

Homopolaire impedanties van kabels, revisie 2

09-095 pmo

8 mei 2009

© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

1	Inleiding	4
2	Theoretische berekening zonder invloed van de omgeving	4
2.1	Homopolaire weerstand	4
2.2	Normale reactantie	5
2.3	Homopolaire reactantie	6
2.4	Homopolaire capaciteit	6
3	Invloed omgeving aarde	7
4	Vaststellen homopolaire impedantie	9
4.1	Meting	9
5	Specifieke verhoudingen R_0/R_1 en X_0/X_1	11
5.1	Vieraderige laagspanningskabels	11
5.1.1	Retour via eigen nulgeleider	12
5.1.2	Retour via eigen nulgeleider en mantel	13
5.1.3	Retour via eigen nulgeleider en aarde	14
5.1.4	Retour via eigen nulgeleider, mantel en aarde	15
5.2	MS-Gordelkabels	15
5.2.1	Retour via scherm	16
5.2.2	Retour via scherm en aarde	17
5.3	MS-Drieadelige kabels met gescheiden afscherming	18
5.3.1	Retour via scherm	18
5.3.2	Retour via scherm en aarde	19
5.4	MS-Enkeladerige kabels	19
5.4.1	Retour via scherm	20
5.4.2	Retour via scherm en aarde	21
6	Conclusie	22

1 INLEIDING

Voor het uitvoeren van kortsluitberekeningen wordt meestal gebruik gemaakt van de methode van symmetrische componenten (Phase, 2009). Deze methode maakt het mogelijk om in een symmetrisch driefasensysteem met behulp van een transformatie gemakkelijker asymmetrische belastingen en verstoringen te berekenen.

Voor de gewone symmetrische berekeningen zijn de gegevens van het normale stelsel voldoende, maar voor het berekenen van asymmetrische verschijnselen zijn ook de inverse en homopolaire gegevens van onder meer kabels en transformatoren noodzakelijk. De inverse gegevens zijn in de meeste gevallen gelijk aan de normale gegevens. De homopolaire gegevens zijn niet gelijk aan de normale gegevens en hangen bij kabels af van onder meer de aarding en de ligging in de grond. Ook de nabijheid van andere geleidende objecten, zoals stalen buizen of tramrails heeft invloed op de homopolaire impedantie. Om deze reden kan de homopolaire impedantie van kabels niet zonder meer in de specificatie van typegegevens worden opgenomen. Dit document gaat kort in op de problematiek rond de homopolaire impedanties van kabels.

2 THEORETISCHE BEREKENING ZONDER INVLOED VAN DE OMGEVING

De normale impedantie is gelijk aan de bedrijfsimpedantie en is meestal wel bekend en kan worden afgeleid uit brochures en naamplaatgegevens. De inverse impedantie van kabels is gelijk aan de normale impedantie.

De homopolaire impedantie is meestal gemeten, zoals bij een hoogspanningslijn, en is in die gevallen goed bekend bij de beheerder. De impedanties van MS-kabelverbindingen zijn in de meeste gevallen niet gemeten. Voor een kabel is slechts een beperkte algemene richtlijn te geven voor de waarde van de homopolaire impedantie. Deze is onder meer afhankelijk van:

- uitvoering: drie éénfasekabels of één driefasenkabel
- ligging: onderlinge afstand in plat vlak of in driehoek
- aanwezigheid van andere geleidende objecten zoals andere kabels of pijpleidingen

Omdat de homopolaire gegevens worden beïnvloed door de liggingssomstandigheden en de omgeving, kunnen deze het best gemeten worden aan de bestaande verbinding. Voor planningsdoeleinden moeten deze waarden geschat worden. Indien geen betrouwbare waarden beschikbaar zijn, kan een schatting gemaakt worden aan de hand van theoretische berekeningen. Deze berekeningen hebben betrekking op de situatie dat het retourpad alleen via de kabel loopt. Voor het meenemen van de invloed van de aarde zijn uit de praktijk specifieke tabellen afgeleid.

2.1 Homopolaire weerstand

In het algemeen geldt voor een kabel dat de homopolaire weerstand per fase gelijk is aan de wisselstroomweerstand van de fasegeleider, zonder de invloed van het proximity effect maar met de invloed van het skin effect, waarbij de invloed van de retourgeleider wordt opgeteld (BICC, 1990):

- drieadelige kabels: drie maal de weerstand van de metalen afscherming, eventueel parallel aan de weerstand van de armering
- SL-type kabels: de weerstand van een metalen afscherming, parallel met drie maal de weerstand van de armering.
- enkeladerige kabels: de weerstand van de metalen afscherming

Voor in Nederland veelvuldig gebruikte kabels betekent dit onderstaande.

LS vieraderige kabel: $R_0 = R_N // 3(R_S // R_A)$

MS GPLK drieadrige kabel: $R_0 = 3(R_S // R_A)$

MS XLPE drieadrige kabel: $R_0 = R_S // 3R_A$

MS XLPE enkeladerige kabel: $R_0 = R_S // R_A$

In het algemeen geldt het volgende. Sommige drieadrige kabels zijn per fase uitgerust met een afscherming die in staat is een éénfase kortsluitstroom te geleiden. In dat geval moet de weerstand van die afscherming worden gebruikt. Wanneer er sprake is van één afscherming, gezamenlijk voor de drie geleiders, moet drie maal de weerstand van die afscherming worden gebruikt. Indien beide typen gecombineerd voorkomen, zoals een afscherming per fase en een gezamenlijke armering moet het voorbeeld van de SL-type kabel worden gebruikt. In principe moeten de weerstanden R_i van alle individuele retourpaden separaat worden berekend en moet de equivalente weerstand van al deze parallel geschakelde retourpaden worden bepaald. De homopolaire weerstand is dan deze waarde, vermenigvuldigd met 3.

$$R_0 = \frac{3}{\sum \frac{1}{R_i}} \quad (1)$$

De weerstanden worden berekend uit het geleidende oppervlak en de specifieke weerstand van de betreffende geleiders. Voor een scherm wordt het geleidende oppervlak berekend uit de diameter en de dikte. Voor afzonderlijke draden wordt de weerstand bepaald uit die van een enkele draad, gedeeld door het aantal draden en gecorrigeerd voor de spoed. Bij kabels met een meanderend scherm is de lengte van het scherm groter dan die van de totale kabel.

2.2 Normale reactantie

De normale reactantie kan eenvoudig worden afgeleid uit de specificatie van de inductie in de brochure van de fabrikant. Deze is voor drie- en vieraderige kabels constant. Bij enkeladerige midden- en hoogspanningskabels is de ligging (driehoek of plat vlak) van belang. In het geval dat de inductie niet gegeven is, kan deze berekend worden. De inductie L van een ideale ronde oneindig lange geleider, in het geval van twee parallelle geleiders, kan worden berekend volgens (Pirelli, 1999):

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \ln \frac{s}{\rho} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \ln \frac{2s}{d_c \cdot f_{gmd}} \quad [\text{H/km}] \quad (2)$$

waarin:

μ_0 : permeabiliteitsconstante in vacuüm: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$

s : hartafstand van de geleiders in driehoeksformatie

of $^3\sqrt{2} = 1.26$ maal de hartafstand van de geleiders in plat vlak (mm)

ρ : geometrisch gemiddelde diameter van de geleider (mm)

d_c : geleiderdiameter (mm)

f_{gmd} : factor voor geometrisch gemiddelde diameter van de geleider: $f_{gmd} = 0,779$

Invullen van de permeabiliteitsconstante, de factor voor de geometrisch gemiddelde diameter van de geleider en de frequentie levert de reactantie (BICC, 1990):

$$X_1 = 2\pi f \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2s}{d_c} \right) = 2\pi f \cdot 10^{-3} \left(K + 0,2 \ln \frac{2s}{d_c} \right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3)$$

Waarin:

K : een constante die gerelateerd is aan de geleiderconstructie: $K = 0,05$

2.3 Homopolaire reactantie

De homopolaire reactantie per fase van een enkeladerige kabel kan redelijk eenvoudig berekend worden voor het geval dat het retourcircuit bestaat uit alleen de eigen kabelmantel. Door in de formule voor berekening van de inductie twee maal de geleiderafstand te vervangen door de diameter van de metalen afscherming, ontstaat de formule voor de homopolaire inductie per fase.

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^{-3} \ln \frac{D_s}{d_c \cdot f_{gmd}} \quad [\text{H}/\text{km}] \quad (4)$$

waarin:

μ_0 : permeabiliteitsconstante in vacuüm: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$

D_s : gemiddelde diameter van de metalen afscherming (mm)

d_c : geleiderdiameter (mm)

f_{gmd} : factor voor geometrisch gemiddelde diameter van de geleider: $0,779$

Invullen van de permeabiliteitsconstante, de factor voor de geometrisch gemiddelde diameter van de geleider en de frequentie levert de reactantie per fase van een enkeladerige kabel (BICC, 1990):

$$X_0 = 2\pi f \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_s}{d_c} \right) = 2\pi f \cdot 10^{-3} \left(K + 0,2 \ln \frac{D_s}{d_c} \right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (5)$$

Waarin:

K : een constante die gerelateerd is aan de geleiderconstructie: $0,05$

Voor drieadrige kabels kan de homopolaire reactantie per fase berekend worden met behulp van onderstaande vergelijking. Hierin komt een factor 3 voor om de reactantie van het gezamenlijke scherm om te rekenen naar reactantie per fase.

$$X_0 = 3 \cdot 2\pi f \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{D_s}{gmd} \quad \text{Ohm}/\text{km} \quad (6)$$

waarin:

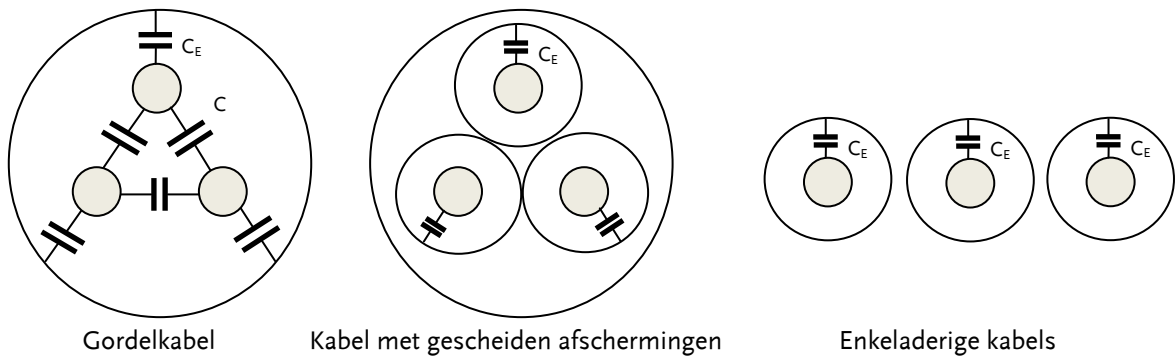
D_s : gemiddelde diameter van de metalen afscherming over de gezamenlijke aders (mm)

gmd : geometrische gemiddelde diameter is van de geleiders in de kabel (mm).

De waarde van gmd mag gelijk genomen worden aan 0,75 maal de diameter van de cirkel die raakt aan de drie gezamenlijke geleiders in de kabel (ervan uitgaande dat de geleiders cirkelvormig zijn).

2.4 Homopolaire capaciteit

De kleine afstanden tussen de geleiders onderling in een kabel en tussen geleiders en afscherming en de diëlektrische constante van het isolatiemedium zorgen ervoor dat de capaciteit groter is dan bij bovengrondse lijnen. De kabelcapaciteiten liggen in de grootte van 0,1 tot 1,2 $\mu\text{F}/\text{km}$. De homopolaire capaciteit is afhankelijk van de constructie van de kabel.



Figuur 1 Capaciteiten in diverse kabelsoorten

De normale en homopolaire capaciteiten voor deze kabelsoorten zijn:

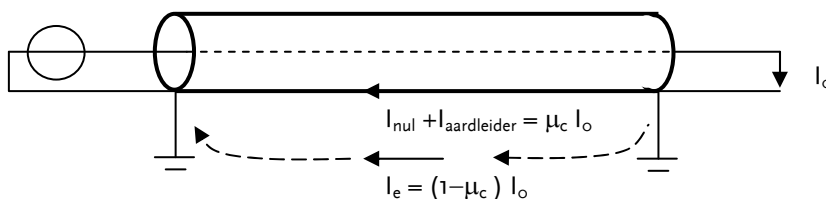
	C_1	C_0
Gordelkabel	$C_E + 3 C$	$0,6 C_1$
Gescheiden afschermingen	C_E	C_1
Enkeladerige kabel	C_E	C_1

3 INVLOED OMGEVING AARDE

Bei de berekening van de homopolaire impedantie van kabels is het niet mogelijk een eenduidige formule aan te geven. Men moet rekening houden dat de homopolaire stromen zich verdelen over de nulgeleider, afscherming en bewapening van de kabel zelf en over de aarde. Ook alle in de buurt van het retourpad liggende metalen geleiders, zoals gas- en waterleidingen en omhullingen van andere kabels spelen een rol bij de verdeling van de retourstroom. Overigens is de invloed van andere metalen geleiders op de homopolaire impedantie van kabels met een geleiderdoorsnede groter dan 70 mm^2 gering. Bij normale waarden van de specifieke weerstand van de grond, tussen 100 tot $500 \Omega\text{m}$, kan de invloed van andere geleiders verwaarloosd worden (Kloppel, 1965).

De berekening van de homopolaire impedantie is naar verhouding complex en tijdrovend. Voor elke situatie betreffende het retourpad en grondweerstand verschillen de berekende waarden.

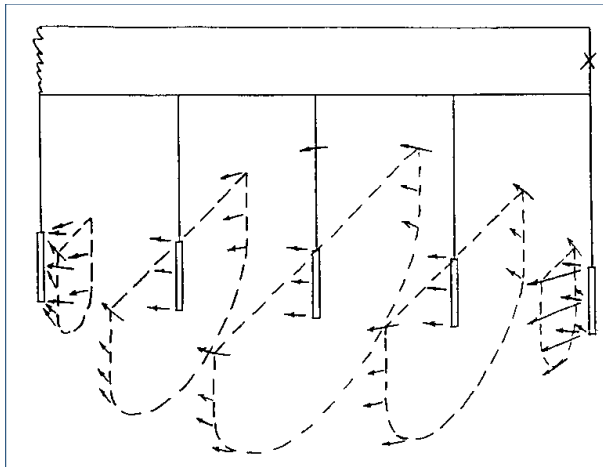
Het retourpad voor de homopolaire stroom is van grote invloed op de homopolaire weerstand en reactantie. De homopolaire gegevens van een kabel kunnen redelijk goed berekend worden voor het geval dat de homopolaire stroom volledig door de kabel (nul of afscherming) retour vloeit. Voor de meeste ondergronds geïnstalleerde kabelsystemen geldt dat echter niet, omdat de nul of aardgeleider op meerdere plaatsen geaard kan zijn. Het retourpad bestaat dan uit een parallelschakeling van nul, aardgeleider en aarde. Onderstaand diagram geeft een schematische representatie (Van Waes, 2003).



Figuur 2 Retourpad bij een kabelverbinding

Het circuit kan in drie gebieden worden opgesplitst:

- het gebied vlak bij de voeding; dit kan een onderstation zijn met eventueel een aardelektrode
- het gebied vlak bij de homopolaire belasting I_0 (of een asymmetrische fout); dit kan een onderstation zijn met eventueel een aardelektrode
- het tussengebied: ver van de voeding en ver van de homopolaire belasting; in dit gebied is interactie tussen de kabelstromen en aardstromen door toegepaste aardelektrodes en door ander contact tussen kabel en aarde (bijvoorbeeld de loodmantel).

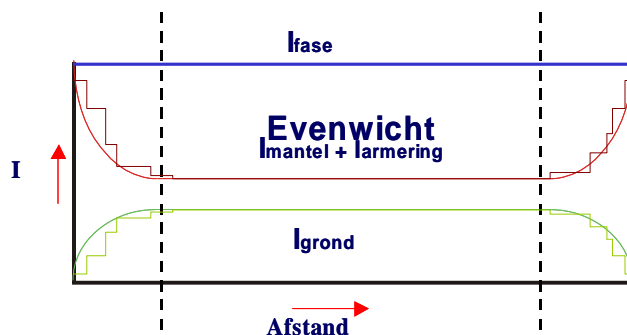


Figuur 3 Contact afscherming kabeltracé met aarde en stroomverdeling van de aardstroom

De invloed van aarding langs een kabeltracé op de interactie met de aarde is geïllustreerd in bovenstaand diagram. In dit diagram is dit geïllustreerd alsof het kabeltracé op meerdere plekken (bij de middenspanningsruimten) via een aardelektrode geaard is. De retourstroom door de aarde volgt een pad van het punt van de aardelektrode aan het einde van het kabeltracé bij de homopolaire bron, enigszins uitwaaiërend langs het kabeltraject, retour naar het punt van de aardelektrode aan het begin van het kabeltracé (Van Waes, 2000).

Onderstaand diagram geeft een schematisch overzicht van de stroomverdeling door het kabeltracé en de aarde. Het effect van het verdelen van de stromen tussen kabels en aarde is het grootst aan beide uiteinden van het tracé (bij de voeding en bij de homopolaire bron). Als gevolg is de stroom door het kabeltracé (in mantel en armering) het grootst aan het begin en aan het eind van de kabelverbinding.

Stroomverdeling als functie van plaats

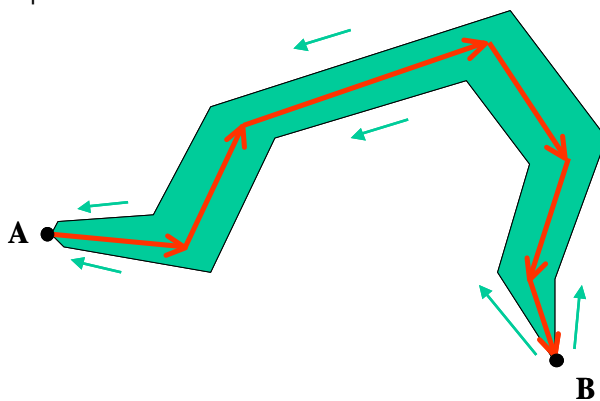


Figuur 4 Stroomverdeling door GPLK kabel en aarde als functie van de afstand

In het geval van een tracé met kunststof kabels, dat alleen via aardelektrodes in contact met aarde kan staan, vertoont de grafiek met de stroomverdeling een trapsgewijs (discreet) verloop. Op de hoogte van elke aardelektrode worden de stromen door mantel, bewapening en aarde opnieuw verdeeld.

In het geval dat het tracé alleen uit GPLK kabels bestaat, is er naast het aardcontact via elektrodes ook sprake van een aardcontact via de loodmantel langs het gehele tracé. Hierdoor vertoont de stroomverdeling in bovenstaand diagram het geschetste continue verloop.

Het retourpad volgt het traject van de fasegeleider. In onderstaand diagram is dit afgebeeld voor een kabel die een gekromd pad volgt. Het retourpad van de homopolaire stroom door de aarde volgt een enigszins uitgewaaierd pad, maar blijft de contour van de heenweg volgen (Provoost, 2003). Dit is het gevolg van het feit dat voor elk ander retourpad de door het heen- en retourpad omvatte flux groter is en daardoor de homopolaire reactantie groter is. De stroom neemt dan de weg van de minste impedantie.



Figuur 5 Terug volgt heen

De invloed van de aarde is in veel gevallen onvoorspelbaar vanwege de invloed van nabij gelegen geleidende materialen, zoals andere kabels, metalen pijpen en spoorrails. Afhankelijk van de grootte van het retourpad, worden de homopolaire weerstand en reactantie beïnvloed. Parallelschakeling via de aarde kan de homopolaire weerstand doen afnemen en de homopolaire reactantie doen toenemen (wegens toename van de omvatte flux).

4 VASTSTELLEN HOMOPOLAIRE IMPEDANTIE

4.1 Meting

Aangezien de homopolaire impedantie van sterkstroomkabels niet met grote nauwkeurigheid berekend kan worden, zijn metingen noodzakelijk. Met behulp van deze metingen uit de praktijk kan een schatting gedaan worden voor waarden die bij de planning van een nieuw tracé bruikbaar zijn. Overigens laten talrijke praktijkmetingen zien dat de spreiding in de resultaten aanzienlijk is.

De homopolaire impedantie wordt gemeten met behulp van een voeding met een homopolair stelsel. Dit wordt bereikt door de fasen aan beide uiteinden parallel te schakelen. Aan het ene uiteinde wordt deze parallelschakeling geaard en aan het andere éénfasig tegen aarde gevoed. De homopolaire impedantie is dan het quotiënt van spanning en stroom. Indien de kabelmantels aan beide uiteinden geaard zijn, vindt een stroomopdeling plaats tussen de mantels en de aarde. Bij éénzijdige aarding (op

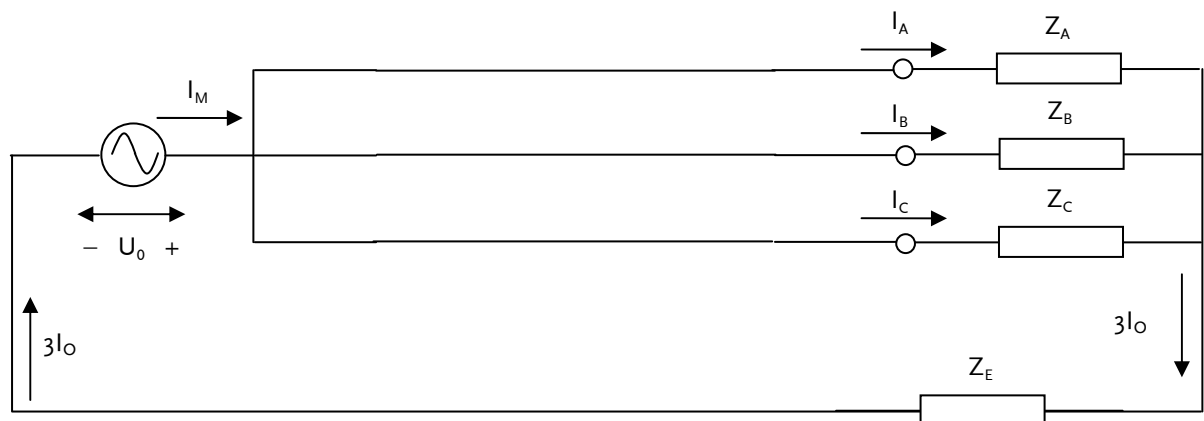
de andere zijde zijn de mantels zwevend en niet doorverbonden met mantels van andere kabels) gaat de retourstroom alleen door de aarde. De stroom door de aarde wordt sterk beïnvloed door andere geleidende voorwerpen in of op de aarde, zoals andere kabelmantels, metalen gas- en waterleidingen en dergelijke. Omdat de homopolaire impedantie dus mede afhankelijk is van de omgeving van de kabel kan voor een bepaald kabeltype een algemeen geldige homopolaire impedantie niet worden aangegeven. Soms wordt een homopolaire impedantie aangegeven onder de voorwaarde dat de retourstroom alleen door de mantels vloeit. Bij drie éénfase-kabels zijn deze mantelstromen gelijk.

De symmetrische componenten transformatie beschrijft de relatie tussen de stromen in het componenten-netwerk en het fysieke stelsel:

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad (7)$$

Hieruit blijkt dat de homopolaire stroom gelijk is aan één-derde van de som van de drie fasenstromen. In geval van een driefasensymmetrisch systeem, zal de homopolaire stroom nul zijn. Als gevolg van deze vergelijking is de stroom, die over het retourpad vloeit, gelijk aan de som van de drie fasenstromen en dus gelijk aan $3I_0$.

Hieruit volgt de manier om de homopolaire impedantie te meten, met alleen een het aanbrengen van een homopolaire spanning, zoals aangegeven in onderstaande afbeelding.



Figuur 6 Meting van de homopolaire impedantie

In een driefasensymmetrisch net is $Z_A = Z_B = Z_C = Z_L$, zodat $I_A = I_B = I_C = I_0$. Dan volgt voor de meting:

$$U_0 = Z_L I_0 + Z_E \cdot 3I_0 \quad (8)$$

Hieruit volgt voor de homopolaire impedantie:

$$Z_0 = Z_L + 3Z_E \quad (9)$$

en voor de meting:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = 3 \frac{U_0}{3I_0} = 3 \frac{U_0}{I_M} \quad (10)$$

Voor planningsdoeleinden kan de homopolaire impedantie geschat worden, afhankelijk van de situatie als een constante waarde of als een factor van de normale impedantie.

5 SPECIFIEKE VERHOUDINGEN R_0/R_1 EN X_0/X_1

De homopolaire impedantie is afhankelijk van het retourpad. Bij LS-kabels met 4 geleiders is, door aanwezigheid van de nulgeleider de invloed van het retourpad niet zo heel erg groot, maar bij drie- en enkeladerige MS kabels zonder nulgeleider is de invloed van het retourpad sterk. Dit hoofdstuk behandelt achtereenvolgens:

- Vieraderige LS-kabels,
- MS-GPLK-kabels,
- MS-drieaderige XLPE-kabels en
- MS-enkeladerige XLPE-kabels

Voor bovenstaande kabels is uit de literatuur een overzicht samengesteld, teneinde een praktische benadering van de homopolaire waarden te vinden. Er wordt onderscheid gemaakt in het retourpad: retour via alleen eigen nulgeleider en/of scherm en parallelschakeling met aarde.

Het is gebruikelijk de homopolaire weerstand en reactantie aan te geven in relatie tot de normale parameters. Dat wordt in dit hoofdstuk overgenomen.

5.1 Vieraderige laagspanningskabels

Het retourpad bij LS-kabels met 4 geleiders kan bestaan uit:

- alleen de nulgeleider,
- de nulgeleider parallel geschakeld met de afscherming,
- de nulgeleider parallel geschakeld met de aarde en
- de nulgeleider parallel geschakeld met de afscherming en de aarde.

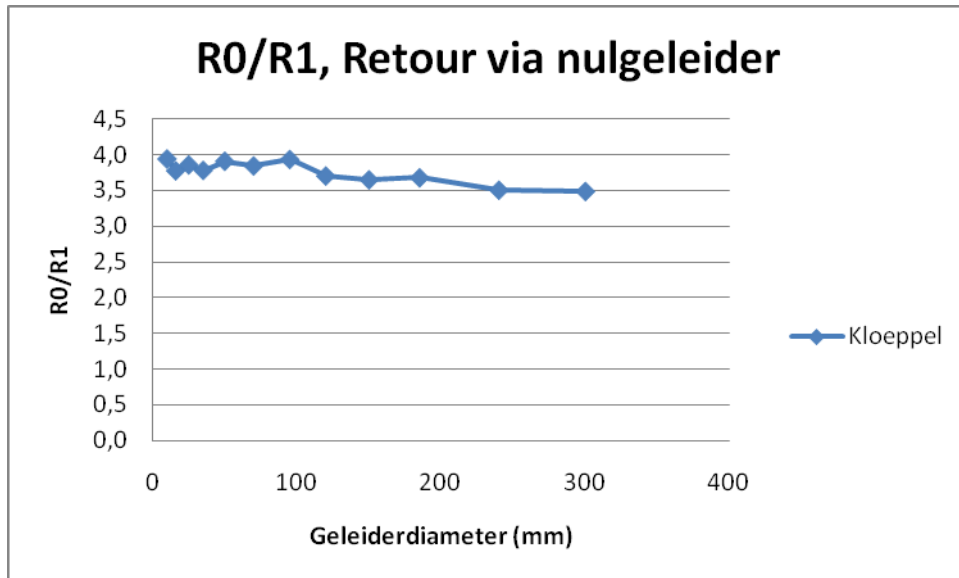
Voor kabels met kleine geleiderdoorsnede (kleiner van 70 mm^2) zijn de homopolaire impedanties sterk afhankelijk van het retourpad. Eventuele parallel lopende vreemde geleiders zouden de waarden nog iets kunnen verkleinen, maar dit effect wordt meestal verwaarloosd. Bij kabels met grotere geleiderdoorsneden (groter dan 70 mm^2) is de homopolaire impedantie daarentegen niet meer zo sterk afhankelijk van het retourpad. Het verschil tussen een retourpad dat bestaat uit alleen de nulgeleider en een retourpad dat bestaat uit nulgeleider, afscherming en aarde bedraagt voor een 300 mm^2 kabel ongeveer 15% (Kloepfel, 1965).

De homopolaire impedantie voor de parallelschakeling van nulgeleider en afscherming komt voor bij kabels in gebouwen of installaties. De situatie waarbij ook de aarde is parallelgeschakeld komt voor bij alle direct in de grond gelegde kabels.

5.1.1 RETOUR VIA EIGEN NULGELEIDER

 R_0/R_1

Volgens IEC 60909-2 en volgens (Happoldt, 1978) is de verhouding R_0/R_1 voor LS-kabels constant en gelijk aan 4,0. Volgens (Kloeppeel, 1965) neemt voor kabels met aluminium geleiders deze verhouding af van 4,0 voor de kleine diameters tot 3,5 voor 300 mm².

 **X_0/X_1**

Volgens IEC 60909-2 is de verhouding X_0/X_1 voor LS-kabels voor de kleine diameters gelijk aan 3,5 en voor diameters groter dan 50 mm² gelijk aan 4,0.

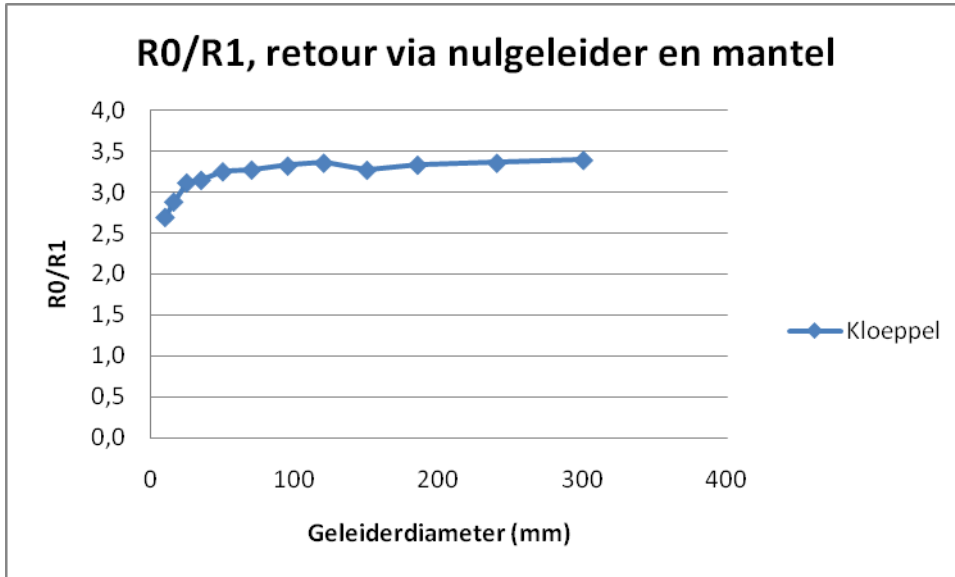
Volgens (Happoldt, 1978) is de verhouding X_0/X_1 voor LS-kabels constant 4,0.

Volgens (Kloeppeel, 1965) is de verhouding X_0/X_1 voor LS-kabels constant 3,4.

5.1.2 RETOUR VIA EIGEN NULGELEIDER EN MANTEL

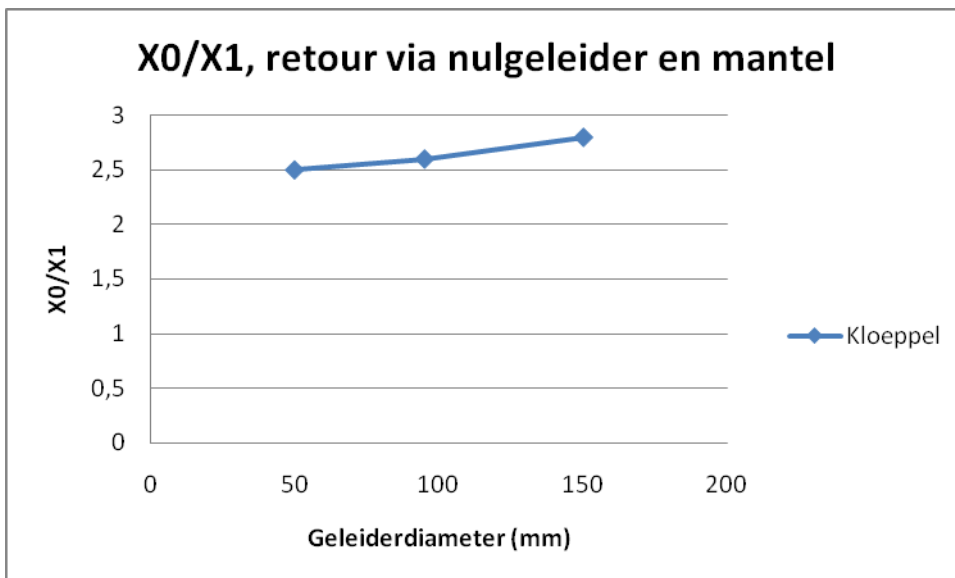
R_0/R_1

Volgens (Kloeppeel, 1065) neemt voor kabels met aluminium geleiders de verhouding R_0/R_1 toe van 2,7 voor de kleine diameters tot 3,4 voor 300 mm².



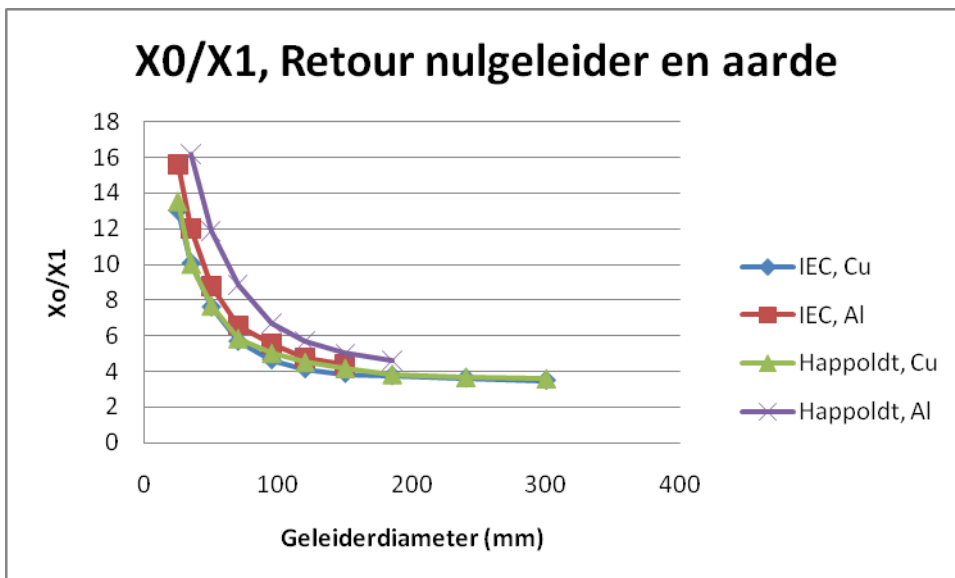
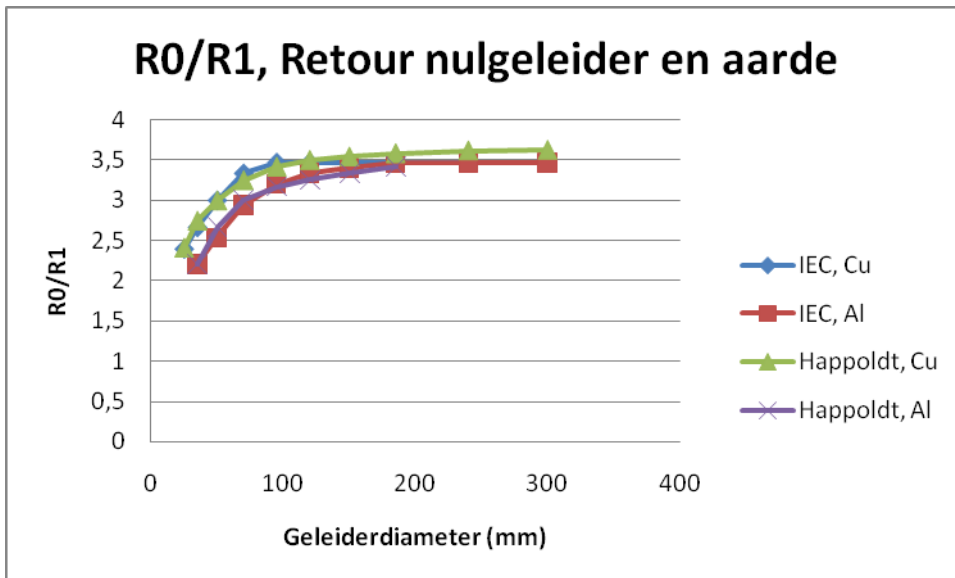
X_0/X_1

Volgens (Kloeppeel, 1065) is X_0 bij benadering constant 0,2 Ω/km, waardoor de verhouding X_0/X_1 voor LS-kabels niet sterk varieert en toeneemt van 2,5 naar 2,8 met toenemende geleiderdiameter.



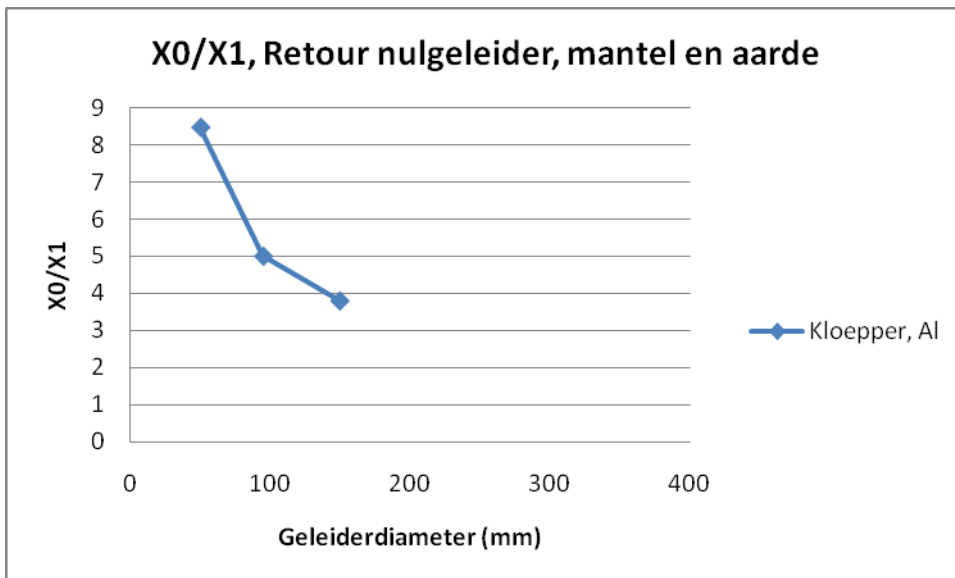
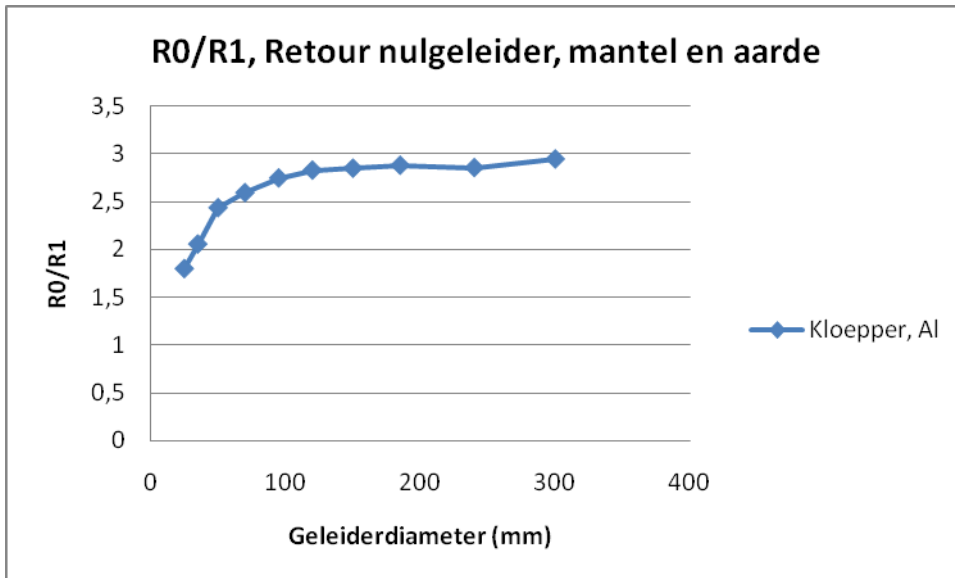
5.1.3 RETOUR VIA EIGEN NULGELEIDER EN AARDE

Indien de retour via de eigen nulgeleider loopt en ook via de aarde, zal ten opzichte van de situatie zonder aarde de weerstand afnemen wegens een extra parallel pad en de reactantie toenemen, vanwege de extra omvatte flux. De grafieken hebben betrekking op een specifieke weerstand van de omgeving: $\rho = 100 \Omega\text{m}$. De grafieken zijn ontleend aan IEC 60909-2 en aan (Happoldt, 1978).



5.1.4 RETOUR VIA EIGEN NULGELEIDER, MANTEL EN AARDE

De literatuur geeft ook nog een referentie voor het geval dat het retourpad bestaat uit nulgeleider, mantel en aarde. Door parallelschakelen van de mantel zal de homopolaire weerstand kleiner zijn dan het geval dat de mantel niet was parallelgeschakeld. De homopolaire reactantie verandert weinig ten opzichte van het geval dat de mantel niet is parallelgeschakeld.



5.2 MS-Gordelkabels

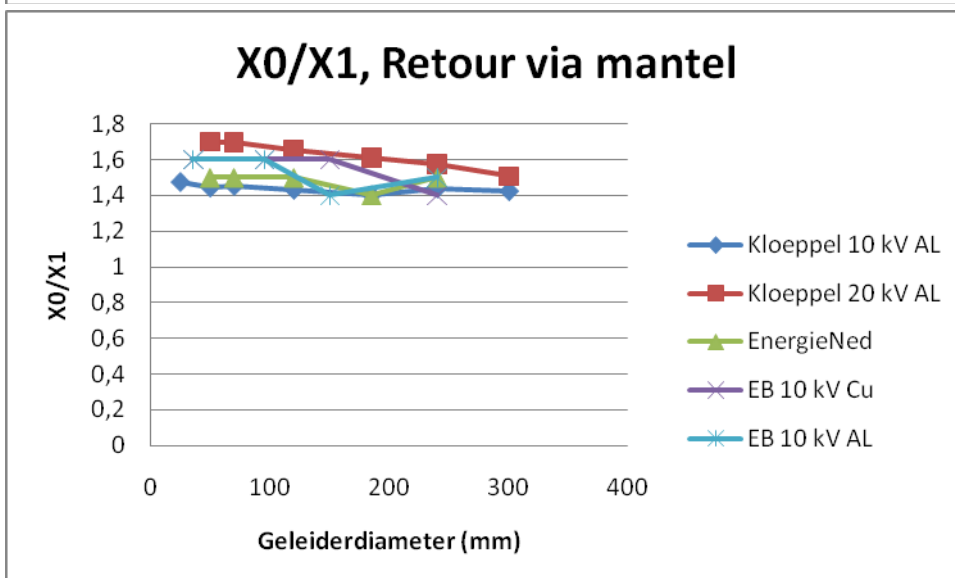
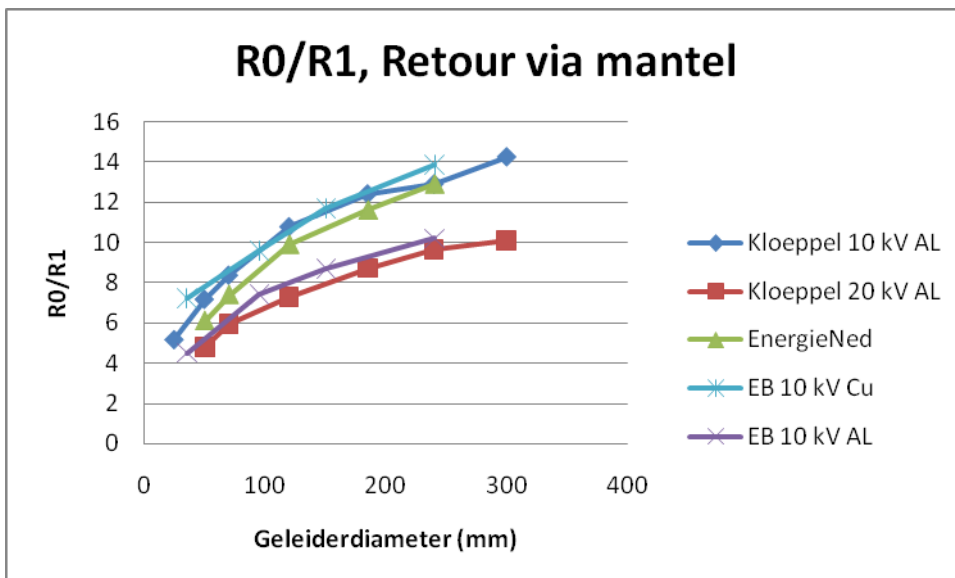
Het retourpad bij MS-gordelkabels met 3 geleiders kan bestaan uit:

- alleen de afscherming en
- de afscherming parallel geschakeld met de aarde.

Er is informatie gevonden in de literatuur (Kloeppel, 1965) en (EnergieNed, 2001). Er is aanvullende informatie gevonden voor de situatie dat het retourpad bestaat uit alleen de afscherming en voor de situatie dat het retourpad bestaat uit de afscherming en de aarde.

5.2.1 RETOUR VIA SCHERM

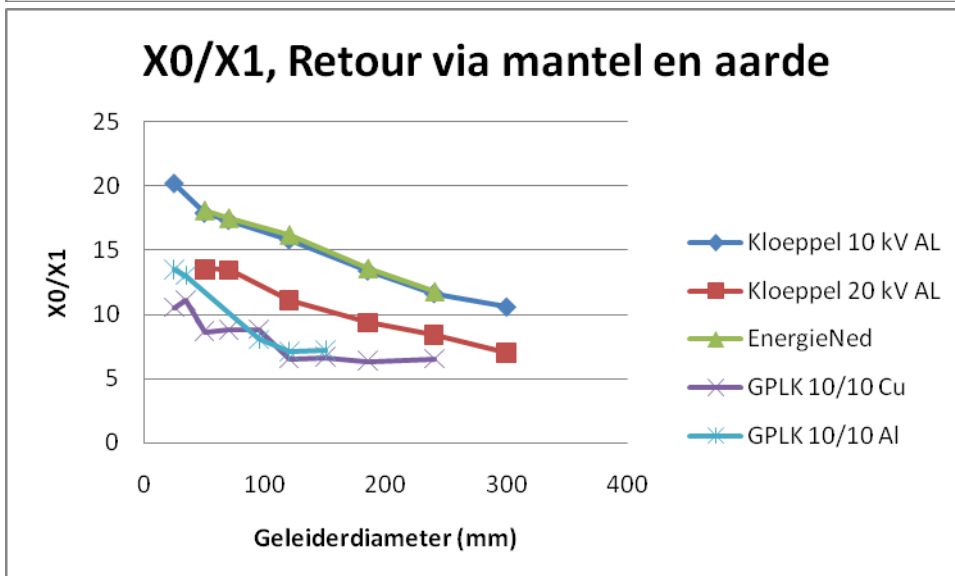
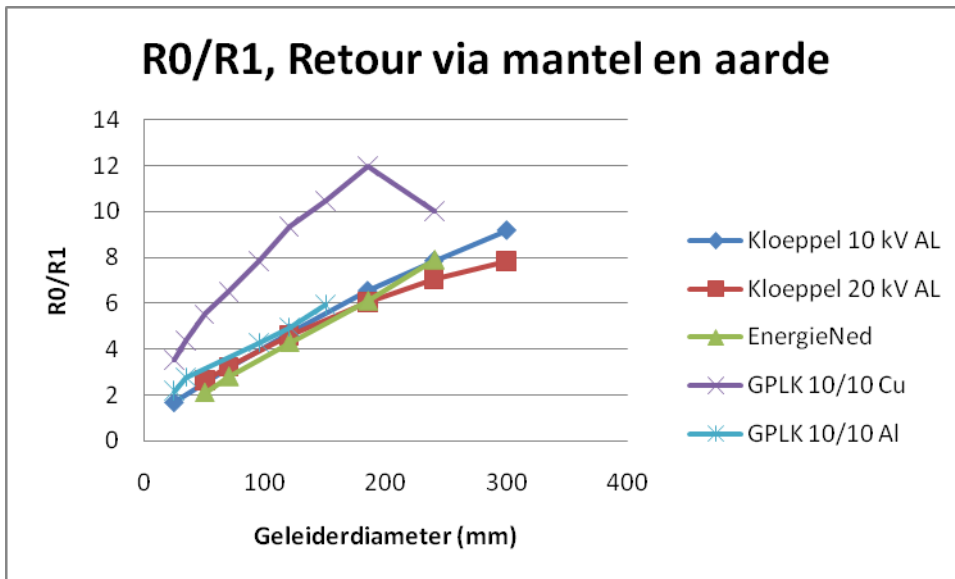
In het boek van (Kloeppel, 1965) zijn voor deze situatie gordelkabels met aluminium geleider opgenomen voor 10 kV en voor 20 kV. Het boek van (EnergieNed, 2001) geeft het geleidermateriaal en de nominale spanning niet aan. Volstaan wordt met de mededeling dat het “veelgebruikte kabeltypen” zijn. Aangezien dit boek ook het boek van Kloeppel als referentie noemt, wordt aangenomen dat het hier een 10 kV Al-gordelkabel betreft. De reeksen, genoemd “EB 10 kV Cu” en “EB 10 kV AL”, zijn afkomstig van een interne bron. De verhouding R_0/R_1 voor kabels met koperen geleider is groter dan voor kabels met aluminium geleider. Duidelijk zichtbaar is dat de verhouding R_0/R_1 toeneemt met toenemende geleiderdiameter en dat de verhouding X_0/X_1 steeds in de buurt van 1,5 blijft.



5.2.2 RETOUR VIA SCHERM EN AARDE

In het boek van (Kloeppel, 1965) zijn voor deze situatie gordelkabels met aluminium geleider opgenomen voor 10 kV en voor 20 kV. De specifieke weerstand van de bodem is: $\rho=100\Omega m$. Het boek van (EnergieNed, 2001) geeft voor deze situatie waarden voor een 10 kV Al-gordelkabel. Ter illustratie zijn berekeningen toegevoegd van een kabelfabrikant voor een specifieke situatie, weergegeven met de reeksen “GPLK 10/10 Cu” en “GPLK 10/10 Al”.

De curven voor de Al-kabels geven een mooi beeld van de afhankelijkheid van R_0/R_1 van de geleiderdiameter. Ook is zichtbaar dat de verhouding X_0/X_1 omgekeerd evenredig is met de geleiderdiameter.



5.3 MS-Drieadelige kabels met gescheiden afscherming

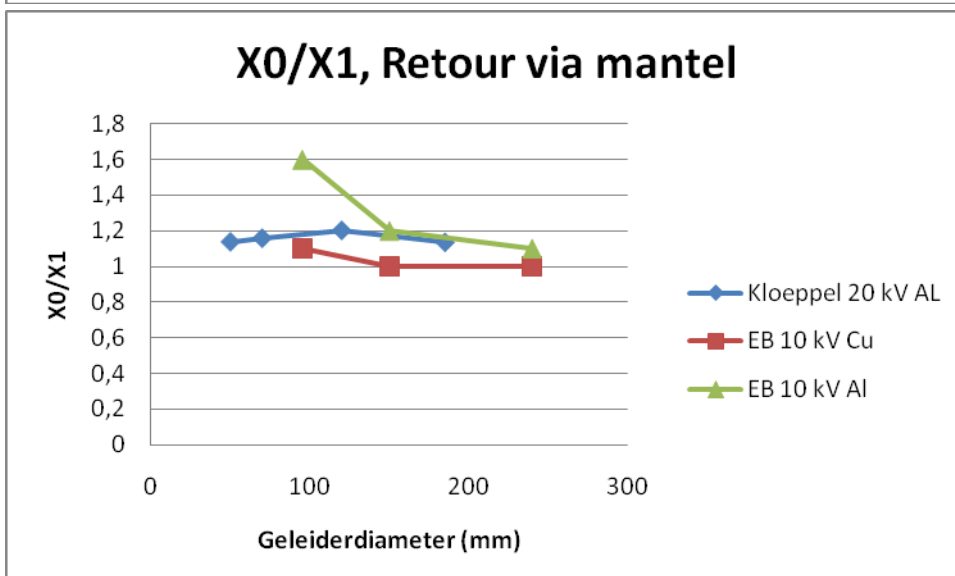
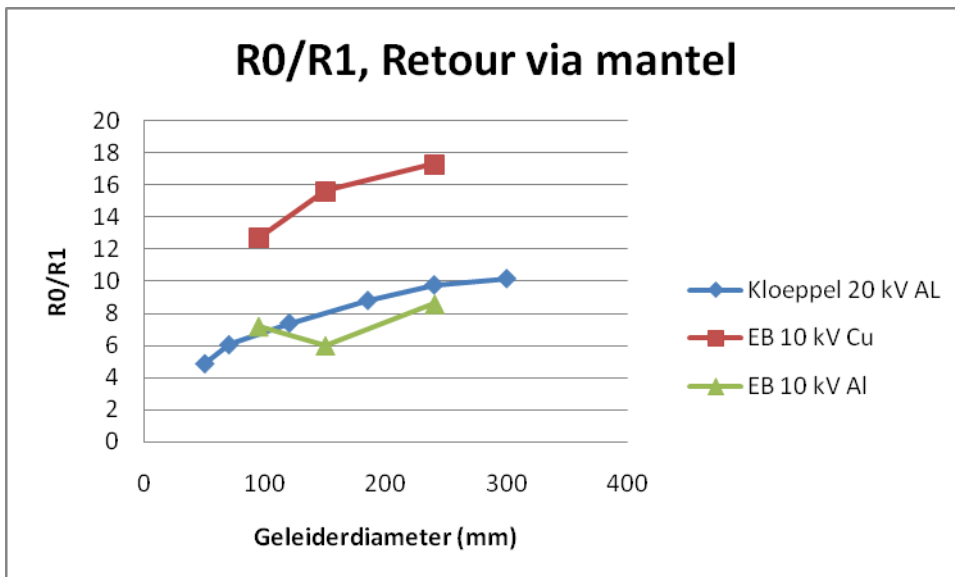
Het retourpad bij MS XLPE-kabels met 3 geleiders kan bestaan uit:

- alleen de afscherming en
- de afscherming parallel geschakeld met de aarde.

Er is in de literatuur alleen informatie gevonden in (Kloepfel, 1965). Er is aanvullende informatie gevonden voor de situatie dat het retourpad bestaat uit alleen de afscherming.

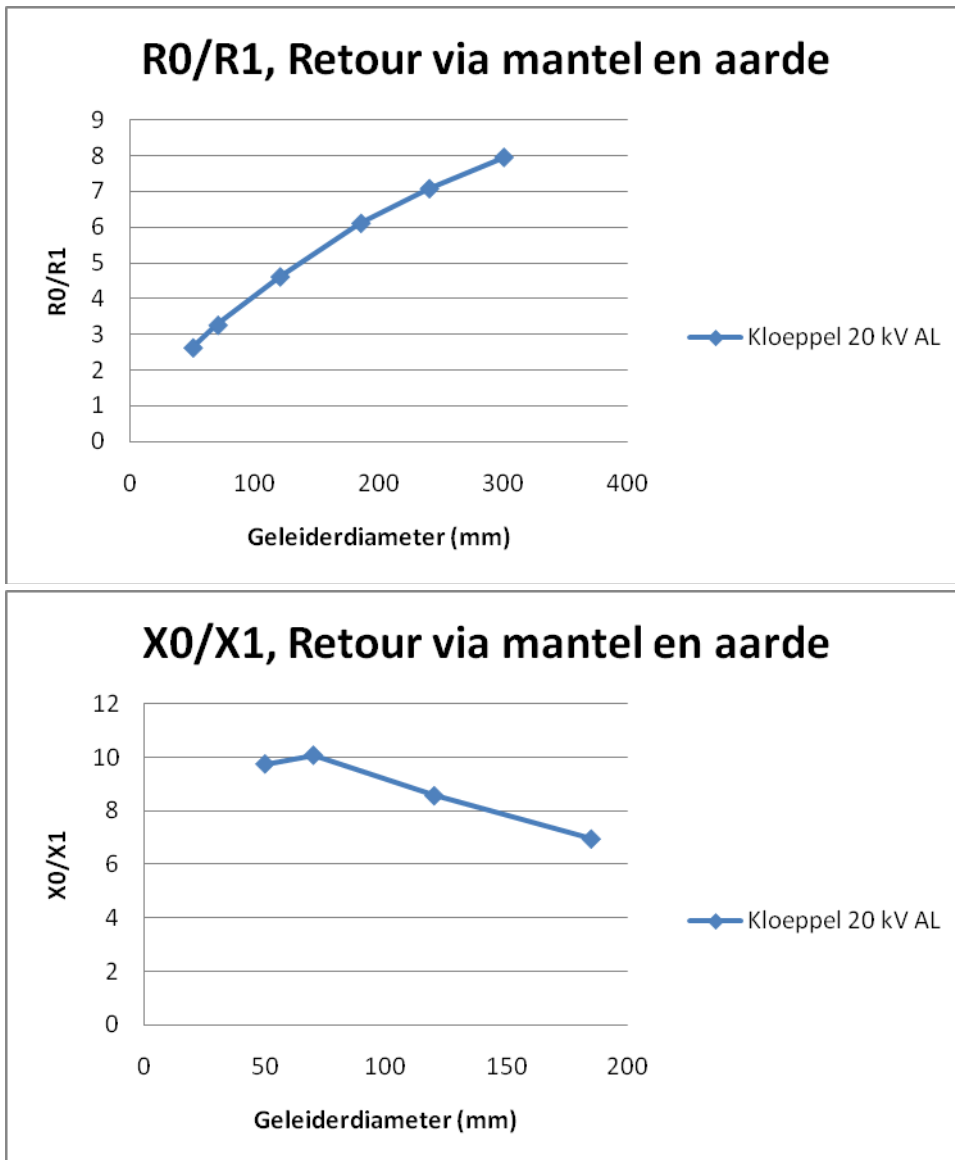
5.3.1 RETOUR VIA SCHERM

In het boek van (Kloepfel, 1965) zijn voor deze situatie homopolaire impedanties van H-kabels met aluminium geleider opgenomen voor 20 kV. De reeksen, genoemd "EB 10 kV Cu" en "EB 10 kV Al", zijn afkomstig van een interne bron. De verhouding R_0/R_1 voor kabels met koperen geleider is groter dan voor kabels met aluminium geleider. Duidelijk zichtbaar is dat de verhouding R_0/R_1 toeneemt met toenemende geleiderdiameter en dat de verhouding X_0/X_1 tussen 1,0 en 1,5 ligt.



5.3.2 RETOUR VIA SCHERM EN AARDE

In het boek van (Kloeppel, 1965) zijn voor deze situatie homopolaire impedanties van H-kabels met aluminium geleider opgenomen voor 20 kV. De specifieke weerstand van de bodem is: $\rho=100\Omega\text{m}$. De curven voor de Al-kabels geven een mooi beeld van de afhankelijkheid van R_0/R_1 van de geleiderdiameter. Ook is zichtbaar dat de verhouding X_0/X_1 omgekeerd evenredig is met de geleiderdiameter.



5.4 MS-Enkeladerige kabels

Het retourpad bij MS enkeladerige XLPE-kabels kan bestaan uit:

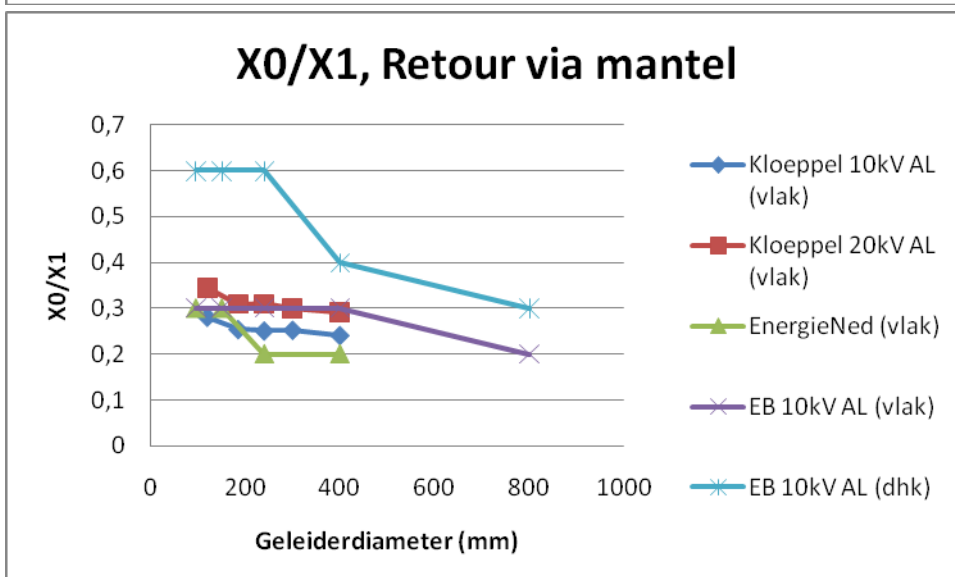
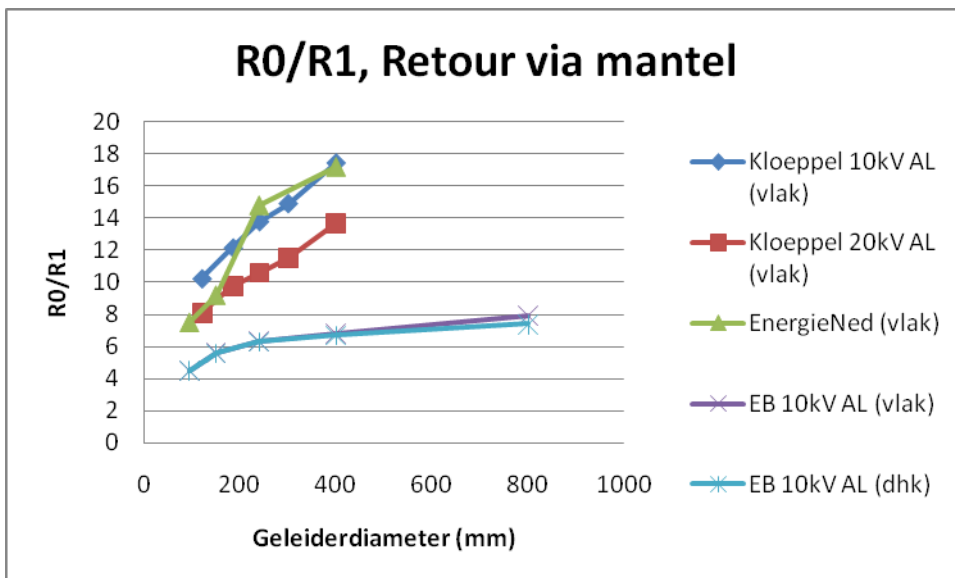
- alleen de afscherming en
- de afscherming parallel geschakeld met de aarde.

De reactanties zijn afhankelijk van de ligging: in plat vlak of in driehoek. Het is niet bekend of de kabels in plat vlak elkaar raken of dat zij met afstand van elkaar liggen. Er is in de literatuur informatie gevonden in (Kloepfel, 1965) en in (EnergieNed, 2001). Er is aanvullende informatie gevonden voor de situatie dat het retourpad bestaat uit alleen de afscherming.

5.4.1 RETOUR VIA SCHERM

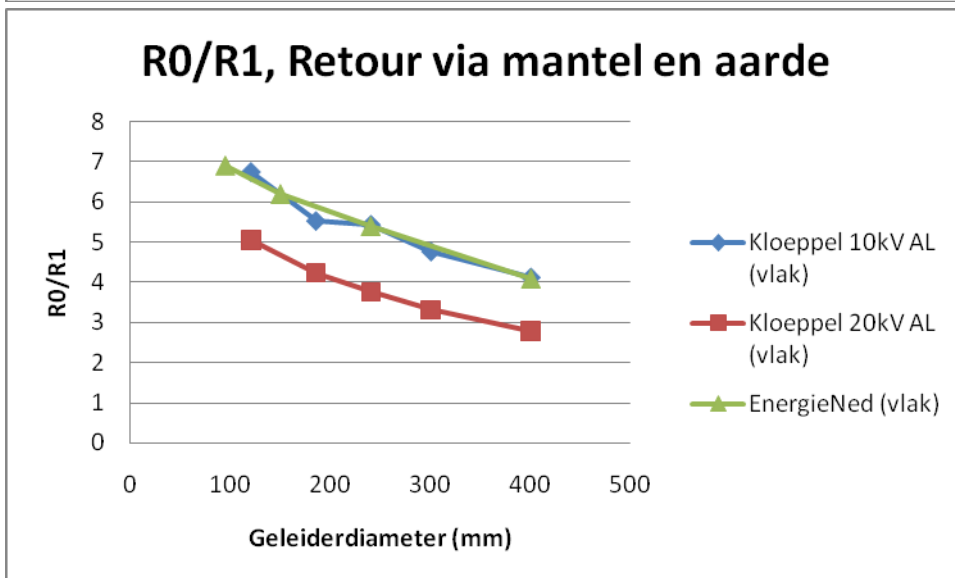
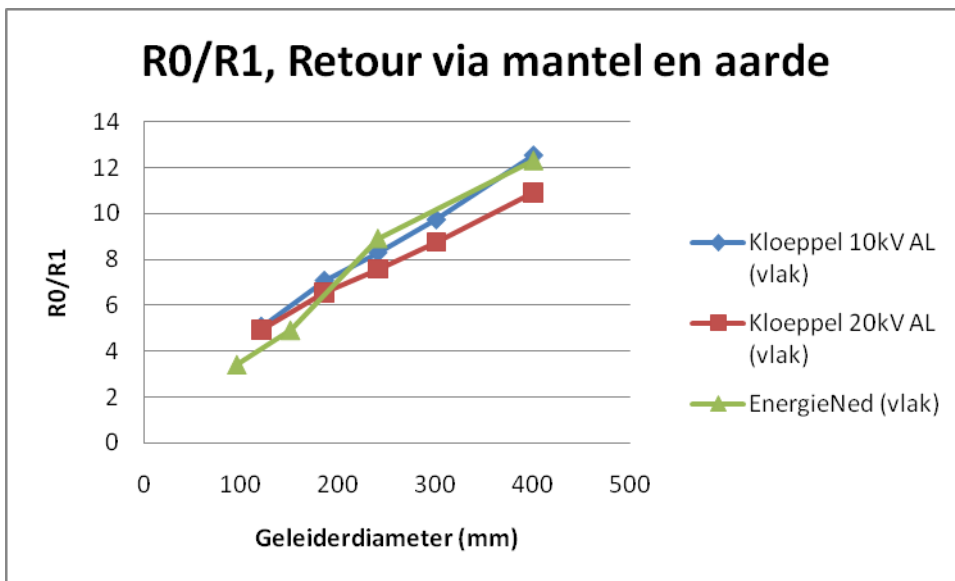
Voor deze situatie hebben de meeste referenties betrekking op ligging in plat vlak. In het boek van (Kloepfel, 1965) zijn homopolaire impedanties van 10 kV en 20 kV kabels met aluminium geleider opgenomen. Het boek van (EnergieNed, 2001) geeft waarden voor “veelgebruikte kabeltypen”, waarschijnlijk met aluminium geleider. De reeksen, genoemd “EB 10 kV AL (vlak)” en “EB 10 kV AL (dhk)”, zijn afkomstig van een interne bron en geven waarden voor respectievelijk in plat vlak en in driehoek gelegde kabels.

Duidelijk zichtbaar is dat de verhouding R_0/R_1 toeneemt met toenemende geleiderdiameter. De verhouding X_0/X_1 is klein en neemt af met toenemende diameter. Conform vergelijkingen (5) en (6) kan de waarde van de homopolaire reactantie bij enkeladerige kabels ongeveer een factor 3 kleiner zijn dan bij drieadrige kabels.



5.4.2 RETOUR VIA SCHERM EN AARDE

Voor deze situatie zijn alleen gegevens gevonden voor ligging in plat vlak. In het boek van (Kloeppeel, 1965) zijn homopolaire impedanties van 10 kV en 20 kV kabels met aluminium geleider opgenomen. De specifieke weerstand van de bodem is: $\rho=100\Omega\text{m}$. Het boek van (EnergieNed, 2001) geeft waarden voor “veelgebruikte kabeltypen”, waarschijnlijk met aluminium geleider. De curven voor de Al-kabels geven een mooi beeld van de afhankelijkheid van R_0/R_1 van de geleiderdiameter. Ook is zichtbaar dat de verhouding X_0/X_1 omgekeerd evenredig is met de geleiderdiameter.



6 CONCLUSIE

De homopolaire impedantie van een kabelverbinding wordt bepaald door het totale circuit van de homopolaire stroom. Het totale circuit bestaat uit de heenweg (de fasegeleiders) en de terugweg (de nulgeleiders, de afscherming en armering van de kabel plus de aarde via de aardelektrodes (onder andere in middenspanningsruimten) en eventueel ander contact met aarde. Met name bij GPLK kabels maken over hun gehele tracé de afscherming en armering contact met de aarde, hetgeen de vaststelling van de homopolaire impedantie compliceert. Bovendien kunnen in de aarde aanwezige geleidende materialen (andere kabels, metalen pijpen en spoorrails) de homopolaire impedantie sterk beïnvloeden.

Het is mogelijk de homopolaire impedantie van een kabel te berekenen voor het geval dat het retourcircuit bestaat uit mantel en eventueel nulgeleider. Dit is ook de waarde die de fabrikant in de meeste gevallen opgeeft. Indien de retourstroom echter (zoals in de meeste praktische gevallen) ook door de aarde vloeit, kan de homopolaire weerstand afnemen en kan de homopolaire reactantie toenemen. De waarde is voor die gevallen zeer moeilijk te berekenen en de berekening is meestal onnauwkeurig.

Voor enkele kabeltypen en situaties zijn in de literatuur gegevens over de verhoudingen van homopolaire tot normale impedanties gevonden. Deze zijn hieronder samengevat. De resultaten variëren voor kabels van kleine naar grote geleiderdiameter.

	Retour nul		Retour nul + mantel		Retour nul + aarde		Retour nul + mantel + aarde	
	R_o/R_1	X_o/X_1	R_o/R_1	X_o/X_1	R_o/R_1	X_o/X_1	R_o/R_1	X_o/X_1
LS 4-ad kabel 25..300 mm	4,0..3,5	3,5..4,0	2,7..3,4	2,5..2,8	2,5..3,5	16..4,0	2,0..3,0	9,0..3,0

	Retour mantel		Retour mantel + aarde	
	R_o/R_1	X_o/X_1	R_o/R_1	X_o/X_1
MS gordelkabel 25..300 mm	4..14	1,7..1,4	2..10	20..6
MS 3-ad XLPE 50..300 mm	7..10	1	2..8	10..7
MS 1-ad XLPE 95..400 mm	7..18	0,3..0,2	3..12	7..4

LITERATUUR

- BICC, 1990 : "Electric cables handbook", E.W.G. Bungay, D. McAllister, 2nd edition, BICC Power Cables Limited, 1990
- EnergieNed, 2001 : "Elektriciteitsdistributienetten", EnergieNed, Kluwer Techniek, 1996, 2001
- Funk, 1962 : "Der Kurzschluss im Drehstromnetz", G. Funk, R. Oldenburg Verlag München, 1962
- Happoldt, 1978 : "Elektrische Kraftwerke und Netze", H. Happoldt & D. Oeding, Springer-Verlag, 1978
- Kloepfel, 1965 : "Kurzschluß in elektrischen Anlagen und Netzen", F.W. Kloepfel, H. Fiedler, VEB Verlag Technik Berlin, 1965.
- Phase, 2009 : "Methode symmetrische componenten", P.M. van Oirsouw, Phase to Phase document 09-069 pmo van 10 maart 2009,
www.phasetophase.nl/pdf/methodesyymmetrischecomponenten.pdf.
- Pirelli, 1999 : "Kabel und Leitungen für Starkstrom", L. Heinhold, R. Stubbe, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1999.
- Provoost, 2003 : "De kortsluitstroom op zijn retour", F. Provoost, Vision Gebruikersdag 16 december 2003
- Van Waes, 2000 : "Experimenteel onderzoek naar stroomverdeling bij kortsluitingen", Vision Gebruikersdag 14 december 2000
- Van Waes, 2003 : "Safety and EMC aspects of grounding", J.B.M. van Waes, Proefschrift TU Eindhoven, 2003