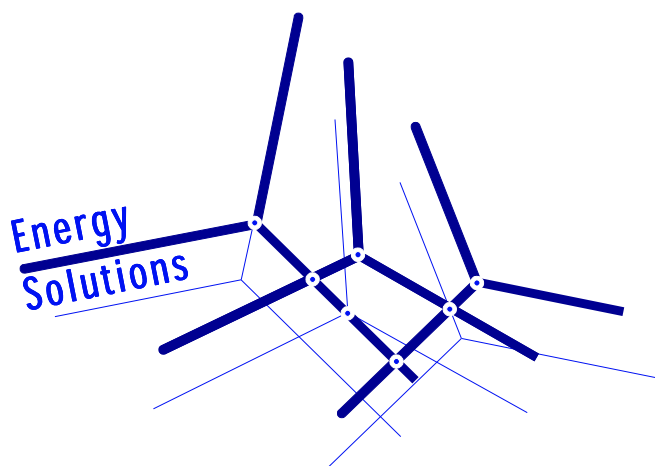




Cross-bonding

Een alternatieve toepassing



Auteur: Boris Kooij

14-12-2016



Cross-bonding

Een alternatieve toepassing

Naam student:	Borís Kooij,	boris1593@gmail.com , b.kooij@ensol.nl
Hogeschool:	De Haagse Hogeschool Rotterdamseweg 137 2628 AL, Delft	
Studentnummer:	11072075	
Begeleiders hogeschool:	Dhr. G. Hoogendorp Dhr. J. B. Woudstra	g.hoogendorp@hhs.nl j.b.woudstra@hhs.nl
Bedrijf:	Energy Solutions Ampèreweg 27 2627 BG, Delft	
Begeleider Energy Solutions:	Dhr. W. van Doeland	w.van.doeland@ensol.nl



Voorwoord

Voor u ligt de afstudeerscriptie 'Cross-bonding, een alternatieve toepassing'. Het onderzoek naar een alternatieve toepassing van cross-bonding in hoogspanningskabels is geheel uitgevoerd binnen het bedrijf Energy Solutions in Delft. Deze scriptie is geschreven naar aanleiding van mijn afstuderen aan de HBO-opleiding elektrotechniek aan De Haagse Hogeschool te Delft, waar ik van eind augustus 2016 tot eind december 2016 heb gewerkt aan mijn onderzoek en het schrijven van deze scriptie.

De onderzoeksvraag is voorafgaand aan mijn afstuderen grofweg opgesteld. Bij de start van mijn afstuderen heb ik samen met mijn begeleider Wouter van Doeland vanuit Energy Solutions, de onderzoeksvraag verfijnd en is deze gedurende het onderzoek aangepast. Stef Blanken, Maurice Oltmans en Jozua van Oosterom hebben mij naast mijn begeleider goed geholpen indien ik dat nodig had.

Graag wil ik mijn begeleider en collega's bedanken voor de technische en raadgevende ondersteuning in mijn onderzoek. Ook wil ik graag René Lommen van TenneT TSO bedanken voor het verstrekken van nuttige informatie over de eisen vanuit netbeheer in mijn onderzoek. Mijn dank gaat ook uit naar mijn stagebegeleider Gerben Hoogendorp vanuit De Haagse Hogeschool, die mij in het begin van mijn stage goede raad heeft gegeven wat betreft de focus van mijn onderzoek.

Borís Kooij

Delft, 22-11-2016



Samenvatting

In de loop der jaren worden steeds meer bovengrondse lijnen van 150kV en hoger vervangen door hoogspanningskabels. Hoogspanningskabels hebben echter meer last van elektrische verliezen. Een reeds toegepaste oplossing voor deze verliezen is 'cross-bonding', wat wordt toegepast op de metaalmantel van de kabel. Cross-bonding is een systeem dat op een aantal plaatsen in een kabelverbinding in de vorm van kasten of putten wordt gerealiseerd. Deze putten en kasten vormen een belemmering van het maaiveld, waar landeigenaren hinder aan ondervinden. Ondergrondse plaatsing bemoeilijkt het monitoren van de kabelconditie en is daarom niet direct mogelijk.

Het doel van dit onderzoek is om de belemmering van het maaiveld zoveel mogelijk te minimaliseren terwijl de conditiemeting van de kabel herhaaldelijk uitgevoerd kan worden. De onderzoeksvraag is als volgt: "Is het mogelijk om aarding en cross-bonding onder het maaiveld toepasbaar te maken? Zo ja, hoe is dan de conditie van de hoogspanningskabelverbinding te monitoren zonder graafwerkzaamheden te verrichten ten behoeve van een conditiemeting?". Voor de huidige conditiemeting is bereikbaarheid van de aarding en cross-bonding vereist, wat graafwerkzaamheden vereist wanneer deze ondergronds zijn gevestigd.

Om het eerste gedeelte van de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden, zijn alle richtlijnen en eisen van de netbeheerder TenneT TSO verzameld en is er gesproken met René Lommen van TenneT over zowel de eisen van TenneT als de eisen van landeigenaren. Verschillende alternatieve toepassingen van cross-bonding zijn verzameld en er zijn drie concepten opgesteld. Een alternatieve techniek voor conditiemonitoring is onderzocht in de vorm van een simulatie in Mathcad, waaruit ook drie concepten zijn voort gekomen. Uit de zes concepten is vervolgens een ondergrondse opstelling met een ingebouwd meetsysteem als beste alternatief naar voren gekomen.

De conclusie is dat aarding en cross-bonding van een hoogspanningskabel allebei ondergronds toepasbaar zijn en dat de conditie van de kabelmantel gemonitord kan worden zonder graafwerkzaamheden, door het gebruik van een ingebouwde stroommeting bij de aarding aan beide kanten van een cross-bonding sectie. Naar aanleiding van het algemene proefontwerp van het meetsysteem, wordt aanbevolen om dit verder door te ontwikkelen tot een werkend en uitvoerbaar systeem. Daarnaast wordt aanbevolen om de simulatie voor verschillende kabelopstellingen te ontwikkelen, zodat een groter gedeelte van bestaande kabelverbindingen ook met dit meetsysteem kan worden uitgerust.



Summary

Over the years, overhead powerlines with a voltage of 150kV and above are being replaced by underground cables. The disadvantage of underground cables is the losses induced in the metallic cable sheath. A well-known solution for this is cross-bonding, which reduces the losses induced in the cable sheath. Cross-bonding however requires installation of boxes that are located at multiple locations along the cable connection. These boxes require good accessibility for condition monitoring and are therefore placed near or above ground level. Local landowners experience these boxes as an obstacle to access or cultivate their land.

The purpose of this research is to minimize the inconvenience for local landowners, while cable condition monitoring could still be performed. The research question is formulated as: "Is it possible to place earthing and cross-bonding below ground level, while the condition monitoring can still be performed without the necessity of excavations?" At this moment, excavations would be needed on the regular condition monitoring procedure when it would be performed on underground earthing and cross-bonding boxes.

To answer the first part of the research question, all the requirements and guidelines of the transmission system operator TenneT TSO, were collected. During this process there have been conversations with an employee of TenneT called René Lommen, about the demands of the landowners as well as the requirements of TenneT. Different alternative applications for earthing and cross-bonding were investigated, which produced three concepts. For the second part of the research question, a study is performed to find an alternative technique for monitoring the condition of the cable. This study was performed in the form of a simulation in Mathcad, which produced another three concepts. Of all six concepts, an underground earthing and cross-bonding design with a built-in monitoring system clearly emerges.

The research shows that underground earthing and cross-bonding is applicable while the condition of the cable can be measured without the necessity of excavation. Due to the built-in current measurement, that will be placed in the earthing boxes at both ends of every cross-bonding section. In response to the general design of the monitoring system, it's recommended to refine this design towards a working and practicable solution which can then be tested and developed. Besides the monitoring system, it's recommended to also develop the simulation model for various cable systems, which makes it applicable for more existing high voltage cable systems.



Inhoudsopgave

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	4
SUMMARY	5
1 FIGUREN- EN TABELLENLIJST.....	9
2 BEGRIPPENLIJST	10
3 INLEIDING	11
4 PROBLEEMSTELLING	12
4.1 ONDERZOEKSKADER	12
4.2 GLOBALE AANPAK	12
5 TECHNISCHE ONDERSTEUNING	13
5.1 KABELVERLIEZEN	13
5.1.1 <i>Stroomafhankelijke verliezen</i>	13
5.1.1.1 Ohmse geleiderverliezen	13
5.1.1.2 Circulerende verliezen	14
5.1.1.3 Reductie van stroomafhankelijke verliezen in het aardscherf	15
5.1.2 <i>Spanningsafhankelijke verliezen</i>	16
5.2 CROSS-BONDING.....	17
5.2.1 <i>Cross-bonding met transpositie</i>	18
5.3 MANTELBEPROEVING EN CONDITIEMETINGEN.....	19
5.3.1 <i>Manteltest</i>	19
5.3.1.1 Huidige mantelfoutdetectie.....	19
5.3.1.2 Mantelfout localisatie met TDR.....	19
5.3.2 <i>Overgangsweerstand</i>	21
5.3.2.1 Contactvormen	21
5.3.2.2 Oorzaak	21
5.3.2.3 Gevolgen.....	21
5.3.2.4 Meten	21
5.4 SHEATH VOLTAGE LIMITER (SVL)	22
5.4.1 <i>Toepassingen</i>	22
5.4.2 <i>Dimensionering</i>	23
6 EISEN EN WENSEN.....	24
6.1 DE LANDEIGENAREN	24
6.2 DE NETBEHEERDER TENNET TSO B.V.	24



6.2.1	Eisen moffen, aardings- en cross-bondingdozen	25
6.2.2	Eisen kabelverbinding.....	25
7	ONDERZOEK MANTELFOUT	26
7.1	SIMULATIE MANTELFOUT CROSS-BONDINGSECTIE.....	26
7.1.1	Fundamenten mantelstroomsimulatie.....	26
7.1.1.1	Aardretourgeleider	27
7.1.1.2	Aarding	27
7.1.1.3	Stroomberekening	27
7.1.1.4	Opbouw cross-bonding simulatie.....	27
7.1.2	Mantelfoutsimulatie.....	28
7.1.2.1	Opbouw mantelfoutsimulatie:	28
7.1.3	Hypothese	29
7.1.4	Simulatiere resultaten	29
7.1.4.1	Mantelfout in mantel 4, 10 meter vanaf het 1 ^e aardpunt.....	31
7.1.4.2	Mantelfout in mantel 4, 450 meter vanaf het 1 ^e aardpunt.....	31
7.1.4.3	Mantelfout in mantel 4, 910 meter vanaf het 1 ^e aardpunt.....	32
7.1.4.4	Mantelfout in mantel 4, 1350 meter vanaf het 1 ^e aardpunt.....	32
7.1.5	Conclusie	33
8	CONCEPTEN	34
8.1	UITGANGSPUNT	34
8.1.1	Opbouw Huidige kabelverbinding.....	34
8.1.2	Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen	34
8.1.3	Routine conditiemeting	34
8.1.4	Onderhoud	34
8.1.5	Voor- en nadelen	35
8.2	CONCEPT 1	35
8.2.1	Opbouw kabelverbinding	35
8.2.2	Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen	35
8.2.3	Routine conditiemeting	35
8.2.4	Onderhoud	35
8.2.5	Voor- en nadelen	36
8.3	CONCEPT 2	36
8.3.1	Opbouw kabelverbinding	36
8.3.2	Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen	37
8.3.3	Routine conditiemeting	37
8.3.4	Onderhoud	37
8.3.5	Voor- en nadelen	37



8.4	CONCEPT 3	37
8.4.1	Opbouw kabelverbinding	37
8.4.2	Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen	38
8.4.3	Routine conditiemeting	38
8.4.4	Onderhoud	38
8.4.5	Voor- en nadelen	38
8.5	CONCEPT 4	39
8.5.1	Opbouw kabelverbinding	39
8.5.2	Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen	39
8.5.3	Routine conditiemeting	39
8.5.4	Onderhoud	39
8.5.5	Meetsysteem.....	40
8.6	CONCEPT 4.1	40
8.6.1	Voor- en nadelen	42
8.7	CONCEPT 4.2	42
8.7.1	Voor- en nadelen	43
8.8	CONCEPT 4.3	44
8.8.1	Voor- en nadelen	44
8.9	AFWEGING	45
9	CONCLUSIE EN AANBEVELING.....	46
10	LITERATUURLIJST	47
11	BIJLAGEN.....	48

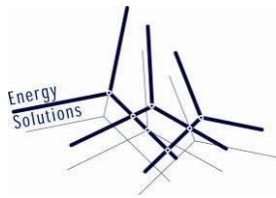


1 Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1: schematische weergave geïnduceerde aardschermspanning in naastgelegen kabel door axiale inductie. [1]	14
Figuur 2: Vectordiagram $\tan \delta$	16
Figuur 3: Schematische weergave van crossbonding (mantels:gekleurd, geleiders:grijs)	17
Figuur 4: Kabels in driehoek formatie	18
Figuur 5: Kabels in plat vlak formatie	18
Figuur 6: Verloop van de mantelspanningen in ideaal model met cross-bonding (topspanningen van de mantels per fase identiek).	18
Figuur 7: schematische weergave van een cross-bonding verbinding met transpositie	18
Figuur 8: Illustratie van TDR bij een mantelfout	20
Figuur 9: Bodemmicrofoon met koptelefoon [4].....	20
Figuur 10: "sniffer" met twee meetpennen [4]	20
Figuur 11: Schematische weergave van cross-bonding met SVL's in ster configuratie met aarding....	22
Figuur 12: Schematische weergave van cross-bonding met SVL's in driehoek configuratie zonder aarding.	23
Figuur 13: Illustratie opbouw kabelverbinding in de mantelfoutsimulatie (fout in het midden van mantel 1).....	28
Figuur 14: Ringkern om hoogspanningskabel.	40
Figuur 15: Ringkern om hoogspanningskabel.....	40
Figuur 16: Externe glasvezelverbinding parallel aan hoogspanningskabel. [11]	41
Figuur 17: Voorbeeld van een zonnepaneel t.b.v. meetapparatuur voor aardingsput. [13].....	42
 Tabel 1: Voor- en nadelen uitgangspunt	35
Tabel 2: Voor- en nadelen concept 1.....	36
Tabel 3: Verschillen tussen Prysmian en NKT Cables cross-bondingdozen	36
Tabel 4: Voor- en nadelen concept 2.....	37
Tabel 5: Voor- en nadelen concept 3.....	38
Tabel 6: Voor- en nadelen concept 4.1.....	42
Tabel 7: Voor- en nadelen concept 4.2.....	43
Tabel 8: Voor- en nadelen concept 4.3.....	44
Tabel 9: Keuzematrix zonder weegfactoren	45

2 Begrippenlijst

Begrip	Omschrijving
(Verbindings)mof	Verbinder voor kabels die rondom afsluit en de kabels elektrisch met elkaar verbindt.
(Kabel)metaalmantel /Aardscherm	Metalen draden die naast elkaar liggend rondom de geleiderisolatie gewikkeld zijn, en daarmee een elektrische bescherming bieden tegen bijvoorbeeld blikseminslag.
(Kabel)mantel	Kunststof isolatie aan de buitenkant van de kabel.
Hoogspanning (HS)	Wisselspanning boven de 1000 volt en gelijkspanning boven de 1500 volt wordt verstaan onder hoogspanning (HS). Een wisselspanning tussen de 1000 en 50000 volt wordt ook wel middenspanning genoemd (MS)
Aarding	Het elektrisch verbinden van objecten met aarde. Dit zorgt voor een spanning op de geaarde componenten van nul volt. Op deze manier worden ongewenst hoge spanningen voorkomen en is er een referentiepunt aanwezig.
Cross-bonding	Een cyclische uitwisseling van de aardschermen van een 3-fase kabelverbinding, waarmee de geïnduceerde circulerende mantelverliezen in de aardschermen gereduceerd kunnen worden.
(Kabel)Geleider	Een koperen of aluminium draad/staaf (in een kabel) waarover elektrische energie wordt getransporteerd.
(Kabel)Tracé	De fysieke ligging van een (kabel)verbinding.
kV	Elektrische spanning: Kilovolt (1000 volt).
Busbar/rail systemen	Een strip of buis van elektrisch geleidend materiaal dat in schakelstations en verdeelinstallaties wordt gebruikt als hoofdgeleider waarop meerdere subsystemen op aangesloten kunnen worden.
Scheiders/scheidingsschakelaar	Een schakelaar die elektrische delen met aarde kan verbinden wanneer dit noodzakelijk is. Bijvoorbeeld in geval van onderhoud of inspectie aan deze elektrische delen.
SVL/overspanningsafleider	Sheath Voltage Limiter, ook wel overspanningsafleider genoemd. Elektrische component dat het aardscherm of een andere component beschermt tegen overspanningen.
TenneT TSO	Transmission System Operator. Systeem operator en beheerder van hoogspanningstransmissielijnen in Nederland en Duitsland.
Mathcad	Wiskundige simulatie software.
Conditiemeting	Meting waarmee de technische en functionele gesteldheid van een component kan worden bepaald.
Magnetische fluxdichtheid	Magnetische flux per oppervlakte-eenheid.
Hysteresis verliezen	Verlies dat ontstaat in ferromagnetisch materiaal als gevolg van het telkens wisselende magneetveld wat wordt veroorzaakt door een wisselende elektrische stroom.
Transpositie	Het cyclisch verwisselen van de fasevolgorde van hoogspanningskabels in het kabelbed.
Kabelbed	Geul waarin kabels liggen met specifieke afmetingen en condities.
TDR (Time Domain Reflectometry)	Een techniek om aan de hand van stroompulsen de locatie van impedantieverschillen in een kabel te kunnen meten.
Stootgolf	De benaming voor een korte, krachtige elektrische puls.
Mutuele koppeling	De wederzijdse inductie van een geleider ten opzichte van andere naastgelegen geleiders.



3 Inleiding

Door de toename van hoogspanningskabels in het hoogspanningsnet, is er sprake van een toename van cross-bonding- en aardingskasten en putten. Deze kasten en putten worden toegepast op hoogspanningskabels, om de verliezen die optreden als gevolg van een geïnduceerde spanning op de kabelmetaalmantel te reduceren. Deze kasten en putten staan onder andere op agrarische grond, waar deze een belemmering vormen voor de landeigenaren. De hoogspanningskabels samen met de kasten en putten zijn in het beheer van TenneT. Het feit dat de landeigenaren belemmerd worden, beïnvloedt de relatie tussen TenneT en de landeigenaren negatief. Het belang van Energy Solutions is om een oplossing hiervoor te bieden in de vorm van een adviesontwerp of dienst waarbij de belangen en eisen van zowel TenneT als de landeigenaren worden behartigd.

TenneT heeft aangegeven dat de plaatsing van de aarding en cross-bonding op de kabel een kritisch onderdeel is, waarbij er sprake is van een kleine marge voor het vinden van de meest geschikte locatie, omdat de aarding en cross-bonding binnen 15 meter afstand van de kabel dienen te liggen. Dit maakt het moeilijker om tegemoet te komen aan de algemene wens van de landeigenaren om geen belemmering te veroorzaken. Het gevolg is dat de kasten en putten vervolgens een bedreiging vormen voor landbouwmaterieel en vice versa. In het verleden zijn vaak putten geraakt bij het maaien van hoge vegetatie of het verbouwen van op landbouwgronden. Schade aan putten en landbouwmachines zijn hiervan het gevolg.

Het zoeken naar een geschikte oplossing is in het belang van beide partijen en de relatie tussen deze partijen. De ondergrondse plaatsing van kasten of putten is niet per direct mogelijk met de bestaande ontwerpen. De kasten en putten dienen momenteel goed bereikbaar te zijn ten behoeve van conditiemetingen. Onderzoek naar de toepassing van ondergrondse cross-bonding en aarding, vereist technisch inzicht en kennis van kabelsystemen.



4 Probleemstelling

Sinds een aantal jaren worden bij verbindingen met een spanningsniveau van 150kV en hoger steeds vaker hoogspanningskabels toegepast in plaats van hoogspanningslijnen. Bij deze hoogspanningskabels wordt veelal cross-bonding toegepast om geïnduceerde mantelstromen te reduceren. Ook wordt er mantelaarding toegepast in deze verbindingen. Voor zowel cross-bonding als mantelaarding, worden op zo evenredig mogelijke afstanden kasten gebruikt die boven het maaiveld worden geplaatst en waar onderhoud aan gepleegd dient te worden. Echter staan deze kasten vaak op elektrisch strategische plaatsen, wat betekent dat ze in een aantal gevallen midden in een akkerland of op een veeteelt gebied uitkomen. Op dit soort plekken is dus het toepassen van de kasten lastig en gaat de voorkeur uit naar geen belemmering aan het maaiveld om hinder voor de landeigenaren te beperken. Anderzijds dienen de kasten wel bereikbaar te zijn voor onderhoud, indien nodig.

De vraag is: “Is het mogelijk om cross-bonding en mantelaarding onder het maaiveld toepasbaar te maken? Zo ja, hoe is dan de conditie van de hoogspanningskabelverbinding te monitoren zonder graafwerkzaamheden te verrichten ten behoeve van een conditiemeting?”

4.1 Onderzoekskader

Dit haalbaarheidsonderzoek betreft:

- Mantelaarding en cross-bonding voor kabelverbindingen van 150kV en hoger.
- Beproeving en conditiemetingen van kabelmantels, mantelaarding en cross-bonding.
- Alternatieve plaatsing van cross-bonding en aarding.
- Eisenpakket van landeigenaren en netbeheerder TenneT.
- Veiligheid van personeel en landeigenaren.

Buiten dit haalbaarheidsonderzoek valt:

- Werkzaamheden en onderzoeken betreffende de rest van de kabelverbinding en doorkruisend terrein.
- Bodemonderzoek.
- Contractuele zaken.
- Milieu effecten.
- Juridische zaken.

4.2 Globale aanpak

Het is bekend dat de fysieke plaatsing van kasten onder het maaiveld mogelijk is. Er dient dus nog onderzocht te worden wat de mogelijkheden zijn op elektrotechnisch vlak om de ondergrondse plaatsing in de toekomst uitvoerbaar te kunnen maken. De gegevens die hiervoor verzameld en onderzocht worden:

- Eisen en wensen van landeigenaren en TenneT.
- Technische gegevens en documenten van de huidige aardings- en cross-bondingcomponenten.
- Technische documenten t.b.v. beproeving van hoogspanningskabels.
- Technische documenten over beproevings- en meettechnieken voor kabelmantels en cross-bonding van:
 - Huidige conditiemetingen.
 - Mogelijke andere vormen van conditiemetingen.
- Simulaties uitvoeren om kennis te nemen van het effect dat cross-bonding en verschillende liggingconfiguraties hebben op de mantelstromen in de kabels.

Het onderzoek moet uitwijzen of cross-bonding en aarding van de kabels ondergronds uitvoerbaar is. Hierbij is de voorwaarde dat de conditie van de kabel vastgesteld moet kunnen worden.

5 Technische ondersteuning

Voorafgaand aan het onderzoek naar een alternatief voor de ondergrondse toepassing van cross-bonding en aarding van de mantels van hoogspanningskabels, zijn een aantal technische zaken die eerst worden toegelicht. De volgende onderwerpen worden behandeld: cross-bonding, kabelverliezen, inductie, kabelligging, sheath voltage limiters (SVL's), overgangsweerstand en de huidig toegepaste manteltest.

5.1 Kabelverliezen

De verliezen die optreden in een kabelverbinding in normaal bedreven omstandigheden kunnen door lokale oververhitting zorgen voor versnelde veroudering en vroegtijdig falen van de kabelverbinding, wat resulteert in mogelijk grote financiële schade. De totale verliezen die optreden in deze verbinding zijn op te delen in twee categorieën:

- Verliezen die optreden wanneer er een stroom door het kabelsysteem loopt, ook wel stroomafhankelijke verliezen genoemd.
- Verliezen die worden veroorzaakt door het effect van een elektrisch veld op de isolatie van de kabel, ook wel spanningsafhankelijke verliezen genoemd.

5.1.1 Stroomafhankelijke verliezen

De stroomafhankelijke verliezen bestaan voornamelijk uit de verliezen in de geleider, maar ook uit verliezen die ontstaan in andere metalen delen in het kabelsysteem. Een voorbeeld van een ander metaal deel in een kabel dan de geleider, is het aardscherm of ook wel metaalmantel genoemd. In deze paragraaf zullen alle kabelverliezen aan bod komen.

De verliezen die optreden in de kabel zijn op te delen in drie verschillende verliezen:

- Ohmse geleiderverliezen.
- Circulerende verliezen in het aardscherm.
- Magnetische verliezen en wervelstroomverliezen in het aardscherm.

5.1.1.1 Ohmse geleiderverliezen

De geleiderverliezen die ontstaan als gevolg van een stroom die zal lopen door de geleider, worden bepaald door de weerstand van de kabel en de stroom die gevoerd wordt. Daarnaast is er sprake van het "skin effect" wat de kabelverliezen beïnvloedt. De ohmse verliezen ($P_{verlies}$) zijn grofweg te berekenen met formule 1

$$P_{verlies} = I_{geleider}^2 \cdot R_{geleider} \quad (1)$$

De stroom door de geleider ($I_{geleider}$) is bij hoogspanningskabels vaak tussen de 500 en 1000 A. Doordat de stroom een kwadratische invloed heeft op de verliezen, is dit het grootste verlies dat optreedt in de kabel. De weerstand van de geleider ($R_{geleider}$) is afhankelijk van het type kabel dat gebruikt wordt en ligt ongeveer tussen de 0,01 en 0,1 Ω/km .

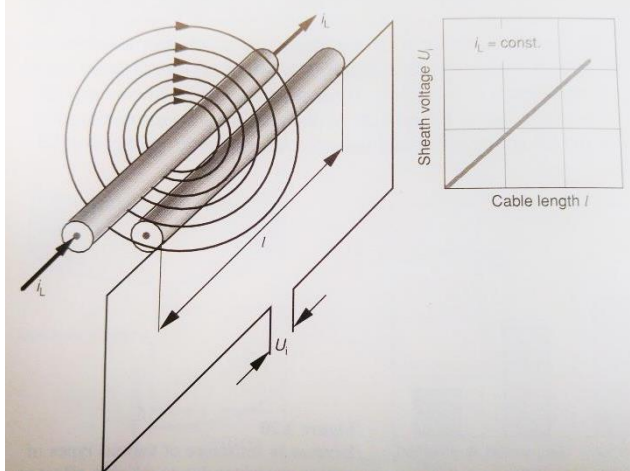
Het skin effect dat ontstaat wanneer er een wisselend magnetisch veld in de kabel aanwezig is, zorgt voor een slechte stroomverdeling in de geleider. Het skin effect kan ervoor zorgen dat de meeste stroom door de buitenkant van de geleider gaat lopen, waardoor niet de gehele geleider wordt benut. Het resultaat van het skin effect, is dat de weerstand van de kabel bij wisselspanning hoger is en daardoor de verliezen ook toenemen. Manieren om dit te voorkomen, zijn:

- Een grotere geleiderdiameter gebruiken.
- De geleider opdelen in meerdere gebundelde geleiders (ook wel Milliken geleider genoemd).

Het skin effect zal bij Milliken geleiders op elke geleider individueel invloed hebben, maar zal effectief een hogere stroom kunnen voeren dan een solide geleider met dezelfde diameter. Verschillende geleiderontwerpen kunnen het skin effect dus verminderen.

5.1.1.2 Circulerende verliezen

Circulerende verliezen zijn verliezen die ontstaan in het aardscherm van een kabel wanneer deze aan beide zijden geaard is, als gevolg van axiale inductie vanaf een stroomvoerende geleider. In Figuur 1 is een schematische weergave te zien van de geïnduceerde spanning in het aardscherm van een naastgelegen kabel door axiale inductie vanaf een stroomvoerende geleider. Op dezelfde wijze als in Figuur 1, zal ook een spanning worden geïnduceerd in het aardscherm van de kabel waarin een stroom wordt gevoerd.



Figuur 1: schematische weergave geïnduceerde aardschermspanning in naastgelegen kabel door axiale inductie. [1]

Als er een stroom loopt door de geleider van de kabel zal als gevolg van de wisselspanning, een wisselend magnetisch veld worden opgewekt. De richting van het magnetisch veld, wordt bepaald volgens de "regel van Maxwell" ook wel de rechterhandregel genoemd [2]. De duim wijst in de richting van de stroom, de vingers geven in gebogen vorm de radiale richting van het magnetische veld met fluxdichtheid $\vec{B}$ weer. De opgewekte magnetische velden induceren een spanning in het aardscherm, de spanning is afhankelijk van de geleiderstroom en de lengte van het aardscherm. Bij een constante stroom i_L door de geleider loopt de aardschermspanning U_i rechtevenredig op met de lengteafhankelijke impedantie van de kabel $Z(\ell)$, zoals in Figuur 1 is weergegeven. De relatie tussen de geleiderstroom, de lengte van de kabel en de geïnduceerde mantelspanning is gegeven in formule 2 [1].

$$U_i = i_L \cdot Z(\ell) \quad (2)$$

Ongeaard kabelsysteem:

Bij een ongeaard kabelsysteem kunnen afhankelijk van de lengte van de kabels en de geleiderstroom, de mantelspanningen aan beide kanten oplopen tot een paar honderd volt. Wanneer de geleiderstroom zeer hoog wordt als gevolg van een kortsluiting of overbelasting kan deze spanning zelfs nog hoger oplopen. Dit levert een gevaar op voor mensen en apparatuur vanwege een hoge open klemspanning tussen de kabelmantel en aarde. De kabelisolatie heeft een maximale houdspanning, waar de mantelspanning niet boven mag komen, vanwege de kans op beschadiging van de kabelmantel. Er gaat echter geen stroom door de mantels lopen, waardoor er geen circulerende verliezen optreden. In de praktijk wordt dit echter niet toegepast, omdat de gehele metaalmantel los ligt van aarde en er dus geen aarde gedefinieerd is als referentie. Hierdoor is de spanning op de metaalmantel niet te controleren.



Enkelzijdig geaard kabelsysteem:

Om het gevaar van een ongeaard systeem te beperken, wordt enkelzijdige aarding toegepast. Enkelzijdige aarding beperkt het gevaar tot enkel één open klem. De mantelspanning loopt vanaf het aardpunt tot de open klem op en zal dus bij de open klem het hoogst zijn. Ook hier gaat er geen stroom door de mantels lopen, waardoor er geen circulerende verliezen zullen optreden.

Tweezijdig geaard kabelsysteem:

De gevaarlijke open klemspanningen kunnen worden voorkomen door de kabels aan beide zijden te aarden. Dit zorgt voor een gesloten stroomkring. Het aardscherm aan beiden kanten aarden heeft als nadeel dat er door de geïnduceerde spanning in het aardscherm een stroom gaat lopen, evenredig aan de geleiderstroom. Er treden dus circulerende verliezen op. Circulerende verliezen in de mantel bestaan uit de mantelstroom in het kwadraat maal de weerstand van de kabelmantel, zoals gegeven in formule 3.

$$P_{\text{verlies}} = I_{\text{mantel}}^2 \cdot R_{\text{mantel}} \quad (3)$$

De circulerende verliezen in de metaalmantel worden voor het grootste gedeelte omgezet in warmte en hebben daardoor invloed op de temperatuur van de kabel, wat zorgt voor lokale verwarming en beperkt de transportcapaciteit van de kabel. Ongewenste mantelstromen ten gevolge van een fout kunnen zelfs oververhitting, versnelde veroudering en vroegtijdig falen van de kabel veroorzaken.

De richting van de geïnduceerde stroom in het aardscherm is volgens de wet van Lenz altijd in tegengestelde richting van de geleiderstroom. De wet van Lenz luidt: “de geïnduceerde stroom in een gesloten circuit die ontstaat door een opgewekt wisselend magnetisch veld, dient in de tegengestelde stroomrichting te zijn van de bron (welke het wisselend magnetisch veld produceert) om het opgewekte wisselend magnetisch veld te compenseren en hiermee een mechanische kracht tegen te werken”. De wet van Lenz is te vergelijken met bijvoorbeeld massa traagheid, m.a.w. het tegenwerken van verandering, [2], [3].

De resterende stroomafhankelijke verliezen, wervelstroomverliezen en magnetische verliezen zijn minder van invloed op de totale verliezen in de kabel. Toch zorgen ze voor extra warmteproductie in een kabel en mogen ze niet geheel buiten beschouwing worden gelaten.

5.1.1.3 Reductie van stroomafhankelijke verliezen in het aardscherm

Om de verliezen in het aardscherm zoveel mogelijk te beperken zijn er een aantal maatregelen die getroffen kunnen worden. Deze maatregelen zijn als volgt:

- Het gebruik van niet magnetiseerbaar staal voor het aardscherm om hysteresis verliezen te voorkomen.
- Het eenzijdig aarden van het aardscherm in plaats van tweezijdig aarden, hierdoor is er geen gesloten circuit meer en zal er geen stroom lopen. Dit is echter alleen toepasbaar op korte kabelverbindingen, aangezien de open klemspanning van het aardscherm evenredig met de lengte toeneemt tot een gevaarlijk hoge spanning.
- Het toepassen van “cross-bonding” om de circulerende verliezen zo laag mogelijk te houden. Cross-bonding wordt hieronder in paragraaf 0 verder toegelicht.



5.1.2 Spanningsafhankelijke verliezen

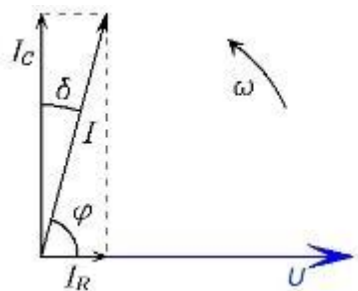
De spanningsafhankelijke verliezen die optreden in de kabel, zijn uitsluitend de diëlektrische verliezen. De totale diëlektrische verliezen in een kabel P_{diel} worden bepaald door de spanning U_0 over de kabelisolatie, capaciteit C per fase en de diëlektrische verliesfactor $\tan \delta$. De diëlektrische verliesfactor zal enige invloed hebben op de mantelstromen en geeft de mate van isolatiekwaliteit weer die wordt bepaald door de verhouding tussen de capacitieve stroom en de resistieve stroom.

De geleidingsverliezen worden bepaald door de stroom I_R die afhankelijk is van de weerstand R van het isolatiemateriaal. Daarnaast zijn de capacitieve verliezen ook van invloed, bepaald door de stroom I_C die afhankelijk is van de capaciteit C van het isolatiemateriaal. De capacitieve (blind)verliezen worden ook wel polarisatieverliezen genoemd, doordat het wisselende elektrisch veld de isolatiemoleculen 50 keer per seconde van polariteit veranderen, wat energie kost die in de vorm van een stroom wordt geleverd. Formule 4, 5 en 6 geven weer wat de relatie is tussen de capacitieve verliezen en de resistieve verliezen en hoe deze verliezen tot stand komen.

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{U}{R_{isolatie}} \quad (5)$$

$$I_C = C_{isolatie} \frac{dU}{dt} \quad (6)$$

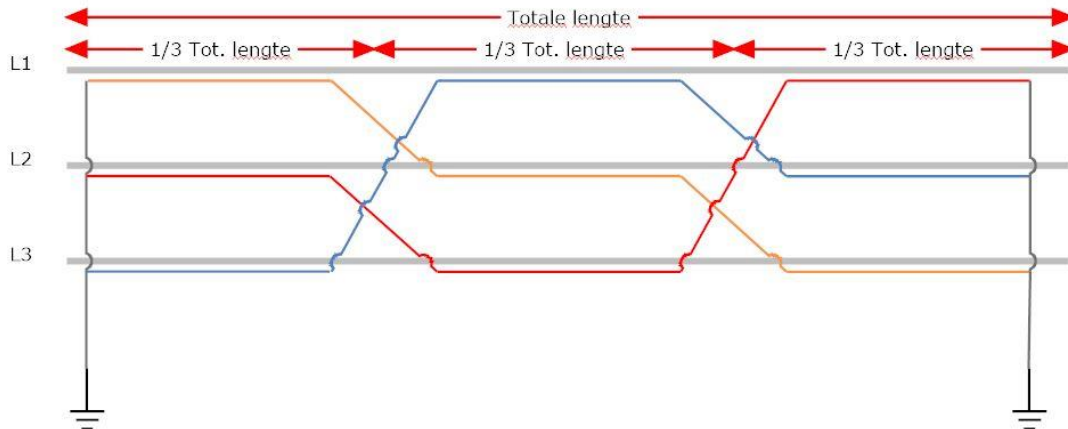


Figuur 2: Vectordiagram $\tan \delta$

In bovenstaande Figuur 2 is een vectordiagram de relatie tussen de twee stromen te zien met de verlieshoek δ . Hoe kleiner de hoek, hoe minder de geleidingsverliezen zijn en hoe beter de kwaliteit van de isolatie. Hoe kleiner de hoek δ hoe beter de isolatiekwaliteit.

5.2 Cross-bonding

Bij cross-bonding wordt de kabelmantel tweezijdig geaard, om openklemspanningen te voorkomen. Het aardscherm wordt in de lengte opgedeeld in drie – of een veelvoud van drie – gelijke kabeldelen. Tussen de opgedeelde secties worden de aardschermen cyclisch verwisseld zoals weergegeven in Figuur 3. De totale lengte van het cross-bondingsysteem wordt de 'major section' genoemd en de delen met $1/3^e$ van de totale lengte wordt een 'minor section' genoemd.

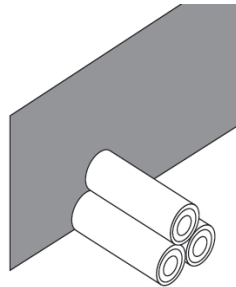


Figuur 3: Schematische weergave van crossbonding (mantels:gekleurd, geleiders:grijs)

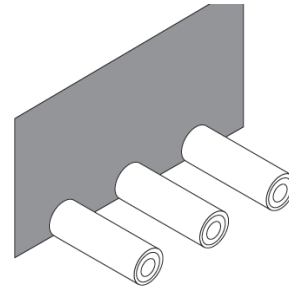
Elke metaalmantel wordt over de complete lengte van de major section door elke geleider evenveel beïnvloedt. Dit is enkel in een ideaal geval zo, omdat de minor sections precies dezelfde lengte en liggingconfiguratie moeten hebben en de geleiderstromen exact dezelfde amplitude moeten hebben. De fasehoeken tussen de stromen in de geleiders is 120° . Wanneer de drie geïnduceerde stromen per mantel vectorieel bij elkaar op worden geteld, resulteert dit in een mantelstroom per fase van '0A'. Op deze manier lopen er geen stromen door de mantels, in tegenstelling tot een tweezijdig geaard systeem zonder cross-bonding. Het verloop van de mantelspanningen in een cross-bonding kabelsectie is weergegeven in Figuur 4.

In de praktijk zijn er een aantal voorwaarden waar de kabelverbinding aan dient te voldoen om zo dicht mogelijk bij de ideale situatie te komen:

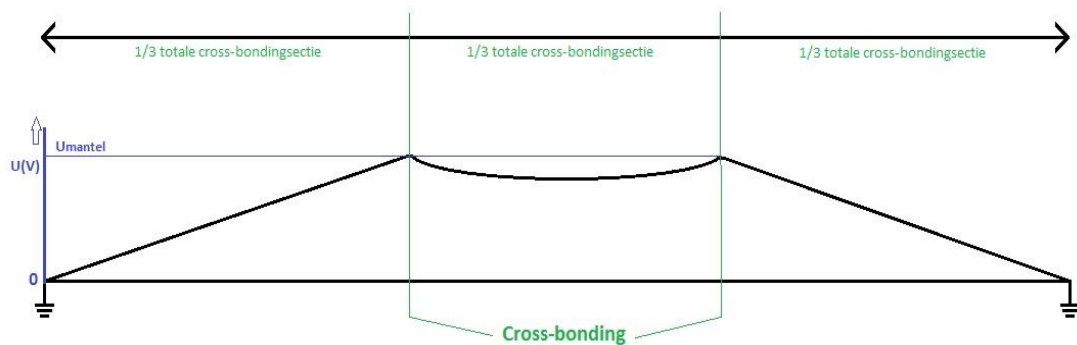
- De lengte van de kabelverbinding moet in drie – of een veelvoud hiervan – zo gelijk mogelijke delen verdeeld zijn.
- De wederzijdse inductie van elke fase ten opzichte van de andere twee fasen, ook wel "mutuele koppeling" genoemd, moet zo gelijk mogelijk zijn over de gehele lengte van de verbinding. Een opstelling die hier de beste mogelijkheid voor biedt is de driehoekopstelling zoals te zien is in Figuur 4, waarbij de drie fasen in driehoekvorm worden gebundeld en waarbij de afstanden tussen de kabels onderling gelijk zijn. Echter heeft cross-bonding bij een driehoek opstelling het minste effect, omdat de mantelstromen al door deze liggingconfiguratie worden gereduceerd.
- De geleiderstromen die gevoerd worden moeten in amplitude zo gelijk mogelijk zijn en onderling een fasehoek hebben van 120° , de kabel is dan symmetrisch belast.



Figuur 4: Kabels in driehoek formatie



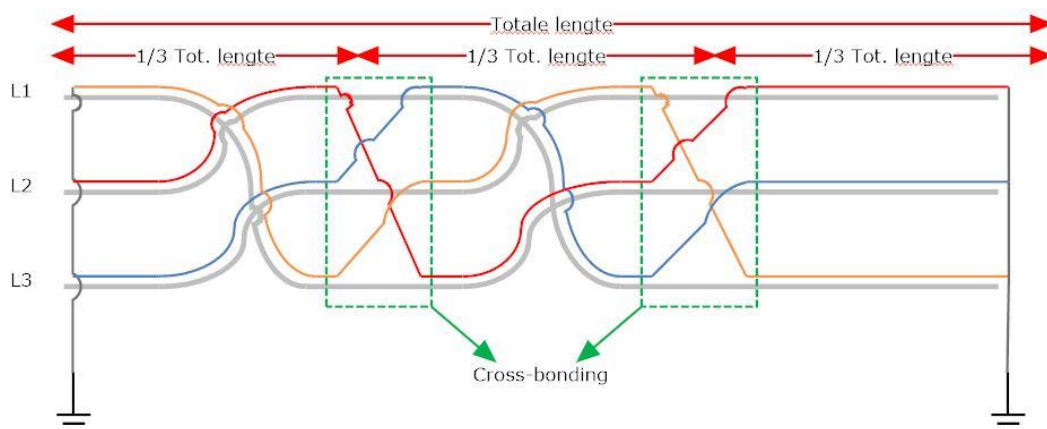
Figuur 5: Kabels in plat vlak formatie



Figuur 6: Verloop van de mantelspanningen in ideaal model met cross-bonding (topspanningen van de mantels per fase identiek).

5.2.1 Cross-bonding met transpositie

De plat vlak formatie zoals te zien is in Figuur 5, heeft de voorkeur voor energietransport, vanwege de betere warmtedissipatie van de kabels aan de omgeving, wat een hogere transportcapaciteit oplevert. De mutuele koppeling in plat vlak formatie is echter wat minder gunstig, omdat de middelste fase anders wordt beïnvloedt dan de buitenste 2 fasen. Om de mutuele koppeling in de kabelopstelling in een plat vlak te verbeteren, wordt er gebruik gemaakt van “transpositie”. Dit houdt in dat niet alleen de mantels cyclisch worden verwisseld, maar ook de fasevolgorde. Dit verbetert de mutuele koppeling tussen de kabels, waardoor de middelste fase in mindere mate dominant wordt beïnvloedt. Deze opstelling is schematisch weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: schematische weergave van een cross-bonding verbinding met transpositie



5.3 Mantelbeproeving en conditiemetingen

Het beproeven van een nieuw aangelegde kabelverbinding, wordt uitgevoerd direct of kort na montage van elke component waar de verbinding uit bestaat. Wanneer een nieuw kabelsegment gemonteerd is, wordt deze beproeft. Beproeving van de kabel bestaat uit een aantal beproevingen van de geleider en isolatie(diëlektricum) en een beproeving van de kabelmantel. Bij de conditiemetingen worden de geleider en isolatie niet beproeft. Alleen de metaalmantel en kunststofmantel worden hier beproefd

Cross-bonding is onderdeel van de metaalmantel en is daarom meegenomen in deze beproeving. De mantelbeproeving bestaat uit een manteltest en een meting van overgangsweerstanden. Beide mantelbeproevingen worden in dit hoofdstuk beschreven.

5.3.1 Manteltest

Hoogspanningskabels hebben een isolerende laag aan de buitenkant van de kabel, welke zich om het aardscherm van de kabel heen bevindt. Deze isolerende laag is de kabelmantel. Wanneer deze isolerende laag beschadigd raakt kan dit een elektrisch pad tussen het aardscherm en aarde veroorzaken, wat zal leiden tot additionele verliezen en grotere schade aan de kabel of kabelsysteem. Dit verschijnsel wordt een mantelfout genoemd.

5.3.1.1 Huidige mantelfoutdetectie

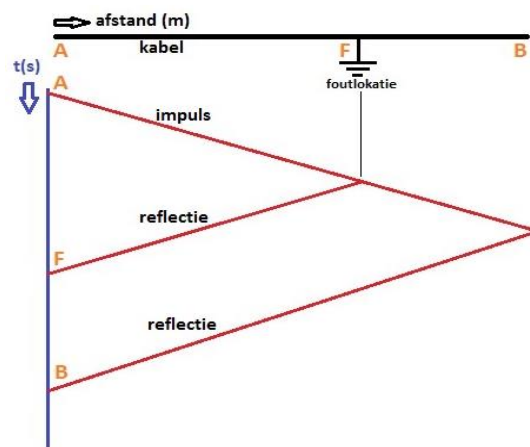
Mantelfouten bij hoogspanningskabels worden momenteel vastgesteld met behulp van manteltesten die eens in de drie jaar (in het geval van TenneT TSO) worden uitgevoerd. Bij deze manteltesten worden de metaalmantels van de kabels geheel losgekoppeld van aarde en SVL's (Sheath Voltage Limiters, ofwel overspanningsafleiders) moeten worden verwijderd indien mogelijk, waarna een DC spanning van 5 of 10kV op de mantel wordt gezet. Zolang er tijdens de test geen stroom door de mantel loopt is er geen sprake van een mantelfout.

Als bij een manteltest de SVL's niet losgekoppeld kunnen worden, wordt de mantel beproefd op een spanning die lager is dan de gedimensioneerde protection voltage van de SVL's. De manteltest wordt vanuit de aardpunten van de mantel uitgevoerd. Bij een kabelverbinding met meerdere cross-bondingsegmenten zal de manteltest bij de aardpunten van elke major section worden uitgevoerd.

5.3.1.2 Mantelfout localisatie met TDR

Nadat de manteltest heeft aangetoond dat er sprake is van een mantelfout, zal een exactere locatie van de fout worden bepaald met behulp van TDR (Time Domain Reflectometry). TDR werkt volgens een principe van een puls die met een gekalibreerde loopsnelheid over de kabel wordt gestuurd, welke bij een verandering in de impedantie ergens in de kabel gedeeltelijk zal terugkaatsen. Een mantelfout is een impedantiewijziging in de metaalmantel en zal het impuls dus gedeeltelijk terugkaatsen naar de bron.

Voor de locatiebepaling zijn de gekalibreerde loopsnelheid en de looptijd van het impuls vanaf de bron tot aan de fout nodig. De loopsnelheid staat na kalibratie vast. De looptijd is vast te stellen door de reflectiemeting te analyseren. Na analyse is met behulp van Figuur 8 ongeveer de plaats van de fout te illustreren.



Figuur 8: Illustratie van TDR bij een mantelfout

Door de tijd tussen A en F te vermenigvuldigen met de loopsnelheid, is de afstand te berekenen tussen het begin van de mantel en de fout. Om de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling te verhogen, is de afstand tussen de fout en het einde van de kabel ook te berekenen m.b.v. de tijd tussen F en B. Het foutgebied wordt hiermee afgebakend.

Zodra het vastgestelde foutgebied klein genoeg is, zal er in het veld gericht worden gezocht naar de mantelfout. Dit wordt gedaan door middel van een stootgolf die op de kabelmantel wordt gezet. Deze stootgolf zal vervolgens rond de plaats van de fout hoorbaar of meetbaar zijn met sensoren. Vaak bestaat dit meetsysteem uit meerdere sensoren, die met een bepaalde afstand tussen elkaar in de grond meten. Dit biedt de mogelijkheid om de metingen met elkaar te vergelijken. In Figuur 9: Bodemmicrofoon met koptelefoon en Figuur 10 zijn voorbeelden gegeven van deze meettechnieken [4].



Figuur 9: Bodemmicrofoon met koptelefoon [4]



Figuur 10: "sniffer" met twee meetpennen [4]



5.3.2 Overgangsweerstand

Overgangsweerstand is een weerstandswaarde die de contactkwaliteit indiceert tussen twee of meer stroomvoerende delen. Een aantal voorbeelden van stroomvoerende componenten waarbij deze contactkwaliteit van belang is, zijn:

- Overgangsmoffen.
- Busbar systemen.
- Aardingssystemen.
- Scheiders.
- Schakelaars.
- Relays.
- Ander schakelmaterieel.
- Andere stroomvoerende delen met contactovergangen.

5.3.2.1 Contactvormen

Er zijn verschillende vormen van contact tussen twee of meer stroomvoerende delen. Deze technieken zijn:

- Solderen.
- Schroefverbinden.
- Krimpen/persen.
- Drukcontact.

5.3.2.2 Oorzaak

Een overgangsweerstand tussen de stroomvoerende delen kan ontstaan door verminderde contactdruk, wat resulteert in oxidatie en/of koolstofvorming tussen de contacten. Door de koolstof of oxidatie samen met de tussenliggende luchtlaag, verandert op die plek de weerstand doordat deze stoffen een andere chemische samenstelling hebben en daardoor een andere geleidbaarheid hebben.

Een verminderde contactdruk buiten de directe oorzaak van menselijke invloeden is het gevolg van de volgende zaken:

- Temperatuurwisselingen met krimpen en uitzetten van metalen delen tot gevolg.
- Te hoge temperatuur voor langere tijd.
- Trillingen.
- Mechanische belasting door kortsluiting of andere oorzaken.

5.3.2.3 Gevolgen

Een verhoogde overgangsweerstand kan leiden tot:

- Vermogensverlies (dus spanningsverlies).
- Lokale verhitting.
- Verlies van elektrisch contact.
- Falen bij stroomonderbrekingen.

Bovenstaande gevolgen kunnen tot grote schade leiden aan diverse hoogspanningsapparatuur, zoals schakelaars, kabels en generatoren of motoren.

5.3.2.4 Meten

Het meten van overgangsweerstanden wordt gedaan met een stroombron die lokaal wordt aangesloten op de betreffende component. Als vervolgens de spanning over de component gemeten wordt, kan de weerstand berekend worden. Bij deze meting is het van belang dat de aansluitwijze waarmee de stroombron wordt aangesloten, goed contact maakt met de te meten component om een zo zuiver mogelijke meting te kunnen uitvoeren.

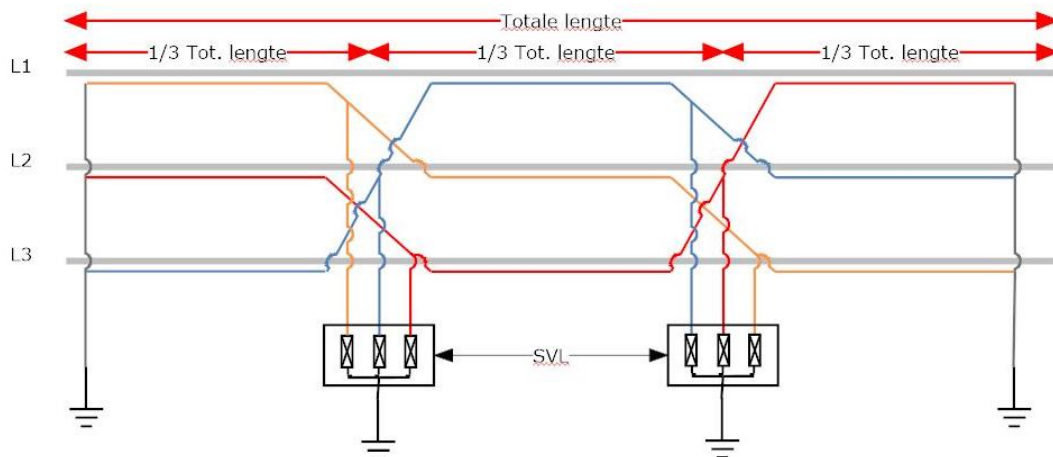
5.4 Sheath Voltage Limiter (SVL)

Bij kabelverbindingen met cross-bonding en enkelzijdige aarding worden vaak “Sheath Voltage Limiters” gebruikt, afgekort SVL. Een SVL heeft vergelijkbare eigenschappen als een bliksemafleider en wordt ook wel een overspanningsafleider genoemd (OSA). De SVL's zitten vaak tussen aarde en de drie aardschermen verbonden. Bij een lage spanning treedt de SVL niet in geleiding, waardoor bij de cross-bonding los ligt van aarde en het systeem alleen geaard is bij de uiteinden in de vorm van aardingsputten of kasten. In het geval van een blikseminslag of een overspanning als gevolg van een schakelhandeling, zal de aardschermspanning oplopen tot de zogeheten ‘protection voltage’ van de SVL waarna deze in geleiding treedt en het getroffen segment in een aantal nanoseconden tot milliseconden met aarde verbindt waardoor de spanning direct afneemt. De geleiding naar aarde zal de spanning tussen de verschillende fasen balanceren en zullen de mantel weer isoleren van aarde wanneer de spanning onder de ‘protection voltage’ uitkomt.

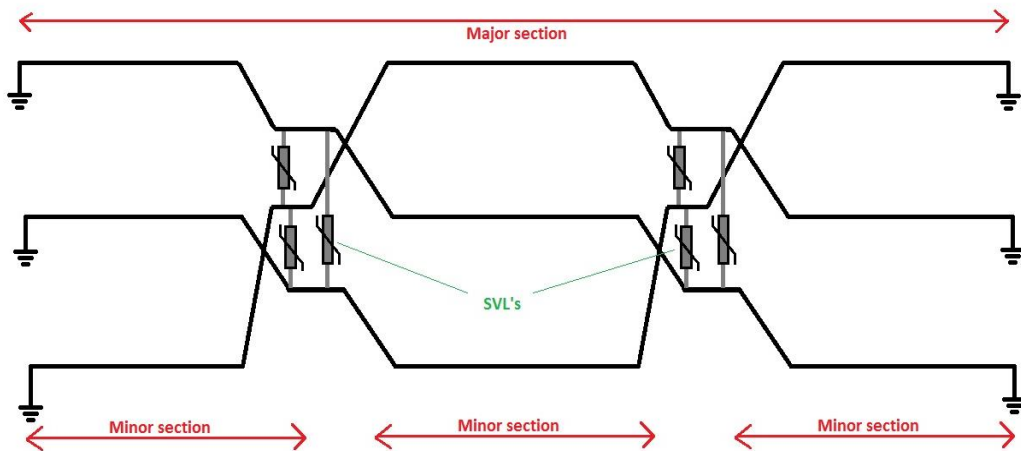
5.4.1 Toepassingen

De SVL's worden in de praktijk vaak toegepast in cross-bonding- of aardingsdozen en op de openklem van een enkelzijdig geaard kabelsysteem. De cross-bondingdozen zijn met aardingskabels aangesloten op de mantels van de verbindingsmoffen die de minor sections met elkaar verbinden. Omdat de mantels van de kabels worden onderbroken bij de verbindingsmof –d.m.v. een ‘cross-bondingring’– om vervolgens met een mantel van een andere fase te worden verbonden, komt de verschilspanning tussen de verschillende mantels over deze cross-bondingring te staan. Dit kan in geval van overspanningen resulteren in een doorslag in de verbindingsmof, als gevolg van een te hoge mantelspanning. SVL's beschermen de verbindingsmoffen tegen transiënte overspanningen en bliksemspanningen. [5].

Er is ook een configuratie van SVL's bij cross-bonding, waarbij deze tussen de mantels worden aangesloten in plaats van tussen de mantels en aarde. Op deze manier worden de mantelspanningen gebalanceerd door stroomafvoering via de mantels zelf t.b.v. spanningsafbouw. In Figuur 11 en Figuur 12 zijn schematische weergaven gegeven van beide configuraties.



Figuur 11: Schematische weergave van cross-bonding met SVL's in ster configuratie met aarding.



Figuur 12: Schematische weergave van cross-bonding met SVL's in driehoek configuratie zonder aarding.

5.4.2 Dimensionering

SVL's die zijn toegepast in cross-bonding zijn gedimensioneerd op twee spanningsniveaus: een ondergrens en een bovengrens. De ondergrens wordt bepaald door de maximale tijdens kortsluiting geïnduceerde spanning op het aardscherm. Tijdens zo'n kortsluiting mag de SVL niet gaan geleiden. De bovengrens is de beveiligingsspanning waarbij de SVL in geleiding treedt en dient de cross-bondingring in de verbindingsmof te beschermen tegen overspanning als blikseminslag en andere transiënten.



6 Eisen en wensen

Om de problemen goed in kaart te brengen en tot een goede oplossing te komen, is het belangrijk dat de eisen en wensen, of ook wel de belangen van de betrokken partijen worden verzameld. De betrokken partijen zijn:

- De landeigenaren.
- De netbeheerder: TenneT TSO B.V.

6.1 De landeigenaren

De eisen die de landeigenaren stellen aan een hoogspanningskabelverbinding:

- De plaatsing van de componenten moeten het mogelijk maken om het land onverhindert te kunnen maaien of als volwaardig akkerland te kunnen gebruiken.
- De kasten en elektrische componenten mogen geen gevaar opleveren voor mens en dier.
- Indien onderhoud gepleegd wordt, mag het land niet teveel beschadigd raken (denk aan graafschade en schade aan het land door zwaar materieel). Het beperken van schade geldt vooral voor periodieke conditiemetingen van de mantels, aarding en cross-bonding.

6.2 De netbeheerder TenneT TSO B.V.

“Het primaire belang van de netbeheerder is om een betrouwbaar en ononderbroken levering van elektriciteit in hun hoogspanningsnet te garanderen. Dit belang is op te splitsen in 2 kernwaarden:

- **Kwaliteit:**
Kwaliteit speelt een leidende rol in het verwezenlijken van een ononderbroken elektriciteitsvoorziening, tegen een acceptabele prijs. Daarbij worden veiligheid en efficiëntie volgens de hoogste normen toegepast.
- **Integriteit**
Integriteit weerspiegelt de morele principes, waaronder openheid, eerlijkheid en respect.

Naast de kernwaarden zijn er ook merkwaarden. Merkwaarden stellen een belofte op aan de buitenwereld, waarmee aangegeven wordt hoe tegemoet te komen aan de wensen en behoeften van belanghebbenden. Hierbij is het belangrijk dat de belanghebbenden een goed beeld hebben van TenneT. Daarnaast ook dat de belanghebbenden vertrouwen hebben in TenneT als netbeheerder van Nederland. “ Aangepast citaat uit bron: [6]”.

De wens van TenneT is dat landeigenaren en gemeenten bereid zijn land beschikbaar te stellen voor hoogspanningsinstallaties, kabels en lijnen. Deze wens komt voort uit het feit dat TenneT zelf relatief weinig grond bezit en daarom grotendeels afhankelijk is van alle andere grondbezitters waar TenneT haar verbindingen doorheen wilt laten lopen en installaties wilt plaatsen.



6.2.1 Eisen moffen, aardings- en cross-bondingdozen

De eisen die TenneT stelt aan aardings- en cross-bondingdozen en de daarbij horende verbindingsmoffen zijn in het programma van eisen van TenneT zoals deze zijn gedefinieerd in het programma van eisen [7], zijn als volgt:

- Cross-bonding- en aardingsdozen dienen aan het maaiveld aangelegd te worden en moeten geschikt zijn voor buitenopstelling. Ze zijn daarom uit corrosiebestendig materiaal vervaardigd of op andere wijze deugdelijk tegen corrosie beschermd, (beschermingsgraad IP 65 conform NEN 10529).
- De aansluitingen in de dozen dienen zo geconstrueerd te zijn dat de aardschermen op eenvoudige wijze van het aardnet te scheiden zijn.
- Alle apparatuur dient bereikbaar te zijn voor onderhoudswerkzaamheden.
- Bij cross-bonding worden ondergrondse linkboxes toegepast, geplaatst in een betonnen bak.

Aardingskasten op stations:

- 3-fase kasten hebben een voorkeur boven 1-fase kasten.
- Het binnenwerk van de kasten dient gemakkelijk toegankelijk te zijn.
- Kastten dienen onderhoudsvrij te zijn onder gegeven omgevingscondities waarin zij worden opgesteld.

6.2.2 Eisen kabelverbinding

De eisen die TenneT stelt aan de ligging van de kabelverbinding zoals deze zijn gedefinieerd in het programma van eisen [7], zijn als volgt:

- Installatiediepte: minimaal 1,20 m. Bij verbindingen in agrarisch gebied moet de gronddekking minimaal 1,80 m zijn, zodat zonder kans op beschadiging, geploegd of drainage aangelegd kan worden.
- De configuratie van de circuits is afhankelijk van het transportvermogen en de specifieke grondweerstand. Er zijn hiervoor een degelijk grondonderzoek en tracéstudie nodig. Leg kabels bij voorkeur onderling evenwijdig en in een nagenoeg horizontaal vlak. Onder specifieke omstandigheden, bijvoorbeeld vanwege ruimtegebrek of magneetveld contouren, is installatie in driehoek toegestaan.
- De ruimte tussen de circuits moet bij storingen gebruikt kunnen worden als werkstrook. Zijn de werkstroken op andere wijze voorzien, dan is die ruimte minimaal 2 m, tenzij belastbaarheidberekeningen een grotere afstand nodig maken.



7 Onderzoek mantelfout

De huidige detectie van mantelfouten zoals deze staat beschreven in paragraaf 0, heeft een viertal nadelen:

- Aardingsputten/kasten dienen geopend te worden, om de mantels van aarde los te kunnen koppelen. Dit belemmert ondergrondse plaatsing van mantelaarding.
- De verbinding moet uit bedrijf t.b.v. de manteltest (dit is voor TenneT het belangrijkste nadeel).
- Elke 3 jaar is er bevoegd personeel en gekeurd materieel nodig om deze meting uit te voeren.

Een alternatief voor de manteltest om de conditie van de mantel vast te kunnen stellen zou oplossingen moeten bieden voor bovengenoemde negatieve aspecten. Als een mantelfout optreedt, gaat er een stroom naar aarde lopen. Als deze stroom goed meetbaar is, kan een stroommeting op de mantel als mantelfoutdetectie fungeren. Bij kabelverbindingen zonder cross-bonding is de mantelstroom een directe en betrouwbare indicatie voor een mantelfout, met name voor kabelverbindingen met enkelzijdige aarding. Bij kabelverbindingen met cross-bonding is de mantelstroom een complexer begrip, door de cyclische uitwisseling van de kabelmantels. Daarnaast is een cross-bondingsysteem een zo symmetrisch mogelijk systeem, dat ontregelt kan worden door een mantelfout. Om het gedrag van de mantelstromen als gevolg van een mantelfout op een cross-bonding systeem in kaart te brengen wordt in de volgende paragraaf een simulatie behandeld.

7.1 Simulatie mantelfout cross-bondingsectie

Het effect van een mantelfout op een kabelverbinding met cross-bonding is gesimuleerd met behulp van het programma MathCad gedaan. De simulatie is volgens het '7 geleider' rekenmodel uitgevoerd welke door dhr. J. van Eerde is opgesteld [8]. De kern van dit model is de berekening van geïnduceerde stromen in parallelle geleiders. Dit wordt gedaan door de kabelmantels, geleiders en aarde als geleiders te definiëren. De fundamenteën van de simulatie staan hieronder beschreven.

7.1.1 Fundamenteën mantelstroomsimulatie

Mutuele koppeling, impedantie en liggingsconfiguratie:

Voor elke geleider worden alle mogelijke mutuele koppelingen vastgelegd in een matrix 'M'. In deze matrix zit ook de zelfinductie van elke geleider verwerkt. Elke geleider en mantel krijgt een 'x' en 'y' coördinaat toegekend, welke in de mutuele koppelingen worden meegenomen. Met de coördinaten, zijn verschillende liggingsconfiguraties van de kabels te simuleren en kan cross-bonding worden gesimuleerd, door de fysieke ligging van de mantels per sectie aan te passen. De impedanties in matrix 'Z' worden vervolgens berekend met behulp van matrix 'M' en de gedefinieerde weerstand 'R' per meter voor elke geleider. Het impedantiemodel van de NKT cross-bondingdoos is niet meegenomen in de simulatie. Deze staat beschreven in de paper "Cross-bonding cable and box model based on pulse reflection measurement" [15]



7.1.1.1 Aardretourgeleider

Aarde is moeilijk om goed te simuleren, omdat in de praktijk de stromen door aarde zich verdelen over verschillende dieptelagen in de grond. Als bijvoorbeeld de aarde een goede geleidbaarheid heeft, zal de meeste stroom door aarde dicht langs het aardoppervlak lopen wat een stroom kan induceren in de mantels en geleiders. Wanneer de geleidbaarheid slechter is, zal de stroom zich beter verspreiden door de grond en zal de beïnvloeding van de aardstroom op de kabels minder zijn. Dit wordt gesimuleerd door de aardretourgeleider afhankelijk van de geleidbaarheid van de grond op een bepaalde diepte te leggen.

7.1.1.2 Aarding

De aanname voor de stroomverdeling van de geleiders van de kabels en de aardretourgeleider, is zoals in formule 7 en is gedefinieerd als hulpmatrix 'Q'.

$$I_8 - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (7)$$

De aanname voor de stroomverdeling van de geaarde mantels is zoals is weergegeven in formule 8 en is gedefinieerd als hulpmatrix 'M':

$$I_8 = I_4 + I_5 + I_6 \quad (8)$$

De aanname voor het spanningsval over alle mantels en de retouraarde, is dat deze allen 0V bedragen en is gedefinieerd als hulpmatrix 'P'. Op deze manier hebben alle geleiders een relatie met alle andere geleiders en is er sprake van een tweezijdig geaard systeem.

7.1.1.3 Stroomberekening

De stroomberekening is opgebouwd uit de eerder genoemde matrices:

- Impedantiematrix 'Z'.
- Stroommatrix 'I' (met enkel de geleiderstromen hierin gedefinieerd).
- Hulpmatrix 'P'.
- Hulpmatrix 'Q'.
- Hulpmatrix 'M'.

De stroomberekening is als in formule 9 en is enkel een berekening van de mantelstromen en de aardretourstroom, de geleiderstromen zijn vooraf gedefinieerd en staan vast.

$$I' = [M \cdot (P \cdot Z \cdot M)^{-1} \cdot P \cdot Z \cdot Q] \cdot I \quad (9)$$

I' is de matrix met de geleiderstromen, de mantelstromen en de stroom door de retouraarde.

7.1.1.4 Opbouw cross-bonding simulatie

De cross-bonding simulatie begint bij het opdelen van de gehele verbinding in drie secties met gelijke lengtes die samen de totale lengte vormen van het kabelsysteem. De geleiders zijn genummerd van 1 t/m 3 en de mantels van 4 t/m 6. Geleider 1 hoort bij mantel 4 en zo verder. Cross-bonding wordt in de simulatie gerealiseerd door de 'x' coördinaten van de mantels per sectie te wijzigen, zodanig dat de mantels zich telkens bij elke sectie om een andere geleider bevinden. Zo is mantel 4 alleen onderdeel van kabelgeleider 1 in de eerste cross-bonding sectie. De mantelwisseling moet ook in de matrix voor de mutuele koppelingen worden doorgevoerd.

7.1.2 Mantelfoutsimulatie

De basis voor de mantelfoutsimulatie [9] is de mantelstroomsimulatie van een cross-bondingsysteem in plat vlak opstelling zoals beschreven is als uitgangspunt voor dit haalbaarheidsonderzoek. In deze paragraaf wordt daarom als eerst de opbouw van de cross-bonding simulatie behandeld.

7.1.2.1 Opbouw mantelfoutsimulatie:

Het kabelsysteem dat is gesimuleerd betreft een 380kV kabelverbinding in plat vlak met een afstand van 0,75 meter tussen de kabels. De cross-bonding sectie heeft een totale major sectionlengte van 2700 meter met 3 identieke minor sections van 900 meter. De geleiderstromen hebben ieder een amplitude van 1000 A met een fasehoek van 120°.

Om in het bestaande cross-bondingmodel een mantelfout te simuleren, dient de gestoorde mantel gesimuleerd te worden met behulp van een hulpmantel. Het model heeft namelijk niet de mogelijkheid om op eenvoudige wijze, direct een aardpunt op een willekeurige plek te plaatsen. Om een fout op verschillende plekken mogelijk te maken, moet met de hand de plaats van de fout worden ingevoerd.

Het cross-bondingsysteem dient uit minimaal 4 mantelsecties te bestaan waarvan minimaal één van de drie cross-bonding secties opgedeeld is in 2 deelsecties, de structuur is weergegeven in Figuur 13. De twee mantels voor de mantelfout zijn in dit geval '1a' en '1b'. Tussen de gesplitste cross-bonding secties (in blauw gearceerd) wordt vervolgens mantel '1a' vervangen door mantel '1b'. Vanaf het punt waar mantel '1a' ophoudt, heeft deze mantel –met de stippellijn aangegeven– lengte '0' tot aan het einde van sectie 4 en is nu direct verbonden met aarde. Dit geldt andersom ook voor mantel '1b' en heeft vanaf het begin tot aan het punt tussen de twee gesplitste cross-bonding secties lengte '0'.

Om de impedantie van de fout mee te nemen in de simulatie, is deze opgeteld bij de mantelimpedantie van de mantels '1a' en '1b'. De impedantie van de fout impliceert de grootte van de fout. De simulatie is aan te passen voor mantelfouten op elke plaats, in elke fase.

CB Sectie 1		CB Sectie 2		CB Sectie 3	
900 meter		900 meter		900 meter	
Sectie 1		Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	
G1		G1	G1	G1	
G2		G2	G2	G2	
G3		G3	G3	G3	
Mantel 1a	CB	Mantel 2	Mantel 2	CB	Mantel 3
Mantel 2		Mantel 3	Mantel 3		Mantel 1b
Mantel 3		Mantel 1a	Mantel 1b		Mantel 2
Mantel 1b	Mantel 1b		Mantel 1a	Mantel 1a	
Retourraarde					

Figuur 13: Illustratie opbouw kabelverbinding in de mantelfoutsimulatie (fout in het midden van mantel 1)



7.1.3 Hypothese

De verwachting van de mantelfoutsimulatie is dat er alleen een stroom in de mantel gaat lopen waar de fout zit en dat de amplitude van de stroom toeneemt naarmate de impedantie van de fout afneemt en dat bij een hoge foutimpedantie de stroom nagenoeg '0A' zal blijven.

Daarnaast is de verwachting dat de stroom bij een mantelfout dicht bij de aarding laag zal zijn en daardoor moeilijker meetbaar.

7.1.4 Simulatieresultaten

De twee belangrijkste parameters bij een mantelfout die invloed hebben op de mantelstromen van een cross-bondingsysteem zijn de impedantie en de plaats van de fout. Door de stromen uit te zetten tegen de impedantie van de fout is het gedrag van de stromen goed inzichtelijk te maken. Dit is gedaan voor 27 verschillende foutplaatsen, waarbij op elke foutplaats de impedantie van de fout is gevarieerd van $5 \mu\Omega/\text{m}$ tot $0,5 \Omega/\text{m}$, hieruit volgen de stromen die als gevolg hiervan door de mantels gaan lopen. De reden dat de foutimpedantie in Ω/m is, is omdat hiermee een retourpad naar de aarding voor de foutstroom mee wordt gesimuleerd. In Simulatieresultaten mantelfout simulatie

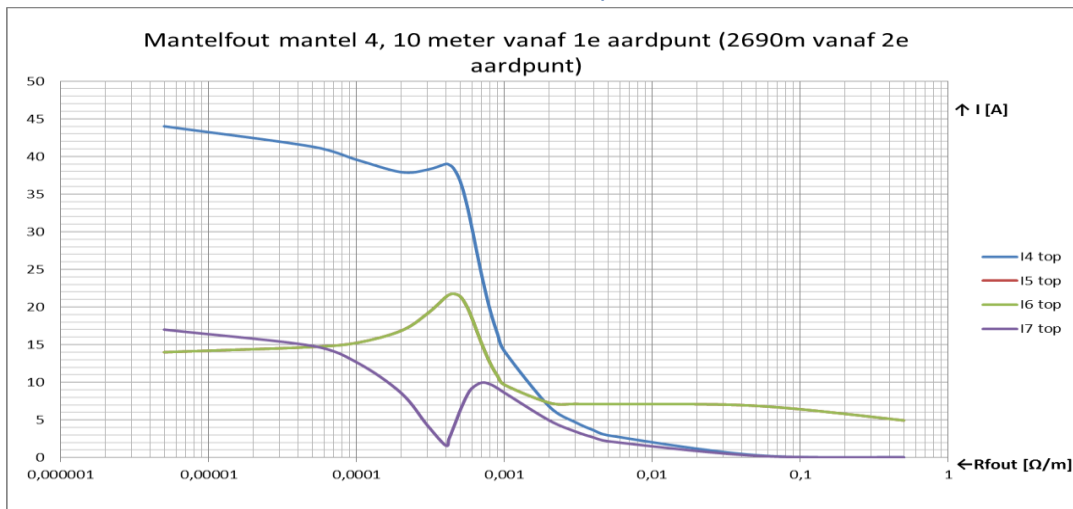


Bijlage A: zijn de absolute waarden van de stromen gegeven voor de 27 verschillende foutplaatsen. Telkens zijn de stromen van de betreffende mantel (I_4 , I_5 of I_6) samen met I_7 , de stromen die richting de mantelfout lopen. Alle mantelstromen zijn telkens met dezelfde kleuren weergegeven.

De volgende resultaten uit worden op de volgende bladzijde toegelicht:

1. Mantelfout in mantel 4, 10 meter vanaf het 1^e aardpunt.
2. Mantelfout in mantel 4, 450 meter vanaf het 1^e aardpunt.
3. Mantelfout in mantel 4, 910 meter vanaf het 1^e aardpunt (deze foutplaats is op 10 meter afstand van de cross-bonding).
4. Mantelfout in mantel 4, 1350 meter vanaf het 1^e aardpunt (het midden van de verbinding).

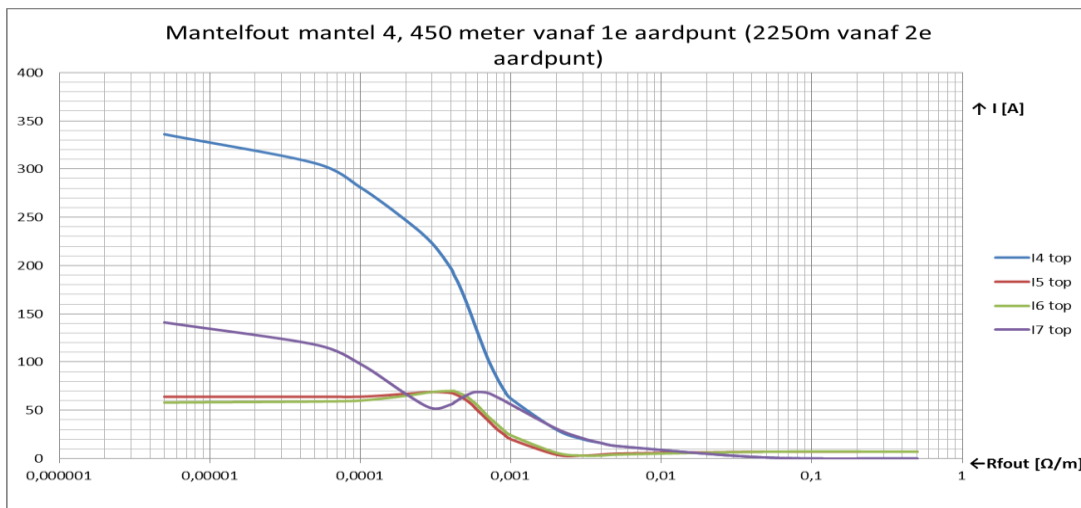
7.1.4.1 Mantelfout in mantel 4, 10 meter vanaf het 1^e aardpunt



Grafiek 1: Simulatieresultaat mantelfout mantel 4, 10 meter vanaf 1^e aardpunt gesimuleerd

In bovenstaande Grafiek 1 is een dip zichtbaar bij een impedantie van 0,0004Ω/m. Bij deze foutimpedantie is deze gelijk aan de impedantie van de mantelaarding. Nu kan het stuk aardscherm van 10m worden beschouwd alsof deze er niet is, omdat de stroom door het resterende stuk aardscherm met een lengte van 2690 meter, nu geen mantelstroom voert. Dit is in de grafiek weergegeven als I7 top. De amplitude van de stroom die gaat lopen als gevolg van de mantelfout, is vrij laag vanwege de minimale invloed die de fout op 10 meter afstand van de aarding uitoefent. Het systeem wordt enigszins asymmetrisch.

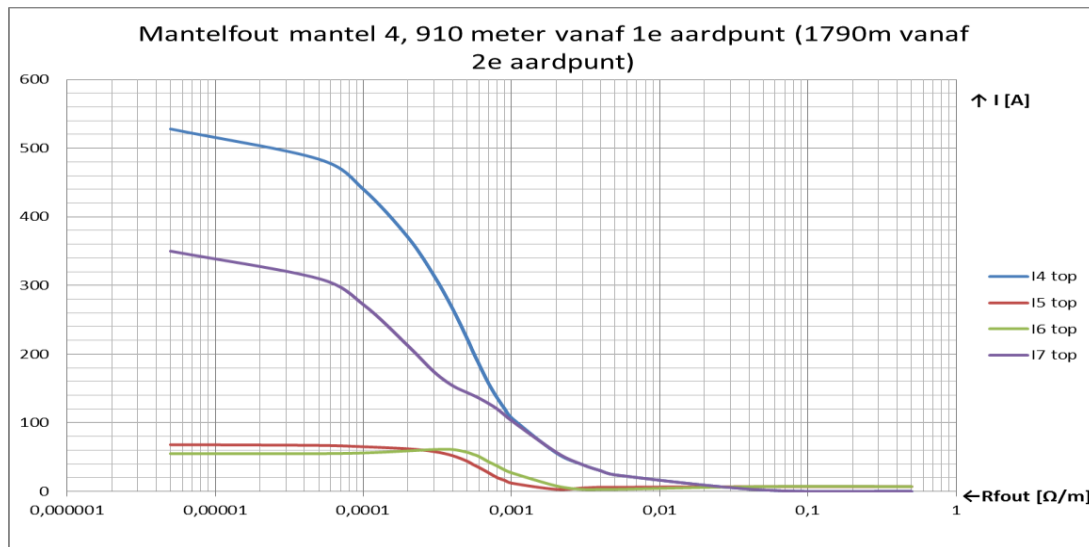
7.1.4.2 Mantelfout in mantel 4, 450 meter vanaf het 1^e aardpunt



Grafiek 2: Simulatieresultaat mantelfout mantel 4, 450 meter vanaf het 1^e aardpunt

In bovenstaande Grafiek 2 is de hierboven verklaarde dip aanzienlijk minder dan bij een mantelfout op 10 meter afstand van de aarding. Dit keer is de stroom die gaat lopen door het aardscherm als gevolg van de mantelfout niet meer zo klein bij een foutimpedantie van ongeveer 0,0004Ω/m. De fout op 450 meter afstand van de aarding, heeft gezien de amplitude meer invloed op het systeem en zorgt voor een duidelijke asymmetrie.

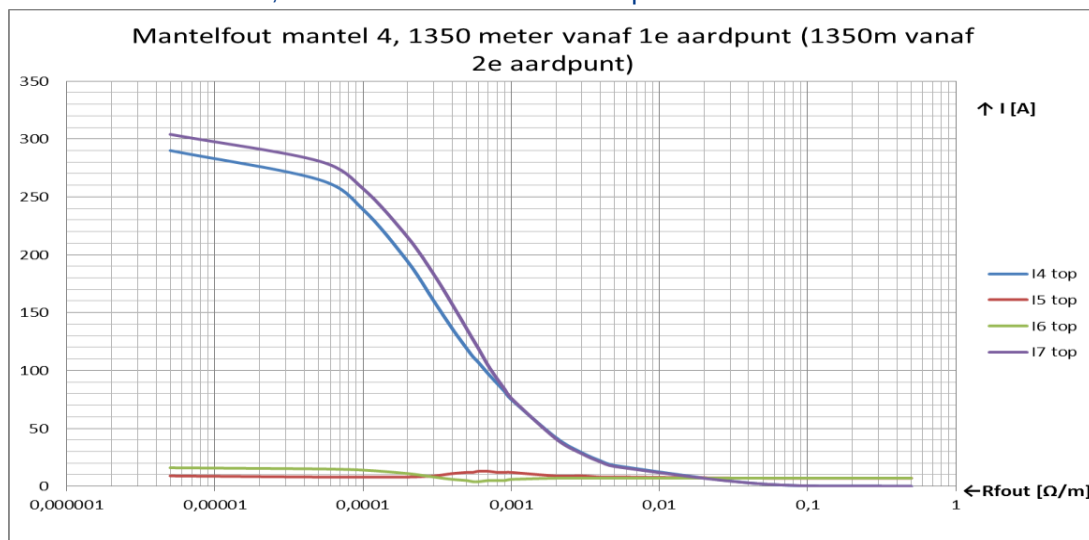
7.1.4.3 Mantelfout in mantel 4, 910 meter vanaf het 1^e aardpunt



Grafiek 3: Simulatieresultaat mantelfout mantel 4, 910 meter vanaf het 1^e aardpunt

In bovenstaande Grafiek 3 is de dip als gevolg van gelijke impedanties van de aarding en de fout, niet meer van invloed op het systeem. Doordat mantel 4 wordt opgesplitst in twee grote manteldelen, zal in elk deel niet meer door elke fase een stroom worden geïnduceerd. Dit resulteert daarom niet meer in een vectorieel opgetelde stroom van 0A. Dit vormt daarom een duidelijke asymmetrie in het cross-bondingsysteem.

7.1.4.4 Mantelfout in mantel 4, 1350 meter vanaf het 1^e aardpunt



Grafiek 4: Simulatieresultaten mantelfout mantel 4, 1350 meter vanaf het 1^e aardpunt

In bovenstaande Grafiek 4 is te zien dat wanneer er een fout optreedt midden in de verbinding, de stromen richting de fout, nagenoeg gelijk aan elkaar zijn. De fout veroorzaakt een asymmetrie in het cross-bondingsysteem, maar enkel in het gestoorde aardscherm.



7.1.5 Conclusie

De simulatie wijst uit dat het mogelijk is om mantelfouten te meten door het verschil in stromen aan beide kanten van de mantels te meten. Indien metingen van dezelfde mantel aan beide zijden verschillen en dit bij de andere mantels niet het geval is, kan geconcludeerd worden dat er sprake is van een mantelfout.

Er zijn echter situaties waarbij de stromen van de gestoorde mantel aan beide uiteinden van de mantel gelijk aan elkaar zijn. Indien dit het geval is, zullen de stromen van de andere mantels bijna altijd lager zijn, waardoor alsnog een mantelfout vastgesteld kan worden. De simulatie laat zien dat de gezonde mantelstromen in het geval van een mantelfout alleen hoger uitvallen dan die van de gestoorde mantel wanneer de mantelfout dicht bij de aarding zit. Bij de andere situaties waarbij de fout verder van de aarding af ligt, liggen de stromen van de gestoorde mantel altijd hoger dan de stromen in de gezonde mantels, ook bij een kleine fout. Er kan dus bij lage stromen al bepaald worden dat er sprake is van een mantelfout, waardoor de mantelfout al kan worden vastgesteld voordat de kabelmantel of het aardscherm verder beschadigd raken.

Uit de resultaten is dus te concluderen dat een mantelfout meetbaar is aan de hand van de absolute waarde van de stroom. De resultaten zijn naar verwachting. Zelfs bij de mantelfoutsimulaties op 10m afstand vanaf de aarding is de foutstroom nog meetbaar, ondanks de lagere stromen. Dit biedt mogelijkheden voor zowel ondergrondse als bovengrondse mantelaarding. Bij beide toepassingen is het mogelijk om de conditie van de kabelmantel continue te monitoren en daardoor de reguliere conditiemeting achterwege te laten.



8 Concepten

In het hierop volgende hoofdstuk zullen oplossingen worden aangedragen in de vorm van concepten. Alle concepten zijn gebaseerd op een hoogspanningskabelverbinding met cross-bonding die in de praktijk is toegepast. In dit hoofdstuk wordt de hoogspanningsverbinding welke als uitgangspunt dient beschreven.

De opbouw van een kabelverbinding met cross-bonding heeft vaak de volgende opbouw: 'Cross-bonding wordt voornamelijk toegepast bij kabelverbindingen met een bedrijfsspanning van 150kV of hoger. De verbinding wordt onderverdeeld in drie minor sections van rond de 1000 meter lang wat resulteert in een lengte van rond de 3000 meter voor de major section. Voor verbindingen langer dan 3000 meter, zal een tweede of zelfs een derde major section worden toegepast. Elke major section wordt tweezijdig geaard. De eerste en laatste secties van de gehele kabelverbinding worden ook in de stations geaard. Tussen de minor sections worden verbindingsmoffen toegepast waarbij de kabelmantels met aardingskabels, op een cross-bondingdoos of kast worden aangesloten ter illustratie zie Bijlage B:. Deze cross-bondingdoos beschikt over SVL's.'

De concepten en het uitgangspunt van deze concepten, hebben elk voor- en nadelen op verschillende vlakken. De belangrijkste punten waarop deze concepten verschillen ten opzichte van het uitgangspunt en ten opzichte van elkaar, zijn:

- Opbouw kabelverbinding.
- Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen.
- Routine conditiemetingen.
- Onderhoud.

8.1 Uitgangspunt

8.1.1 Opbouw Huidige kabelverbinding

De kabelverbinding welke als uitgangspunt dient voor een mogelijk alternatief voor een ontwerp dat reeds is gerealiseerd, is een dubbele 380kV kabelverbinding van ± 11 kilometer met 4 *major sections* van $\pm 2,7$ km met elk 3 *minor sections* van ± 900 m, zie Bijlage B:. De aardings- en cross-bondingdozen die in deze verbinding worden toegepast, zijn van de fabrikant NKT Cables, zie Bijlage D:.

8.1.2 Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen

Aarding en cross-bonding vindt plaats in dozen geplaatst op maaiveldhoogte in putten of in kasten op het maaiveld. De lengte van de aardingskabels naar een cross-bonding- of aardingspunt moet zo kort mogelijk worden gehouden ter bescherming van het kabel systeem. (maximaal 15 meter)

8.1.3 Routine conditiemeting

In de huidige kabelverbinding wordt de reguliere mantelbeproeving uitgevoerd zoals staat beschreven in paragraaf 0. De meting van overgangsweerstanden wordt toegepast, omdat een luchtgeïsoleerd systeem met bouten als contactmiddel op den duur te maken kan krijgen met overgangsweerstanden, zoals beschreven in paragraaf 0.

8.1.4 Onderhoud

Onderhoud kan eenvoudig worden uitgevoerd vanwege de gunstige plaatsing net aan het maaiveld of daarboven en zal alleen worden uitgevoerd als blijkt dat er mankementen zijn.



8.1.5 Voor- en nadelen

De bovengenoemde punten hebben elk voor- en nadelen en zijn uitgezet in Tabel 1.

Uitgangspunt	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
Voordelen:	Makkelijk bereikbaar	Meting overgangsweerstanden uit te voeren zonder graafwerkzaamheden	Aardings- en crossbondingdozen bovengronds te onderhouden
		Manteltest goed bovengronds uitvoerbaar	
Nadelen:	Vaak lange aardkabels van mof naar aardings- en cross-bondingkast/put	Tijdelijk extra belemmering landeigenaar	Tijdelijk extra belemmering landeigenaar
	Continue belemmering maaiveld	Tijdsintensieve metingen	Schade aan het land voor ondergronds onderhoud aan b.v. Aardkabels is groot
	Gevoelig voor schade door invloeden van boven het maaiveld (b.v. Landbouwmachines)		

Tabel 1: Voor- en nadelen uitgangspunt

8.2 Concept 1

Dit concept richt zich op de plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen die ondergronds geplaatst worden, om belemmeringen aan het maaiveld te voorkomen. Er wordt gebruik gemaakt van het bestaande ontwerp uit het uitgangspunt, waarbij enkel de aarding en cross-bonding ondergronds wordt geplaatst.

8.2.1 Opbouw kabelverbinding

Voor de opbouw van de verbinding wordt uitgegaan van dezelfde opbouw als bij de huidige kabelopstelling. Enkel de lengte van de aardkabels van de verbindingsmoffen naar de cross-bondingdozen zijn korter, vanwege de ondergrondse plaatsing.

8.2.2 Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen

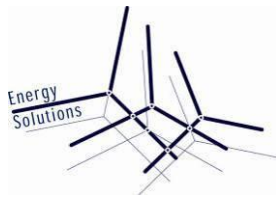
De plaatsing van de cross-bonding en aardingsdozen is ondergronds met een minimale diepte van 1,2 m en een maximale diepte van 1,8 meter [10, p. 22]. Dezelfde dozen worden toegepast als in de huidige kabelopstelling, welke met een IP 68 klasse waterdicht zijn volgens de IEC 60529/EN 60529 norm. De dozen zullen in een put worden. De ondergrondse plaatsing voorkomt continue belemmering van het maaiveld.

8.2.3 Routine conditiemeting

De conditiemetingen kunnen alleen worden uitgevoerd wanneer de dozen allemaal worden opgegraven. Dit geldt voor zowel de manteltest als voor de meting van overgangsweerstanden.

8.2.4 Onderhoud

Voor onderhoud aan de dozen zijn door de liggingsdiepte extra graafwerkzaamheden nodig, wat extra tijd in beslag neemt en meer kosten met zich mee brengt.



8.2.5 Voor- en nadelen

De bovengenoemde punten hebben elk voor- en nadelen en zijn uitgezet in Tabel 2.

Concept 1	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	Korte aardkabels		Sleuf voor ondergronds onderhoud is kleiner door ligging van de cross-bondingdozen in kabelbed
	Geen schade aan componenten door invloeden van boven het maaiveld		Aardingsdozen bovengronds te onderhouden
	Geen continue belemmering van het maaiveld		
Nadelen:		Manteltest bij conditiemeting zorgt voor versnelde veroudering van de kabelisolatie	Tijdelijk extra belemmering landeigenaar
		Tijdelijk extra belemmering landeigenaar	Aardings- en cross-bondingdozen niet bovengronds te onderhouden
		Schade aan het land bij elke meting	Schade aan het land bij onderhoud
		Conditie meting zeer tijdsintensief	

Tabel 2: Voor- en nadelen concept 1

8.3 Concept 2

Dit concept biedt de mogelijkheid om de cross-bonding op een betrouwbare wijze ondergronds te plaatsen zonder dat hier graafwerkzaamheden aan te pas komen wanneer conditiemetingen uitgevoerd moeten worden. Een bepaald type cross-bondingdoos verwezenlijkt dit.

Prysmian heeft een cross-bondingdoos ontwikkeld die onderhoudsvrij is en ondergronds toepasbaar is, zie Bijlage E:. Deze cross-bondingdoos heeft een andere configuratie dan het model van NKT Cables. De verschillen tussen de cross-bondingdozen van Prysmian en NKT Cables zijn tegen elkaar uitgezet in Tabel 3.

NKT 3P-300-CB-CX	Prysmian 6SXU-BP
Onder- en bovengronds toepasbaar	Ondergronds toepasbaar
Luchtgeïsoleerd (V3.2), deels giethars isolatie (V3.3)	Giethars isolatie
Onderhoud mogelijk	Onderhoud niet mogelijk
Geïsoleerde coaxiale aardkabels	Normale geïsoleerde aardkabels
Aarding aanwezig	Geen aarding
SVL's in ster configuratie	SVL's in driehoek configuratie

Tabel 3: Verschillen tussen Prysmian en NKT Cables cross-bondingdozen

8.3.1 Opbouw kabelverbinding

De Prysmian 6SXU-BP cross-bondingdoos beschikt niet over een aarding. De SVL's zijn in dit ontwerp niet verbonden met aarde maar verbinden de mantels onderling met elkaar d.m.v. een driehoek opstelling, zoals in paragraaf 5.4.1 staat beschreven. In Bijlage C: is een tekening te zien van de aansluitwijze van de Prysmian cross-bondingdoos op de verbindingsmoffen tussen twee minor sections. De aardkabels voor de cross-bondingdozen zijn alleen in normale uitvoering geschikt. Coaxiale aardkabels zijn niet toepasbaar op dit type cross-bondingdoos.



8.3.2 Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen

De plaatsing van de aardingsdozen zal net als in de huidige kabelverbinding bovengronds worden geplaatst. De bovengrondse plaatsing zal de uitvoering van de manteltest vergemakkelijken. Condiitiemetingen dienen gedurende de gehele levensloop van een kabelverbinding een aantal keren uitgevoerd te worden, waardoor bovengrondse plaatsing in dit geval de beste oplossing biedt, wat echter wel een belemmering blijft vormen voor landeigenaren.

8.3.3 Routine conditiemeting

Door de toepassing van de onderhoudsvrije Prysmian 6SXU-BP, kan de overgangsweerstandsmeting als conditiemeting, wegens ondergrondse plaatsing niet worden uitgevoerd en wordt deze bij de conditiemeting weggelaten.

8.3.4 Onderhoud

De Prysmian 6SXU-BP is onderhoudsvrij en zal in geval van schade of mankement worden vervangen, omdat reparatie binnenin de –met giethars ingegoten– cross-bondingdoos niet mogelijk is. De aardingskasten kunnen als nodig op reguliere wijze worden onderhouden.

8.3.5 Voor- en nadelen

De bovengenoemde punten hebben elk voor- en nadelen en zijn uitgezet in Tabel 4.

Concept 2	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	Korte aardkabels	Manteltest goed bovengronds uitvoerbaar	Aardingsdozen bovengronds te onderhouden
	Minder gevoelig voor schade door invloeden van buitenaf (door b.v. Landbouwmachines)	Meting overgangsweerstanden overbodig	Sleuf voor ondergronds onderhoud/vervanging is kleiner door ligging van de cross-bondingdozen in kabelbed
	8 van de 11 dozen ondergronds (geen belemmering maaiveld overgrote deel landeigenaren)		Ingegaten cross-bondingdoos is onderhoudsvrij
Nadelen:	3 van de 11 dozen staan bovengronds (belemmering voor enkele landeigenaren)	Manteltest bij conditiemeting zorgt voor versnelde veroudering van de kabelisolatie	Door giethars isolatie enkel vervanging van cross-bondingdoos mogelijk

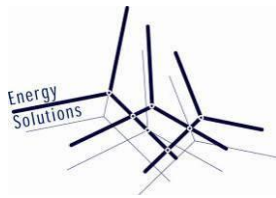
Tabel 4: Voor- en nadelen concept 2

8.4 Concept 3

Dit concept betreft een kabelontwerp met cross-bonding door middel van directe verbinding met aardkabels tussen de verschillende kabelmantels op de verbindingsmoffen. Er komen geen cross-bondingdozen aan te pas zoals in de voorgaande ontwerpen. De aardingsdozen zullen echter nog boven het maaiveld worden toegepast vanwege de manteltest ten behoeve van conditiemetingen.

8.4.1 Opbouw kabelverbinding

De kabelverbinding is voornamelijk hetzelfde opgebouwd als in concept 2, het verschil is dat de cross-bondingdozen worden vervangen door directe cross-bonding tussen de verbindingsmoffen, zonder SVL's. De major sections van de kabelverbinding zijn aan beide kanten geaard.



8.4.2 Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen

De aardingsdozen worden op de huidige wijze boven of aan het maaiveld uitgevoerd en geplaatst. De cross-bonding zal direct op de verbindingsmoffen worden uitgevoerd in het kabelbed onder het maaiveld.

8.4.3 Routine conditiemeting

De conditiemeting die verricht zal worden, is enkel de manteltest. De overgangsweerstandsmetingen kunnen niet verricht worden, en zouden in dit systeem alleen van toepassing zijn op de verbinders waarmee de aardkabels aan de moffen zijn gemonteerd. Vanwege de isolatie die hier omheen zit is deze meting niet meer uitvoerbaar, zonder de isolatie te beschadigen. De manteltest is wederom uitvoerbaar via de aardingsdozen.

8.4.4 Onderhoud

Directe cross-bonding is vrijwel onderhoudsvrij. Echter kan het ontbreken van SVL's zorgen voor schade aan verbindingsmoffen bij overspanning op de mantel en daarmee op de verbindingsmoffen. Een overspanning op de moffen resulteert in grote onderhoudswerkzaamheden, omdat de moffen vervangen moeten worden in geval van schade. De aardingsdozen daarentegen zijn makkelijk bovengronds te onderhouden.

8.4.5 Voor- en nadelen

De bovengenoemde punten hebben elk voor- en nadelen en zijn uitgezet in Tabel 5.

Concept 3	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	Korte aardkabels	Manteltest goed bovengronds uitvoerbaar	
	Minder gevoelig voor schade door invloeden van buitenaf (door b.v. Landbouwmachines)	Geld- en tijdsbesparing op metingen van overgangsweerstanden in directe cross-bonding	
Nadelen:	3 van de 11 dozen staan bovengronds (belemmering voor enkele landeigenaren)	Metingen niet uitvoerbaar op cross-bonding, cross-bondingkabels niet demontabel	Verhoogde kans op onderhoud aan moffen door overspanning a.g.v. ontbreken van SVL's bij de cross-bonding
		Manteltest bij conditiemeting zorgt voor versnelde veroudering van de kabelisolatie	

Tabel 5: Voor- en nadelen concept 3



8.5 Concept 4

Dit concept is een kabelverbinding met alle aarding en cross-bonding ondergronds, waarbij een meetsysteem is ingebouwd in de aardingsputten van het cross-bonding systeem. Dit concept is vervolgens weer onderverdeeld in drie deelconcepten, waarbij enkel het meetsysteem op andere wijzen is opgebouwd.

8.5.1 Opbouw kabelverbinding

De opbouw van de kabelverbinding in dit concept is een combinatie van concept 1 en 2, waarbij van concept 2 de cross-bondingdozen worden toegepast en waarbij van concept 1 de ondergrondse plaatsing van de aarding wordt toegepast.

8.5.2 Plaatsing van aardings- en cross-bondingdozen

De plaatsing de aardingsdozen is in dit concept ondergronds, dit wordt mogelijk gemaakt door middel van een meetsysteem, wat de noodzakelijke bereikbaarheid van deze dozen onnodig maakt. De cross-bondingdozen die worden toegepast zijn de Prysmian 6SXU-BP, welke ondergronds worden geplaatst.

8.5.3 Routine conditiemeting

De conditiemeting wordt in dit concept niet meer één keer in de drie jaar uitgevoerd. De conditie van de kabelmantel wordt continue uitgevoerd door een ingebouwd meetsysteem, dat de mantelstromen aan beide zijden van een major cross-bondingsectie meet. Het gebruik van een meetsysteem voor mantelfoutdetectie, heeft als gevolg dat de reguliere conditiemetingen kunnen worden bespaard. De meetbaarheid van mantelfouten in een cross-bonding systeem is onderzocht aan de hand van simulaties die zijn beschreven in hoofdstuk 0.

Echter dient de conditie van het meetsysteem wel bepaald te worden. Dit hoeft minder frequent plaats te vinden dan de conditiemeting van de mantel. Daarnaast kan de conditiebepaling van het meetsysteem worden uitgevoerd terwijl de kabelverbinding in bedrijf is.

8.5.4 Onderhoud

Het onderhoud dat noodzakelijk is om het kabelsysteem in orde te houden, kan op reguliere wijze worden verricht met graafwerkzaamheden als extra handeling. Onderhoud aan het meetsysteem daarentegen kan over het algemeen worden uitgevoerd zonder dat de verbinding hiervoor uit bedrijf hoeft. Ook hier zijn graafwerkzaamheden een extra onderhoudshandeling.

8.5.5 Meetsysteem

Het meetsysteem werkt met stroommetingen om de aardkabels van de kabelmoffen naar de aardingsdoos met behulp van stroomtransformatoren in ringkern uitvoering. Aan beide kanten van een major cross-bonding sectie waar de kabelmantels geaard zijn, wordt de stroom gemeten. De mantelstromen per fase worden met elkaar vergeleken, en worden vervolgens vergeleken met de stromen aan de andere kant van de major section. Hieruit kan bepaald worden of er sprake is van een mantelfout. De grootte van de stroom is voldoende om de mantelfout te detecteren, er is dus geen spanningsmeting vereist om de richting en/of fasehoek van de mantelstroom te bepalen. De meetgegevens worden verwerkt in een systeem dat een actie kan ondernemen indien er sprake is van een mantelfout.

Het meetsysteem kan op diverse mogelijkheden worden uitgevoerd. Een aantal variabelen in het meetsysteem zijn:

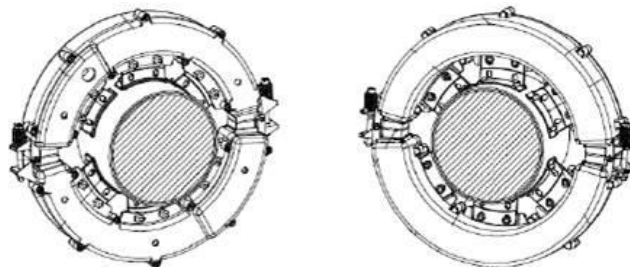
- Voeding voor meetsysteem.
- Communicatiemedium.
- Verwerking meetgegevens.
- Plaatsing meetsysteem.
- Plaatsing aardingsdoos in put/kast.

Door een aantal verschillende realistische varianten van het meetsysteem aan het licht te brengen, kunnen deze meegenomen worden in de afweging van de verschillende concepten. De verschillende varianten worden geschetst als deelconcepten van concept 4.

8.6 Concept 4.1

Voeding voor meetsysteem:

Ringkern om de hoogspanningskabel heen, zoals weergegeven in Figuur 14 en Figuur 15.



Figuur 14: Ringkern om hoogspanningskabel.



Figuur 15: Ringkern om hoogspanningskabel

Zolang de kabel onder spanning staat en belast is, zal door de geleiderstroom van de kabel een stroom worden geïnduceerd in de ringkern, en kan dit als voeding worden gebruikt.



Communicatiemedium:

Glasvezelverbinding tussen de meetsystemen en naar het onderstation. Een voorbeeld van een glasvezelverbinding is weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16: Externe glasvezelverbinding parallel aan hoogspanningskabel. [11]

Glasvezel wordt ook intern in hoogspanningskabels verwerkt. Bij enkelfasige kabels is de glasvezel verwerkt in het aardscherm van de kabel en bij driefasige kabels in verwerkt tussen de fasen.

Verwerking meetgegevens en plaatsing meetsysteem:

De stroommeting en digitale omzetting van de gemeten stroomwaarden t.b.v. de glasvezelverbinding vindt plaats in de aardingsput. De verwerking van de digitale data vindt plaats in het onderstation en hier zal het systeem een signalering genereren voor bijvoorbeeld het bedrijfsvoeringscentrum, of naar het lokale beheer van het station. Door de verwerking van de gegevens buiten de aardingsputten, blijft de eenvoud van de putten behouden, wat de kans op onderhoud aan het meetsysteem in de putten verkleint.

Plaatsing aardingsdozen:

De aardingsdozen kunnen ondergronds geplaatst worden in een put, mits de meetapparatuur een IP68 klasse waterdichtheid heeft. In de put wordt het meetsysteem aangelegd en zullen de ringkernen buiten de cross-bonding doos, maar binnen de cross-bondingput om de aardingskabels worden gemonteerd.

8.6.1 Voor- en nadelen

Zoals in de voorgaande concepten heeft dit concept ook op het gebied van plaatsing, routine conditiemetingen en onderhoud, voor- en nadelen. Deze zijn in onderstaande Tabel 6 uitgelicht.

Concept 4.1	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	Korte aardkabels	Conditie van de mantel wordt door mantelfoutdetectie gemonitord	onderhoud aan het meetsysteem kan in bedrijf worden uitgevoerd
	Geen continue belemmering van het maaiveld	Verbinding hoeft niet uit bedrijf t.b.v. Conditiemeting	
	Voeding meetsysteem ondergronds		
Nadelen:	Gevoeliger voor eventuele waterschade aan meetsysteem	Visuele inspectie van de aardingsputten niet meer mogelijk zonder graafwerkzaamheden	Verhoogde kans op onderhoud aan Mantelfoutdetectiesysteem in de aardingsputten
	Ringkern kan kans op schade aan de kabel vergroten.	Overgangsweerstandsmetingen niet meer uitvoerbaar	

Tabel 6: Voor- en nadelen concept 4.1

8.7 Concept 4.2

Voeding voor meetsysteem:

Zonnepaneel boven het maaiveld boven de betreffende aardingsputten als voeding voor het meetsysteem inclusief een accu, om 's nachts het meetsysteem van voeding te voorzien. Een voorbeeld is te zien in Figuur 17. De landeigenaar kan de locatie van het zonnepaneel binnen bepaalde grenzen aanwijzen, waardoor de belemmering te beperken is in tegenstelling tot een put.

Vanwege kans op langdurige vorst aan het maaiveld, is het gebruik van accu's zonder vloeistof vereist. Een voorbeeld van een "droge accu" is een VRLA-accu. VRLA, staat voor Valve-Regulated Lead-Acid en is een accu met electrolyten in een gel-achtige samenstelling, dat geïmpregneerd is in matten van glasvezel. Deze samenstelling geeft de accu goede onderhoudsvrije eigenschappen, waaronder minder gevoelig voor vorst en hoge temperaturen, [12].



Figuur 17: Voorbeeld van een zonnepaneel t.b.v. meetapparatuur voor aardingsput. [13]



Communicatiemedium:

Aan het zonnepaneel kan een vorm van draadloze GPRS communicatie worden toegepast, aangezien dit bovengronds moet plaatsvinden. In de aardputten wordt door een converter de analoge meting van de ringkernen omgezet naar een digitaal signaal dat via de GPRS verstuurd kan worden. Ook hier geldt dat deze apparatuur bestand moet zijn tegen water met een waterdichtheids klasse van IP68.

Verwerking meetgegevens en plaatsing meetsysteem:

In het onderstation staat een GPRS ontvanger die alle meetgegevens ontvangt van de verschillende aardputten. De meetgegevens worden in het station verwerkt en kan vervolgens een signalering genereren voor bijvoorbeeld het bedrijfvoeringscentrum of voor het stationsbeheer.

Plaatsing aardingsdozen:

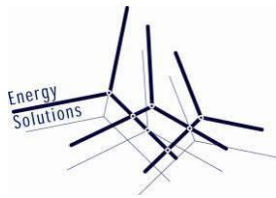
De aardingsdozen kunnen het beste bovengronds worden geplaatst, aangezien de zonnepanelen en de GPRS antenne ook bovengronds geplaatst dienen te worden. Dit biedt de mogelijkheid om goed onderhoud en inspecties te verrichten aan zowel de aardingsdoos als het meetsysteem. Echter vormt het wel een belemmering van het maaiveld.

8.7.1 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van dit concept zijn in onderstaande Tabel 7 uitgelicht.

Concept 4.2	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	De locatie van het zonnepaneel kan makkelijker worden bepaald in overleg met de landeigenaar dan een put	Conditie van de mantel wordt door mantelfoutdetectie gemonitord	Onderhoud aan het meetsysteem kan voor het overgrote deel in bedrijf worden uitgevoerd
		Visuele inspectie van aardingsputten mogelijk	Geen graafwerkzaamheden vereist bij onderhoud aan zowel de aardingsput, als het meetsysteem
		Verbinding hoeft niet uit bedrijf t.b.v. Conditie meting	
Nadelen:	Meetapparatuur en aardingsdozen vormen belemmering van het maaiveld		
	Gevoelig voor schade door invloeden van boven het maaiveld (b.v. Landbouwmachines)		

Tabel 7: Voor- en nadelen concept 4.2



8.8 Concept 4.3

Voeding voor meetsysteem:

Inductiespoel op het kabelbed. Deze inductiespoel is een variatie op de ringkern en verkrijgt energie volgens hetzelfde fundament van inductie. In een eerder onderzoek naar een geschikte inductievoeding voor een meetsysteem van hoogspanningskabels is een inductiespoel als beste naar voren gekomen, met als voornaamste reden dat dit geen risico voor de kabel vormt omdat het zich op een afstand van de kabel bevindt [14].

Communicatiemedium:

Een glasvezel verbinding is in combinatie met de ondergrondse inductievoeding het beste te combineren, op deze manier wordt belemmering van het maaiveld voorkomen.

Verwerking meetgegevens en plaatsing meetsysteem:

De stroommeting en digitale omzetting van de gemeten stroomwaarden t.b.v. de glasvezelverbinding vindt plaats in de aardingsput. De verwerking van de digitale data vindt plaats in het onderstation en hier zal het systeem een signalering genereren voor bijvoorbeeld het bedrijfvoeringscentrum, of naar het lokale beheer van het station. Door de verwerking van de gegevens buiten de aardingsputten blijft de eenvoud van de putten behouden, wat de kans op onderhoud aan het meetsysteem in de putten verkleint.

Plaatsing aardingsdozen:

De aardingsdozen kunnen ondergronds geplaatst worden met de voorwaarde dat alle apparatuur een waterdichtheidsklasse van IP68 heeft. De inductiespoel dient onder de kabelafdekplaat geplaatst te worden om eventuele beschadiging te voorkomen.

8.8.1 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van dit concept zijn in onderstaande Tabel 8 uitgelicht.

Concept 4.3	Plaatsing	Routine conditiemeting	Onderhoud
voordelen:	Korte aardkabels	Conditie van de mantel wordt door mantelfoutdetectie gemonitord	onderhoud aan het meetsysteem kan in bedrijf worden uitgevoerd
	Geen continue belemmering van het maaiveld	Verbinding hoeft niet uit bedrijf t.b.v. Conditiemeting	
	Voeding meetsysteem ondergronds		
	Inductiespoel levert geen verhoogd risico op schade aan de kabel op		
Nadelen:		Visuele inspectie van de aardings- en cross-bondingputten niet meer mogelijk zonder graafwerkzaamheden	

Tabel 8: Voor- en nadelen concept 4.3



8.9 Afweging

De beste opstelling van bovengenoemden kan worden bepaald aan de hand van een aantal criteria die bepalend zijn voor de afweging van meerdere oplossingen. Elk concept inclusief de huidige kabelverbinding, wordt beoordeeld op alle opgestelde criteria door middel van cijfers in een keuzematrix. Het concept met het hoogste cijfer is het beste ontwerp en voldoet het beste aan de gestelde eisen en criteria. De beoordeling van alle concepten is in een keuzematrix hieronder weergegeven in Tabel 9.

Beoordeling 1 t/m 4 (slecht naar goed)						
zonder weegfactoren:	kosten	Belemmering landeig.	Schade of mankementen	Leveringszekerheid	Veiligheid	totaal
Huidige kabelverbinding	2	1	1	2	1	7
concept 1	1	3	2	1	2	9
concept 2	3	2	3	3	3	14
concept 3	4	2	2	1	3	12
concept 4.1	3	4	3	4	4	18
concept 4.2	1	3	3	3	3	13
concept 4.3	3	4	4	4	4	19
ideaal	4	4	4	4	4	20

Tabel 9: Keuzematrix zonder weegfactoren.

De beoordelingen die in de Tabel 9 staan zijn per criterium onderbouwd in Bijlage F:.

Het is voor elke partij mogelijk om weegfactoren op te stellen voor de gestelde criteria. Het kan voorkomen dat TenneT veiligheid bijvoorbeeld belangrijker vindt dan schade of mankementen, terwijl de landeigenaar daar misschien juist andersom over denkt. Door weegfactoren op te stellen per criterium en deze vervolgens met de beoordeling te vermenigvuldigen, kan het resultaat uit de keuzematrix anders uitvallen.



9 Conclusie en aanbeveling

Conclusie:

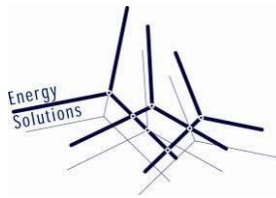
Concept 4.3 is van alle concepten bij de beoordeling als beste naar voren gekomen. Het gebruik van de Prysmian 6SXU-BP cross-bondingdoos biedt de mogelijkheid om onderhoudsvrij cross-bonding ondergronds toe te passen. De toepassing van het meetsysteem dat mantelfouten kan signaleren is door zijn eenvoud samen met de aarding ook ondergronds toepasbaar en heeft daarom nauwelijks tot geen onderhoud nodig.

Het meetsysteem heeft als tweede voordeel dat de conditie van de kabel continu gemonitord kan worden in plaats van een keer in drie jaar. Hier komt bij dat de kabelverbinding niet uit bedrijf hoeft om de conditie van de kabel vast te stellen. Ook in geval van sporadische conditiemetingen aan het meetsysteem hoeft de kabelverbinding niet uit bedrijf. Het toepassen van een meetsysteem voor mantelfoutdetectie heeft dus op meerdere vlakken voordelen en zal ook bij bovengrondse aarding uitkomsten kunnen bieden, indien bijvoorbeeld de plaatsing geen belemmering vormt.

Aanbeveling:

Om voor andere kabelverbindingen vast te stellen of mantelfouten meetbaar zijn aan de hand van de mantelstromen, is aan te bevelen om de simulatie aan te passen aan de kabelverbinding waarvoor het meetsysteem oplossingen zou moeten bieden.

Bij andere kabelverbindingen kunnen er complicaties zijn die de metingen kunnen beïnvloeden. Door deze complicaties in de toekomst mee te nemen en toe te voegen aan de simulaties, is de beïnvloeding hiervan inzichtelijk te maken en kan dit wijzigingen opleveren in het meetsysteem of in de verwerking van de meetgegevens. Door continue dit systeem te blijven doorontwikkelen door te testen en terug te koppelen, is de verwachting dat dit systeem op veel kabelverbindingen toepasbaar zal zijn.



10 Literatuurlijst

- [1] R. v. O. E. Peschke, „Losses in the cable,” in *Cable systems for high and extra-high voltage*, München, Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999, pp. 58 - 62.
- [2] L. Viren, 23 maart 2010. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=he3ByTc2OQo>. [Geopend 8 september 2016].
- [3] M. Mallick en M. Rafi, „1.6 Lenz's Law,” in *Fundamentals of Electrical Engineering*, Word Press, 2010, pp. 8-18.
- [4] „Produkte digiPHONE+ NT Set,” [Online]. Available: <http://www.sebakmt.com/produkte/elektrizitaet/kabelfehlerortung/bodenmikrofon-sniffer/digiphone-nt-set.html>. [Geopend 15 november 2016].
- [5] „Connection Of Earthing Circuits In High Voltage Systems,” General Cables, 2005. [Online].
- [6] „<http://www.tennet.eu/>,” 2016. [Online]. Available: <http://www.tennet.eu/nl/bedrijf/profiel/missie-visie-en-waarden/>.
- [7] R. v. Thillart, *PVE.06.000 Standaard programma van eisen Kabels versie 1.0*, Arnhem, 2011.
- [8] S. B. J. van Eerde, „Circuit 1 in bedrijf (XB),” Delft, 2016.
- [9] J. Van Eerde, S. Blanken en B. Kooij, „Circuit 1.1 in bedrijf MF Mantel 'x' 'xxxxxxx' sectie (XB),” Delft, 2016.
- [10] R. Ross, „TBD 010 Beleid tav AC-kabels voor 110-380 kV,” TenneT, 2015.
- [11] T. Connectivity, „[Cableservices.co.uk/high-voltage/pdfs/](http://www.cableservices.co.uk/high-voltage/pdfs/),” februari 2016. [Online]. Available: http://www.cableservices.co.uk/high-voltage/pdfs/CS_TE-FibreOptic_Add-On-Kit.pdf. [Geopend 9 december 2016].
- [12] I. Buchmann, „Absorbent Glass Mat (AGM),” 12 juli 2016. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/absorbent_glass_mat_agm. [Geopend 9 december 2016].
- [13] „Zon Energie,” [Online]. Available: <http://www.camerapaal.nl/?p=zonenergie>. [Geopend 9 december 2016].
- [14] R. Mingels, „EnSol CTMS-VV, vervangend voedingssysteem voor het EnSol CTMS,” R.H.G. Miingels, Delft.
- [15] G. Hoogendorp, J. J. de Regt, P. Wagenaars, P. A.A.F. Wouters, M. Popov, L. Van der sluis en E. F. Steennis, „Cross-bonding cable and box model based on pulse reflection measurement,” in *Cross-bonding cable and box model based on pulse reflection measurement*, IET Science, Measurement and Technology, 2014, p. 8.



11 Bijlagen

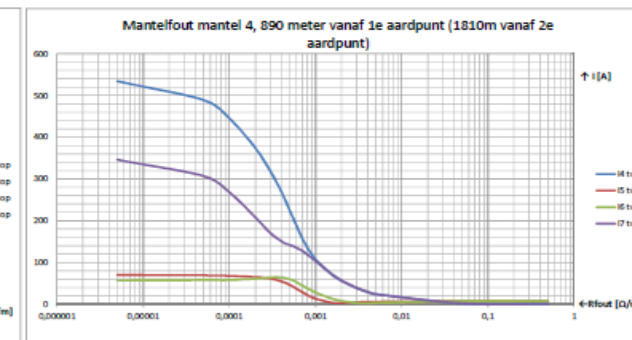
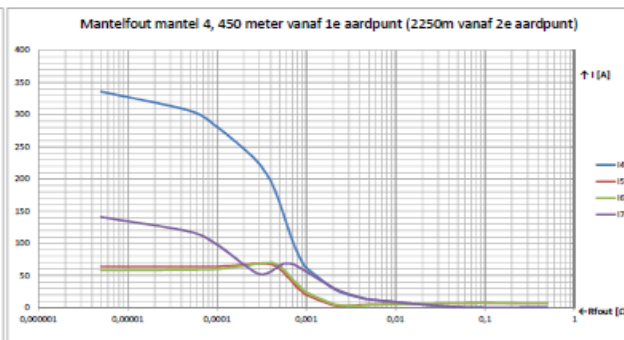
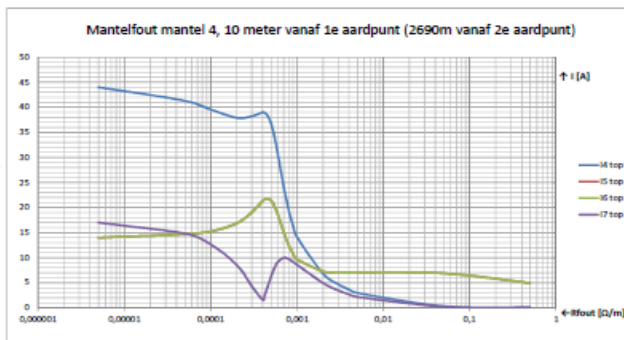
- Bijlage A: Simulatieresultaten mantelfout simulatie
- Bijlage B: Schematische weergave 380kV kabelverbinding met cross-bonding
- Bijlage C: Aansluitwijze cross-bondingdoos op moffen
- Bijlage D: Schematische weergave NKT cross-bondingdoos
- Bijlage E: Datasheet Prysmian cross-bindingdoos
- Bijlage F: Onderbouwing beoordelingscijfers concepten
- Bijlage G: Competenties



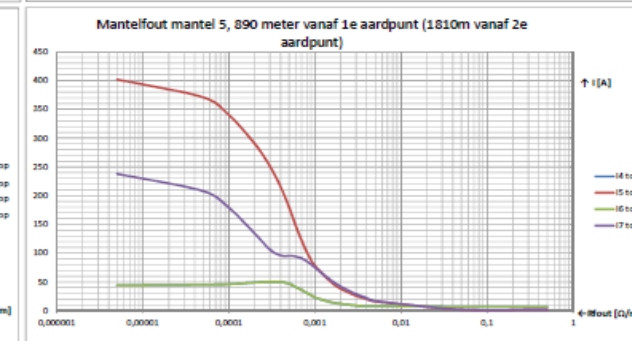
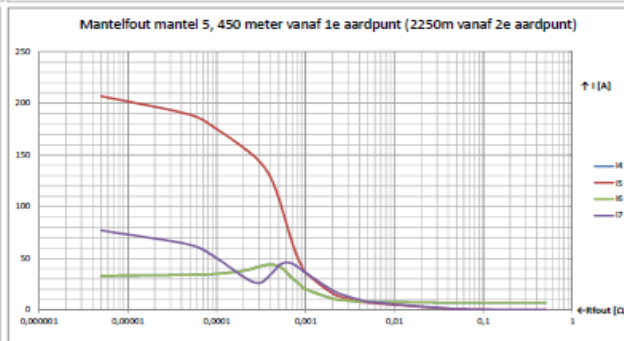
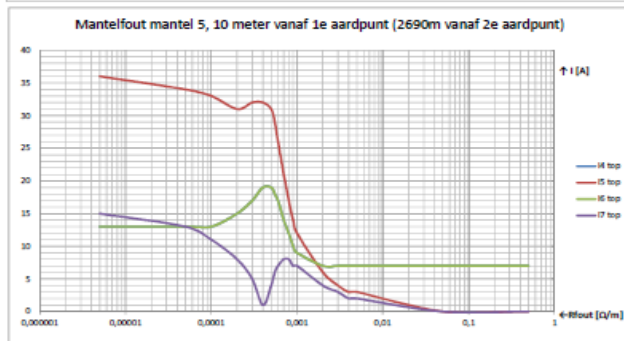
Bijlage A: Simulatieresultaten mantelfout simulatie

Cross-bonding sectie 1 mantelfoutsimulatie op diverse afstanden

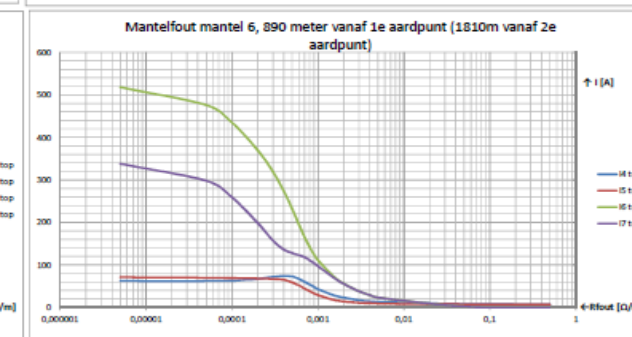
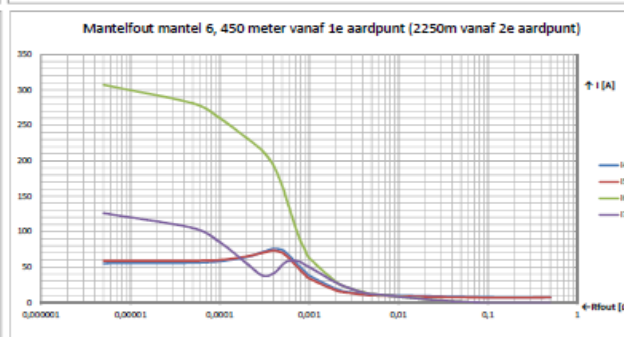
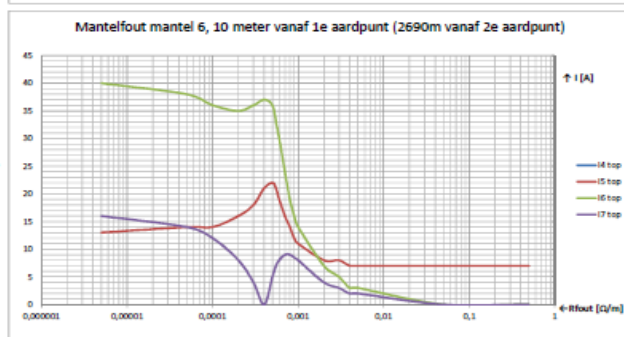
M4



M5



M6

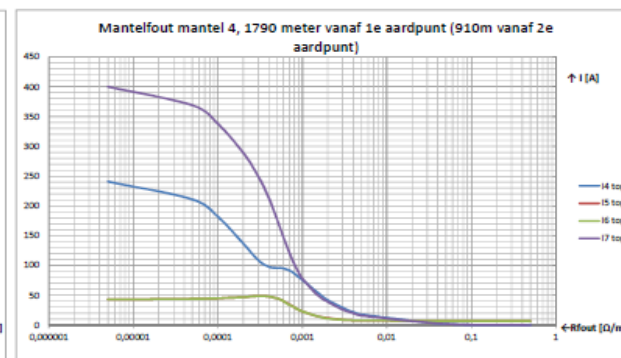
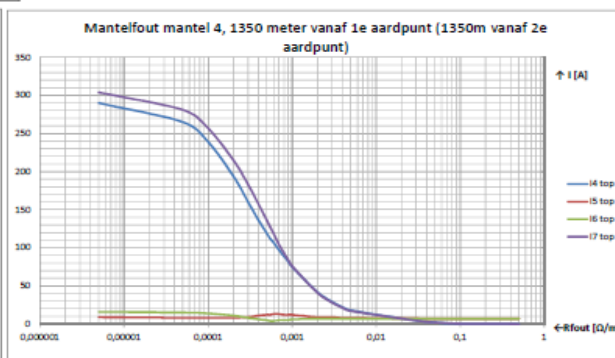
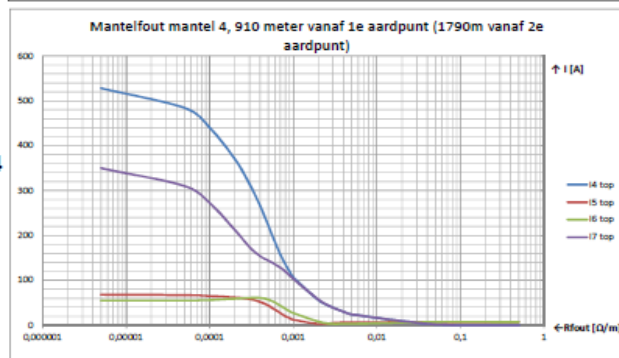




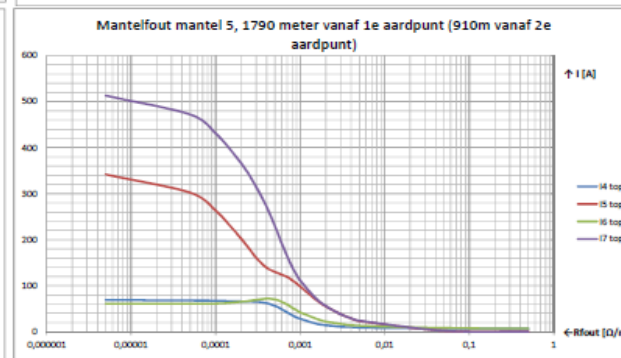
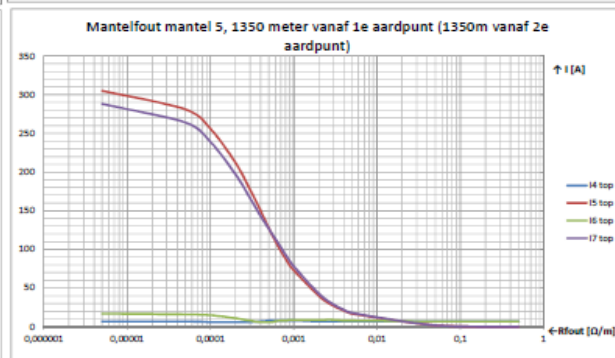
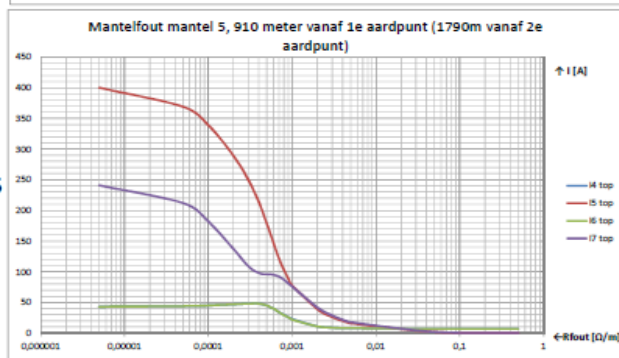
Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

Cross-bonding sectie 2 mantelfoutsimulatie op diverse afstanden

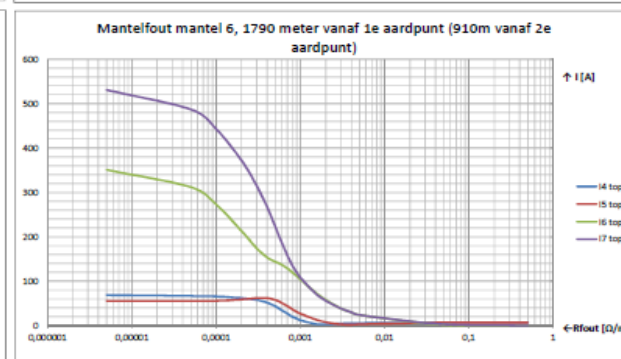
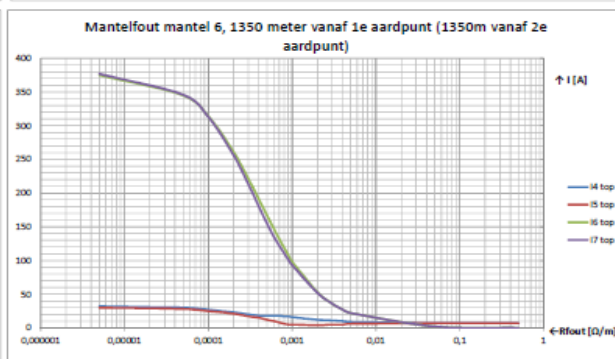
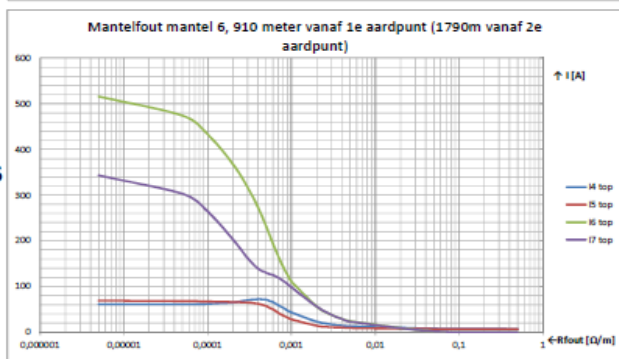
M4



M5



M6

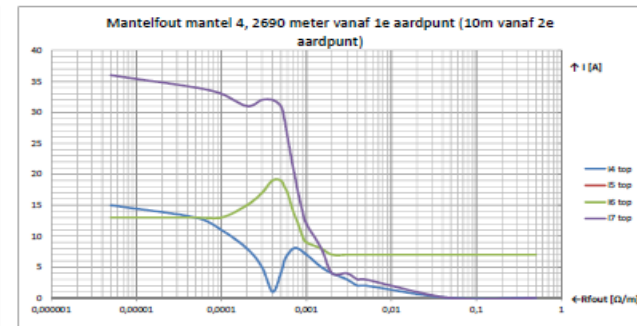
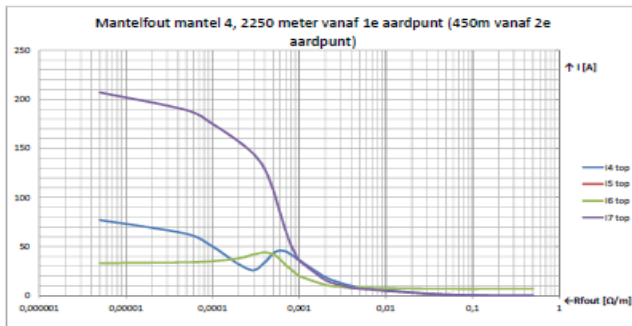
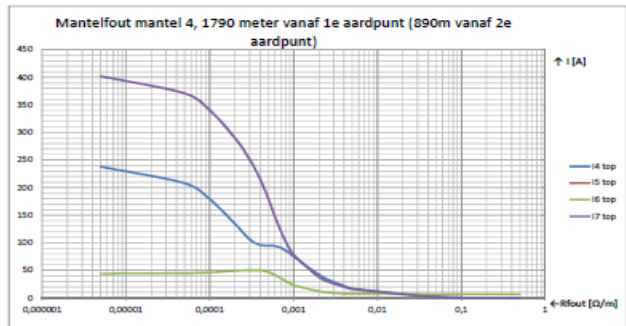




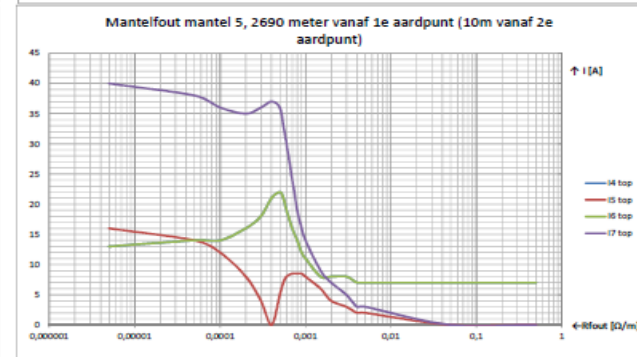
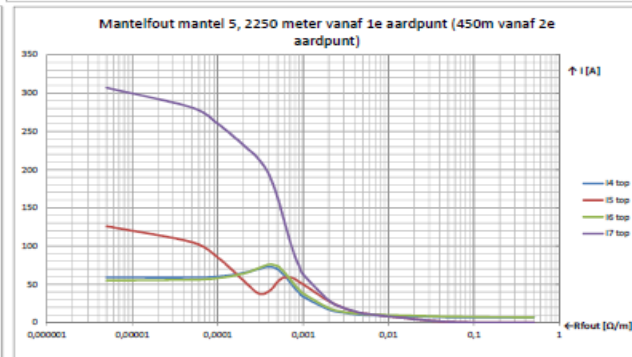
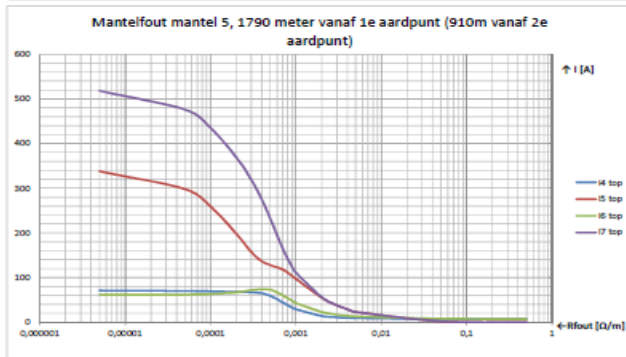
Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

Cross-bonding sectie 3 mantelfoutsimulatie op diverse afstanden

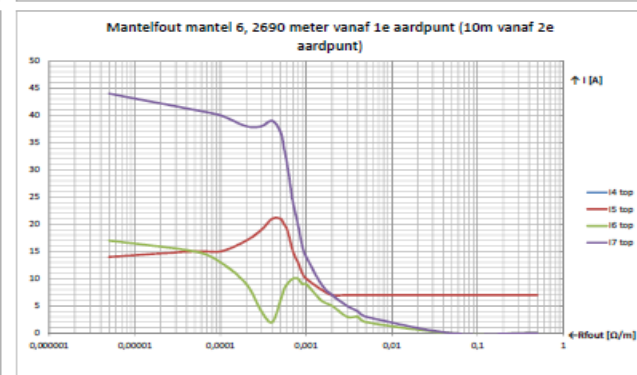
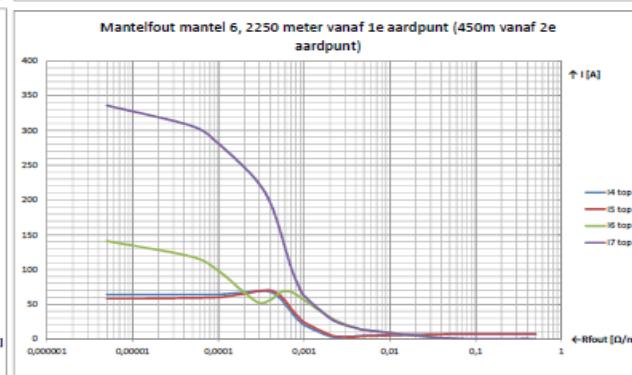
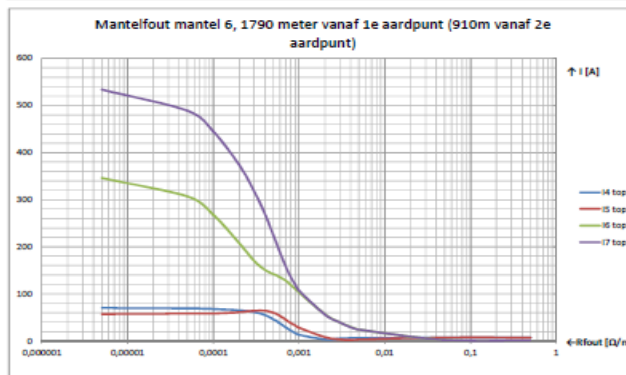
M4



M5



M6

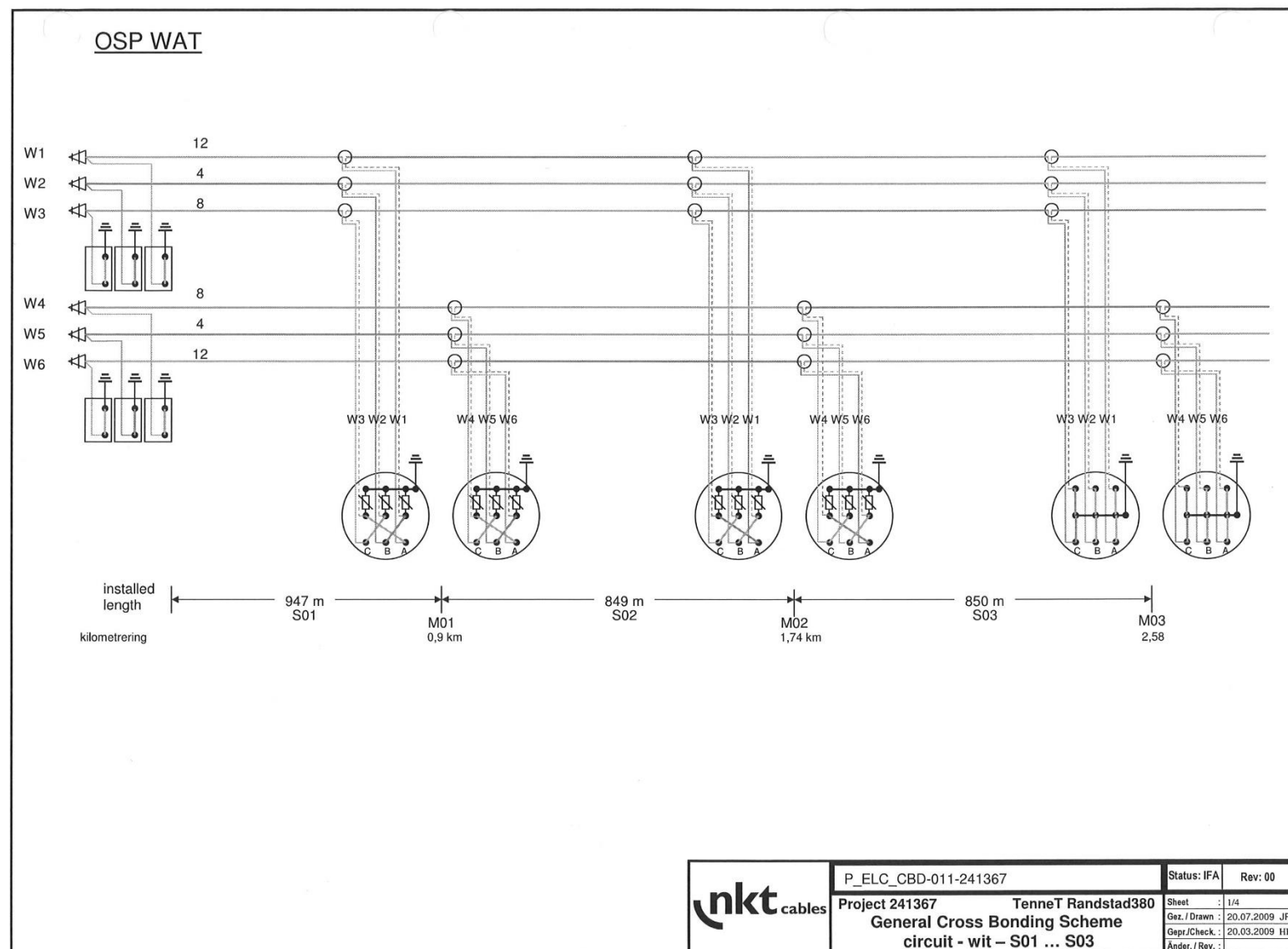




Bijlage B: schematische weergave 380 kV kabelverbinding met cross-bonding

Major section 1:

Cross-bonding: Een alternatieve toepassing



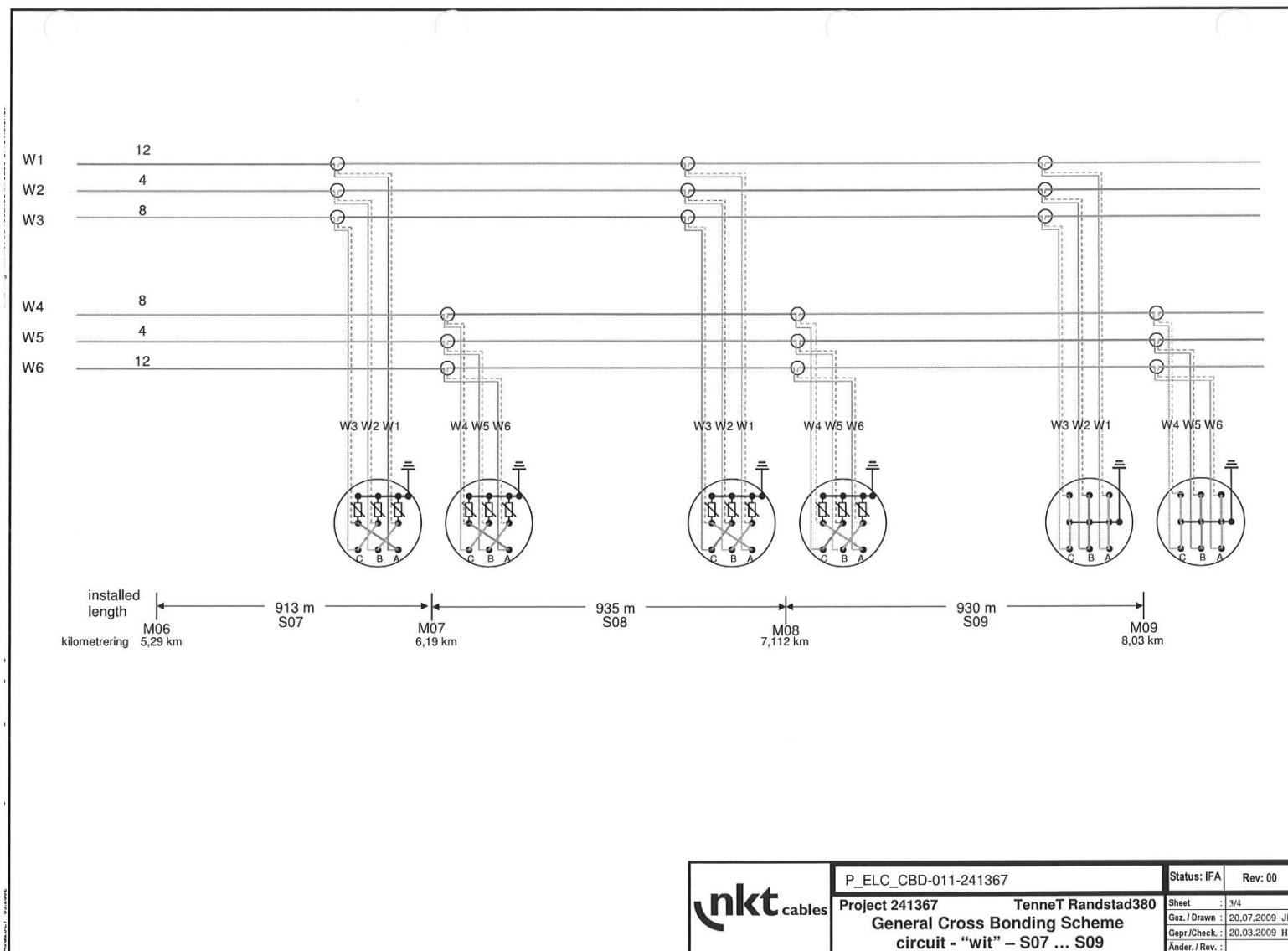
Major section 2





Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

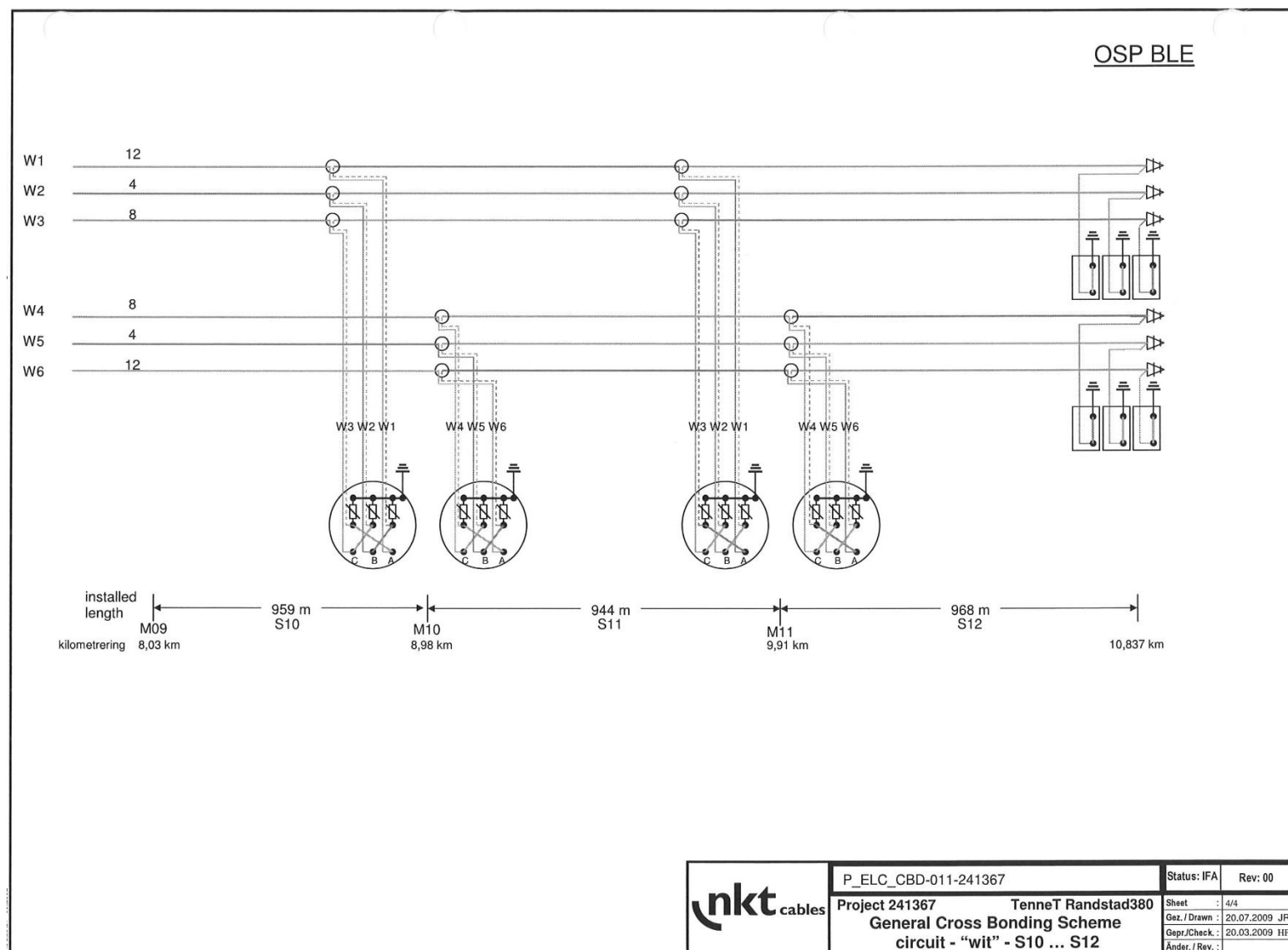
Major section 3



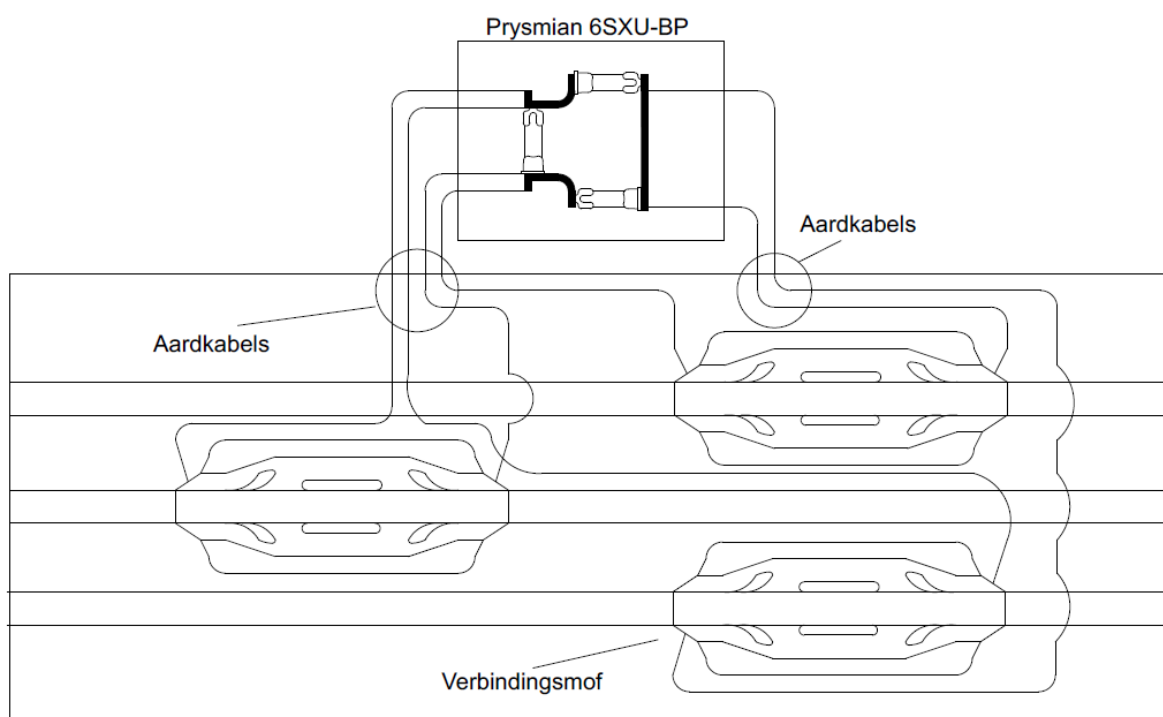


Major section 4

Cross-bonding: Een alternatieve toepassing



Bijlage C: Aansluitwijze cross-bondingdoos op moffen:

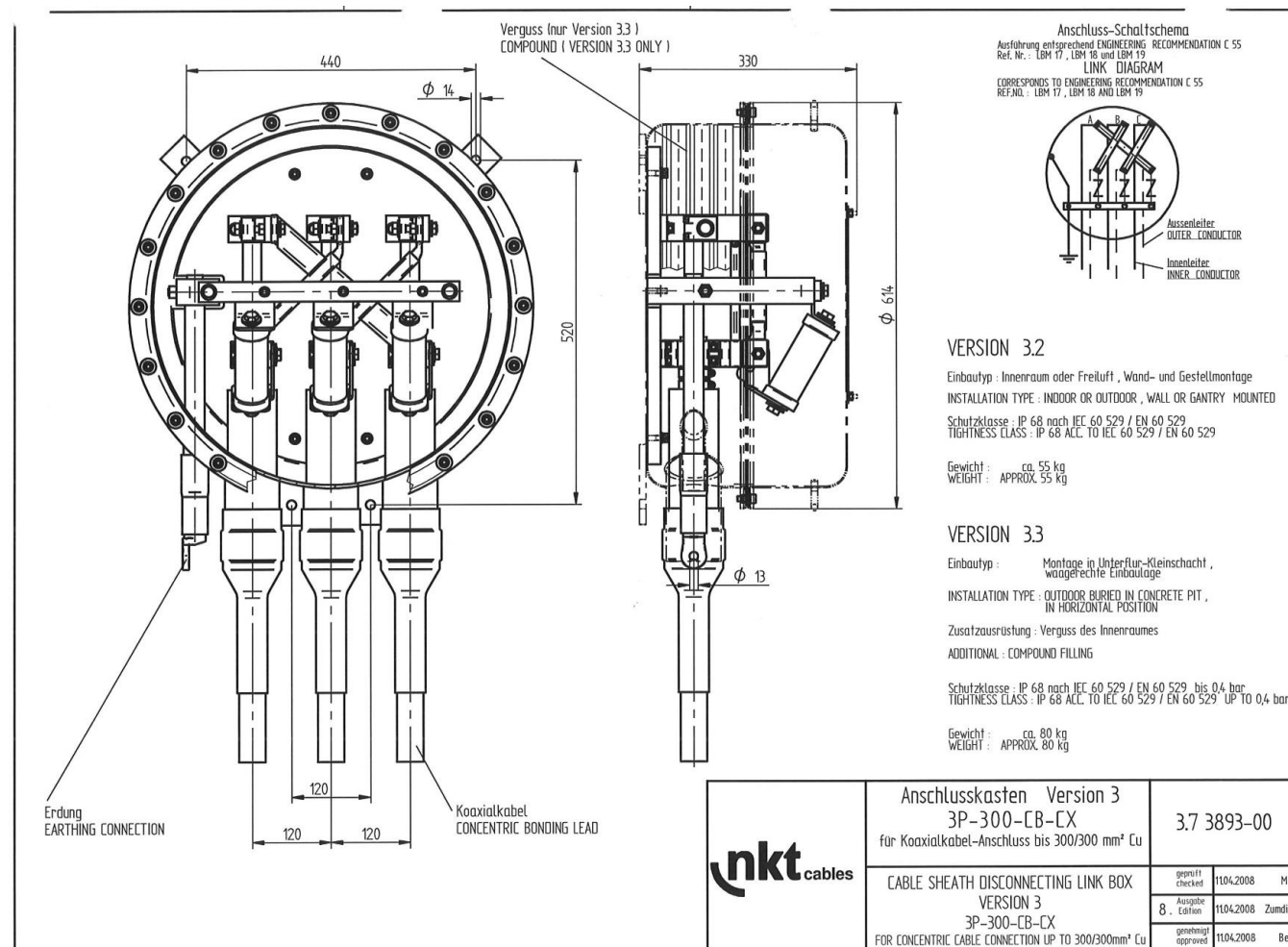


Bovenaanzicht



Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

Bijlage D: Schematische weergave NKT cross-bondingdoos





Bijlage E: Datasheet Prysmian cross-bondingdoos

6SXU-BP

Cross Bonding link box for underground installation



PRODUCT DESCRIPTION

Link box type 6SX/U-BP is an unearthed link box designed for cross bonding of six single core insulated earthing cables. The box is suitable for direct buried installation (~1 meter depth) or manholes installation and can be placed in any position (horizontal and vertical). The link box is maintenance free.

BASIC LINK BOX COMPONENTS

- plastic box, filled with homogeneous, impermeable, insulating material
- six insulated earthing cables, standard 1x240mm² Cu, branched out of the box for connecting single bonding leads
- 6 earth connection sets for extending the insulating earthing cables
- three delta connected voltage limiters (standard specified for 15kV maximum continuous operating voltage)

OPTIONS

- alternative protection level of voltage limiters (< 15kV continuous operating voltage)
- alternative cross section earthing cable

TECHNICAL SPECIFICATION

AREA OF APPLICATION

- | | | |
|--|---|---|
| • Material of earthing cable conductor | : | annealed copper |
| • Bonding wire cross section range | : | 95mm ² - 240mm ²
(180kcmil - 480kcmil) |

ELECTRICAL SPECIFICATION

- | | | |
|--|---|---------|
| • Data for standard supplied voltage limiters | : | |
| • Rated voltage | : | 18,7 kV |
| • Maximum continuous operating voltage | : | 15 kV |
| • Impulse withstand current 4/10, s | : | 10 kA |
| • long duration current impulse, 2000µs | : | 100 kA |
| • residual voltage (at wave 8/20µs and 10kA) | : | 46 kV |
| • DC withstand voltage with disconnected SLV's | : | 25 kV |

MISCELLANEOUS

- | | | |
|----------------------|---|-------|
| • Protection class | : | IP68 |
| • Approximate weight | : | 75 kg |

INSTALLATION

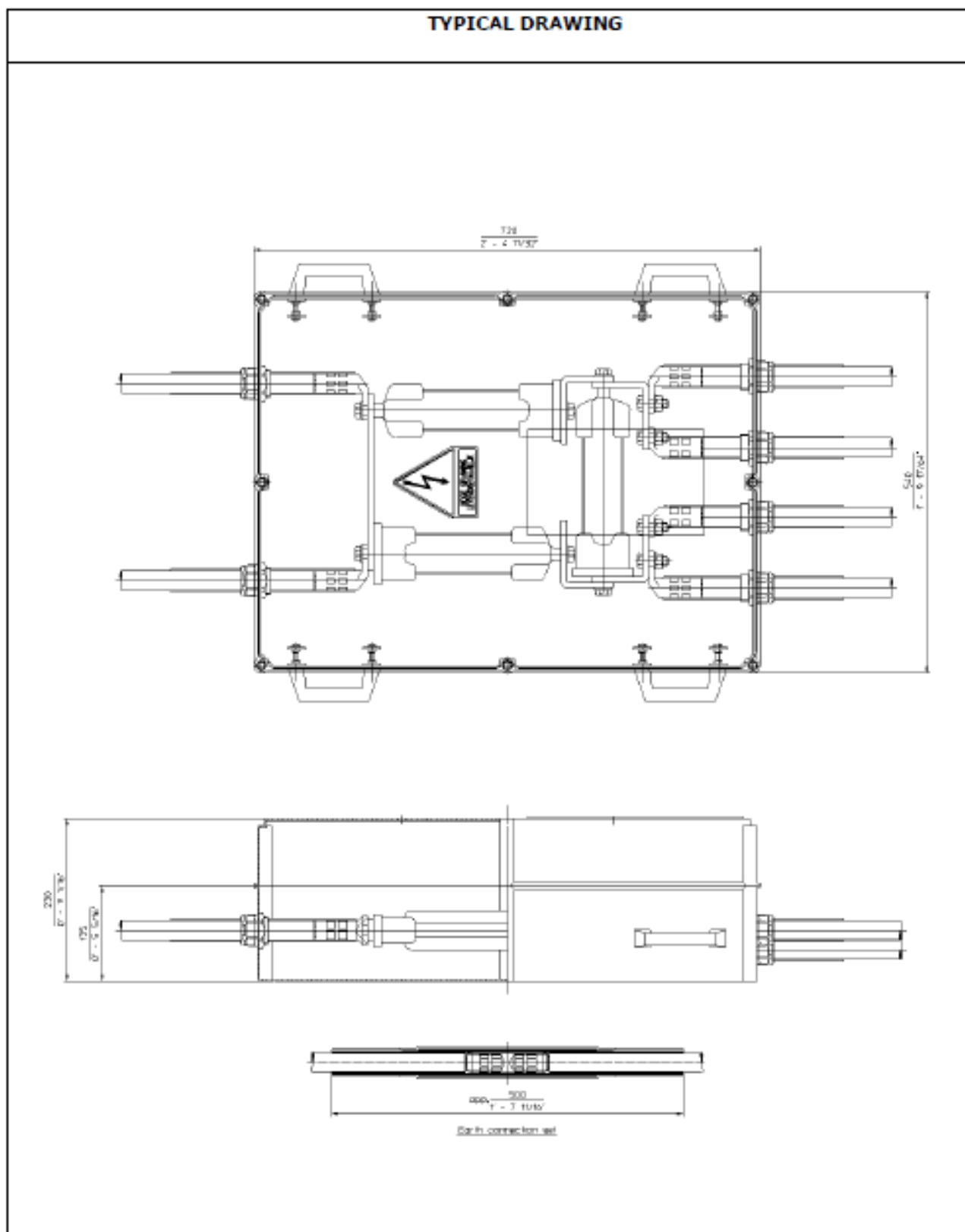
- | | | |
|----------------------------|---|---------------------------------|
| • Site condition | : | protected against rain and dust |
| • Installation work | : | only by certified jointers |
| • Installation temperature | : | min 0 / max 40 °C |

subject to modification without notification

Prysmian
Group

Prysmian Netherlands B.V.

1 of 2
May 2014



Bijlage F: Onderbouwing beoordelingscijfers concepten

In deze bijlage zijn van alle concepten de onderbouwingen voor de beoordeling beschreven.

Onderbouwing huidige kabelverbinding

Kosten(2/4):

De relevante kosten die in grove lijnen gemaakt worden bestaan uit:

- Kosten voor beproeven en conditiemetingen met behulp van zowel de manteltest als de meting van overgangsweerstanden, inclusief manuren.
- Extra kosten voor graafwerkzaamheden t.b.v. aanleg van aardings- of cross-bondingdozen buiten het kabelbed.

Belemmering landeigenaren(1/4):

De belemmering die dit ontwerp oplevert voor de landeigenaren zijn als volgt:

- Over de gehele verbinding zullen alle aardings- en cross-bondingdozen voor verstoring van het maaiveld zorgen, waarvan een onbekend aantal voor eventuele belemmering voor landeigenaren kan zorgen.
- Bij de uitvoering van conditiemetingen dienen de dozen bereikt te worden, dit kan uit veiligheidsredenen voor belemmering zorgen voor de landeigenaar.

Schade of mankementen(1/4):

Schade aan het land of aan elektrische componenten zijn in dit ontwerp gedefinieerd als:

- Schade aan aardings- of cross-bondingdozen door bijvoorbeeld aanrijdingen met landbouwmachines of ander verkeer.
- Schade aan landbouwmachines wanneer door bijvoorbeeld aanrijdingen met aardings- en cross-bondingdozen.
- Extra schade aan het land bij aanleg van aardings- en cross-bondingdozen buiten het kabelbed.

Leveringszekerheid(2/4):

Tijdelijke uitbedrijfname van de verbinding heeft invloed op de leveringszekerheid en kan door de volgende zaken worden veroorzaakt:

- Bij de uitvoering van conditiemetingen of onderhoud dient de verbinding uit bedrijf te gaan vanwege veiligheidsredenen.
- De kans op schade aan het aardingssysteem van de verbinding vanwege de bovengrondse plaatsing, zorgt voor een kans dat de verbinding uit bedrijf moet.
- Vanwege de goede bereikbaarheid kan in geval van een defect snel en makkelijk gehandeld worden, wat de leveringszekerheid ten goede komt.



Veiligheid(1/4):

De veiligheid voor mens en dier is het belangrijkste aspect, waar ten allen tijden naar gestreeft wordt. Echter is er niets zonder gevaar en zullen er altijd risico's zijn die de veiligheid negatief kunnen beïnvloeden. In dit geval is dat het volgende:

- Bovengrondse plaatsing van de aardings- en cross-bondingdozen brengt met zich mee dat de aardkabels dicht tegen het maaiveld aan liggen wat bij bewerking van het land, voor elektrisch contact kan zorgen met de aarding (waar op sommige plaatsen in de verbinding een spanning van een aantal kV op kan staan).
- Bij het beproeven en het uitvoeren van de conditiemetingen, kan er over het algemeen veilig gewerkt worden door de uitvoerende partij, vanwege de goede bereikbaarheid aan of boven het maaiveld.

Onderbouwing concept 1

Kosten(1/4):

De relevante kosten die in grove lijnen gemaakt worden bestaan uit:

- Kosten voor beproeven en conditiemetingen met behulp van zowel de manteltest als de meting van overgangsweerstanden, inclusief manuren.
- Kosten voor graafwerkzaamheden voor elke keer dat conditiemetingen uitgevoerd dienen te worden.

Belemmering landeigenaren(3/4):

De belemmeringen die landeigenaren mogelijk wel of niet zullen ondervinden:

- Alle betrokken landeigenaren zullen geen continue belemmering van het maaiveld meer hebben, vanwege de ondergrondse plaatsing van de aardings- en cross-bondingdozen.
- Bij conditiemetingen zal door de graafwerkzaamheden meer overlast worden veroorzaakt dan bij de bovengrondse plaatsing van de aardings- en cross-bonding kasten.

Schade of mankementen(2/4):

Schade aan het land of aan elektrische componenten zijn in dit ontwerp gedefinieerd als:

- Bij de uitvoering van conditiemetingen, zal het land beschadigd raken als gevolg van graafwerkzaamheden. Daarbij kan ook schade aan de aardkabels of aan de aardings- of cross-bondingkast of put ontstaan.
- Schade aan het aardingssysteem door landbouwmachines of andere voertuigen en dergelijken, wordt beter voorkomen door de liggingdiepte van het aardingssysteem.

Leveringszekerheid(1/4):

De volgende zaken beïnvloeden de leveringszekerheid:

- Bij de uitvoering van conditiemetingen of onderhoud dient de verbinding uit bedrijf te gaan wegens veiligheidsredenen en beïnvloeding van de metingen.
 - door de graafwerkzaamheden die hiervoor nodig zijn, zal de uit bedrijfname lang duren.

Veiligheid(2/4):

Veiligheidsaspecten die in dit ontwerp van toepassing zijn:

- De ondergrondse ligging van het gehele aardsysteem voorkomt fysiek contact met spanningvoerende delen van het aardsysteem, wat de veiligheid ten goede komt.
- De uitvoering van conditiemetingen wordt in een gegraven sleuf uitgevoerd, wat vocht en vuil met zich meebrengt. Dit kan een gevaar zijn voor de uitvoerende mensen tijdens beproeven en bij de uitvoering van conditiemetingen.



- Bij werken in een sleuf kan het ook gebeuren dat een werknemer ten val komt tijdens werkzaamheden.

Onderbouwing concept 2

Kosten(3/4):

De relevante kosten die in grove lijnen gemaakt worden, zijn als volgt:

- Kosten voor beproeven met de manteltest en de meting van overgangsweerstanden, inclusief manuren.
- Kosten voor conditiemeting met behulp van enkel de manteltest, inclusief manuren.

De relevante kosten die bespaard kunnen worden ten opzichte van de huidige kabelverbinding zijn:

- Kosten voor de meting van overgangsweerstanden bij conditiemetingen, inclusief manuren.

Belemmering landeigenaren(2/4):

De belemmeringen die landeigenaren wel of niet ondervinden:

- De landeigenaren waarbij een aardingsdoos op het land wordt geplaatst, zullen continue belemmering van het maaiveld ondervinden en bij conditiemetingen zal op deze aardingsdozen de manteltest worden uitgevoerd.
- De Cross-bondingdozen zullen echter ondergronds worden geplaatst en onderhoudsvrij zijn, wat ervoor zorgt dat continue belemmering hierop niet van toepassing is.

Schade of mankementen(3/4):

Factoren die de kans op schade aan componenten of eigendommen van landeigenaren vergroten of verkleinen:

- Ondergrondse plaatsing van onderhoudsvrije cross-bondingdozen voorkomt schade aan het land en aan het aardingssysteem.
- Er bestaat een kans dat er schade aan het aardingssysteem en aan materieel van de landeigenaar ontstaat, vanwege de bovengrondse plaatsing van de aardingsdozen.

Leveringszekerheid(3/4):

De leveringszekerheid wordt door de volgende aspecten beïnvloedt:

- Voor de onderhoudsvrije cross-bondingdozen zullen geen metingen voor overgangsweerstanden uitgevoerd worden bij de conditiemetingen – wat de spanningsloosheid t.b.v. de conditiemetingen – beperkt en daarmee de leveringszekerheid bevordert.
 - Voor de manteltest zal de verbinding nog uit bedrijf moeten en zal dat de leveringszekerheid beperken.

Veiligheid(3/4):

Veiligheidsaspecten die in dit ontwerp van invloed zijn:

- Door de ondergrondse plaatsing van de cross-bondingdozen zal hier de kans op menselijk of dierlijk contact met het aardingssysteem zeer klein zijn.



Onderbouwing concept 3

Kosten(4/4):

De relevante kosten die gemaakt zullen worden, zijn:

- Kosten voor beproeven met behulp van zowel de manteltest als de meting van overgangsweerstanden, inclusief manuren.
- Kosten voor conditiemeting met behulp van enkel de manteltest, inclusief manuren.

De relevante kosten die bespaard kunnen worden ten opzichte van de huidige kabelverbinding, zijn:

- Kosten voor de meting van overgangsweerstanden bij conditiemetingen, inclusief manuren.
- Aanschaf en onderhoud aan cross-bondingdozen.

Belemmering landeigenaren(2/4):

De belemmeringen die landeigenaren wel of niet ondervinden:

- De landeigenaren waarbij een aardingsdoos op het land wordt geplaatst, zullen continue belemmering van het maaiveld ondervinden en bij conditiemetingen zal deze belemmering groter zijn.
- De cross-bonding is ondergronds uitgevoerd, maar heeft een verhoogde kans op falen. Dit resulteert in frequenter onderhoud.

Schade of mankementen(2/4):

Schade aan het land of aan elektrische componenten zijn in dit ontwerp gedefinieerd als:

- Door ontbreken van SVL's, is de mof niet beschermd tegen overspanning op de cross-bondingring en zal deze een verhoogde faalkans hebben.
- Gevolg van verhoogde kans op falen frequenter schade aan het land op bij onderhoud.
- Er bestaat een kans dat er schade aan het aardingssysteem en aan materieel van de landeigenaar ontstaat, vanwege de bovengrondse plaatsing van de aardingsdozen.

Leveringszekerheid(1/4):

De leveringszekerheid wordt door de volgende aspecten beïnvloedt:

- Door de ondergrondse directe cross-bonding, is het meten van overgangsweerstanden niet nodig. Dit zorgt voor kortere beproevingstijd en daardoor betere leveringszekerheid.
 - Voor de manteltest zal de verbinding nog uit bedrijf moeten en zal dat de leveringszekerheid beperken.
- Directe cross-bonding zonder SVL's verhoogt de kans op falen in de verbindingsmoffen. Dit zorgt voor een slechtere leveringszekerheid.

Veiligheid(3/4):

- Door de ondergrondse directe cross-bonding zal hier de kans op menselijk of dierlijk contact met het aardingssysteem zeer klein zijn.
 - Echter als een van de cross-bondingkabels geraakt wordt, zal hier een spanning van een aantal kV op kunnen staan, wat gevaarlijk kan zijn.



Onderbouwing concept 4.1

Kosten(3/4):

De relevante kosten die gemaakt zullen worden, zijn:

- Kosten voor de meetsystemen:
 - Ringkernen (voeding).
 - Glasvezelverbinding.
 - Meetspoelen.
 - AD-converters.
- Kosten voor onderhoud aan meetsysteem.

De relevante kosten die bespaard kunnen worden ten opzichte van de huidige kabelverbinding, zijn:

- Kosten voor conditiemetingen, inclusief manuren.

Belemmering landeigenaren(4/4):

De belemmering die landeigenaren wel of niet ervaren:

- Geen continue belemmering van het maaiveld, enkel bij onderhoud.
- Landeigenaren ondervinden niet elke 3 jaar overlast door de uitvoer van conditiemetingen.

Schade of mankementen(3/4):

Factoren die de kans op schade aan componenten of eigendommen van landeigenaren vergroten of verkleinen:

- Kans op schade aan cross-bonding- en aardingsputten wordt beperkt door ondergrondse plaatsing.
- Versnelde veroudering van de kabelisolatie en mantel a.g.v. manteltest bij conditiemeting wordt voorkomen door meetsysteem.
- Indien schade of mankementen ontstaan aan meetsysteem of aardingssysteem, kan het land beschadigd raken als gevolg van graafwerkzaamheden.
- Ondanks gebruikte afdekplaten boven de hoogspanningskabels, is er een kans dat de glasvezelkabel bechadigd raakt.
- De ringkern om de kabel, welke als voeding dient voor het meetsysteem, kan de buitenisolatie van de kabel beschadigen.

Leveringszekerheid(4/4):

De volgende punten beïnvloeden de leveringszekerheid van de kabelverbinding:

- De verbinding hoeft niet uit bedrijf om de conditie van de kabels vast te stellen.
- Onderhoud aan het meetsysteem vereist geen spanningsloosheid van de kabel.
- De toepassing van het meetsysteem heeft geen invloed op de primaire werking van de kabelverbinding en zal de leveringszekerheid bevorderen.

Veiligheid(3/4):

De volgende aspecten zijn van invloed op de veiligheid:

- Alle aardingsdelen zijn weggewerkt onder het maaiveld en zullen geen gevaar vormen voor mens en dier.
- Onderhoud aan de meetsystemen kan veilig worden uitgevoerd, vanwege de lage meetspanningen en aanraakveiligheid van het kabelsysteem.



Onderbouwing concept 4.2

Kosten(1/4):

De relevante kosten die gemaakt zullen worden zijn:

- Kosten voor het meetsystemen
 - Zonnepanelen.
 - Palen t.b.v. montage zonnepanelen en GPRS antennes.
 - GPRS Zenders.
 - AD-converters.
 - Meetspoelen.
- Kosten voor onderhoud aan meetsysteem.

De relevante kosten die bespaard kunnen worden ten opzichte van de huidige kabelverbinding, zijn:

- Kosten voor conditiemetingen, inclusief manuren.

Belemmering landeigenaren(3/4):

De belemmering die landeigenaren wel of niet ervaren:

- Continue belemmering van het maaiveld, met name bij onderhoud.
- Landeigenaren ondervinden niet elke 3 jaar extra overlast door de uitvoer van conditiemetingen.
- De locatie van het zonnepaneel is makkelijker in samenwerking met de landeigenaren vast te stellen.

Schade of mankementen(3/4):

Factoren die de kans op schade aan componenten of eigendommen van landeigenaren vergroten of verkleinen:

- Kans op schade aan aardingsputten en meetsysteem vanwege bovengrondse plaatsing.
- De kans op schade aan materieel van de landeigenaar wordt door de goede zichtbaarheid van de locatie van de put en het meetsysteem verkleind.
- Versnelde veroudering van de kabelisolatie en mantel a.g.v. manteltest bij conditiemeting wordt voorkomen door meetsysteem.
- Indien schade of mankementen ontstaan aan meetsysteem of aardingssysteem, kan het land beschadigd raken als gevolg van graafwerkzaamheden.
- Het gebruik van GPRS beperkt de kans op schade aan het communicatiemedium van het meetsysteem.

Leveringszekerheid(3/4):

De volgende punten beïnvloeden de leveringszekerheid van de kabelverbinding:

- De toepassing van het meetsysteem heeft geen invloed op de primaire werking van de kabelverbinding en zal de leveringszekerheid bevorderen.
- De verbinding hoeft niet uit bedrijf om de conditie van de kabels vast te stellen.
- Onderhoud aan het meetsysteem vereist geen spanningsloosheid van de kabel.

Veiligheid(3/4):

De volgende aspecten zijn van invloed op de veiligheid:

- Alle cross-bondingdozen zijn ondergronds geplaatst, waardoor de kans dat iemand met hoge mantelspanningen in aanraking komt wegneemt.



- Onderhoud aan de meetsystemen kan veilig worden uitgevoerd, vanwege de lage meetspanningen en aanraakveiligheid van het kabelsysteem buiten de gesloten cross-bondingdoos.

Onderbouwing concept 4.3

Kosten(4/4):

De relevante kosten die gemaakt zullen worden, zijn:

- Kosten voor de meetsystemen:
 - Ringkernen (voeding).
 - Glasvezelverbinding.
 - Meetspoelen.
 - AD-converters.
- Kosten voor onderhoud aan meetsysteem.

De relevante kosten die bespaard kunnen worden ten opzichte van de huidige kabelverbinding, zijn:

- Kosten voor conditiemetingen, inclusief manuren.

Belemmering landeigenaren(4/4):

De belemmering die landeigenaren wel of niet ervaren:

- Geen continue belemmering van het maaiveld, enkel bij onderhoud.
- Landeigenaren ondervinden niet elke 3 jaar overlast door de uitvoer van conditiemetingen.

Schade of mankementen(3/4):

Factoren die de kans op schade aan componenten of eigendommen van landeigenaren vergroten of verkleinen:

- Kans op schade aan cross-bonding- en aardingsputten wordt beperkt door ondergrondse plaatsing.
- Versnelde veroudering van de kabelisolatie en mantel a.g.v. manteltest bij conditiemeting wordt voorkomen door meetsysteem.
- Indien schade of mankementen ontstaan aan meetsysteem of aardingssysteem, kan het land beschadigd raken als gevolg van graafwerkzaamheden.
- Ondanks gebruikte afdekplaten boven de hoogspanningskabels, is er een kans dat de glasvezelkabel bechadigd raakt.
- De inductiespoel boven de kabel vormt geen bedreiging voor de kabelmantels.

Leveringszekerheid(4/4):

De volgende punten beïnvloeden de leveringszekerheid van de kabelverbinding:

- De verbinding hoeft niet uit bedrijf om de conditie van de kabels vast te stellen.
- Onderhoud aan het meetsysteem vereist geen spanningsloosheid van de kabel.
- De toepassing van het meetsysteem heeft geen invloed op de primaire werking van de kabelverbinding en zal de leveringszekerheid bevorderen.

Veiligheid(3/4):

De volgende aspecten zijn van invloed op de veiligheid:

- Alle aardingsdelen zijn weggewerkt onder het maaiveld en zullen geen gevaar vormen voor mens en dier.



Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

- Onderhoud aan de meetsystemen kan veilig worden uitgevoerd, vanwege de lage meetspanningen en aanraakveiligheid van het kabelsysteem.



Bijlage G: Competenties

Gedurende het afstuderen heb ik de volgende vijf competenties van mijn opleiding Elektrotechniek ontwikkeld tot een niveau van een competente ingenieur:

- Analyseren
- Ontwerpen
- Realiseren
- Managen
- Onderzoeken

De wijze waarop ik denk dat ik de bovengenoemde competenties tot een hoger niveau heb ontwikkeld tijdens het afstuderen is hieronder per competentie benoemd.

Analyseren:

Het analyseren van het probleem is tijdens mijn afstuderen erg van belang geweest, omdat het probleem en de eisen van de betrokken partijen zeer bepalend zijn geweest voor de aan te dragen oplossing. Door de probleemstelling kritisch en in detail te specificeren en eisen van de betrokken partijen in kaart te brengen, heb ik mij goed kunnen richten tot de kern- en randvoorwaarden die van belang zijn geweest om tot een gerichte oplossing en advies te komen. Het gericht opstellen van een opdracht, doelstelling en probleemstelling heb ik veel aandacht aan besteedt en heb ik telkens bij enige onduidelijkheid over bepaalde aspecten kennis en advies geraadpleegd van collega's. Hierbij heb ik naast de technische aspecten ook de maatschappelijke aspecten vastgelegd.

Om een goed beeld te vormen van de bestaande situaties waar een alternatieve toepassing voor gevraagd is, heb ik mantelstroomsimulaties uitgevoerd om gevoel te krijgen voor de betreffende technische kennis. Daarnaast heb ik ontwerpdocumenten geraadpleegd om de opbouw van een bestaande kabelverbinding inzichtelijk te krijgen. De verkregen resultaten uit de mantelfoutsimulatie heb ik telkens geanalyseerd aan de hand van de verwachtingen en de bestaande mantelstroomsimulaties.

Ontwerpen:

In de stappen naar de opstelling van een proefontwerp met bijbehorend advies, zijn een zestal concepten aangedragen, welke zijn opgesteld vanuit het programma van eisen van zowel de landeigenaren als die van TenneT TSO. Door deze concepten tegen elkaar af te wegen aan de hand van criteria is hieruit één concept als beste naar voren gekomen. De criteria die hiervoor zijn opgesteld, hebben ieder een bepaalde impact op verschillende factoren, zoals: leveringszekerheid, veiligheid, schade of mankementen, belemmering van landeigenaren en kosten. Het concept is niet gedetailleerd uitgewerkt op verzoek van Energy Solutions. Het advies dat is gedaan aan de hand van het gekozen concept volstaat als eindresultaat waarop in de toekomst verder op gebouwd kan worden in de vorm van vervolgsimulaties en proefopstellingen in het veld. De scriptie dient als advies- en procesdocument waarin staat beschreven hoe het bestaande probleem opgelost kan worden en wat hiervoor nodig is om dat in de toekomst ook uitvoerbaar te maken.

Realiseren:

Voor de realisatie van het proefontwerp en het adviesdocument dat in de vorm van deze scriptie is geschreven is voortgekomen uit richtlijnen en eisen van TenneT TSO, eisen van landeigenaren en uit technische ontwerpdocumenten, datasheets en simulaties. De basis van de simulaties die zijn gebruikt, zijn ontwikkeld door Energy Solutions en zijn uitvoerig getest bij meerdere projecten. Mijn onderzoek naar een alternatieve meettechniek van mantelfouten in hoogspanningskabels is gedaan



Cross-bonding: Een alternatieve toepassing

aan de hand van een uitbreiding van deze simulatie. Deze uitbreiding heb ik kunnen realiseren, door het bestaande ontwerp te doorgronden en hier uit eigen inzicht wijzigingen in aan te brengen. De correctheid van de wijzigingen heb ik telkens gecontroleerd door de opgestelde verwachtingen hiermee te vergelijken en de resultaten te analyseren. Bij het ontwikkelen van een oplossing en advies is rekening gehouden met ethiek van de landeigenaren en TenneT TSO en de relatie tussen deze twee partijen. Het belang van Energy Solutions is hierin ook meegenomen.

Managen:

Bij de start van het afstuderen ben ik direct begonnen met informatie verzamelen bij meerdere collega's over de gegeven opdrachtbeschrijving, om hier een project van op te kunnen zetten. Het plan van aanpak vormde de fundatie van het project en heeft een goede indicatie gegeven van het verloop en de inhoud van het project. Ik heb meerdere vergaderingen georganiseerd met zowel collega's als met iemand van TenneT TSO. Bepaalde technische documenten heb ik zelfstandig opgevraagd bij collega's, vanwege mijn beperkte bereikbaarheid tot technische informatie als stagiair. Tussentijds heb ik met collega's de werkwijze en inhoud van het onderzoek gemonitord en ben ik daarin doelgericht te werk gegaan, door gerichte vragen te stellen over bepaalde keuzes en onduidelijkheden.

Tijdens mijn werkzaamheden binnen Energy Solutions, heb ik mij sociaal opgesteld en heb ik mij ondanks mijn vakantie in de tweede stageweek van mijn beste kant laten zien, door hard te werken aan een plan van aanpak en actief mensen te benaderen voor vragen. In de loop van de stage raakte ik steeds meer geïntegreerd in het bedrijf en heb ik meer inhoudelijk contact gehad met andere collega's dan in de eerste weken. Ik heb uiteindelijk met één collega veel samengewerkt aan de simulatiemodellen en heb daarbij veel positieve steun en feedback mogen ontvangen. Naast de communicatie en samenwerking in een werkgerelateerde omgeving, heb ik mij ook weten te mengen in de meer persoonlijke communicatie met collega's.

Onderzoeken:

Voor het onderzoek dat ik gedurende de stage zelfstandig heb uitgevoerd heb ik gebruik gemaakt van verschillende middelen, zoals technische normen en eisen vanuit TenneT TSO, datasheets van verschillende componenten en simulatiemodellen. Van deze middelen heb ik de betrouwbaarheid kunnen valideren. Het onderzoek is direct gebaseerd op de doel- en vraagstellingen die zijn opgesteld. De belangrijkste onderzoeksresultaten heb ik vervolgens stuk voor stuk behandeld en verklaard, waarna deze zijn samengevat en hieruit een conclusie is gevormd, waarbij de onderzoeksvraag is beantwoord. Het complete onderzoek is volgens de rapportageopzet van Energy Solutions opgesteld en is daarmee in zijn volledige vorm op te nemen in het bedrijfsarchief en kan worden gebruikt als basis voor een vervolgonderzoek en voor een gedetailleerder proefontwerp. Uit dit oogpunt heb ik aan de hand van de resultaten en conclusies een aanbeveling gedaan, zodat Energy Solutions verder onderzoek of het ontwikkelen van een proefopstelling kan realiseren, met deze scriptie als basis.