Magnefix: Het betreft hier een netopening, die normaliter via de Magnefix geschakeld wordt
- Burg. Stulemeijerlaan: Het betreft hier een koppeling naar een ander deelnet. Ervaring leert dat deze netopeningen zeer weinig geschakeld worden
- inkomend veld: Dit veld heeft geen vermogensschakelaar. Het ligt in de lijn der verwachting dat dit veld geen stromen schakelt.

Dit is een indicatie dat de aanwezige boomvormige ontladingssporen een relatie hebben met de bedrijfsvoering van het afgaande veld. De waargenomen diepte en vertakkingen van de boomstructuren op de raildoorvoeren duiden erop dat het hier gaat om een interface-probleem dat langere tijd aanwezig is geweest. Dit schadebeeld ontstaat in een periode variërend van maanden tot jaren, afhankelijk van het verontreinigingsniveau.

Het betreft hier een grensvlak tussen olie en giethars in een schakelinstallatie. Het grensvlakprobleem kan ontstaan zijn door één of meerdere van de volgende oorzaken:

- 1 een significante verhoging van de bedrijfsspanning
- 2 een beschadiging of productiefout van de giethars isolatoren
- 3 een degradatie van het giethars
- 4 degradatie of verontreiniging van de olie rond het isolatoroppervlak.

ad 1.

Deze faalhypothese is in paragraaf 7.1 beschouwd en als “zeer onwaarschijnlijk” beoordeeld

ad 2.

Deze faalhypothese wordt in paragraaf 7.7 beschouwd en als “onwaarschijnlijk” beoordeeld.

ad 3.

Giethars is bekend om zijn chemische stabiliteit, ook bij blootstelling aan verhoogde temperaturen, isolatieolie en vocht. Wanneer geen sprake is van extra belastende externe factoren is deze situatie zeer onwaarschijnlijk.

ad 4.

Bij verontreiniging van de olie zal deze verontreiniging deels op het isolatoroppervlak neerslaan. De isolatiekwaliteit van deze verontreiniging is doorgaans veel slechter dan die van giethars of olie, er is doorgaans zelfs sprake van geleiding. Hierdoor wordt op deze locatie de isolerende werking van het isolator-olie-grensvlak verminderd. Bekend is dat hierdoor lokaal elektrische deelontladingen ontstaan. Dat zijn kleine, laag-energetische, ontladingen over het oppervlak die in principe in elke richting kunnen optreden. Zo ontstaan boomvormige structuren zoals waargenomen.

Door de deelontladingen wordt zowel de omringende olie als het isolatoroppervlak geleidelijk aan verder aangetast. De ontladingen veroorzaken koolstofvorming waardoor een geleidende structuur op het isolatoroppervlak ontstaat.

Zodra een voldoende groot deel van het isolatoroppervlak op deze manier is aangetast is, is de isolerende werking van de isolator dermate verslechterd dat een volledige ontlading langs de gehele

isolator kan optreden, vanaf het contact naar de gearde onderkant. Dit is ook waargenomen (bijv. foto #36 of #37, Bijlage E)

Volledige doorslagen dragen meer energie in zich dan deelontladingen, en zullen het isolatoroppervlak versneld doen degraderen. Er zal een fase-aarde kortsluitstroom gaan vloeien met een amplitude die afhankelijk is van het gevormde stroom-pad. In eerste instantie zullen de fase-aarde kortsluitstromen relatief klein zijn in verband met een relatief hoge weerstand, maar naarmate de storing zich verder ontwikkelt en de weerstand verlaagd wordt door verdere koolstofvorming, worden de kortsluitstromen groter en zal uiteindelijk het aardfout detectiesysteem aanspreken en een aardfoutmelding geven.

Er zijn twee oorzaken waardoor een dergelijk proces vaker optreedt en zich lokaal sneller ontwikkelt in het geval van een raildoorvoerisolator:

- 1 vanuit de bovenliggende schakelkolom lekt aanwijsbaar olie (zie paragraaf 5.5.2), die direct op het oppervlak van de doorvoerisolator terechtkomt
- 2 de raildoorvoerisolatoren zijn vrijwel hermetisch afgesloten door een Coqolite koker (zie bijvoorbeeld foto #14, Bijlage C) die ook de onderzijde van de schakelkolom omsluit. Rondom deze schakelkolom is slechts een kleine cirkelvormige spleet van 1 à 2 mm, waardoor de (verontreinigde) olie grotendeels lokaal aanwezig blijft.

Eventuele vervuiling die door andere oorzaken en dus op andere locaties in de COQ-installatie zijn veroorzaakt zal zich min of meer gelijkmatig over de installatie verdelen. Vervuiling als gevolg van deelontladingen die lokaal op plaatsen ontstaat waar geen omhulling aanwezig is, zal zich door circulatie makkelijker verdelen over de gehele installatie. Op die locaties zal verregaande degradatie van isolatoren minder kans van optreden hebben in vergelijking met de omhulde situaties, zoals bij de raildoorvoeringen. Deze ontledingen zullen ook eerder bij een oppervlakkige inspectie aan het licht komen omdat hierbij de olie en de binnenkant van de bak meer gelijkmatig vervuild zijn.

Binnen de Coqolite koker om de raildoorvoeren is die situatie anders. Vervuiling vanuit de schakelkolom zal lokaal aanwezig blijven, evenals de aanvullende vervuiling door deelontladingen. Zodra de eerdergenoemde volledige, en relatief hoogenergetische, doorslagen langs het isolatoroppervlak optreden, zal het kleine olievolume binnen de Cocolite koker versneld degraderen. Hierdoor worden directe doorslagen van de schakelstift naar een willekeurig punt op de messing bevestigingsring van de isolator mogelijk, zoals bijvoorbeeld waargenomen op fase L1 van veld Transformator 3 (foto #33, Bijlage E).

### **Beoordeling**

Mogelijk tot waarschijnlijk.

## **7.6 Chemische incompatibiliteit tussen olie en coating**

### **Omschrijving hypothese**

Door een niet optimale keuze van de coating van de metalen bak, of door eventuele toevoegingen aan de olie, treedt er na verloop van tijd een onderlinge chemische reactie op. Hierdoor wordt de isolatiekwaliteit van de olie negatief beïnvloed.

### **Analyse**

Op de bodemplaten van de bak van de COQ-installatie is de verf aangetast, blaasvorming en verkleuring. De bodem was over het gehele oppervlak bedekt met 'sludge'. De zijwanden van de bak zijn alleen aangetast op locaties waar 'sludge' tegen de zijwand kwam. Dit kan worden afgeleid uit de hoogteverschillen in de sludge die overeenkwamen met de hoogteverschillen in de aantasting van de verflaag.

Ondanks dat de sludge zich ongeveer gelijkmatig heeft verdeeld over de gehele installatie is er een verschil in de mate van aantasting van de verflaag: De coating van de bodemplaten in de rechter bak is, voor zover dat is na te gaan, in zijn geheel aangetast; Voor de linker bak lijkt de aantasting zich te beperken tot een klein gebied rondom de raildoorvoer tussen beide bakdelen. Aangezien beide bakdelen tegelijk zijn geïnstalleerd is het onwaarschijnlijk dat er links en rechts substantieel verschillende coatings zijn toegepast. Het verschil in degradatie tussen de bakken kan daarom niet verklaard worden door de eigenschappen van de coating.

Bij intensieve en/of langdurige ontladingen in olie neemt de zuurgraad hiervan sterk toe. Een dergelijk verzuurde olie kan coatings en kunststoffen aantasten. De coating op verticale bakdelen lijkt niet of nauwelijks aangetast. In de normale bedrijfssituatie staan deze echter ook in contact met de isolatieolie. Dit betekent dat de bestanddelen die de coating aantasten zich voornamelijk bevinden in de gevormde 'sludge' die neerslaat op de bodem. Dit komt ook overeen met de olieanalyse waarbij de zuurgraad van de olie in de bak nog relatief laag is. Hiermee kan geconcludeerd worden dat de aantasting van de coating een gevolg is van de vorming van grote hoeveelheden agressieve sludge in voornamelijk de rechterbak, en daarmee gevolgschade is van een eerder opgetreden afwijking.

Indien er toch – voorafgaand aan de sludge-vorming - een onbekende chemische reactie tussen de olie en de coating zou zijn opgetreden waardoor schadelijke stoffen in de olie zouden ontstaan, dan had de hierdoor veroorzaakte degradatie zich op alle isolatoren gemanifesteerd. De kabel(doorvoer)isolatoren vertonen het schadebeeld niet of slechts zeer marginaal. Om die reden kan worden aangenomen dat er geen generieke aantasting plaatsgevonden heeft, maar dat deze slechts lokaal is opgetreden. Dit is een verdere bevestiging dat de storing niet is ingeleid door een chemische interactie tussen de verflaag en de olie.

Wel is het zo dat degradatie van de coating de houdveldsterkte in de nabijheid nadelig kan beïnvloeden. Het ontstaan van een fase-aarde-fout op de L3 railkoppeling van veld Transformator 1 (foto #38, Bijlage E) kan hiermee mogelijk worden verklaard. Door de drukgolf als gevolg van de eerste kortsluiting zullen eventuele degradatieproducten van de olie en de coating immers rond gaan wervelen onderin het railcompartiment, waardoor een relatief goed geleidend pad naar aarde kan ontstaan. Dit geeft een verklaring voor een deel van het verdere verloop van de storing, maar niet voor de grondoorzaak van deze storing.

### **Beoordeling**

Zeer onwaarschijnlijk.

## **7.7 Imperfecties isolatiemateriaal**

### **Omschrijving hypothese**

Door productiefouten, of door beschadigingen die ontstaan zijn tijdens het bedrijf van de COQ-installatie, voldoen de doorvoerisolatoren niet (meer) aan de gestelde eisen. De isolatiewaarde daalt, waardoor er een doorslag in het isolatiemateriaal, of langs het isolatoroppervlak kan optreden.

### **Analyse**

#### **7.7.1 Isolatoroppervlakken**

##### **Rail-/kabeldoorvoerisolatoren**

Op geen van de onderzochte rail- en kabeldoorvoerisolatoren is een in het oog springende beschadiging van mechanische aard waargenomen, zoals breuk, scheurvorming of krassen. De schades die waargenomen zijn, hebben allen een elektrische oorzaak: boomvorming en carbonisatie. De raildoorvoerisolatoren zijn dusdanig geplaatst dat deze niet geraakt kunnen worden door de schakelaar



onderdelen tijdens het in- of uithijzen. De Coqolite kokers en het tulpcontact geleiden de schakelaar in verticale richting zodat een grote radiale kracht op de contactstift vermeden wordt. Zou de schakelaar toch worden geplaatst terwijl hij niet is uitgelijnd, dan is een krachtwerking op de contacten denkbaar, maar in dit geval zouden de tulpcontacten ook de Coqolite kokers aan de bovenkant raken en deze zwaar beschadigen. Een dergelijke beschadiging is echter niet aangetroffen.

Ook zijn er geen overmatige krassen of beschadigingen op de contactstiften waargenomen. DNV GL gaat er daarom vanuit dat de schakelaars steeds op de voorgeschreven wijze zijn in- en uit-gehesen zonder significante beschadigingen van de isolatoren te veroorzaken.

Omdat de railisolatoren kritische componenten zijn, ondergaan ze bij montage van de COQ-installatie per individu een routinetest, waarbij ook een visuele inspectie wordt uitgevoerd. Dit beperkt de kans dat een beschadigde isolator is toegepast in de installatie. De kans dat er tien of meer beschadigde isolatoren worden toegepast, dusdanig beschadigd dat dit op den duur tot doorslagen gaat leiden, is verwaarloosbaar klein.

Ten slotte zit er een marge op het ontwerp van de isolatoren om kleine imperfecties toe te kunnen toestaan.

### **Coqolite isolatie**

Op enkele Coqolite railkokers van de onderste (fase L3) railkoppelingen zijn boomvormige ontladingssporen aangetroffen (zie foto #47, Bijlage E). Over vrijwel de gehele lengte van de onderzijde van de koker is de boomvormige ontladingsstructuur zichtbaar, waardoor er een (vrijwel) volledig geleidend pad langs de railisolator ontstond. De locatie van deze ontladingen komt overeen met de waargenomen sludge afzetting langs de onderzijde van deze koker.

Boomvormige ontladingen zijn niet waargenomen op locaties op Coqolite isolatie waar geen sludge is aangetroffen, in het bijzonder zijn geen ontladingssporen aangetroffen op Coqolite isolatie van de bovenste railgeleiders (fasen L1 en L2)<sup>16</sup>.

Daarmee is het zeer waarschijnlijk dat de waargenomen boomvormige ontladingen over de lengte van de Coqolite isolatoren van de fase L3 railgeleiders een gevolg is van de verontreiniging in de vorm van sludge die hierop afgezet is, en niet het gevolg is van een eerdere afwijking, of van een ontwerp- of fabricagefout.

### **7.7.2 Inwendig isolatordefect**

Een luchtinsluiting in een isolator, bijvoorbeeld door een gietfout of een barst, kan leiden tot partiële ontladingen in deze holte als deze zich op een positie met een hoge veldsterkte bevindt. Na verloop van tijd – doorgaans tientallen jaren – groeien deze holtes dan steeds verder uit. Ook ontstaan hierbij geleidende afbraakproducten in de isolator door verkoling. Uiteindelijk ontslaat er dan een doorslag door het isolatiemateriaal, van de hoogspanningsgeleider naar aarde.

Omdat het degradatiemechanisme van partiële ontladingen in holtes in vaste isolatiematerialen al zeer lang bekend is, wordt bij alle toegepaste isolatoren als routinetest de aanwezigheid van partiële ontladingen gemeten. Deze moeten bij voorkeur niet optreden, maar in ieder geval onder een grenswaarde liggen waarvan internationaal wordt aangenomen dat die niet tot degradatie leidt.

Desondanks komt het bij oude isolatoren wel voor dat er door partiële ontladingen doorslagen ontstaan.

<sup>16</sup> Aanvullend geldt voor de Coqolite isolatie van de rail dat deze niet de spannings-voerende railgeleiders isoleert ten opzichte van aarde (hiervoor is voornamelijk de olie in de bak aanwezig), maar bedoeld is om een extra marge te creëren: dit minimaliseert de kans op een doorslag in het geval van een optredende bliksemoverspanning die via de kabels kan binnentreden. In de normale bedrijfssituatie is het elektrisch veld waaraan deze Coqolite isolatie blootgesteld wordt daarmee veel kleiner dan voor de railisolatoren.

Het beschreven mechanisme, waarbij er een volledige doorslag door de isolator optreedt, is niet waargenomen. Hierbij zal een grote inwendige beschadiging van de isolator optreden.

Het is niet geheel uit te sluiten dat een luchtinsluiting die zich relatief dicht aan het oppervlak bevindt, zich door het optreden van partiële ontladingen tijdens normaalbedrijf langzaam richting het isolatoroppervlak uitbreidt en hier voor deelontladingen aan het isolatoroppervlak leidt. De kans dat dit simultaan optreedt voor de 9 opeenvolgende isolatoren van de velden Transformator 1,2 en 3 is uiterst klein. Vanwege het geleidelijke karakter van deze faalwijze kan ze doorgaans door een periodieke visuele inspectie van de isolatoroppervlakken tijdig onderkend worden.

Een aanvullend onderzoek naar het inwendige van de raildoorvoerisolatoren in het gebied rondom en onder de waargenomen boomvormige ontladingssporen zou hierover verder uitsluitsel kunnen geven.

### Beoordeling

Onwaarschijnlijk.

## 7.8 Overzicht Hypothesen

In de onderstaande tabel zijn de hypothesen en de evaluatie weergegeven.

HYPOTHESEN	Ze er On waarschijnlijk	On waarschijnlijk	Mo ge lijk	Wa arschijnlijk	Ze er waarschijnlijk
1 Externe invloeden					
a. Overspanningen in het net	X				
b. Kortsluiting in de kabeleindsluiting van de MS/LS-transformatoren	X				
c. Verstoring vanuit het laagspanningsnet	X				
2 Interne oorzaken					
a. Vocht in olie			X		
b. Lekkage verontreinigde olie uit schakelkolommen				X	
c. Chemische incompatibiliteit	X				
d. Imperfecties isolatiemateriaal		X			

Op basis van de analyses worden de faalhypothese 'lekkage vanuit schakelkolommen' en 'vocht in olie' als meest waarschijnlijke hoofd-faaloorzaken aangewezen. Zeer waarschijnlijk hebben deze fenomenen elkaar versterkt en kan er het best gesproken worden van een gecombineerde faaloorzaak van vocht in olie en lekkage uit de schakelkolommen.

## 8 VERKLARING VAN HET STORINGSVERLOOP

In paragraaf 7.5 is beschreven hoe vocht in olie in combinatie met een lekkage van vervuilde olie vanuit de schakelkolommen leidt tot herhaaldelijke doorslagen over het oppervlak van de rail(doorvoer)isolator. Dit leidt tot koolstofvorming en neerslag van sludge. In dit hoofdstuk wordt allereerst verklaard hoe deze faaloorzaak geleid heeft tot de eerste kortsluiting, en vervolgens hoe dit verder is geëscaleerd tot de tweede kortsluiting in de explosie.

### 8.1 Escalatie in het storingsverloop tot de eerste kortsluiting

De raildoorvoerisolatoren zijn niet hermetisch afgesloten van de rest van de installatie. Na verloop van tijd zal een klein deel van de ontledingsproducten, zoals sludge, met de olie langs de doorvoeren en langs de Coqolite koker naar beneden bewegen. De onderkant van de rail en alle Coqolite isolatie op deze locaties zal dan ook verontreinigd raken.

Op de Coqolite isolatiekokers rondom de railkoppelingen van de onderste railgeleiders (fase L3) is sludge aangetroffen. Hierdoor kunnen op deze kokers oppervlakteontladingen ontstaan (zoals waargenomen, zie foto #47, Bijlage E). Hierdoor ontstaat uiteindelijk een geleidend pad over het isolatoroppervlak naar de geaarde bakwand. In combinatie met de verontreiniging van de olie kan vervolgens een doorslag plaatsvinden tussen de voorzijde van de isolatie en de bakwand optreden (zoals waargenomen, zie foto #39, Bijlage E).


Het wordt waarschijnlijk geacht dat de beschreven degradatie van de onderste railisolatoren tot een aantal fase-aarde-kortsluitingen geleid heeft, zoals deze op de dag van het incident zijn geregistreerd tussen 05:00 uur en 06:00 uur (zie hoofdstuk 4.2).

Door de hiermee gepaard gaande verdere aantasting van de raildoorvoerisolatoren zijn vanaf ongeveer 06:00 uur de fase-aarde-kortsluitingen overgegaan in relatief kleine doorslagen over het isolatoroppervlak van de raildoorvoerisolatoren van fase L1 en L2 van veld Transformator 3. Deze zijn te gering om als aardfout te worden gedetecteerd (overeenkomstig Figuur 4.1).

De doorslagen langs het isolatoroppervlak en zeker de directe doorslagen naar de messing ring hebben echter voldoende intensiteit en temperatuur om de omringende olie te ontleden in gasvormige producten, met name waterstof en vluchtige koolwaterstoffen. Dit is het zogenaamde 'gassen' van de installatie.

Zo lang de doorslagen in deze situatie een stroomsterkte van minder dan circa 100 A hebben kunnen ze door het ontstaan van de gasbel gedoofd worden. Dit fenomeen treedt ook op bij het testen van oliearme schakelaars bij zeer kleine stromen. Bij het schakelen in een vermogensschakelaar wordt altijd een vlamboog getrokken. Bij grote stromen komt daarbij veel energie vrij die leidt tot veel gasontwikkeling door verdamping en ontleding. Dit zorgt voor koeling en blussing van de vlamboog in de vermogensschakelaar. Bij kleine stromen zal in eerste instantie onvoldoende gasontwikkeling optreden tijdens de schakelhandeling, en daardoor wordt de vlamboog in eerste instantie niet geblust. De vlamboog blijft dus nog enige tijd staan, zelfs als de schakelaar zijn eindpositie heeft bereikt, totdat uiteindelijk wel voldoende gas is geproduceerd om de vlamboog alsnog te blussen. De geometrie van een olieschakelaar in deze toestand vergelijkbaar met de situatie rondom de raildoorvoeren voor wat betreft de grootte van het afgesloten olievolume en vervuilingsgraad is. Een dergelijke spontane blussing in een schakelaar is bij stromen tot circa 100 A gedocumenteerd en bekend bij schakelaar deskundigen.

Beide effecten samen, de ontledingen, vlamboog en de gasontwikkeling zijn zeer waarschijnlijk de oorzaak van de borrel- en sproeigeluiden die door de onderhoudsmonteurs zijn waargenomen. Dat dit in eerste instantie niet door de ASI geregistreerd is, houdt verband met de beperkte stroomsterkte van de



doorslagen langs het isolatoroppervlak. In dit stadium kan ongemerkt ontladingsactiviteit optreden, gepaard met degradatie van de isolatie-olie en de isolatoren. Vervuilde olie uit de Coqolite kokers kan vervolgens ook elders in de installatie terechtkomen.

De vrijgekomen gassen zullen, vanwege de smalle spleet tussen de kolom en de koker, gericht langs de schakelkolom opstijgen. De vervuilde olie wordt hierdoor ook naar boven getransporteerd. De gassen en vervuilde olie komen terecht en hopen zich op bij de doorvoer van de stroomtransformatoren die zich boven de schakelkolommen bevinden. Dit is een ruimte in de installatie die aan alle overige zijden is afgesloten door de volgende vier onderdelen:

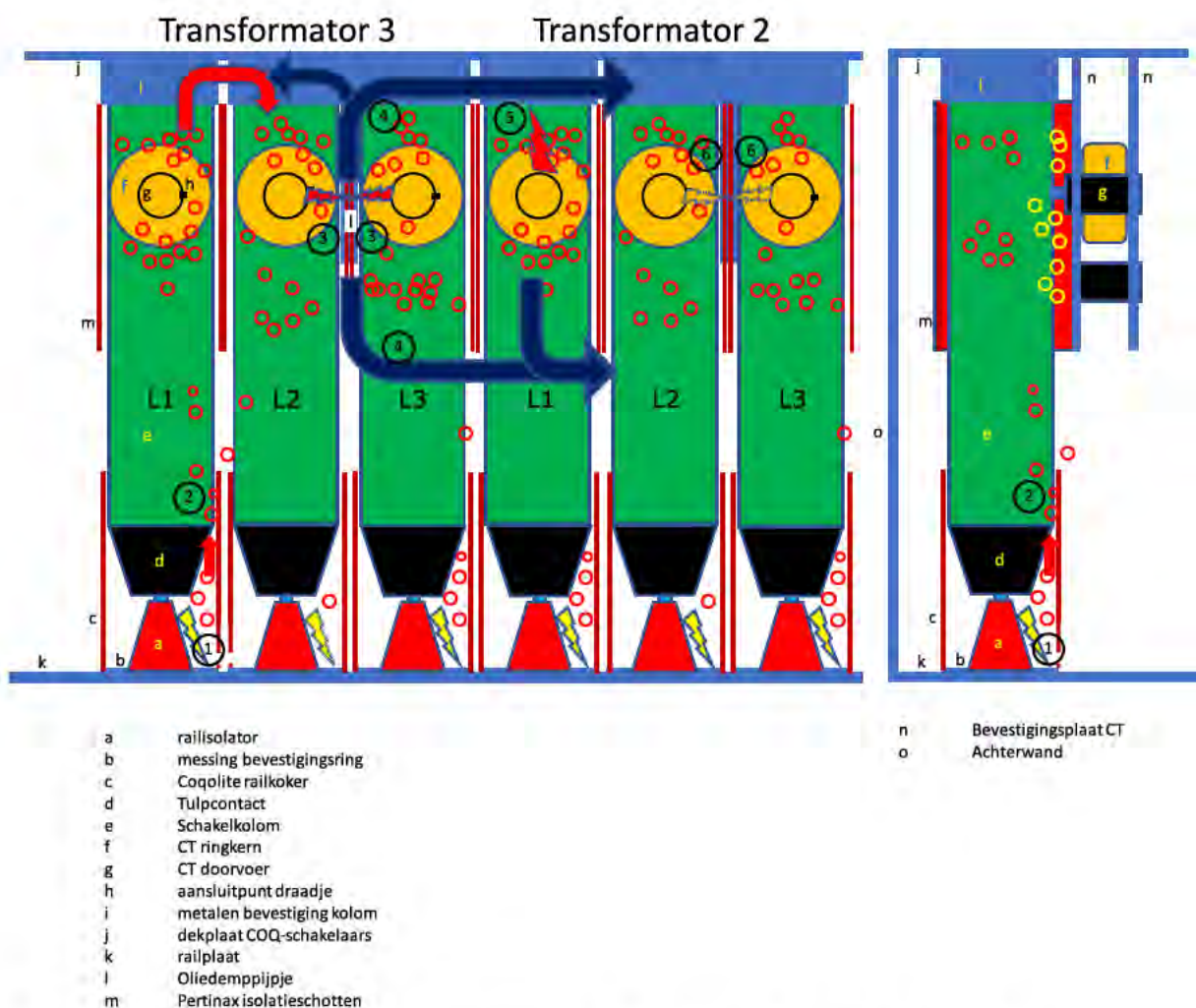
- de Pertinax isolatieschotten aan de linker- en rechterzijde
- de schakelkolom aan de railzijde
- de grondplaat van de CT aan de kabelzijde
- de behuizing van de schakelaar aan de bovenzijde.

Door vervuiling in combinatie met gasbellen wordt de isolerende werking van de olie hier sterk verminderd, waardoor een doorslag kan ontstaan tussen de primaire geleider door de stroomtransformator en aarde. Zodra de Pertinax isolatieschotten door de vlamboog of door de ontstane drukgolf beschadigd raken kan deze fase-aarde-kortsluiting snel overgaan in een fase-fase-kortsluiting.

In onderstaande schematische figuur zijn de belangrijkste stappen van bovenstaand storingsverloop op de posities 1 t/m 6 weergegeven. Deze figuur bevat een voor- en linkerzijdeaanzicht van de schakelaars van velden Transformator 3 en Transformator 2 in de COQ-installatie. Alle weergegeven componenten zijn hierbij omringd door isolatie-olie. Merk op dat de figuur niet op schaal is, en niet proportioneel.

Componenten aan de voorzijde (kabelzijde) van de COQ-installatie zijn niet weergegeven omwille van de overzichtelijkheid. Een globaal overzicht van twee complete velden is onder andere in Figuur 3-5 te vinden.






**Figuur 8-1 Eerste kortsluiting, vooraanzicht (links) en zijaanzicht (rechts)**

#### **Samenvatting van het ontstaan van de eerste kortsluiting (zie Figuur 8-1)**

- 1 Herhaalde doorslagen langs de railisolatoren (a) zorgen voor gasontwikkeling (als gevolg van ontleding van de isolatie-olie) en sludge-vorming. Dit treedt op in fasen L1 en L3 van transformator 3 en in alle fasen van Transformator 2. In fase L2 van Transformator 3 is dit in mindere mate opgetreden.
  - 2 De verontreinigingen en gassen stijgen gericht op door de smalle spleet tussen de schakelkolom (e) en de Coqolite railkoker (c).
  - 3 De verontreinigingen en gassen komen terecht in een vrijwel afgesloten ruimte. Door een lichte oliestroom kunnen de opstijgende gassen relatief eenvoudig in een naastliggende ruimte terechtkomen, bijvoorbeeld vanuit fase L1 en L3 naar L2. Daarnaast is er een zeer kleine opening tussen de fasen, aan de bovenzijde tussen de isolatieschotten (m) en de dekplaat van de installatie (j). Ook hierdoor kan verontreiniging uitgewisseld worden (rode pijl).
- In hoeverre de gassen en vervuiling zich ophopen in deze ruimte en er een doorslag ontstaat is mede afhankelijk van toevalligheden: een geringe afwijking van de montagepositie van een isolatieschot (m) kan al veel invloed hebben. Tevens verhoogt de aanwezigheid van het geaarde oliedemp pijpje (l) tussen de fasen L2 en L3 de kans op doorslag tussen de CT-doorvoer van fase L3 en



dit pijpje (I). Hierdoor komt het olie-demp pijpje (I) op fasespanning, waardoor eveneens een doorslag tussen L2 en dit pijpje bevorderd wordt.

- 4 De nu ontstane tweefasen-sluiting veroorzaakt een drukgolf, die zich door de installatie verspreidt (weergegeven met blauwe pijlen). Deze zal delen van de isolatie zwaar beschadigen (bijvoorbeeld het afscheuren van isolatieschotten) en verontreiniging en installatiedelen meevoeren.
- 5 Hierdoor ontstaat een fase-aardekortsluiting rondom de stroomtransformatordoorvoer van de fase L1 van Transformator 2.
- 6 Door verdere degradatie ontstaan op enig moment ook doorslagen op fase L2 en L3 van Transformator 2.

Vanwege de locatie van deze kortsluitingen (achter de vermogensschakelaar) en de selectiviteit van de beveiligingen in het net worden deze kortsluitingen door de betreffende COQ-schakelaar van het getroffen veld zelf afgeschakeld (zie hoofdstuk 4.3). De rail blijft daarbij onder spanning.

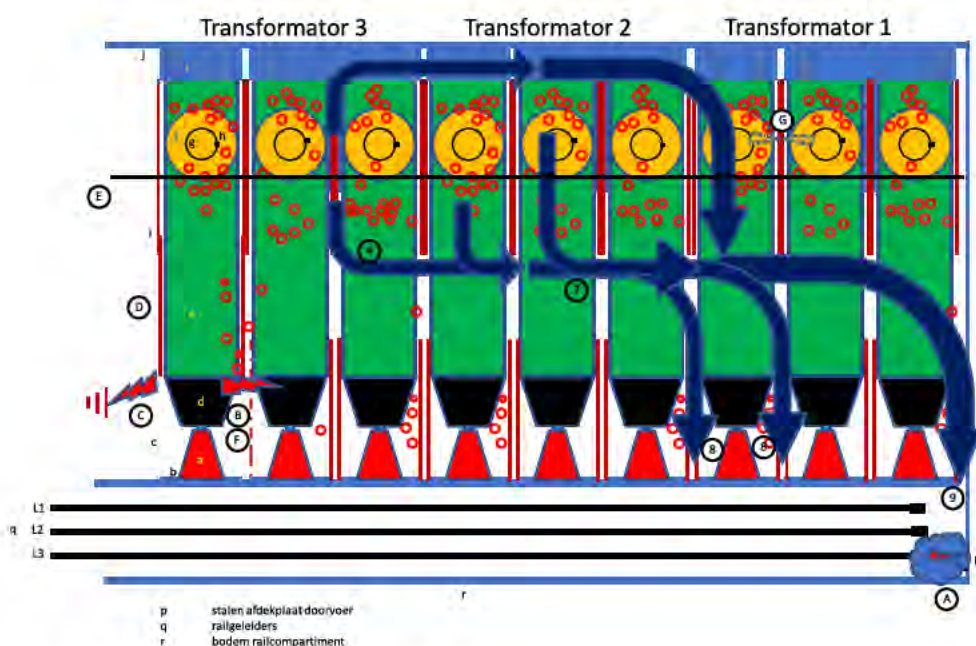
## 8.2 Escalatie tot de tweede kortsluiting

Door de eerste kortsluitingen zal afgebrand koper samen met ander materiaal naar beneden vallen. Er zijn zelfs delen van Pertinax schotten, inclusief de metalen bevestigingsklemmen, op de rail aangetroffen, die daar mogelijk al bij de eerste kortsluiting terecht zijn gekomen. Vervuild residu ontstaan bij deze inwendige kortsluiting zal zich ook door de bakken (links en rechts) van de COQ-installatie verspreiden, en in het railcompartiment terechtkomen.

Hierdoor zullen de ontladingen in het railcompartiment snel verergeren, met als gevolg een fase-aarde kortsluiting in de rail die vervolgens overgaat in een meer-fase kortsluiting. De kortsluiting kan zich manifesteren tussen twee of meerdere fasen, maar via de geaarde bak van de COQ-installatie. Dit komt overeen met het waargenomen schadebeeld: er zijn sporen van grote vlambogen tussen fasen L1 en L2 van het veld transformator 3 én fase L1 en de bak bij veld transformator 3, maar ook sporen van vlambogen op de rail in fase L3 en de bak. Op deze manier is een driefasen-kortsluiting ontstaan die 700 ms heeft gestaan. De energie van de vlamboog heeft geleid tot een zeer grote drukverhoging in de bak van de COQ-installatie, waardoor hete olie uit de bak wordt verneveld. Vervolgens is slechts een kleine hittebron (bijvoorbeeld een optredende lichtboog bovenin een nog in bedrijf staande schakelaar) voldoende om deze olienevel te ontsteken. Dit heeft geresulteerd in de steekvlam die horizontaal over de straat uittrad en vier mensen verwondde.

In onderstaande schematische figuur zijn de belangrijkste elementen van bovenstaande storingsverloop op de posities 7 t/m G weergegeven. In deze figuur is aanvullend het veld Transformator 1 weergegeven, alsook de bakwand die zich hier direct rechts van bevindt, alsook het onderliggende railcompartiment dat door een railplaat gescheiden is van het schakelaardeel. Componenten aan de voorzijde (kabelzijde) van de COQ-installatie zijn niet weergegeven omwille van de overzichtelijkheid. Deze figuur is niet op schaal en ook niet proportioneel.





**Figuur 8-2 Tweede kortsluiting**

**Samenvatting van het ontstaan van de tweede kortsluiting (zie Figuur 8-2)**

- A Verontreinigingen en afbrandproducten verspreiden zich door de gehele installatie.
- B Deels zal dit in de ruimtes tussen de Coqolite railkokers (e) terechtkomen, waar het weinig kwaad kan.
- C Op het uiteinde van de railplaat (k) is een driehoekige uitsparing voor montage-doeleinden en oliemonsternamen. Hierdoor kunnen de verontreinigingen van de eerste kortsluiting in het railcompartiment terechtkomen.
- D Als er zich voldoende materiaal op de bodem verzameld heeft, treedt een doorslag op tussen de onderste railgeleider (fase L3) en de afdekplaat van de raildoorvoer op de zijwand van het railcompartiment (p)
- E Als gevolg van de potentiaalverandering van fasen L1 en L2 treedt een doorslag op tussen de schakelkolommen (e) van fasen L1 en L2. De afstand tussen de geleiders van beide fasen is hier het kleinst, en de Coqolite isolatiekokers die een doorslag moeten verhinderen zijn reeds zwaar beschadigd door de eerdere doorslagen. Op deze wijze ontstaat een driefasen-kortsluiting.
- F Bij een driefasige sluiting neemt de spanning tussen fasen L1 en L2 af, en neemt de kans op een fase-aardfout toe. Deze treedt op bij fase L1, omdat hier de Coqolite isolatiekoker (c) het meest beschadigd is. Hierdoor dooft de kortsluiting tussen L1 en L3 weer.
- G Als gevolg van de kortsluiting naar aarde ontstaat een drukgolf die de Coqolite koker doet scheuren en naar boven drukt.
- H Door de drukgolf wordt olie uit de installatie geperst tot het aangegeven niveau.
- I Door het verdwijnen van de Coqolite koker en overige beschadiging her-ontsteekt de kortsluiting tussen fasen L1 en L2 na circa 200 ms.
- J Een willekeurige vonk of hittebron buiten het olieniveau kan het olie-luchtmengsel ontsteken. Een mogelijke bron wordt gevormd door de waargenomen doorslagen tussen de CT-doorvoer van fasen L1 en L2 van Transformator 1.

## 9 CONCLUSIES

Op basis van de gepresenteerde analyse komt DNV GL tot de conclusie dat de meest waarschijnlijke hoofdstoringsoorzaak voor de storing een combinatie is van:

- **het lekken van vervuilde olie uit de schakelkolommen van in bedrijf staande schakelaars naar de hieronder gelegen raildoorvoerisolatoren**
- **de aanwezigheid van vocht in de olie.**

Dit kan leiden tot een degradatiemechanisme dat overeenkomt met alle waarnemingen die in de COQ-installatie gedaan zijn.

### 9.1 Beantwoording onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de hoofd-onderzoeksvraag en de deelonderzoeksvragen, zoals geformuleerd door SZW /1/ beantwoord.

#### 9.1.1 Hoofdvraag

***Welke achterhaalbare (technische) oorzaak is aan te wijzen voor het falen van deze COQ-schakelinstallatie en beschrijf deze***

De meest waarschijnlijke technische grondoorzaak van het incident is het lekken van door schakelhandelingen verontreinigde olie uit de schakelkolommen van de COQ-installatie op de railisolatoren van de COQ-installatie. Als gevolg van de lekkage heeft zich bezinksel afgezet op het isolatoroppervlak waardoor de isolatiekwaliteit afnam en deelontladingen zijn ontstaan. Hierdoor is het isolatoroppervlak gedegradieerd. Er zijn ook aanwijzingen dat het vochtgehalte in de installatie hoger was dan normaal, hetgeen mogelijk heeft bijgedragen aan deze storing.

Ter plaatse van de ontladingen ontleedt de isolatieolie en ontstaat gasvorming. Dat is waargenomen door de monteurs ter plaatse in de vorm van 'borrel'- en 'sproei'-geluiden. Het gas heeft zich op diverse plaatsen in de installatie opgehoopt en heeft een kortsluiting veroorzaakt in het veld Transformator 3, die zich uitbreidde naar veld Transformator 2.

De drukgolf die gepaard is gegaan met deze kortsluiting is waargenomen op de videobeelden. De transformator beveiliging van beide afgaande velden hebben deze kortsluiting snel afgeschakeld. De installatie zelf is hierbij nog niet spanningsloos geworden.

De beschreven (eerste) kortsluiting heeft door de combinatie van vervuiling in de olie en de drukgolf van de kortsluiting de installatie versneld verder doen gedegradieerd, waardoor ter hoogte van de rail korte tijd later een tweede kortsluiting kon ontstaan. Deze tweede kortsluiting heeft 0.7 s geduurd en is afgeschakeld door het voedende veld in 10kV-station HVS-1.

Tijdens deze tweede kortsluiting is door de snel toenemende druk olie uit de installatie geperst. Deze olie was zeer waarschijnlijk oververhit als gevolg van de

10.1.d

10.1.d

Voor meer detail wordt verwezen

wordt naar hoofdstuk 7, met name 7.5 en hoofdstuk 8 voor een grafische uitwerking van oorzaak en gevolg.



## 9.1.2 Deelvragen

### ***Wat is het oordeel van de deskundige over de aangetroffen schadesporen op de bewijsstukken en foto's?***

De waarnemingen met bewijsstukken worden in detail besproken in Hoofdstuk 5 en in de Appendices C t/m F. In hoofdstuk 7 wordt de relatie beschreven tussen de waarnemingen en de mogelijke faaloorzaken. De schadesporen en bewijsstukken zijn in lijn met, de eerdergenoemde meest waarschijnlijke storingsoorzaak.

### ***Was het naar redelijk oordeel van de deskundige mogelijk geweest om de COQ-schakelinstallatie, in het schakelstation Hoogstraat, spanningsloos te kunnen schakelen direct na constateren "sproei" en "borrelen olie"?***

De installatie is binnen afzienbare tijd spanningsloos te schakelen. Hierbij dient de vermogensschakelaar in het voedend veld in 10kV-station HVS-1 uitgeschakeld te worden én dienen de afgaande richtingen spanningsloos geschakeld te worden (velden Keizerstraat, Lindebaan en Penstraat). DNV GL acht het mogelijk om binnen circa 20 minuten het veld in station HVS-1 uit te schakelen. De afgaande velden zullen binnen 1 à 2 uur spanningsloos geschakeld kunnen worden. In dit antwoord is meegenomen dat conform het oordeel van DNV GL vanwege onveiligheid in het 10kV-station Hoogstraat niet in dit station geschakeld kan worden, zie ook antwoord vraag 3.

### ***Beschrijf de mogelijke consequenties hiervan***

Het uitschakelen van het voedende veld in 10kV-station HVS-1 heeft als consequentie dat alle klanten die gevoed worden vanuit 10kV-station Hoogstraat spanningsloos worden gedurende onbepaalde tijd. Het betreft de volgende 10kV-stations: Hoogstraat, Maagdtheater, st. Annastraat, Markiezenhof, st. Antoniusstraat, Huize st. Catharina.

Het spanningsloos schakelen van de afgaande velden heeft normaliter geen directe consequenties, maar door veiligheidsmaatregelen, in verband met de sproei en borrelgeluiden, zullen drie 10kV-strengen tijdelijk (DNV GL verwacht circa 15 minuten<sup>17</sup>) spanningsloos geschakeld moeten worden. Het betreft de 10kV-stations: Tante Louise, Jumbo, HEMA, Thaliaplein, Huybergsestraat, Achter de Koevoet, Keizerstraat, Vlaszak, Lindebaan, Fluwenbroekstraat, Potterstraat en Penstraat.

### ***In welke mate voldoet/voldeed de isolatieolie, in de gefaalde sectie van de installatie (railcompartiment en schakelaars), aan de specificaties en waar blijkt dat uit?***

De COQ-installatie bevat in hoofdlijnen twee type isolatie:

- a de olie: DNV GL heeft afwijkingen gevonden in het vochtgehalte, maar er kan na dit incident niet eenduidig worden aangetoond of dit vóór of na het incident is ontstaan. Daarnaast heeft DNV GL 'sludge' (bezinksel) in de olie waargenomen op de bodem van de installatie. Dat is een teken van oliedegradatie. Er is niet met 100% zekerheid vast te stellen of deze afwijking vóór of na het incident is opgetreden, maar er zijn sterke aanwijzingen dat de sludge al voor het incident aanwezig was. Dit duidt op waarschijnlijke degradatie van de olie voorafgaand aan het incident
- b vast isolatiemateriaal. DNV GL heeft elektrische boomvorming op Coqolite kokers en op railisolatoren aangetroffen. Boomvorming van deze omvang verlaagt sterk de isolerende werking van de installatie en heeft lange tijd nodig om zich tot deze omvang te ontwikkelen. Om die reden concludeert DNV GL dat deze isolatie niet meer voldeed aan de houdspanningsspecificaties van 12 kV (IEC standaard spanningsniveaus).

<sup>17</sup> Gebaseerd op werkelijke schakelhandelingen tijdens het veiligstellen na het incident

### ***Wat is de oorzaak geweest van het borrelen van de isolatieolie?***

Het borrelen werd veroorzaakt door gasontwikkeling als gevolg van doorslagen (met toenemende intensiteit) van het contact naar aarde langs de raildoorvoerisolatoren, met name maar niet alleen optredend bij het veld Transformator 3.

### ***Wat is de oorzaak geweest van de sproei in deze installatie?***

De sproei is het hoorbare effect van intense ontladingen en doorslagen van het contact naar aarde langs de raildoorvoerisolatoren van onder andere veld Transformator 3. Dit soort elektrische ontladingen kan men waarnemen als knetterend of sproeiend geluid.

### ***Welke oorzaken zijn er aan te wijzen voor het exploderen van deze COQ schakelinstallatie?***

De explosie is het gevolg van het ontsteken van olie die door de optredende drukgolf uit de installatie werd geperst. De drukgolf ontstond als gevolg van een kortsluiting in de installatie.

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de eerste en de tweede kortsluiting. Het eerste incident is qua omvang en intensiteit relatief beperkt gebleven doordat de kortsluiting binnen 0,1 seconden is afgeschakeld. Bij het tweede incident werd de kortsluiting na circa 0,7 s afgeschakeld. Hierdoor was de toegevoerde elektrische energie aanzienlijk groter, waardoor de drukgolf krachtiger was en olie uit de installatie werd geperst.

### ***Ten gevolge waarvan en op welke wijze heeft de vuurbal kunnen ontstaan en was dit voorzienbaar?***

Op basis van de hoofdstukken 6 en 7 zijn de volgende oorzaken aan te wijzen, die tezamen tot de vuurbal hebben geleid:

- het ontstaan van een vlamboog op een locatie die niet door de voedende schakelaar op HVS-1 wordt afgeschakeld maar de lokale COQ-schakelaars. Hierdoor bleef de spanning op de overige velden aanwezig, en kon de isolatie versneld verder degraderen, gevoed door de interne drukgolf en door de aanwezige ontbrandingsproducten
- het ontstaan van een tweede kortsluiting die een tweede drukgolf veroorzaakt. Olie wordt uit de installatie geperst en deels verneveld. De olie is door zijn eigen hitte licht ontvlambaar en is ofwel spontaan ontbrand, ofwel ontstoken door vlambogen intern in de installatie in de zojuist ontstane sterk verhitte gas-olie-nivel.

De voorzienbaarheid van de vuurbal kan op twee relevante momenten teruggrijpen. Deze worden hieronder afzonderlijk behandeld:

- na het vaststellen van borrel- en sproeigeluiden om 6:27 uur: Ja, het was voorzienbaar dat er een vuurbal kon komen, het was echter niet te verwachten dat deze 10.1.d  
De COQ-installatie is een oliegevulde installatie. In de elektriciteitswereld is bekend dat oliegevulde componenten in uitzonderlijke gevallen tot gevaarlijke storingssituaties kunnen leiden. Nationaal gezien zijn er enkele incidenten bekend waarbij een COQ-installatie tot explosief falen heeft geleid. Bij directe aanwijzingen, zoals de genoemde borrel- en sproeigeluiden, mag aangenomen worden dat deze installatie een potentiële explosie tot gevolg kan hebben. De omvang en het tijdstip van de potentiële explosie is daarbij onbekend. Vaak blijft de schade als gevolg van een explosie beperkt tot de ruimte waarin de apparatuur is opgesteld. In slechts een klein aantal gevallen treedt een explosie op die groot genoeg is om schade aan te richten buiten de ruimte waarin de apparatuur is opgesteld
- na de eerste storing om 10:09:12 uur: Nee, het was niet voorzienbaar dat na de eerste storing een tweede storing zou optreden met een dergelijk grote vuurbal.  
Het is gebruikelijk dat elektriciteitsstoringen na één kortsluiting eventueel gepaard gaande met een vlamboog afgeschakeld worden. Het is mogelijk dat een dergelijke kortsluiting direct opgevolgd wordt door een kleine of grotere explosie. De structuur van het elektriciteitsnet in midden- en

laagspanningsnetten met bijbehorende beveiliging zorgt ervoor dat het probleemgebied wordt afgeschakeld, waardoor een tweede explosie na circa 90 seconden zeer ongebruikelijk is.

***Welke stroom heeft er vooraf / ten tijde van het ongeval gelopen over de COQ installatie en is deze van invloed geweest op het falen van deze installatie?***

Deze vraag moet in delen beantwoord worden.

- 1 de normale belastingstroom vlak voor het incident over de COQ-installatie is niet gemeten. Maar er zijn geen aanwijzingen dat deze groter is dan de nominale stroom. (Beveiligingen en signalen van overbelasting)
- 2 de aardfouten die opgetreden zijn hebben een grotere amplitude en in enkele gevallen is de beveiliging aangesproken, maar die hebben geen uitschakelcommando gegeven omdat de duur van de aardfouten te kort was. Dit betekent ook dat er nauwelijks opwarming heeft plaatsgevonden als gevolg van de aardfouten.
- 3 de kortsluitstromen tijdens de explosies zijn wel gemeten en weergegeven in hoofdstuk 4. Deze stromen hebben niet het falen veroorzaakt, maar hebben uiteraard wel de olie sterk verhit.

Tevens merken we op dat de beveiligingsinstellingen van het voedende veld (300 A) en van de transformatorvelden (40 A op 10kV-niveau) lager stonden ingesteld dan de nominale stroom waarvoor de installatie gespecificeerd is (respectievelijk 630 A en 400 A). Dat wil zeggen dat de beveiligingen de schakelaars doen uitschakelen voordat een mogelijke overbelasting van deze installatie kan optreden.

***Was er in de 24 uur of direct vooraf aan de storing een schakelhandeling geweest in het betreffende netwerkdeel? (waar blijkt dat uit en welke gevolgen had dat?)***

De beschikbare geregistreerde informatie gaat terug tot 1 week voorafgaand aan de explosie en laat geen schakelhandelingen zien in het betreffende netdeel.

***Is er schade te zien op onder andere de schakelstiften en of hoofdcontact en of tulpcontacten en waardoor is deze schade ontstaan?***

De waargenomen schade aan de schakelstiften en de hoofdcontacten komt overeen met een normaal schadebeeld als gevolg van het afschakelen van de kortsluiting die de eerste explosie heeft veroorzaakt. De waargenomen schade aan 'prikcontacten' van de rail en kabel aansluitingen kan verklaard worden door de vastgestelde doorslagen van de spannings-voerende geleiders op deze locaties naar aarde. Dit zijn de doorslagen die de storing hebben ingeleid.

***Welke andere aandachtspunten zijn er, die door de deskundige als relevant worden beschouwd?***

De lekkage van olie vanuit de schakelkolom naar het railcontact is onomstotelijk vastgesteld en waarschijnlijk de technische grondoorzaak van de explosie, mogelijk in combinatie met een hoog vochtgehalte dat onder meer het gevolg kan zijn van daklekkage (mogelijk inwatering), vastgesteld uit de onderhoudsgeschiedenis. De onderhoudsregistratie geeft onvoldoende inzicht of al het benodigde onderhoud is uitgevoerd dat nodig is om vocht in olie en degradatie in de vorm van sludge-vorming tijdig te herkennen, en de gevolgen te mitigeren.

Opgemerkt wordt dat de ontladingssporen op de railisolatoren zeer moeilijk waarneembaar zijn zonder de installatie spanningsloos te maken.

***Welke andere opmerkelijke zaken werden tijdens het onderzoek van de deskundige waargenomen?***

Hoofdstuk 5 en Appendices A t/m E geven een uitvoerig overzicht van alle vastgestelde bijzonderheden.

## 10 REFERENTIES

- /1/ "Onderzoeksopzet COQ 10 kV schakelinstallatie als referentie voor ongeval voor offerte",  
**10.2.e** Inspectie SZW, ongedateerd, ref.nr. 1815738/07.
- /2/ "Analyse relaisuitlezing MS-storing Hoogstraat (014.008) te Bergen op Zoom", Enexis, 12 november 2018, ref.nr. NSM20180496.
- /3/ "SZW21-1-loglijst\_WDT: ENL Electricity Enexis (archive data) 12.11.18 05:00:00 - 12.11.18 12:00:00", Enexis, 12 november 2018.
- /4/ "SZW11-1- Onderhoudsorders station hoogstraat van nieuw naar oud", Enexis, 12 november 2018.
- /5/ "SZW-11-2- Onderhoudsmeldingen Station hoogstraat van nieuw naar oud", Enexis, 12 november 2018.
- /6/ "SZW15-1- Testen en beoordelen isolatie-olie in MS-installaties Ecc-0080-I", Enexis, 12 november 2018.
- /7/ <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/onweer>.
- /8/ 18-3226 DNV GL rapport Inspectie SWZ bezoekverslag 1e inspectie storing 10kV ruimte Hoogstraat.
- /9/ "SZW10-1- Algemene Beschrijving Hoogspannings Schakelinstallaties COQ", N.V. COQ - Utrecht, maart 1961.
- /10/ "Beschrijving van een Hoogspannings-schakelinstallatie in geheel gesloten uitvoering in het type O-<sup>1</sup>/<sub>4</sub>-10.", N.V. COQ – Utrecht, 14 september 1960.



## APPENDIX A

### Inleiding voor de niet elektrotechnische lezer

#### Het elektriciteitsnet

Het elektriciteitsnet is een onderdeel van het systeem voor elektriciteitsvoorziening. Het net is nodig om elektrisch vermogen te brengen van de plaats waar het wordt opgewekt naar de plaats waar het verbruikt wordt. Binnen het net maken we onderscheid tussen het transportnet en het distributienet. Het transportnet of hoogspanningsnet heeft de hoogste spanningsniveaus, in Nederland 110 kV en hoger, en zorgt voor het verbinden van de belangrijkste opwekkers van elektriciteit (centrales, windmolenparken) met de centra van het gebruik van elektriciteit, zoals grote stedelijke agglomeraties en zware industrieën. Via transformatorstations is het transportnet met het distributienet verbonden. Het distributienet zorgt voor het verdelen van de elektrische energie naar de verbruikers.

Het geheel van elektrische circuits of verbindingen in het net (bovengrondse lijnen, ondergrondse kabels, transformatoren en koppelingen) dat zich tussen één of meerdere voedingspunten en één of meerdere afnamepunten bevindt, is de netstructuur. De opbouw van deze netstructuur van het elektriciteitsnet bepaalt in belangrijke mate de betrouwbaarheid. Zo kunnen netwerkdelen, en dus verbruikers, vanuit één of meerdere stations worden gevoed. We spreken dan van enkelvoudige resp. meervoudige voeding.

Elektriciteitsnetten kunnen vereenvoudigd worden voorgesteld als een verzameling van verbindingen en knooppunten. De hoogspanningslijnen in het hoogspanningsnet kunnen worden gezien als de snelwegen van de elektriciteitsvoorziening, schakelstations als verkeerspleinen en transformatorstations als de op- en afritten naar de autowegen en de provinciale wegen die het distributienet vertegenwoordigen. Ook in de distributienetten kennen we verbindingen (vaak ondergrondse kabels), en transformator- of verdeelstations. In de stations kan vermogen worden ingevoerd en herverdeeld over de verschillende verbindingen naar afnemers. Naast dat de stations de vermogensverdeling beheersen, hebben ze ook als functie om het net te beveiligen. Een station bestaat in principe uit een aantal zogenoemde inkomende velden waar vermogen wordt ingevoerd, en uitgaande velden waar vermogen wordt uitgevoerd. De in- en uitgaande velden kunnen met elkaar verbonden worden door middel van schakelaars en scheiders, vaak via een gemeenschappelijk deel, het zogenoemde railsysteem.

De belangrijkste onderdelen van de velden zijn de vermogenstransformatoren, de vermogensschakelaars en de scheiders. Een vermogenstransformator wordt (doorgaans) gebruikt om het elektrisch vermogen om te zetten naar een ander spanningsniveau. Een vermogensschakelaar kan de normale vermogensstroom in- en uitschakelen, maar kan ook abnormaal grote vermogens onderbreken die ontstaan als gevolg van een kortsluiting. Scheiders worden gebruikt om componenten fysiek aan elkaar te koppelen, of juist van elkaar los te koppelen, wanneer geen vermogen getransporteerd wordt. Hiermee worden de "wissels gezet". Daarnaast worden scheiders gebruikt om delen van de installatie veilig te stellen tijdens onderhoud, waardoor een veilige werksituatie wordt gecreëerd. Een scheider schakelt dus doorgaans zonder vermogen. Deze componenten, samen met de verbindingen daartussen, vormen het primaire systeem.

Om het primaire systeem naar behoren te laten functioneren is er een secundair systeem dat wordt gebruikt om het primaire systeem te monitoren, te bedienen, veilig te stellen en te beschermen. Onderdeel van het secundaire systeem, en belangrijk voor dit onderzoek, zijn de meettransformatoren. Deze hebben tot taak om de primaire stromen en spanningen te transformeren naar niveaus die door meet- en beveiligingsapparatuur veilig verwerkt kan worden. Meettransformatoren, veelal uitgevoerd als enerzijds stroomtransformator of anderzijds spanningstransformator, werken volgens het principe van een transformator.

## Enkele relevante begrippen

### Spanning, stroom, weerstand en impedantie

De drijvende kracht van het transport van elektrische energie is de elektrische spanning (vergelijkbaar met de druk in een waterleiding). Het resultaat van deze drijvende kracht is dat er geladen deeltjes gaan bewegen, er loopt een elektrische stroom. De verhouding tussen spanning en stroom noemen we de impedantie. Bij een constante spanning (gelijkspanning) ontstaat een constante stroom (gelijkstroom), de impedantie bestaat dan uit de elektrische weerstand. Hoe hoger de weerstand, hoe lager de stroomsterkte. In de elektriciteitsvoorziening wordt doorgaans geen gelijkspanning gebruikt maar wisselspanning. In dat geval is de impedantie niet gelijk aan de (gelijkstroom)weerstand maar is ze complexer omdat ook de inducties en capaciteiten van het systeem een rol spelen.

### Elektrisch veld en veldsturing

Wanneer tussen twee geleiders een spanningsverschil bestaat ontstaat tussen de geleiders een elektrisch veld. Dit veld oefent krachten uit op elektrisch geladen deeltjes (elektronen, ionen). Indien de veldsterkte hoger wordt dan het isolatiemateriaal aankan leidt dit een kortsluiting in. Om die reden worden in vermogenscomponenten materialen gebruikt die bestand zijn tegen een hoge veldsterkte, en worden ze zo ontworpen dat de elektrische veldsterkte voldoende laag blijft.

De gemiddelde veldsterkte is gelijk aan het spanningsverschil tussen de geleiders gedeeld door de onderlinge afstand van de geleiders. Maar lokaal hangt de veldsterkte ook sterk af van de vorm van de geleiders. Een kleine afrondingsstraal leidt tot een hoge veldsterkte. Dit treedt op bij dunne geleiders, spitse uiteinden, het abrupt eindigen van geleiders en knikken in geleiders. Ook overgangen tussen materialen met verschillende isolerende eigenschappen, of lokale afwijkingen in zulke materialen, kunnen leiden tot een verhoogde veldsterkte. We spreken dan van veldversterking. Op zulke plaatsen wordt gebruikt gemaakt van zorgvuldig ontworpen extra geleidende delen die zorgen voor een gelijkmatige afbouw van het elektrische veld. We spreken dan van veldsturing.

### Geleiders en isolatie

Twee relevante aspecten in elektriciteit zijn stroom en spanning. Een stroom kan vloeien door een geleider. Vaak zijn geleiders gemaakt van metalen, omdat die vanuit nature elektriciteit kunnen geleiden. In de elektrotechniek worden voornamelijk twee metalen gebruikt als geleiders: Koper en Aluminium. Deze metalen hebben een lage elektrische weerstand, en de kosten zijn relatief laag. Naast metalen zijn er ook andere materialen die geleiden, een belangrijk voorbeeld is koolstof. In situaties waar zeer kleine stromen vloeien wordt koolstof gebruikt in het ontwerp, bijvoorbeeld als hulpmiddel voor veldsturing. Ook in onbedoelde situaties, zoals bij verbranding of ontleding, kan een koolstof ontstaan en onbedoeld een geleidend pad creëren. Een voorbeeld hiervan zijn elektrische boomvormige ontladingssporen.

Als tegenhanger is isolatiemateriaal nodig om geleiders met verschillende spanningen van elkaar te isoleren. Er is een zeer grote verscheidenheid aan isolatiemateriaal, hieronder enkele voorbeelden:

- gassen: bijvoorbeeld lucht, SF<sub>6</sub>, Stikstof
- vloeistoffen: Olie, zuiver water
- baste stoffen: Porselein, giethars, papier, hout, kunststof.

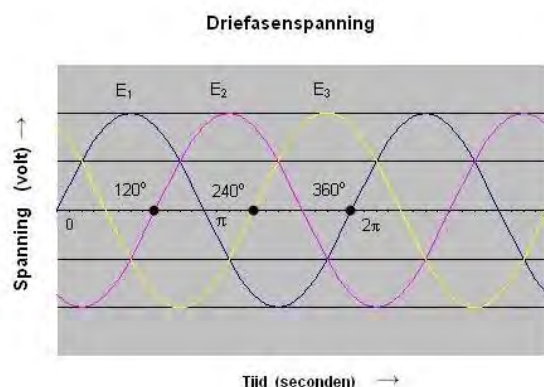
Het isolatiemateriaal heeft altijd een maximale veldsterkte die hij kan weerstaan. Een hogere veldsterkte zal leiden tot een (deel)ontlading. In dat geval slaat de isolator door en kan er een stroom lopen, zie kortsluiting en vlamboog. De isolatiesterkte wordt sterk beïnvloed door de kwaliteit en zuiverheid van het isolatiemateriaal. Met name grensvlakken tussen diverse isolatiematerialen zijn vaak een zwakke

plek, omdat zich daar veldverstoringen kunnen voordoen als gevolg van degradatie en/of verontreinigingen.

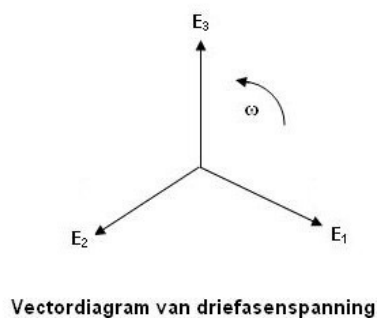
## Drie fasen-systeem

Bij transport van elektrisch vermogen wordt gebruik gemaakt van zogenaamde wisselspanning. De spanning is niet constant maar varieert sinusvormig in de tijd met een frequentie van 50 trillingen per seconde (50 Hz). Wanneer elektriciteit wordt opgewekt met een roterende generator ontstaat als vanzelf de sinusvorm. Deze spanningsvorm maakt het bovendien mogelijk om het vermogen om te zetten naar een ander spanningsniveau met een transformator.

Daarnaast wordt gebruik gemaakt van een driefasen systeem. We transporteren het vermogen via een set van drie geleiders, waarbij op elke geleider de sinusvormige spanning in tijd verschoven is ten opzichte van de spanning op de andere geleiders. Dit wordt ook wel draaistroom of krachtstroom genoemd, en is schematisch weergegeven in figuur A-1. We spreken over de drie fasen van de spanning.



**Figuur A-1 Driefasenspanning**



**Figuur A-2 Vectordiagram driefasenspanning**

De spanning kan ook worden weergegeven als een vector in een zogenaamd vectordiagram, zoals in bovenstaande figuur A-2. Hierbij duidt de lengte van de pijl op de amplitude van de wisselspanning (de maximale grootte van de variërende spanning), en de hoek op de fasehoek van de betreffende spanning.

## Nulpunt en aarde

Wanneer de drie fase-spanningen even groot en gelijk verdeeld zijn (een onderling faseverschil hebben van  $120^\circ$ ), dan is de gemiddelde spanning op elk moment nul. Het punt waar de gemiddelde spanning heerst noemen we het nulpunt, of het sterpunt. Het punt waar de spanning echt nul is noemen we "aarde", gelijk aan de potentiaal van het aardoppervlak.

De gemiddelde spanning is niet altijd nul. Wanneer bijvoorbeeld één fase is kortgesloten naar aarde zal de gemiddelde spanning ongelijk zijn aan nul. We spreken dan van een sterpuntverschuiving, en deze kan leiden tot verhoging van de spanning op de andere fasen, en dit kan leiden tot isolatieproblemen.

Omwille van de veiligheid en/of potentiële isolatieproblemen wordt het nulpunt soms verbonden met aarde, zodat er geen spanningsverschil bestaat tussen het nulpunt en de aarde. Dit heeft tot gevolg dat bij bijvoorbeeld een éénfase naar aarde kortsluiting een grote kortsluitstroom kan vloeien en een spanningsdip kan ontstaan. De kortsluitstromen kunnen daarbij zorgen voor grote warmteontwikkeling met alle gevolgen van dien. Netten worden daarom vaak niet rechtstreeks ("star") geaard maar via een zogenaamde impedantie (weerstand, spoel of sterpunttransformator) die de vereffeningstroom beperkt.

## Kortsluiting en vlamboog

Wanneer een onbedoelde elektrische verbinding ontstaat tussen twee geleiders waartussen een spanningsverschil bestaat spreken we van een kortsluiting. De impedantie tussen de twee geleiders wordt nagenoeg nul en er gaat een kortsluitstroom lopen. De grootte van de kortsluitstroom hangt daarbij af van de impedantie van het kortgesloten circuit. Vaak is de kortsluitstroom zeer groot, maar er zijn ook situaties waarbij de kortsluitstroom beperkt is door de hoge circuit impedantie, we spreken dan van een hoog-impedante kortsluiting. Soms kan een kortsluiting spontaan doven doordat de spanning (de drijvende kracht) daalt als gevolg van de kortsluitstroom. Na het onderbreken van de kortsluitstroom zal de spanning weer stijgen en dit kan opnieuw een kortsluiting inleiden die vervolgens weer dooft, et cetera. We spreken dan van een intermitterende kortsluiting.

De kortsluiting kan ontstaan tussen één fase en aarde (éénfase-aarde kortsluiting ook wel aardsluiting of aardfout genoemd), tussen twee fasen (fase-fase kortsluiting) of tussen meer fasen en aarde (driefasen-aarde kortsluiting of meer-fasen kortsluiting).

Wanneer een kortsluiting ontstaat in een transmissie- of distributiecircuit ontstaat vaak een vlamboog. Een vlamboog is een ontleding in een gas van zeer hoge temperatuur tussen twee geleiders waartussen een spanningsverschil bestaat. Door de zeer hoge temperatuur is het gas deels geïoniseerd en geleidend. Het gas waarin de vlamboog optreedt kan ook ontstaan door verdamping van vloeistoffen of vaste stoffen.

10.1.d  
10.1.d

Voorbeelden zijn

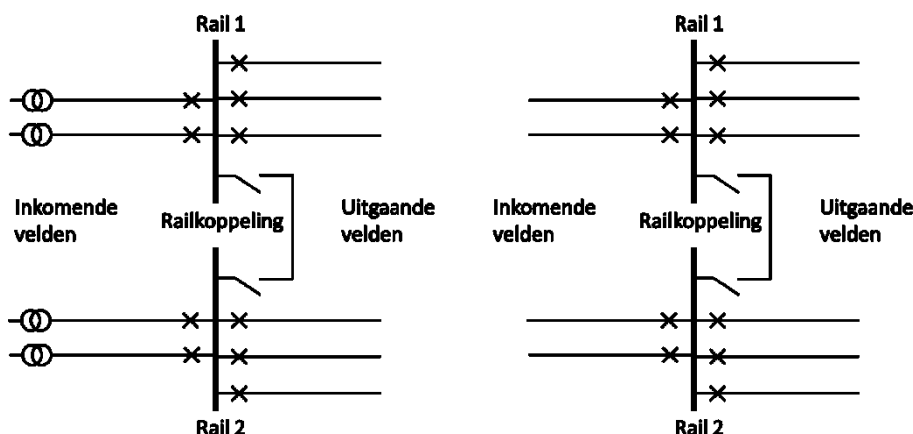
voetpunten, en gesmolten en verkleurde materialen (een voetpunt ontstaat door sterke lokale verhitting op de plaats waar de vlamboog contact maakt met de metalen stroom-voerende delen).

## Schakelstation en verdeelstation

Zoals gezegd bestaat het distributienet uit verbindingen (vaak ondergrondse kabels), en stations. In dit onderzoek zijn twee soorten stations van belang, schakelstations en verdeelstations. In een schakelstation wordt het vermogen herverdeeld over de verschillende verbindingen naar afnemers bij gelijkblijvend spanningsniveau. Een schakelstation bevat inkomende velden waar vermogen wordt ingevoerd, en uitgaande velden waar vermogen wordt uitgevoerd. De in- en uitgaande velden kunnen met elkaar verbonden worden door middel van schakelaars en scheiders, vaak via een gemeenschappelijk deel, het zogenoemde railsysteem. Een verdeelstation lijkt in veel opzichten op een schakelstation maar bevat daarnaast ook vermogenstransformatoren om het vermogen naar het gewenste spanningsniveau te transformeren.

Figuur A-3 geeft schematisch de opbouw van een verdeelstation en een schakelstation weer.





**Figuur A-3 Schematische weergave van een verdeelstation (links) en schakelstation (rechts)**

In een station onderkennen we primaire en secundaire apparatuur en systemen. De primaire componenten dienen voor vermogenstransport of distributie en kunnen grote vermogens voeren, transformeren en/of in- en uitschakelen. Het secundaire systeem kan geen grote vermogens voeren of schakelen, maar dient om het primaire systeem naar behoren te laten functioneren (monitoren, bedienen, veiligstellen, beveiligen).

De belangrijkste primaire componenten van een station zijn de transformatoren, de vermogensschakelaars en de scheiders. Zoals eerder beschreven wordt een vermogensschakelaar gebruikt om de normale vermogensstroom in- en uitschakelen, en om abnormaal grote (kortsluit)vermogens te onderbreken. Scheiders worden gebruikt om componenten fysiek aan elkaar te koppelen, of juist van elkaar los te koppelen, wanneer geen vermogen getransporteerd wordt, of om delen van de installatie veilig te stellen tijdens onderhoud. Een tussenvorm is de lastscheider, deze is wel in staat om de normale vermogensstroom (belastingsstroom) af te schakelen maar geen kortsluitstroom.

## Schakelinstallatie

Voor distributie-verdeelstations worden de schakelaars en scheiders doorgaans ondergebracht in een schakelinstallatie, samen met het railsysteem en de verbindingen met de inkomende en uitgaande velden. De installatie bevindt zich in een speciale ruimte, de schakelruimte. De schakelinstallatie bevat een aantal compartimenten die fysiek gescheiden zijn, zoals het rail-compartiment, de kabel-compartimenten en compartimenten voor schakelaars en scheiders. In de wanden van de compartimenten bevinden zich doorvoeringen om elektrisch vermogen veilig en geïsoleerd naar een volgend compartiment te geleiden. De in dit rapport gebruikte schakelinstallatie is een zogenaamd FMX-systeem van fabrikaat Eaton. Dit ontwerp maakt gebruik van vacuümvermogensschakelaars, epoxyharsisolatie en een elektromagnetisch aandrijfmechanisme.

## Vermogensschakelaar

Vermogensschakelaars bestaan in allerlei varianten afhankelijk van het aandrijfmechanisme, de isolatiematerialen en het blusmedium. Het aandrijfmechanisme zorgt op commando dat de schakelcontacten worden geopend of gesloten. Het blusmedium draagt er zorg voor dat de vlamboog, die ontstaat bij het openen van stroom voerende contacten, wordt gedoofd ("geblust"). De functie van de isolatie is om de spanning voerende geleiders van elkaar geïsoleerd te houden.

## (Last)scheider

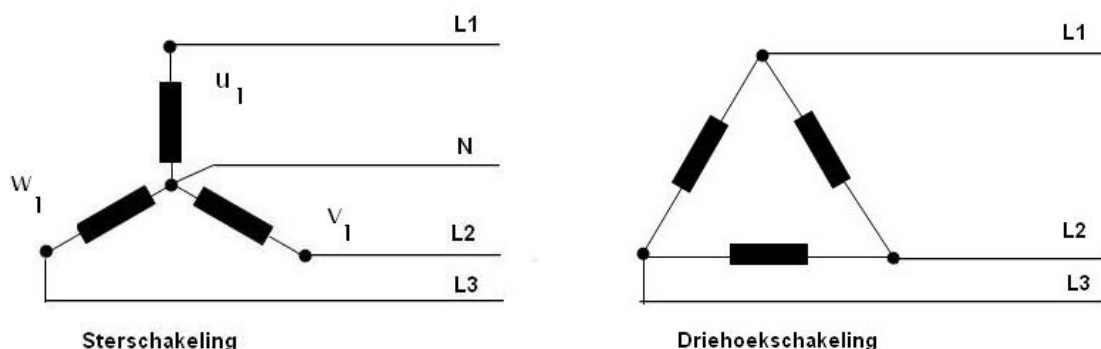
Vermogensschakelaars zijn gezien hun complexiteit relatief duur en zijn gesloten compartimenten. Dergelijke complexiteit is alleen noodzakelijk indien kortsluitingen afgeschakeld moeten kunnen worden. Indien dat niet noodzakelijk is, kan volstaan worden met eenvoudiger type schakelaars:

- Scheiders kunnen geen vermogen schakelen, maar hebben als voornaamste doel om een zichtbare elektrische scheiding te maken. Hierdoor kan er gewerkt worden aan elektrische installaties. Een zichtbare scheiding is dus niet mogelijk met een vermogensschakelaar, om die reden zijn scheiders in een elektrische installatie noodzakelijk. Scheiders kunnen zowel motor- als handbediend zijn. Veelal worden scheiders driefasig geschakeld.
- Lastscheiders kunnen wel vermogen schakelen tot een maximum van de nominale belastingstroom. Lastscheiders bestaan in vele uitvoeringsvarianten, zoals motorbediend en handbediend. Daarnaast kunnen lastscheiders zowel enkelfasig als driefasig bediend worden. Een veel voorkomende lastscheider in Nederland is de zogenoemde Magnefix installatie.

## Vermogenstransformator of distributietransformator

Bij transport van elektriciteit gebruiken we hoge spanningen om energieverliezen te beperken. Maar bij de gebruiker is een lage spanning gewenst. Met een vermogenstransformator kan het vermogen naar elk ander spanningsniveau omgezet worden. Het principe berust op twee spoelen gewikkeld om dezelfde ijzerkern. De eerste spoel produceert in de ijzerkern een magneetveld, en de tweede spoel zet dat magneetveld weer om in elektriciteit bij de gewenste spanning. De wikkeling aan de hoogspanningszijde noemen we doorgaans de primaire wikkeling, de wikkeling aan laagspanningszijde de secundaire wikkeling. Soms is nog sprake van een tertiaire wikkeling die vooral dient om de symmetrie van de drie fase-spanningen te garanderen.

Voor het transformeren van een drie-fasen vermogensstroom wordt doorgaans een drie-fasen transformator gebruikt. Dit is één component met voor elke fase een primaire en een secundaire wikkeling die om een gemeenschappelijke kern gewikkeld zijn. De drie primaire wikkelingen kunnen op verschillende manieren met elkaar verbonden worden, de meest gangbare schakelingen zijn de stersschakeling en de driehoekschakeling. Deze zijn schematisch getoond in onderstaande figuur A-3. In dit voorbeeld worden de drie fasen aangeduid met L1, L2 en L3.



**Figuur A-3 Stersschakeling en driehoekschakeling van transformator fasewikkelingen**

## Meettransformator

De meettransformator werkt volgens hetzelfde principe als de vermogenstransformator, maar wordt alleen gebruikt om stromen en spanningen te meten. We spreken over een spanningstransformator (VT of "voltage transformer") en een stroomtransformator (CT of "current transformer"). Er bestaan ook gecombineerde spanning/stroomtransformatoren.

Een meettransformator wordt vaak per fase toegepast zodat normaliter in een driefasen-systeem 3 afzonderlijke meettransformatoren aanwezig zijn. De meettransformator maakt deel uit van het secundaire systeem.

## Hoogspanningsverbindingen: kabels en lijnen

Voor het transport van elektrisch vermogen, van opwekkers naar stations, tussen stations onderling en van stations naar verbruikers, wordt gebruik gemaakt van (hoogspannings-)lijnen en kabels. Hoogspanningslijnen zijn (meestal niet-geïsoleerde) geleiders die bovengronds met behulp van isolatoren worden opgehangen aan masten. Lijnen worden vaak toegepast bij hoge tot zeer hoge spanningen. In het kader van dit onderzoek spelen hoogspanningslijnen geen rol.

Kabels zijn geïsoleerde geleiders en worden vaak ondergronds gelegd of in zogenaamde kabelgoten. De spanning-voerende geleider is omgeven door een isolatiemateriaal. Om het isolatiemateriaal bevindt zich een geleidende mantel (de retourgeleider) en een beschermende mantel ter voorkoming van vochtindringing en beschadiging. Kabels worden soms gebruikt bij hoge en zeer hoge spanningen, en op grote schaal bij midden-spanning en laagspanning.


## Kabelconstructie

Er bestaan kabels in allerlei varianten. Transport kan plaatsvinden met aparte kabels per fase (één-fase kabel) of met één kabel voor drie fasen (drie-fasen kabel). We beperken ons hier tot de één-fase kabel omdat die relevant is voor dit onderzoek. Deze kabel heeft een eenvoudige concentrische structuur. De geleider kan uit massief materiaal bestaan (koper of aluminium) of uit geslagen draden. Om de kabel bevindt zich het isolatiemedium (bijvoorbeeld polyetheen, PVC of papier/olie), waaromheen een geleidende mantel is aangebracht (de retourgeleider). Op het grensvlak van geleider en isolatiemateriaal wordt een halfgeleidende laag aangebracht die sterk hecht aan het isolatiemateriaal. Deze laag zorgt ervoor dat, wanneer geleider en isolatiemateriaal niet perfect aansluiten, in de daardoor ontstane holte of spleet geen elektrisch veld heerst. Dat zou namelijk ontladingen kunnen veroorzaken die op ten duur kunnen uitgroeien tot een doorslag.

De kwaliteit van een kabel kan in de fabrieksmatige productieomgeving doorgaans in hoge mate worden gecontroleerd. Dat geldt niet voor situaties waar twee kabels in het veld verbonden moeten worden of waar een kabel wordt aangesloten op een station. Daar wordt de concentrische structuur verbroken en moet extra aandacht worden besteed aan de verbinding om te voorkomen dat veldversterking optreedt, of dat verontreinigingen binnendringen.

Een verbinding tussen twee kabels wordt een mof of kabelmof genoemd. Belangrijk bij een kabelmof is dat de geleiders en de halfgeleidende lagen van beide kabels goed verbonden worden en dat de gehanteerde constructies en materialen geen veldversterking veroorzaken. Vaak wordt daarbij gebruik gemaakt van veldsturing (zie de paragraaf "Elektrisch veld en veldsturing"). Tevens moet gezorgd worden dat verontreinigingen en vocht niet in de kabel kunnen indringen.

Wanneer een kabel wordt aangesloten op een station wordt gebruik gemaakt van een kabeleindsluiting. Belangrijk hierbij is dat de geleiders van de kabel goed worden aangesloten op de geleiders van het



station. De halfgeleidende lagen en de isolatiematerialen eindigen bij de kabeleindsluiting. Wanneer dit ongecontroleerd gebeurt kan dit leiden tot veldversterking, en om dat te voorkomen wordt gebruik gemaakt van veldsturing. Ook hier moet gezorgd worden dat verontreinigingen en vocht niet in de kabel kunnen indringen.

## Beveiliging

Elektriciteitsnetten hebben te maken met hoge stromen en hoge spanningen, die inherent gevaarlijk zijn. Om die reden is goede apparatuur vereist en is een vorm van beveiliging vereist indien de installatie faalt (technisch of menselijk), zodat schade en letsel kan worden beperkt en/of voorkomen. In de elektrotechniek worden diverse vormen van beveiliging toegepast. Op het spanningsniveau, waar dit onderzoek zich op concentreert, wordt daarvoor gebruik gemaakt van beveiligingsrelais, in combinatie met meettransformatoren en vermogensschakelaars. De beveiligingsrelais vergelijken de stromen en/of spanningen met vooraf ingestelde criteria en geven bij overschrijding van deze criteria na een vooraf ingesteld tijdsperiode een uitschakelcommando aan de vermogensschakelaars. Enkele typen beveiligingen worden hier kort benoemd:

- overstroom Maximum Tijd: Reageert op de stroomsterkte. Indien de vooraf ingestelde stroomsterkte overschreden wordt, geeft het relais na de ingestelde tijd een uitschakelcommando
- differentiaal: Vergelijkt ingaande en uitgaande stromen van een bepaalde component. Indien de stromen opgeteld ongelijk zijn aan ongeveer nul, geeft het relais na een ingestelde tijd een uitschakelcommando. Meestal is de ingestelde tijd nihil, om zo snel mogelijk de kortsluiting af te schakelen
- distantie: Dit relais berekent uit het quotiënt van spanning en stroom de impedantie in het net. Indien de impedantie kleiner wordt dan vooraf ingestelde waarden, geeft het relais na een vooraf ingestelde tijd een uitschakelcommando. De impedantie van het net is in geval van kortsluiting een maat voor de afstand van de kortsluit locatie tot de plaats van de sensoren (meettransformatoren). Om die reden wordt dit distantiebeveiliging genoemd
- lichtboogbeveiliging: Zie kopje hieronder.



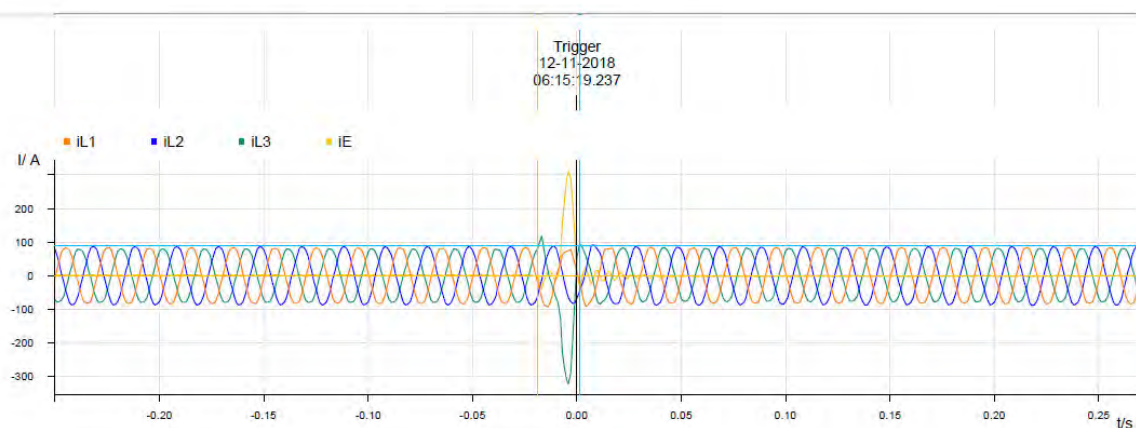
## APPENDIX B

### Kortsluitregistraties beveiligingsrelais

HSS Woensdrecht / HVS 1 Veld 5 HSS WDR W11 7SA610 V4.6 Var

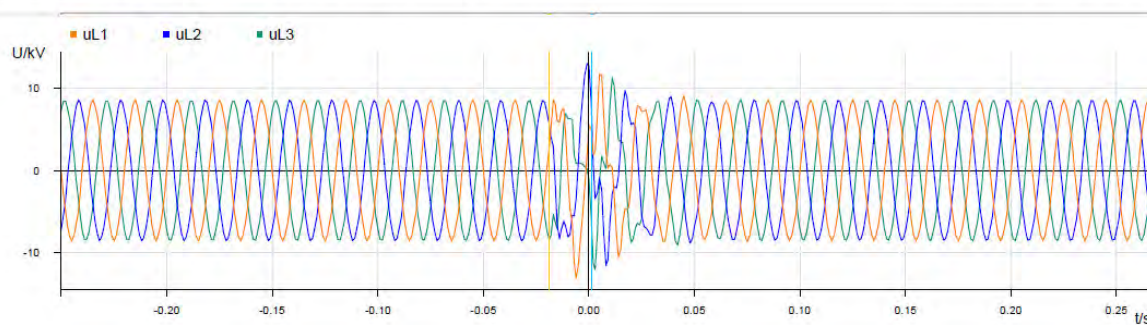
12-11-2018 / 06:15:19.237

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-18.9	IE	-2.3042 A	1.7498 A
Cursor 2:	1.3	IL3	90.874 A	161.69 A
C2 - C1	20.2	IL3 - IE	93.178 A	159.94 A



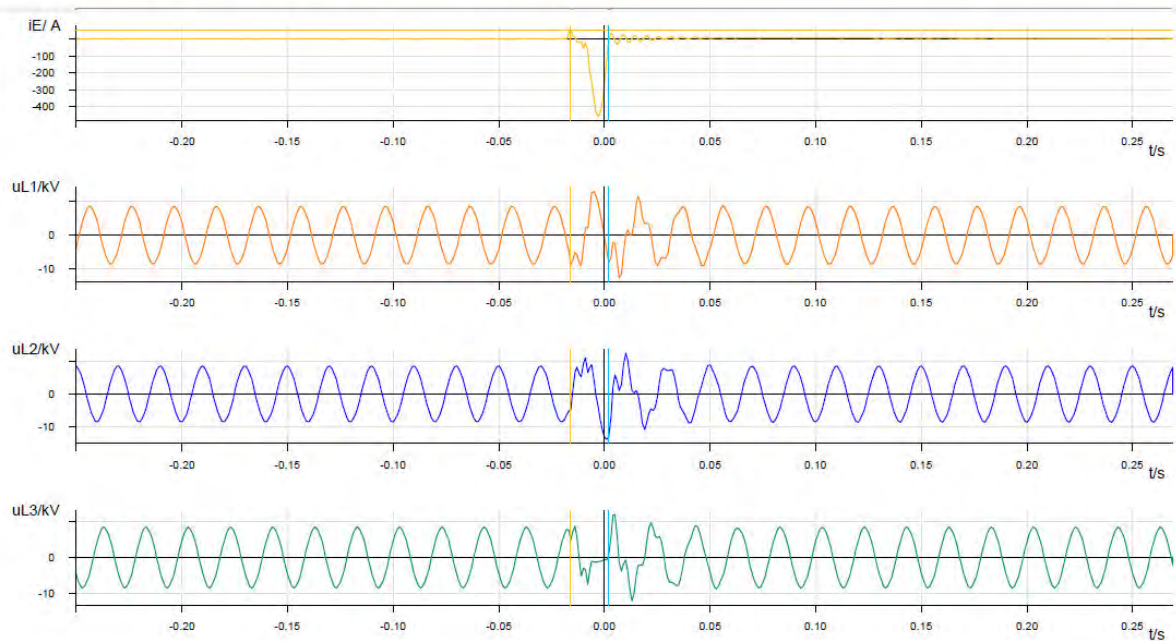
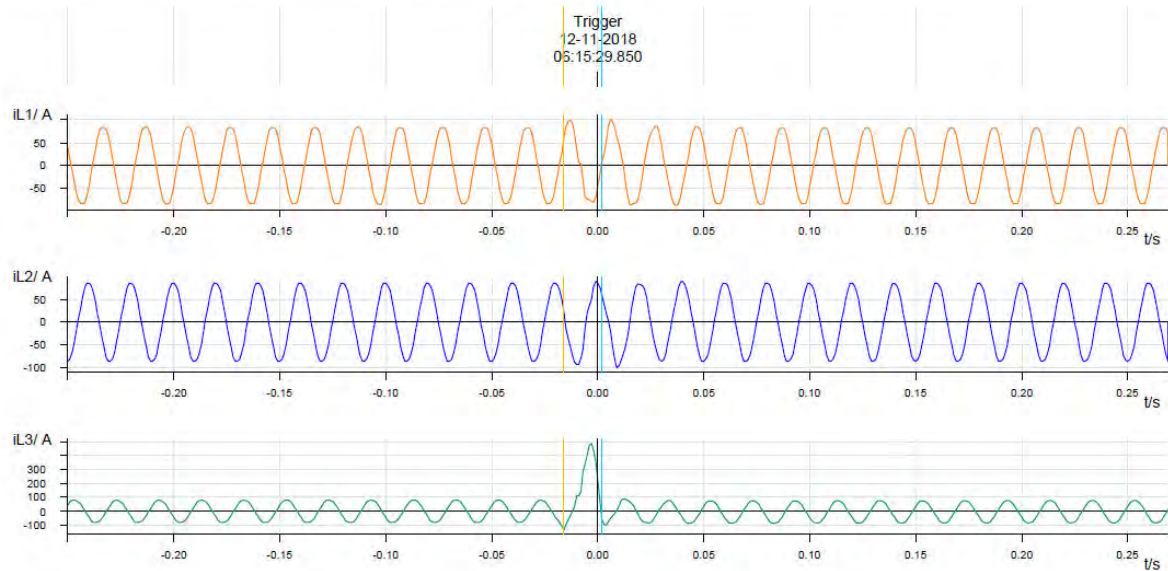
HSS Woensdrecht / HVS 1 Veld 5 HSS WDR W11 7SA610 V4.6 Var

12-11-2018 / 06:15:19.237



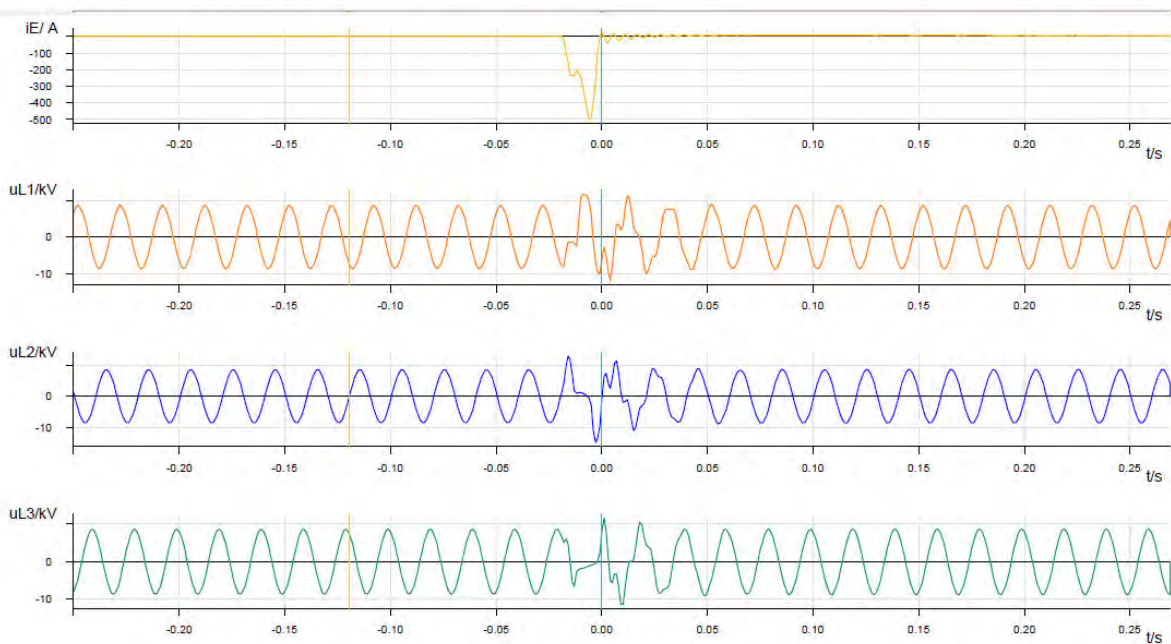
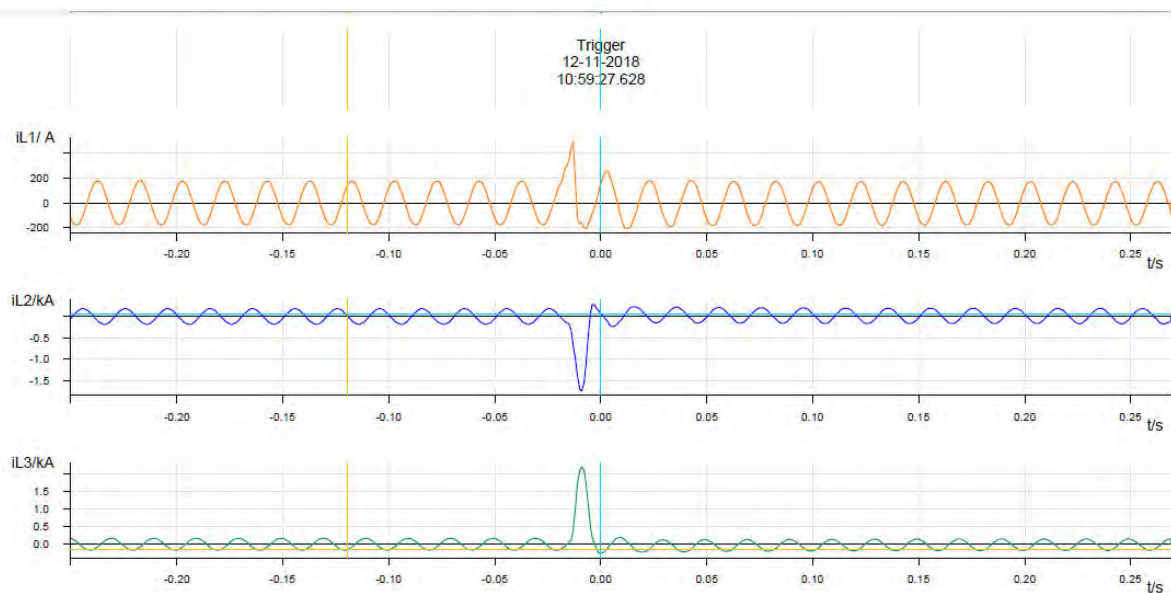
**Figuur B-10-1 Aardfout 1**

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-16.0	IE	53.344 A	14.328 A



Figuur B-10-2 Aardfout 2

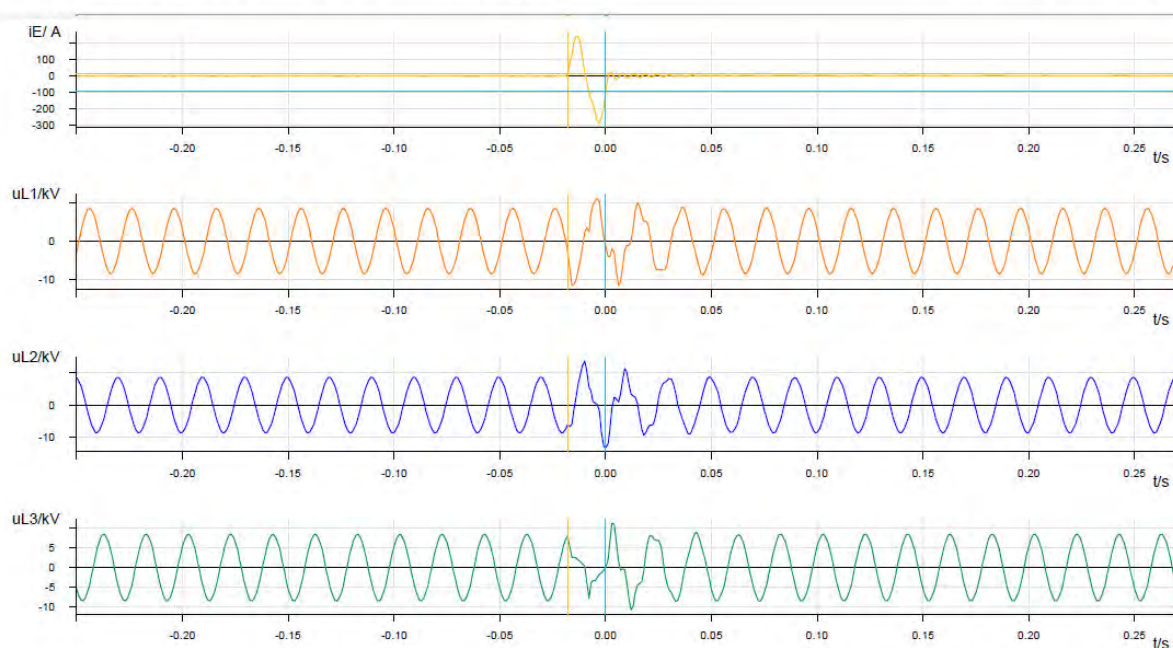
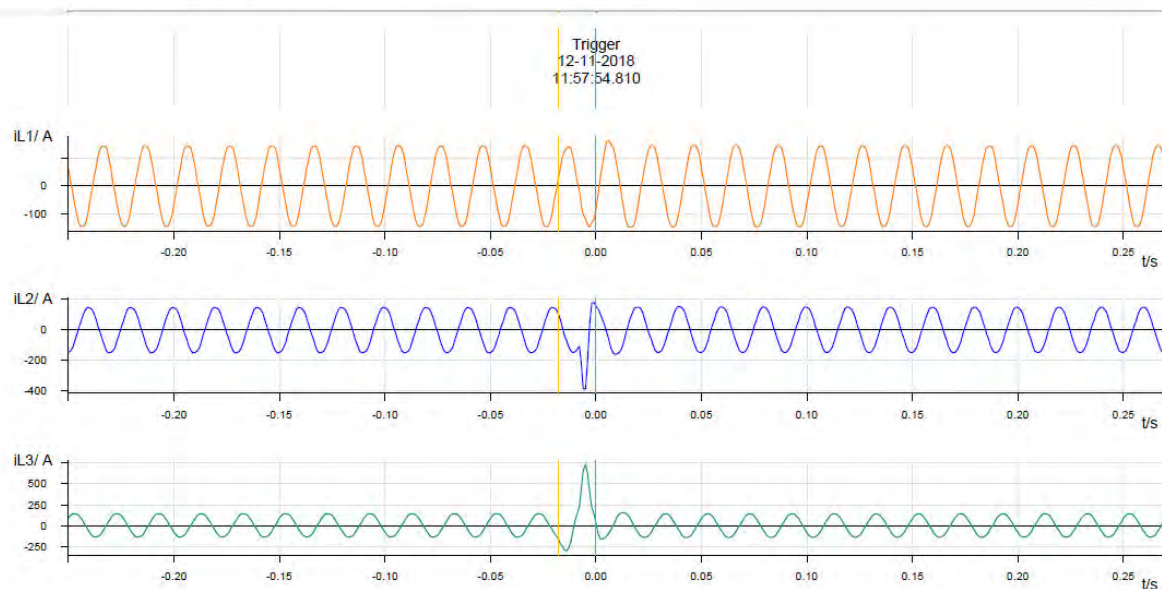
	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-119.6	iL3	-0.1556 kA	0.1216 kA
Cursor 2:	0.0	iL2	0.06636 kA	0.8233 kA
C2 - C1	119.6	iL2 - iL3	0.22199 kA	0.7016 kA



Figuur B-10-3 Aardfout 3



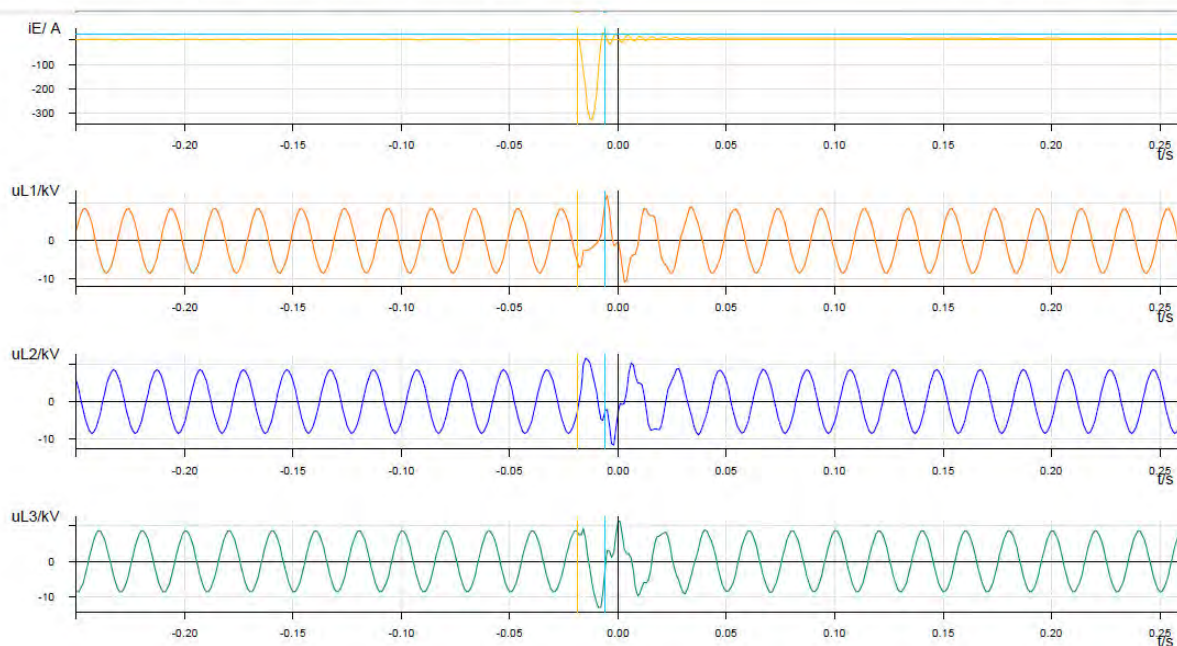
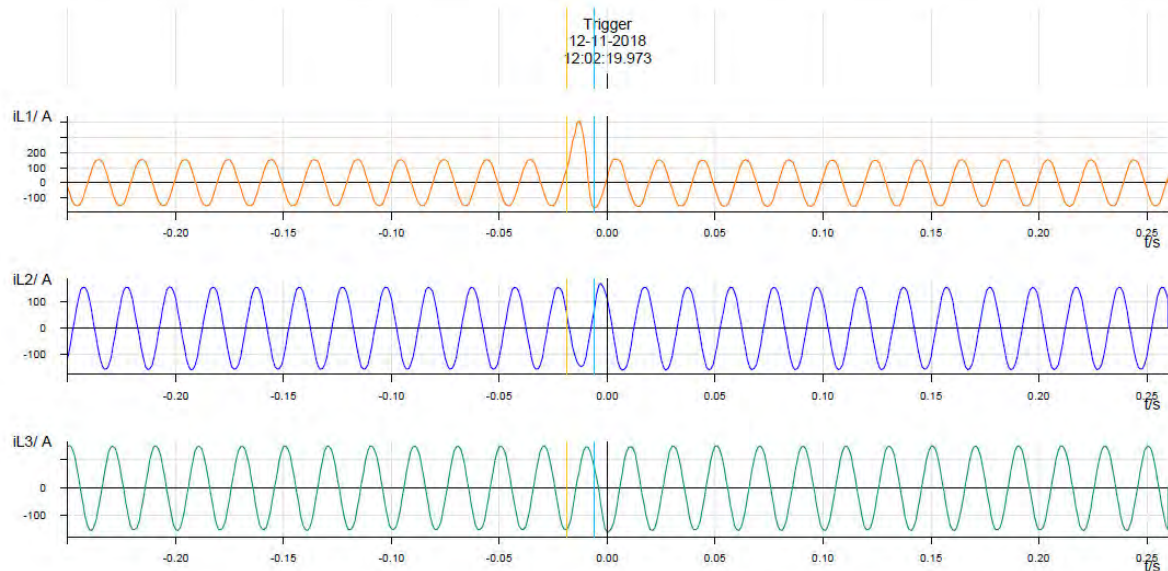
	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-18.0	iE	14.746 A	3.5932 A
Cursor 2:	0.0	iE	-90.321 A	174.22 A
C2 - C1	18.0	iE - iE	-105.067 A	170.63 A



Figuur B-10-4 Aardfout 4




	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-18.7	IE	1.2604 A	1.6321 A
Cursor 2:	-6.2	IE	24.656 A	157.84 A
C2 - C1	12.5	IE - IE	23.395 A	156.21 A



Figuur B-10-5 Aardfout 5

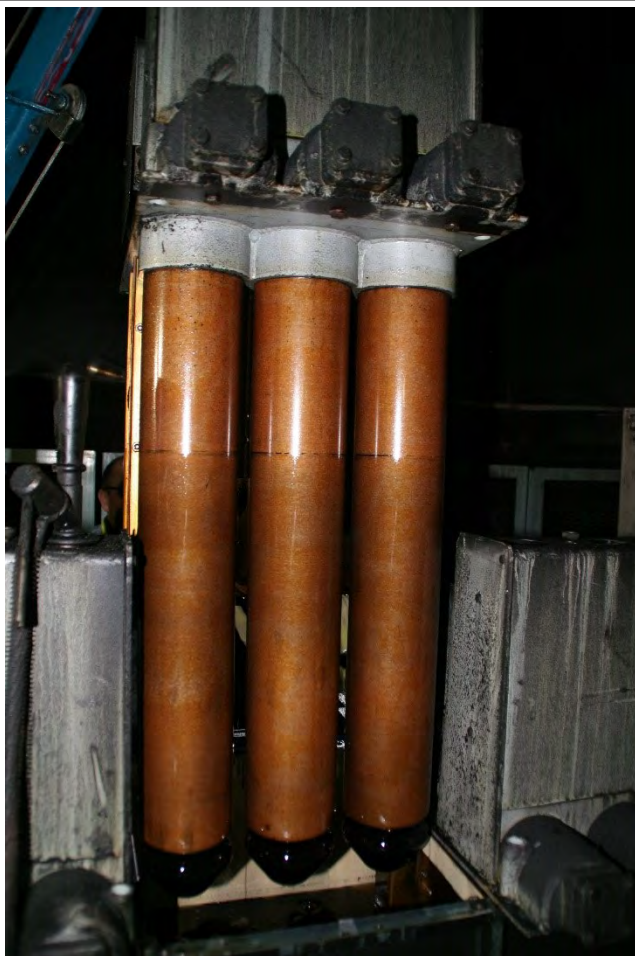
## BIJLAGE C

### Details van de bevindingen van de site inspecties

#	Beeld	Observaties
#1		Overzicht COQ-installatie in MS-ruimte Hoogstraat

**Tabel C-1    Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 3 (Keizerstraat)**

#2



Bij het lichten van schakelaar is door de zwarte streep op de schakelkolommen zichtbaar tot waar het oliepeil in de bak staat.

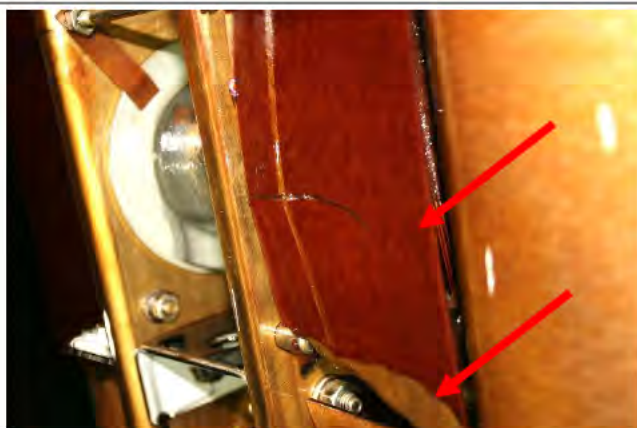
#3



Bij de monsternamen van de olie uit de linkerbak ter hoogte van het zojuist verwijderde veld 3 is zichtbaar dat de olie geheel zwartgekleurd is.



#4



Het Pertinax isolatieschotje van de CT doorvoer aan de railzijde is gebarsten. Tevens is een gedeelte aan de onderkant afgebroken.

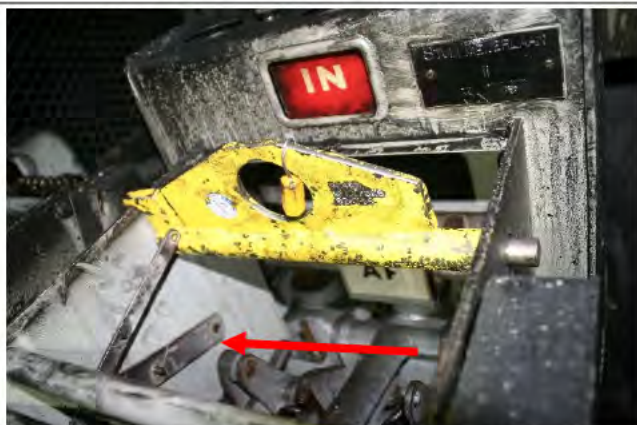
#5



Na het wegpompen van de olie worden ter hoogte van het kabelcontact van de L3 fase twee duidelijke boogvoetpunten zichtbaar.

**Tabel C-2 Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 2 (Stulemeijerlaan)**

#6



Een met de aandrijving verbonden beugel blokkeert bij IN-geschakelde schakelaar de bevestigingspunten van de hyschaak.

Om deze schakelaar in de IN-stand te kunnen lichten, is deze beugel losgemaakt, waarna de hyschaak geplaatst kan worden.



**Tabel C-3    Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 1 (voeding vanaf HVS-1)**

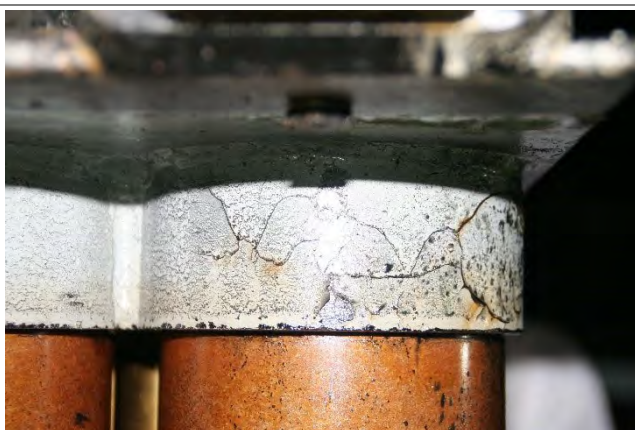
#7



Dit veld stond nog IN, omdat de voeding op de zijde van HVS-1 is afgeschakeld. Tevens heeft dit veld geen CT's en geen beveiliging, omdat het een lastscheider betreft. Er zijn geen noemenswaardige bijzonderheden aangetroffen bij de inspectie.

**Tabel C-4    Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 4 (Markt)**

#8



De lichte coating van de metalen houder van de schakelkolom, en dan met name de L1 fase, is gecraqueleerd.

**Tabel C-5 Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 5 (Maagdtheater)**

#9



Deze schakelaar is van veel recentere datum (bouwjaar 1994) en heeft een duidelijk afwijkende opbouw voor wat et CT-pakket en de contacten naar de kabeleindsluiting betreft.

#10



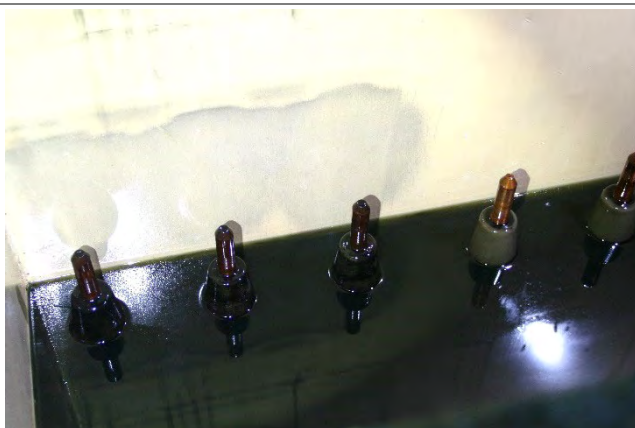
Op de primaire geleider van fase L3, zijn boven de CT boogvoetpunten zichtbaar (zie pijl). Langs de doorvoer van de geleider is een doorslagspoor zichtbaar, de doorvoer is hier ook gebarsten (omcirkeld). Er heeft dus herhaaldelijk een doorslag langs deze doorvoer plaatsgevonden.

#11



Op de rechter bakwand, aangrenzend aan de L3-fase is een duidelijk boogvoetpunt zichtbaar (omcirkeld).

#12



Er is een duidelijke zwartkleuring zichtbaar van de contacten van de kabeleindsluiting en de bakwand hier direct achter

**Tabel C-6    Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 6 (Magnefix)**

#13



Dit veld stond nog IN, omdat dit spanningsloos was ten tijde van het incident vanwege de dubbele netopening van de Magnefix. Er zijn geen noemenswaardige bijzonderheden aangetroffen bij de inspectie.



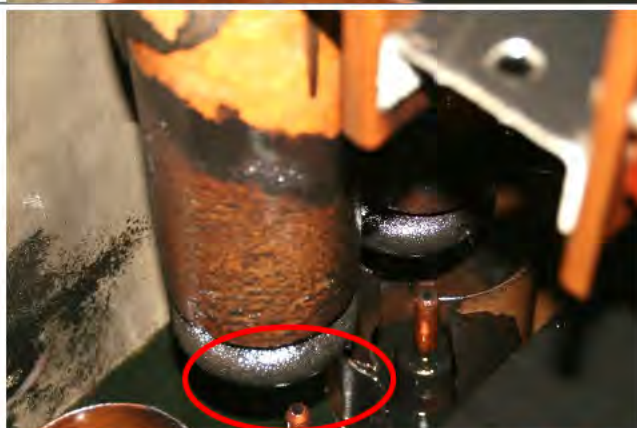
**Tabel C-7 Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 7 (Transformator 3)**

#14



Ter hoogte van de onderkant van de schakelkolom van fase L1 is een zeer duidelijk boogvoetpunt zichtbaar op de achterwand van de oliebak. (Coqoliet koker van het railcontact L3 veld 4 zichtbaar op de voorgrond)

#15



De Coqoliet koker van fase L1 is volledig losgescheurd. Omdat Coqoliet drijft in olie, is het restant ter hoogte van het olieniveau om de schakelkolom aangetroffen.

#16



Het olieresidu op het zwarte gedeelte van de schakelkolommen van fasen L1 en L2 (aan de zijde van L1) heeft een gewelfde, schuimachtige structuur. Met een pijl is aangegeven waar het restant van de Coqoliet railkoker zichtbaar is.

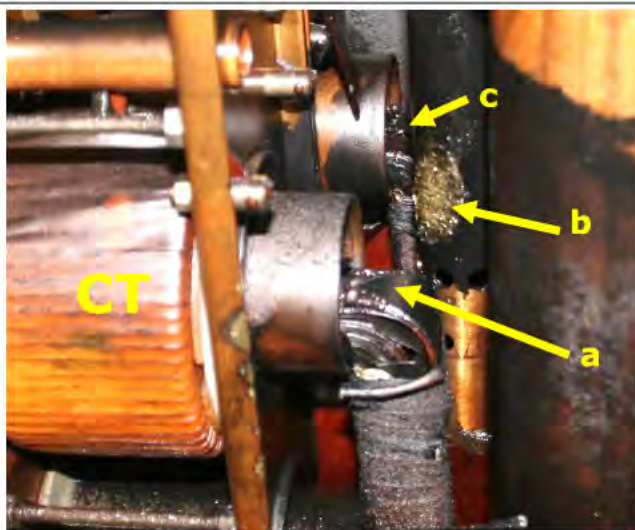
#17



Er is een duidelijke afbrand tussen de koperen contactsamenstelling aan de onderzijde van de schakelkolommen van fasen L1 en L2, juist boven het 'tulp'contact. Daarnaast is op de L1 fase ook duidelijk afbrand zichtbaar op de linkerkzijde (dus van L2 weggericht)



#18



Op de locatie waar de primaire geleider door de CT-kern gaat, is afbrand zichtbaar tussen de primaire geleider fase L (a) en het geaarde koperen pijpje van de oliedemper (b). Tevens is afbrand zichtbaar op deze locatie voor fase L2 (c). Er heeft dus via het oliedemppijpje een boog gestaan tussen fasen L2 en L3. De Pertinax schotten tussen al deze aansluitingen zijn volledig afgebroken en elders in de installatie aangetroffen.

**Tabel C-8 Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 8 (Transformator 2)**

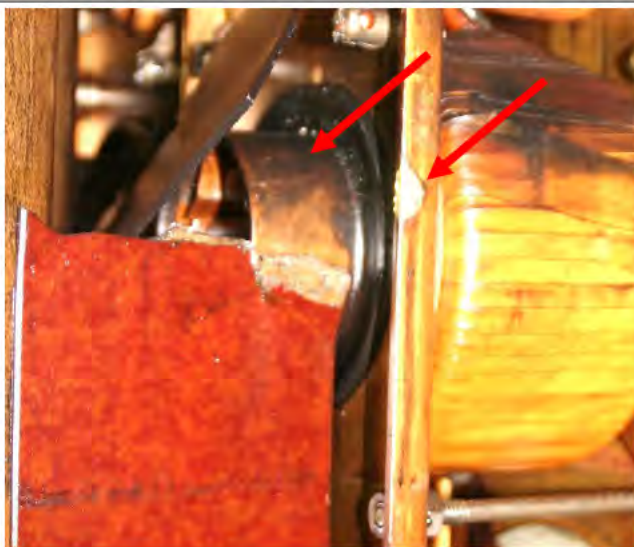
#19



Er is voor fase L1 een duidelijk boogvoetpunt en afbrand zichtbaar tussen de geleider door de CT en het geaarde frame. Op de CT-doorvoer is zichtbaar waar de boog gestaan heeft. Het Coqolite van de schakelkolom is zwartgeblakerd en vertoont blaarvorming, ten teken van blootstelling aan zeer hoge temperaturen.

**Tabel C-9 Overzicht van belangrijke observaties COQ-schakelaar veld 9 (Transformator 1)**

#20



Voor fase L1 zijn boogvoetpunten zichtbaar op de geleiders door de CT-kern en het koperen frame. Over de isolator is het spoor zichtbaar waar deze lichtboog gestaan heeft. Tevens zijn de Pertinax isolatieschotten deels afgebroken.

**Tabel C-10 Overzicht van belangrijke observaties laagspanningsrek transformator 3**

#21



Ook na een gedegen reiniging zijn geen boogvoetpunten op het laagspanningsrek aangetroffen.

Na de visuele inspectie zijn alle laagspanningszekeringen losgenomen en doorgemeten. Alle zekeringen zijn nog intact. Het betreft de velden

- voedend veld
- eigen richting
- afgaand veld 1 t/m 5



## **BIJLAGE D**

### **Details van de bevindingen van het onderzoek in het DNV GL laboratorium**

---

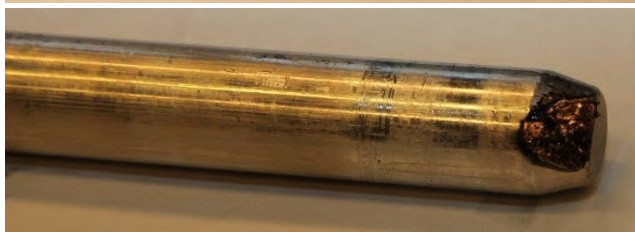


**Tabel D-1    Overzicht van belangrijke observaties schakelaar transformator 3 (30-1-2019)**



De afbrand van de contacten van de schakelstiften is als volgt:

L1: geen afbrand, zeer goede conditie



L2: duidelijk afbrandspoor, goede conditie

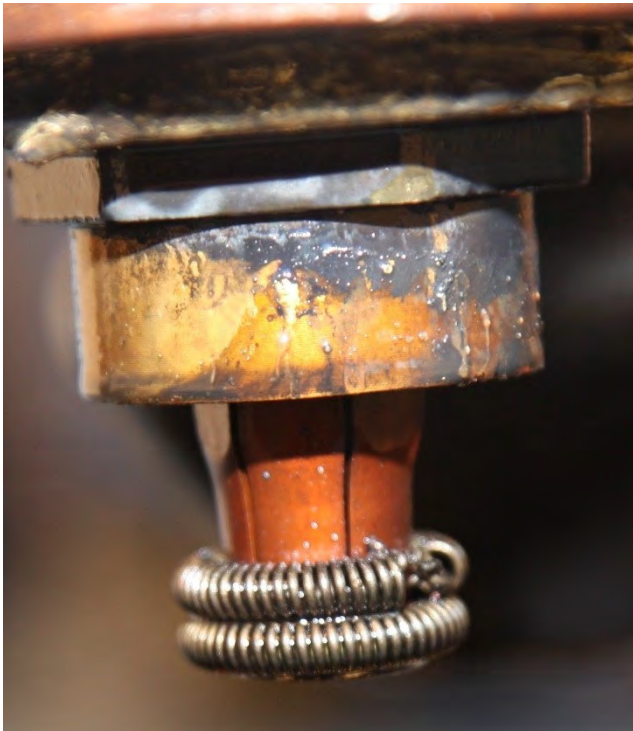


L3: Meerdere grote afbrandplekken, matige conditie

#22



#23



De prikcontacten van de schakelkolommen zijn niet beschadigd. Ook is de koperkleur nog zichtbaar.

L1

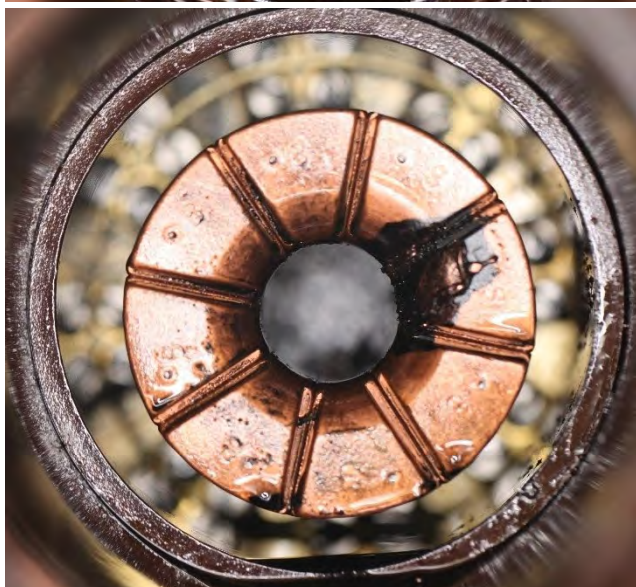


L2



De toestand van de vaste contacten van de vermogensschakelaar komt overeen met die van de schakelstiften.

L1: Geen sporen. Olie helder en honingkleurig



L2: kleine afbrand. Olie bevat koolsporen



L3: relatief grote beschadiging. Olie zwart (Zie ook volgende item)

#24



#25



In de schakelkolom van fase L3 is nauwelijks olie aangetroffen. Het beetje olie dat is aangetroffen was zwart, maar dit is deels verklaarbaar doordat bij een lekkage vooral de zwarte koolresten ('sludge') achterblijven in de kolom.

Nadat er olie in de kolom teruggegoten is, is na 40 min. duidelijk zichtbaar dat er olie uit de onderzijde van de kolom gelekt is. Bij verdere demontage blijkt dat de contacthouder slechts handvast in de schroefraad van de kolom zit.

#26



Bij inspectie van de CT-doorvoeren blijkt dat deze een metallische binnenlaag hebben. Dit geldt zowel voor de onderste als de bovenste doorvoer. Deze binnenlagen zijn aan de zijde van de schakelkolommen middels een gesoldeerde draadverbinding met de primaire geleider verbonden (hier voor fase L1 weergegeven). Dit gedefinieerd hoogspanningspotentiaal aan de binnenzijde zorgt voor een gunstige verdeling van de veldsterkte in en rondom de doorvoer. De constructie met twee doorvoeren is nodig om de primaire geleider 2 maal door de CT te voeren. Dit is nodig om de CT het benodigde vermogen te verschaffen om de tripspoel te bekrachtigen.<sup>18</sup>

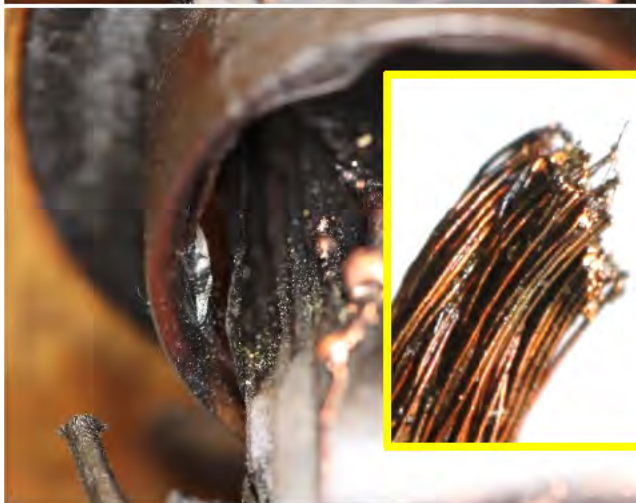
<sup>18</sup> Het zaagsel dat op deze en volgende foto's zichtbaar is, is afkomstig van het opzagen van de Coqolite schakelkolommen. Vanwege de afbrand op de contacthouders van L1 en L2 zijn deze niet meer demonteerbaar.

#27



Voor fasen L1 en L2 is dit draadje van de potentiaalsturing losgeraakt.




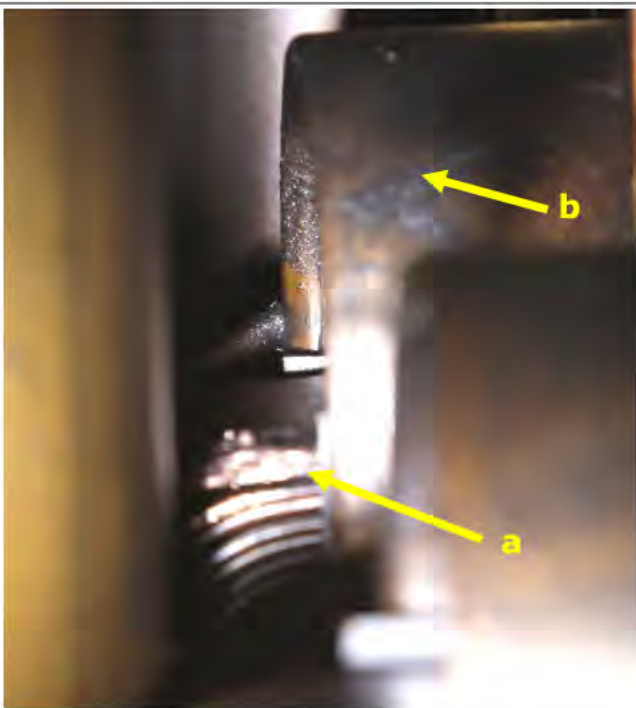
L1: draadje geheel verdwenen



L2: draadje losgeraakt. Het uiteinde van het draadje vertoont smeltsporen.



**Tabel D-2 Overzicht van belangrijke observaties schakelaar transformator 1 (31-1-2019)**

#	Beeld	Observaties
#28		<p>Omdat deze schakelaar nog in staat, is allereerst geverifieerd of de wisselspanningsbeveiliging correct werkt. Hiervoor is een AC-stroombron op de spoel van fase L2 aangesloten. Bij ca. 1,2 A wordt de spoel bekrachtigd en is een duidelijk brommen hoorbaar. Bij ca. 2,4 A wordt de CB uitgeschakeld.</p> <p>Hierna kunnen de schakelstiften geïnspecteerd worden. Hierop is geen afbrand zichtbaar.</p> <p>Met name op L2 is een putje zichtbaar dat erop wijst dat deze schakelaar tenminste éénmaal een normale belastingsstroom heeft afgeschakeld.</p>
		
		
#29		<p>Naast de reeds op locatie vastgestelde doorslagen over de CT doorvoer voor fase L1, is na verdere demontage van de Pertinax schotten waarneembaar dat ook voor L2 duidelijke afbrand op de geleider aanwezig is (a). Een boogspoor is zichtbaar op de bushing. Zowel voor L1 als L2 is het draadje van de spanningssturing van de CT-doorvoer losgeraakt (b).</p>




De prikcontacten naar de rail zijn niet beschadigd, maar de buitenzijde van het contact en de contacthouder zijn donker verkleurd. De foto's zijn genomen na grondige reiniging en ontvetting van de contacten en contacthouders.

#30





#	Beeld	Observaties
		



## **BIJLAGE E**

---

### **Details van de bevindingen van de inspectie van het rail- en kabelcompartiment**



**Tabel E-1    Overzicht van belangrijke observaties railsysteem COQ-installatie**

#	Beeld	Observaties
#31		<p>Na verwijderen van de Coqolite kokers van het linker railgedeelte en grondige reiniging zijn op enkele doorvoeren (bushings) van de railcontacten kruipsporen/ doorslagsporen zichtbaar.</p> <p>Aan de onderzijde van het prikcontact naar de schakelkolom zijn boogvoetpunten zichtbaar. Deze liggen op een cirkel evenwijdig aan de bovenkant van de bushing.</p> <p>Overal waar de boomvormige doorslagsporen eindigen op de messing bevestigingsring, zijn hierop eveneens boogvoetpunten zichtbaar.</p> <p>Voor de linkerbak is dit aangetroffen voor de contacten:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Maagdtheater fase L1</li><li>- Maagdtheater fase L2</li></ul>

---

**# Beeld****Observaties**

---

#32



Voor fase L1 van het veld Transformator 3 (rechter bak) zijn de doorslagsporen zelfs zonder reiniging duidelijk zichtbaar. De hoeveelheid boogvoetpunten op het contact is dusdanig dat hier rondom koper verdwenen is ('insnoering' van de contactstift).

Overal waar de boomvormige doorslagsporen eindigen op de messing bevestigingsring, zijn hierop eveneens boogvoetpunten zichtbaar.

#33



Na demontage en reiniging van het contact Transformator 3 fase L1 is bij daglicht het volgende zichtbaar:

- cirkelvormige afbrand op contactstift
- diepe doorslagsporen op het oppervlak van de doorvoer
- Veelvuldig grote boogvoetpunten rondom op de messing ring met opsmelting van het metaaloppervlak. De boogvoetpunten zitten ook aan de buitenzijde van de ring, daar waar deze aansluit op de Coqolite koker.
- De voet van de doorvoer is op meerdere plekken afgebroken

#

Beeld

Observaties

#34



Voor Transformator 3 fase L2 zijn de boogvoetpunten en doorslagsporen vergelijkbaar met wat er in de linkerbak is waargenomen.



---

**# Beeld****Observaties**

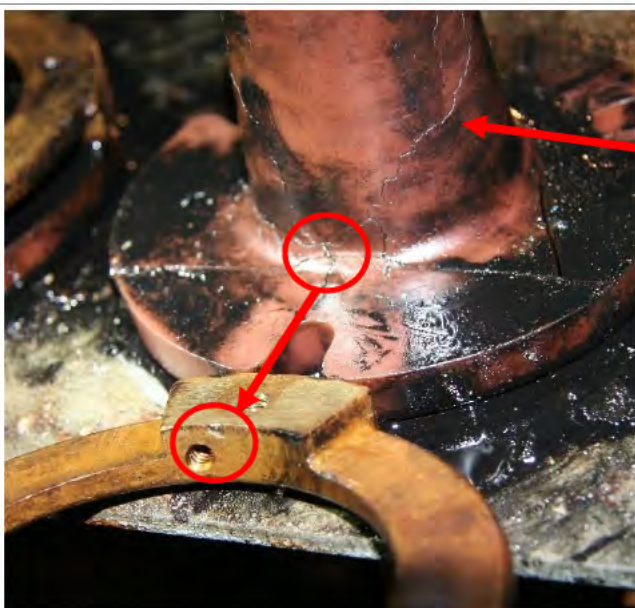
---

#35



Voor Transformator 3 fase L3 zijn diepe doorslagsporen zichtbaar. De boogvoetpunten op de messing ring bevinden zich echter voornamelijk op de binnenkant van deze ring.

#36



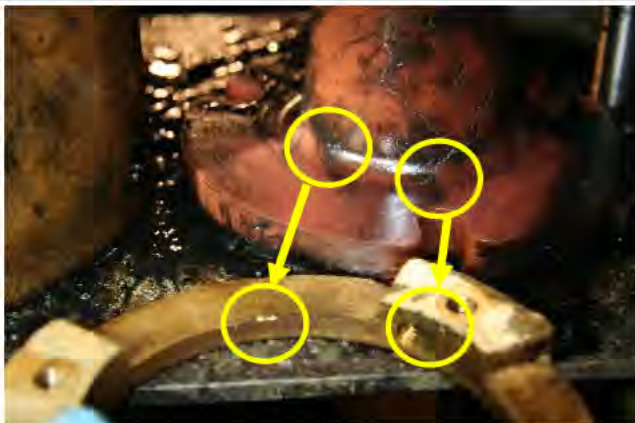
Voor Transformator 2 fase L1 zijn diepe doorslagsporen zichtbaar.

De boogvoetpunten op de messing ring bevinden zich echter voornamelijk op de binnenkant van deze ring.

De positie van de boogvoetpunten is herleidbaar naar de locatie waar de doorslagsporen stoppen



---

**#      Beeld**

#37

**Observaties**

Hierna zijn zonder de Coqolite kokers te verwijderen de contactstiften en bovenzijde van de doorvoeren van de overige contacten geïnspecteerd.

Voor veld Magnefix zijn op alle drie de fasen géén boogvoetpunten of doorslagsporen waargenomen.


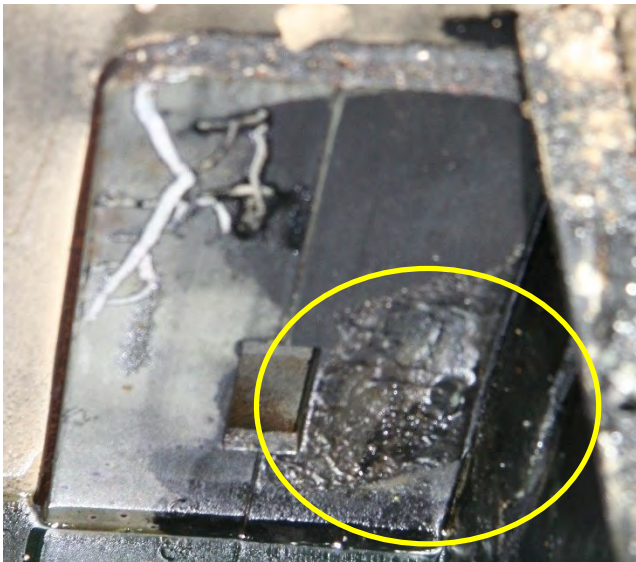
Voor de velden

- Transformator 2, fasen L2 en L3
- Transformator 1, fasen L1, L2 en L3

zijn wél boogvoetpunten en doorslagsporen aangetroffen.

Hierop is steekproefsgewijs de koker van Transformator L1, fase L1 verwijderd. De doorslagsporen zijn hierop duidelijk zichtbaar. Op de uiteinden zijn de boogvoetpunten op de messing ring waarneembaar.

---

#	Beeld	Observaties
		Op het uiteinde van de L3 fase van de rail van veld Transformator 1 is een duidelijk boogspoor zichtbaar. De zeskantbouten van de beugel die is aangebracht om een railverlenging naar een volgende bak mogelijk zijn deels afgesmolten.
#38		<p>Tegenover dit raileinde in het railcompartment is een stalen plaat gemonteerd ter afsluiting van een sparing ten behoeve van railkoppeling. Op deze plaat heeft ook een vlamboog gestaan.</p> <p>Vergelijkbare, maar kleinere vlamboogsporen zijn aangetroffen op de railkoppeling van de L3 fase van het naastliggende veld Transformator 2.</p> <p>Bij nadere inspectie van de raildoorvoer van fase L3, veld Transformator 3, zijn hierop ook kleine vlamboogsporen aangetroffen op het koperen aansluitvlak op de railgeleider.</p>

#	Beeld	Observaties
#39		<p>De uiteinden van de raildoorvoeren van de L3 fasen van alle velden in de rechterbak</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Magnefix</li> <li>- Transformator 3</li> <li>- Transformator 2</li> <li>- Transformator 1</li> </ul>
		<p>Vertonen ontladingssporen. Deze sporen lijken minder op de boomvormige structuren op de bovenzijde (zie foto #35) maar lijken eerder te duiden op een doorslag met behoorlijke stroomsterkte en hitte, waardoor het giethars barsten gaat vertonen. Na schoonmaken zijn de overeenkomende boogvoetpunten op de bakwand van het railcompartiment aangetroffen, of voor de afgebeelde fase L3 doorvoering van veld Magnefix op de binnenzijde van het toegangsluik dat zich hier bevindt</p>
#40		<p>De coating op de bodem van het railcompartiment van de rechterbak is chemisch aangetast.</p> <p>Er is sprake van</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bruine verkleuring</li> <li>- blaarvorming</li> <li>- onthechting</li> </ul> <p>De coating kan met behulp van een droge doek zeer eenvoudig van het oppervlak verwijderd worden. Het onderliggende metaal is niet geoxideerd, maar vertoont wel een vlekkelig/wolkvormig patroon vanwege de onthechting van de coating.</p>