

MASTER

Overspanningsafleiders in een kabeltransmissiesysteem met kruiselings verbonden mantels

Lopez, H.Th

Award date:
1977

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

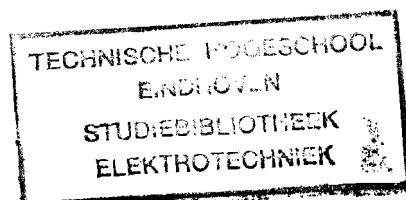
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

2236 bse



Overspanningsafleiders in een
kabeltransmissiesysteem met
kruiselings verbonden mantels.

H. Th. Lopez.

EO.77. A27.

Afstudeerwerk verricht o.l.v.

ir. W.F.J. Kersten.

Verantwoordelijk docent:

prof.ir. G.A.L. van Hoek.

Oktober 1977.

Inhoudsopgave.

1. <u>Inleiding.</u>	3
2. <u>Kriteria.</u>	6
2.1. Algemenen richtlijnen.	7
2.2. Het type overspanningsafleider.	7
2.3. Het aansluiten van de overspanningsafleiders.	8
3. <u>Overspanningsafleiders.</u>	10
3.1. Algemeen.	10
3.2. De opbouw.	12
3.3. De karakteristieken van de overspanningsafleider.	14
3.3.1. De vonkbrug.	14
3.3.2. De spanningsafhankelijke weerstand.	20
3.4. Een model van een overspanningsafleider.	21
3.4.1. Model van een vonkbrug.	21
3.4.2. Model van een spanningsafhankelijke weerstand.	25
3.5. De keuze van de overspanningsafleider.	28
3.6. Heavy duty overspanningsafleiders.	34
4. <u>Berekeningsmethode.</u>	35
4.1. Toestands- en vierpoolvergelijkingen op de kruisverbindingen en kabeleinden.	36
4.2. Overspanningsafleiders op de kruisverbindingen.	42
4.3. De representatie van een hoogspanningslijn.	54
4.4. Damping in het transmissienet.	61
4.5. Bronrepresentatie.	68
5. <u>Berekeningen aan het kabelsysteem in een transmissienet.</u>	70
5.1. Inschakelen.	72
5.2. Ontlading.	74
5.3. Kortsluiting.	75
6. <u>Berekeningsresultaten.</u>	77
7. <u>Nabeschouwing.</u>	88

1. Inleiding.

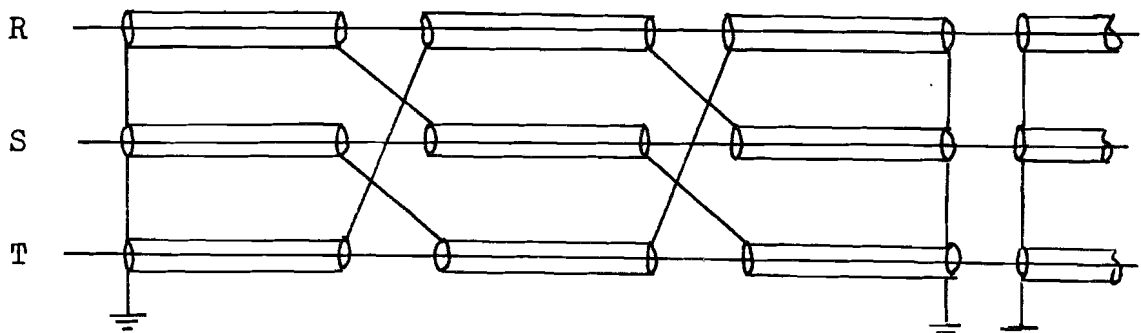
Een kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels, ook wel aangeduid met een -cross bonded- kabelsysteem, is een energie-transmissiesysteem, bestaande uit drie éénfase kabels, waarvan de mantels gesectioneerd en kruiselings doorverbonden, danwel geaard zijn.

Het doel hiervan is een verhoging van de belastbaarheid van de kabels door het beperken van de joulese verliezen in de mantels. Deze verliezen ontstaan in een kabelsysteem met tweezijdig geaarde mantels als gevolg van de kortsluiting van de emk, geïnduceerd door de belastingsstroom. Door de kruisverbinding van de mantelsekties treedt er een cyclische verwisseling van de fasen op, waardoor de vektor emk nagenoeg nul wordt.

In een voorafgaande studie, uitgevoerd door ir. Schouten, zijn verschillende aspecten van dit systeem belicht. [1] Er is tevens een model ontwikkeld voor het digitaal berekenen van de spanningen en de stromen op de kruisverbindingen en kabeleinden.

De resultaten van de berekeningen wezen uit dat er onder bepaalde omstandigheden ontoelaatbare hoge spanningen kunnen ontstaan tussen de mantelsekties onderling en tussen de mantel en aarde.

Zo zal er bij een blikseminslag op een hoogspanningslijn, gekoppeld aan een -cross bonded- kabelsysteem, de spanning tussen de mantelsekties van de getroffen fase op de eerste kruisverbinding ongeveer 46% bedragen van de topwaarde van de overspanningsgolf, althans in het geval de inslag in de direkte nabijheid van het kabelsysteem heeft plaatsgevonden.



Een kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels.

figuur 1.

Ligt het isolatienivo van een 150 kV hoogspanningslijn bij 500 kV, dan zal bij een eventuele blikseminslag de spanning over de mantelsectie-isolator 230 kV en over de mantelisolatie 115 kV kunnen bedragen.

Het afstemmen van het isolatienivo van deze isolatoren op deze spanningen gaat gepaard met onaanvaardbaar hoge kosten. Het zal duidelijk zijn dat bij het toepassen van dit kabelsysteem onder handhaving van een lager isolatienivo er beschermingsmiddelen moeten worden toegepast ter bescherming van de mantelisolatie en de mantel-sectieisolatoren.

De vraag welke middelen ons ter beschikking staan wordt beantwoord in het blad Electra no. 47, waarin een studie over kabelsystemen met kruiselings verbonden mantels, uitgevoerd door een werkgroep van de CIGRE, is gepubliceerd. [12] Daaruit blijkt dat om technische en economische redenen de overspanningsafleider in vergelijking tot de andere middelen het eerste voor deze taak in aanmerking komt.

Dit afstudeerverslag beschrijft een theoretisch onderzoek naar de wisselwerking tussen een 150 kV-kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels en de overspanningsafleiders, aangesloten op de kruisverbindingpunten.

Het geheel wordt geprojecteerd in een meer omvattend elektrisch energie-transmissiesysteem, bestaande uit hoogspanningslijnen en -kabels, waarin verstoringen zoals het inschakelen, kortsluitingen en ontladingen worden gesimuleerd.

Het onderzoek is uitgevoerd met het doel een beter inzicht te verkrijgen in het tot nog toe onbekende verloop van de spanningen en stromen in het kabelsysteem onder invloed van aangesproken overspanningsafleiders, in de netconfiguraties en storingssituaties die aanleiding geven tot de hoogste spanningen in de mantelcircuits en in het bijzonder in de energiedissipatie van de overspanningsafleiders. Dit laatste met het oog op het toetsen van het huidig criterium op dit gebied.

Er zal hierbij gebruik worden gemaakt van het reeds eerder genoemde model voor het digitaal berekenen van spanningen en stromen in een verliesvrije -cross bonded- kabelsysteem zonder overspanningsafleiders [1], welke voor dit onderzoek

zal worden uitgebreid met:

- een model voor een overspanningsafleider op elke kruisverbinding.
- de representatie van een hoogspanningslijn, welke rekening houdt met de optredende reflekties en de wederzijdse koppeling tussen de fasegeleiders.
- een dempingsmechanisme voor de onafhankelijke golven in zowel het kabelsysteem als ook in het eventuele lijncircuit, een en ander gebaseerd op voorafgaande beschouwingen over de karakteristieke grootheden die bij deze modellen en mechanismen een bepalende rol spelen.

2. Kriteria

In de inleiding is aangegeven dat het toepassen van een kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels, voorzien van overspanningsafleiders, in een energie transmissienet een aantal vragen oproept, waarvan het antwoord mogelijk uitsluitend geeft over de specificaties waaraan de overspanningsafleiders dienen te voldoen.

Een aantal vragen kunnen als volgt worden geformuleerd:

- Hoe dienen de overspanningsafleiders aangesloten te worden. Er zijn twee mogelijkheden, een sterschakeling en een driehoekschakeling. Het sterpunt kan eventueel geaard worden.
- Welke invloed hebben de overspanningsafleiders op het verloop van de spanningen en stromen in het systeem.
- Welke storingsomstandigheden zijn van belang voor de hoogste spanningen in het systeem.
- Kan er volstaan worden met het plaatsen van overspanningsafleiders op het eerste kruisverbindingpunt.
- Aan welke criteria dienen de overspanningsafleiders te voldoen, in het bijzonder betreffende het energiedissipatievermogen.

Enkele vragen komen voort uit de gedachtengang dat een bekendheid met die netconfiguraties en storingsomstandigheden, die voorwaarden insluiten voor het ontstaan van extreme spanningen in het mantelcircuit, uitgangspunten geeft bij het ontwerpen van een -cross bonded- kabelsysteem en voor het bepalen van het type overspanningsafleider welke toegepast zal worden.

Een andere faktor is de demping van de spanninggolven. In een lang kabelsysteem is het mogelijk dat de topwaarden van de overspanninggolven zoveel afnemen dat deze geen ontoelaatbare mantelspanningen veroorzaken. Het is dan niet noodzakelijk op dit punt en de volgende kruisverbindingpunten overspanningsafleiders op te stellen.

Er kan daarentegen aangevoerd worden dat een storing in het kabelsysteem zelf, op plaatsen waar er geen overspanningsafleiders zijn opgesteld, fatale gevolgen kan hebben voor de mantelsektie-isolator en in het ergste geval voor de mantelisolatie die onvervangbaar is.

De eerder genoemde werkgroep van de CIGRE heeft in zijn publikatie een aantal van deze vragen aan de orde gesteld en reikt als resultaat een aantal criteria aan voor het bepalen van het type overspanningsafleider, de wijze waarop deze worden aangesloten en van algemene aard. Het uitgangspunt vormt de IEC publikatie no. 71 over isolatie koördinatie.

De criteria worden in de volgende paragrafen aangegeven.

2.1. Algemene richtlijnen.

1. Overspanningsafleiders worden opgesteld in alle kabelsystemen met kruiselings verbonden mantels voor netspanningen van 35 kV en groter.
2. Alle kruisverbindingspunten dienen voorzien te worden van overspanningsafleiders.
3. Indien de hoofdisolatie van de kabel beschermd is door overspanningsafleiders dan is de invallende spanningsgolf maximaal gelijk aan het beschermingsnivo van de overspanningsafleiders. (IEC 99)
Is echter het hoofdcircuit niet beschermd, dan zal de spanningsgolf maximaal gelijk kunnen zijn aan het isolatienivo voor bliksemspanningen van de hoofdisolatie.
4. De overspanningsafleiders worden zodanig opgesteld dat zij eenvoudig toegankelijk zijn voor controle of onderhouds-doeleinden.

2.2. Het type overspanningsafleider.

1. De bedrijfsspanning van de overspanningsafleider dient groter dan of minimaal gelijk te zijn aan de hoogste stationaire 50 Hz. spanning over de overspanningsafleider die onder een der volgende situaties ontstaat: - een volle belasting van de kabels.
- een noodstroomsituatie.
- een kortsluiting.

In praktisch alle gevallen zal de kortsluiting bepalend zijn. De op deze wijze bepaalde bedrijfsspanning garandeert het doven van de overspanningsafleider onder deze omstandigheden, zo deze eerder om andere redenen heeft aangesproken. Van belang is ook de wijze waarop de overspanningsafleiders zijn aangesloten. (ster- of driehoekschakeling).

2. De overspanningsafleiders in het mantelcircuit dienen, evenals die welke eventueel in het hoofdcircuit zijn opgesteld, te voldoen aan de stroomimpulstest van lange duur. Deze overspanningsafleiders worden aangeduid met de term -heavy duty-.

De keuze van de overspanningsafleider legt het isolatienivo van het systeem vast. Deze wordt gelijk gesteld aan de hoogste van de volgende spanningen:

- de aanspreekspanning voor bliksemgolven (1.2/50 usek.).
- de restspanning bij een stroom van 10 kA, volgens de 8/20 usek. golf.
- de aanspreekspanning voor golven met een gespecificeerde steilheid, gedeeld door 1.15 (volgens IEC voorschriften).

2.3. Het aansluiten van de overspanningsafleiders.

De verschillende mogelijkheden voor het aansluiten van de overspanningsafleiders in het kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels zijn weergegeven in figuur 2.

Welke mogelijkheid de voorkeur verdient, wordt mede bepaald door de resultaten van berekeningen van de spanning over, de stroom door en de energiedissipatie van de overspanningsafleiders, welke tot nog toe niet zijn uitgevoerd. Er zijn dan ook geen voorschriften of aanbevelingen op dit gebied. Een beschouwing op andere punten, die eveneens een rol spelen bij de beoordeling van beide mogelijkheden geeft het volgende resultaat:

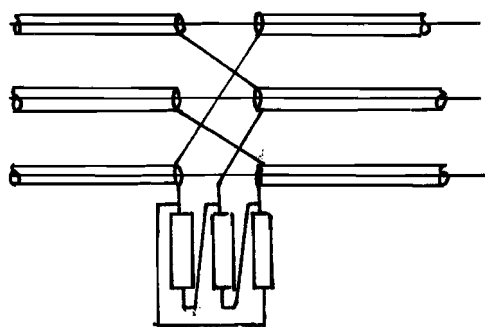
- De driehoekschakeling.

Er is over elke mantelsectie-isolator een overspanningsafleider geplaatst. Zijn bedrijfsspanning wordt afgestemd op de maximale netfrequentie spanning, die onder normale of storingsomstandigheden optreedt over de mantelsectie-isolator.

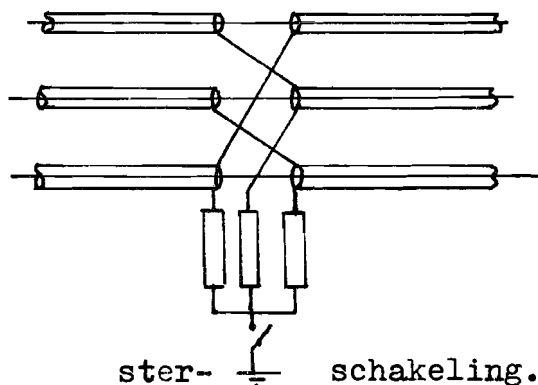
- De sterschakeling.

Bij een sterschakeling staan er twee overspanningsafleiders in serie over elke mantelsectie-isolator. De bedrijfsspanning wordt nu afgestemd op de halve waarde van de spanning die bepalend is onder de driehoekschakeling. Indien het sterpunt geaard is, wordt de bedrijfsspanning van de overspanningsafleider bepaald door de maximale netfrequentie spanning tussen mantel en aarde die er kan ontstaan.

Daar de bedrijfsspanning voor de overspanningsafleiders in een driehoekschakeling hoger is dan bij een sterschakeling zullen deze ook duurder in aanschaf zijn. Uit economisch oogpunt verdient de sterschakeling daardoor de voorkeur.



driehoekschakeling



ster- schakeling.

figuur 2.

Belangrijk zijn tevens de verbindingskabels van het kruisverbindingspunt naar de overspanningsafleiders.

Deze kabels hebben een golfimpedantie die groter kan zijn dan de resulterende golfimpedantie van de energiekabels en ook groter dan de weerstand van de overspanningsafleider.

De beveiliging valt dan enigszins weg aangezien bij een invallende overspanningsgolf de spanning op het kruisverbindingspunt oploopt als gevolg van de positieve reflektiefactor, terwijl pas na een looptijd van de verbindingskabels de spanninggolf de overspanningsafleider bereikt en weer een looptijd later het kruisverbindingspunt de invloed van de lage weerstand van de overspanningsafleider ondervindt, zo deze heeft aangesproken.

De lengte van de verbindingskabels dienen dus zo kort mogelijk te zijn. In de praktijk echter moet rekening worden gehouden met een afstand van tenminste 10 meter.

Het effect kan ondervangen worden door het toepassen van overspanningsafleiders met een lager aanspreekniveau.

De bedrijfsspanning zal daardoor ook lager zijn. Dit is echter in strijd met de onder 2.2. aangegeven richtlijnen, zodat de enige mogelijkheid een verhoging van het isolatienivo van de mantel-(sektie) isolator is.

3. Overspanningsafleiders.

In de volgende beschouwingen over de overspanningsafleider worden het algemene gedrag, de karakteristieke eigenschappen en een op deze eigenschappen afgestemd model besproken.

3. 1. Algemeen.

Overspanningsafleiders worden in elektrische energie systemen opgenomen ter bescherming van de netinstallaties welke blootgesteld kunnen worden aan transiënte overspanningen, waarop het isolatienivo van de betreffende installaties niet berekend is.

De beschermingsgraad is afhankelijk van de keuze van het type overspanningsafleider, de plaats waar deze wordt opgesteld, de netkonfiguratie en van de amplitude en tijdsafhankelijkheid van de optredende overspanning.

Het zijn voornamelijk de apparaten in onderstations, zoals transformatoren, die in aanmerking komen voor deze bescherming, dit met het oog op invallende spanningsgolven van atmosferische oorsprong op lijnen en de verplaatsing van deze golven naar de onderstations.

Hier treedt veelal een verhoging op van de golfimpedantie waardoor er als gevolg van de daarmee samenhangende positieve reflectiecoëfficiënt de resulterende waarde van de spanning tot maximaal de dubbele waarde van de invallende golf kan oplopen.

In het verleden werden overspanningsafleiders ontworpen om overspanningen van korte duur, ontstaan door een atmosferische ontlading te begrenzen. De ontwerpcriteria van deze overspanningsafleiders werden dan ook gebaseerd op het vermogen tot het begrenzen van deze bliksemoverspanningen, tot het afleiden van de inherente lading naar aarde en tot het onderbreken van de stroom na de golf.

De stationaire en niet-stationaire overspanningen, die ontstaan als gevolg van al dan niet foutieve schakelhandelingen of kortsluitingen in het net vormden geen probleem.

De topwaarden van deze overspanningen staan in zekere relatie tot de netspanning en deze was destijds vrij laag. Bovendien hadden de netten een relatief hoog isolatienivo.

Spreekt een voor dit doel ontworpen overspanningsafleider aan, als gevolg van een blikseminslag op een lijn, dan vloeit er allereerst een ontladingsstroom. De spanning over de overspanningsafleider blijft hierbij begrensd tot een waarde die kleiner of hoogstens gelijk is aan een kenmerkende waarde, de restspanning genaamd.

De lading wordt naar aarde afgeleid, waarna de stroom nog binnen een halve periode overgaat in een netfrequentie reststroom, veroorzaakt door de netspanning. Bij nuldoorgang van de spanning en stroom van de overspanningsafleider, die overigens in fase zijn, dient de overspanningsafleider de stroom te onderbreken en de oorspronkelijke situatie te herstellen.

Algemeen werd daarom aanvaard dat de bedrijfsspanning van de overspanningsafleider bepaald werd door de eis dat de spanning hierover onder geen enkele omstandigheid deze bedrijfsspanning gedurende een tijdsinterval langer dan een halve periode mocht overschrijden.

Naarmate echter de te transporteren energien en de transportafstanden toenamen, werd om economische redenen de transmissiespanning verhoogd en tegelijkertijd werd om dezelfde redenen er naar gestreefd het isolatienivo van deze systemen te verlagen.

Deze trend leidde er toe dat niet meer de kortdurende overspanningen de ontwerpcriteria bepaalde, maar juist de langdurige overspanningen.

Om deze redenen heeft de overspanningsafleider de laatste tientallen jaren een grote ontwikkeling doorgemaakt.

De hedendaagse overspanningsafleiders worden nu gekonstrueerd om te voldoen aan een veel groter aantal eisen, waaronder de eis van bestendigheid tegen langdurige overspanningen en de daarmee gepaardgaande zware thermische belasting zeker een belangrijke plaats inneemt.

Alvorens in te gaan op de kenmerken van deze overspanningsafleiders volgt eerst een beschrijving van de elementen waaruit deze zijn opgebouwd.

3. 2. De Opbouw.

Overspanningsafleiders zijn samengesteld uit een aantal identieke eenheden, afhankelijk van de netspanning. Deze eenheden bestaan op zich weer uit funktionele elementen, de vonkbrug en de niet-lineaire weerstand, die in serie geschakeld worden en voor een bepaald nominale spanning gekonstrueerd zijn.

De vonkbrug funktioneert als spanningsafhankelijke schakelaar. Onder normale omstandigheden vloeit er geen stroom door de vonkbrug.

Overschrijdt de spanning over de kontakten van een dergelijk vonkbrug een zekere waarde, de overslagspanning, dan treedt er tussen de kontakten een overslag op.

Er ontstaat een geleidende verbinding in de vorm van een lichtboog tussen het net en de spanningsafhankelijke weerstand.

Bij de meest eenvoudige vormen van overspanningsafleiders uit het verleden werd de vonkbrug direkt tussen het net en aarde geschakeld.

Bij een overslag ontstond zo een direkte aardsluiting.

Om deze redenen werden deze overspanningsafleiders voornamelijk in netten met Petersen-spoelen toegepast.

Er ontstonden niettemin moeilijkheden bij een aanspreken van overspanningsafleiders in twee fasen tegelijkertijd.

De huidige overspanningsafleiders zijn niet alleen uitgerust met spanningsafhankelijke weerstanden, maar ook met aktieve vonkbruggen.

Deze vonkbruggen zijn voorzien van een shunt-spoel die in eerste instantie, d.i. direkt na de overslag, geen invloed heeft op het verloop van spanning en stroom, vanwege de hoge dI/dt van de stroom.

Na verloop van enige tijd, in het algemeen variërend van 200 usek. tot 1000 usek. na de overslag, zal de dI/dt afnemen, immers de overtollige lading is afgevoerd en de ontladingsstroom gaat over in de reststroom. Door de shunt-spoel vloeit er nu ook stroom.

Er ontstaat een magnetisch veld die de boog in de vonkbrug door elektrodynamische krachtswerking verlengt. De spanning over de vonkbrug neemt hierdoor toe.

Dit heeft weer tot gevolg dat de spanning over de weerstand daalt, de weerstandswaarde toeneemt en de stroom in grote afneemt.

Dit proces kan zich voortzetten totdat de stroom zo ver is afgenomen dat de boog niet meer gehandhaaft wordt en blust. De oorspronkelijke situatie is weer hersteld.

Een actieve vonkbrug heeft de eigenschap de reststroom door de overspanningsafleider te kunnen begrenzen of zelfs te onderbreken nog voor de nuldoorgang. Dit is een van de voordelen van deze brug.

Een tweede voordeel heeft betrekking op het energiedissipatievermogen. De boog is nu actief betrokken bij de energiedissipatie, waardoor het energiedissipatievermogen van de overspanningsafleider toeneemt.

Teneinde de overslagspanningen binnen een begrensde marge te houden worden de vonkbruggen ook voorzien van shuntweerstand met een hoge weerstandswaarde en eventueel van shuntcapaciteiten.

De overslagspanning wordt voornamelijk beïnvloed door de vervuiling van de contacten en door de vochtigheidsgraad van de gasvormige isolator tussen de contacten.

De weerstanden van de overspanningsafleiders zijn gesinterde siliciumcarbide schijven. Deze weerstanden hebben een spanningsafhankelijke weerstandswaarde, hetgeen tot uiting komt in de niet-lineaire karakteristiek van spanning en stroom van de weerstand. Naarmate de spanning over de weerstand hoger wordt, neemt de weerstandswaarde af en omgekeerd. Door deze gunstige eigenschap zijn deze weerstanden zeer geschikt voor toepassingen in overspanningsafleiders, waar de weerstand een hoge waarde dient te hebben bij de nominale bedrijfsspanning, maar waar een lage weerstandswaarde een vereiste is bij zeer hoge spanningen. Belangrijk is ook de invloed van de opgenomen energie door de weerstand op de $u-i$ karakteristiek hiervan. Dit komt echter later aan de orde.

Het aantal basiseenheden nodig voor het samenstellen van een overspanningsafleider die geschikt is voor een hogere spanning dan van de basiseenheid wordt verkregen uit het quotiënt van de gewenste bedrijfsspanning op de spanning van de basiseenheid.

3.3. De karakteristieken van de overspanningsafleider.

De funktie en eigenschappen van de afzonderlijke elementen waaruit een overspanningsafleider is opgebouwd, worden weergegeven door de verschillende karakteristieken die het verband geven tussen de grootheden die in dit verband een rol spelen, zoals de spanning, de stroom en de tijd.

Zowel de vonkbrug als de spanningsafhankelijke weerstand hebben een gekompliceerd gedrag. Een volledige beschrijving van de eigenschappen vereist bekendheid met alle factoren die invloed hebben op het gedrag van een overspanningsafleider en dit leidt tot het invoeren van een groot aantal parameters.

Voor kwalitatieve beschouwingen kan men zich echter beperken tot de belangrijkste eigenschappen.

De karakteristieken die aan de orde komen zijn voor:

3.3.1. De vonkbrug.

a. De overslagkarakteristiek.

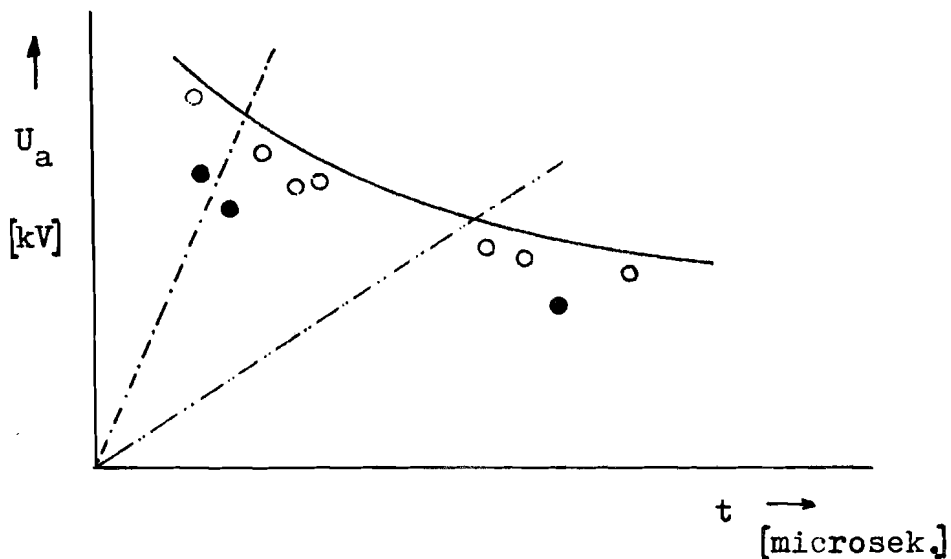
Al eerder is aangegeven dat de overslagspanning niet konstant is. Belangrijker is echter het verband dat er bestaat tussen de overslagspanning en de steilheid van de transiënten. Voor overspanningen met een hoge steilheid treedt er een aanspreekvertraging op. Dit heeft tot gevolg dat de overspanningsafleider in dit geval bij een hogere spanning aanspreekt. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in de oorzaak van de overspanning.

Zo wordt er gedefiniëerd een:

- spanningsfronttijd-karakteristiek voor 1.2/50 usek. spanningsgolven.
- spanningsfronttijd-karakteristiek voor schakeloverspanningen, gekenmerkt door verschillende fronttijden vastgelegd door voorschriften.
- overslagspanning voor netfrequentie spanningen.

De bovengenoemde karakteristieken geven de overslagspanning en de aanspreekvertraging aan bij een gegeven steilheid.

Deze karakteristieken en de daarin opgenomen overslagspanning voor netfrequentie overspanningen vormen de overslagkarakteristiek van een overspanningsafleider. Overigens is de overslag in een vonkbrug enkel met de statistische grootheden μ en σ , de gemiddelde waarde respectievelijk de spreiding, korrekt te beschrijven. Ook de polariteit van de overspanning heeft invloed op de overslag.



t = tijd

U_a = Overslagspanning (aanspreekspanning)

○ test resultaten

● test resultaten bij tegengestelde polariteit.

spanningsfronttijd-karakteristiek voor 1.2/50 usek golven.

figuur 3.

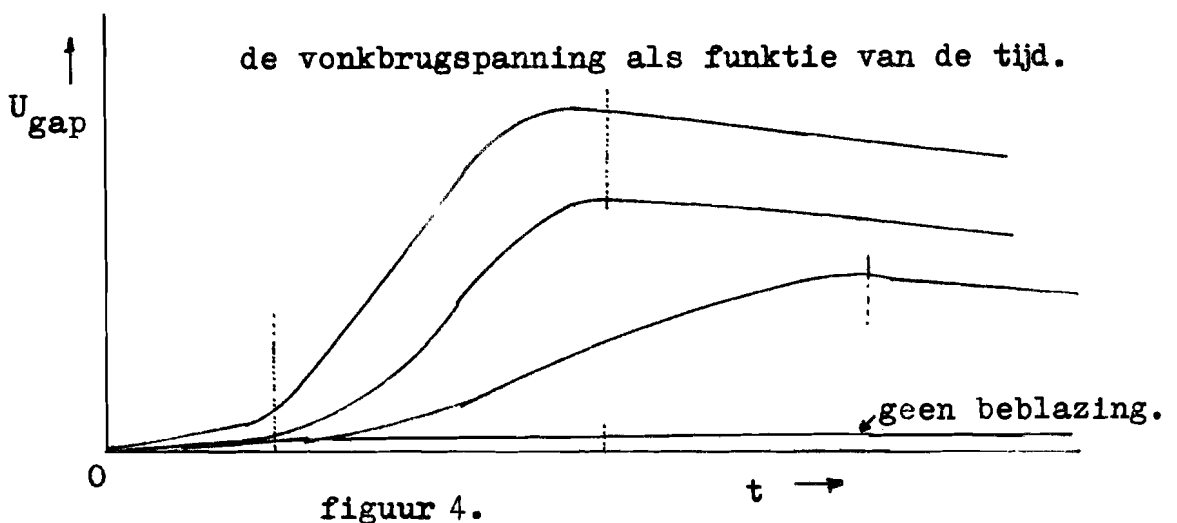
b. De spanningstijd-karakteristiek.

Deze karakteristiek geeft het verloop van de spanning over de vonkbrug weer als functie van de tijd na het aanspreken van de overspanningsafleider. In het algemeen verloopt deze spanning als afgebeeld in figuur 4.

Direkt na de overslag is de spanning over de vonkbrug vrij laag. Is de vonkbrug niet met shunt- of blaasspoelen uitgerust, dan zal de spanning verder nagenoeg niet veranderen. Bij een aktieve vonkbrug zal daaraantegen de boogspanning na ongeveer 200 usek. tot 1000 usek. na een overslag, toenemen onder invloed van de elektrodynamische krachtswerking van het opgebouwde magnetisch veld, totdat er een bepaald maximum wordt bereikt.

Het verdere verloop is verder onafhankelijk van de tijd, er is hoogstens een lichte daling waar te nemen.

Het exakte verloop van de spanning is afhankelijk van een groot aantal factoren, die door laboratoriumproeven kunnen worden bepaald.



Wordt het tijdsverloop van de spanning over de vonkbrug onderverdeeld in drie tijdsintervallen, dan kan het volgende worden opgemerkt:

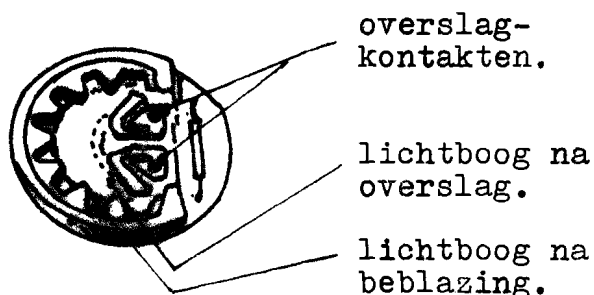
1. In het eerste interval, d.i. direkt na de overslag wordt de vonkbrugspanning bepaald door het ontwerp. De boog staat direkt tussen de overslagkontakten. Het aantal kontakten en de afstand tussen de kontakten bepalen de lengte van de boog en daarmee ook de spanning. Ook de configuratie van de kontakten kan hierbij een rol spelen. Een tweede faktor is de koeling van de boog, door stijging of circulatie van de hete gas rondom de boog en de koeleigenschappen van de verschillende materialen

waaruit de vonkbrug is opgebouwd. In de literatuur wordt aangegeven dat de spanning in dit geval 2% tot 5% bedraagt van de blusspanning. Onder de blusspanning wordt verstaan de spanning van de netfrequentie, waarbij de vonkbrug de volgstroom zeker kan onderbreken. De blusspanning komt dus overeen met de al eerder ingevoerde bedrijfs-spanning.

2. In het tweede tijdsinterval stijgt de spanning van nagenoeg nul tot aan een maximale waarde. Het tijdstip waarop de stijging aanvangt is afhankelijk van het verloop van de overspanningsgolf en met name van de afgeleide van de ontladingsstroom.

De spanningssteilheid wordt mede bepaald door de afgeleide en de topwaarde van de stroom door de overspanningsafleider. Het maximum van de spanning is afhankelijk van de grootte van de stroom door de overspanningsafleider en van het aantal en de afmetingen van de vonkbruggen.

Ook de beblazingsgraad heeft een grote invloed. De maximale spanning wordt namelijk bepaald door de maximale lengte die de boog kan aannemen, daartoe gedwongen door het magnetisch veld. De boog verplaatst zich daarbij van de overslagkontakten naar de brandkontakten die een tandvormig structuur hebben. De oorspronkelijke boog verdeelt zich in een aantal deelbogen tussen deze kontakten.



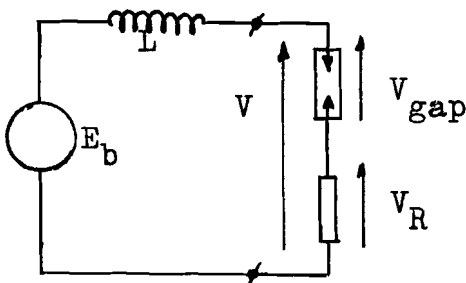
Vonkbrug.

figuur 5.

3. In het derde tijdsinterval zal de vonkbrugspanning slechts langzaam afnemen. De spanningsdaling is een gevolg van de verhitting van de verschillende materialen en is dus afhankelijk van de koeleigenschappen hiervan.

c. De spannings-stroom karakteristiek.

Na een ontlading voert de overspanningsafleider een netfrequentie volgstroom. Het vervangingsschema van het systeem is weergegeven in figuur 6. Dit schema geldt ook indien de overspanningsafleider aanspreekt op netfrequentie overspanningen.



De vergelijking die hier geldt, is:

$$E_b = V + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

met:

$$V = V_{gap} + V_R \quad (2)$$

Vervangingsschema voor 50 Hz spanningen.

figuur 6.

De bovenstaande vergelijking kan worden herschreven tot:

$$\frac{di}{dt} = \frac{E_b - V}{L} \quad (3)$$

Hieruit blijkt dat in het geval de bronspanning \$E_b\$ groter is dan de spanning over de overspanningsafleider de stroom zal toenemen. De grootte van de stroom wordt vastgelegd door de volgende integraal:

$$I = \frac{1}{L} \int (E_b - V) dt \quad (4)$$

De stroom wordt weer nul indien voldaan wordt aan:

$$\int_0^{T_1} (E_b - V) dt = \int_{T_1}^{T_2} (V - E_b) dt \quad (5)$$

waarbij: T_1 = het tijdstip waarop de spanning V over de overspanningsafleider groter wordt dan de bronspanning.

T_2 = het tijdstip waarop de stroom nul wordt.

Vergelijking (5) geeft aan dat het mogelijk is de stroom in elke situatie naar nul te dwingen door de vonkbrugspanning snel toe te laten nemen tot een waarde die minstens gelijk zo niet groter is dan de bronspanning, althans indien de spanning over de weerstand van de overspanningsafleider buiten beschouwing gelaten wordt.

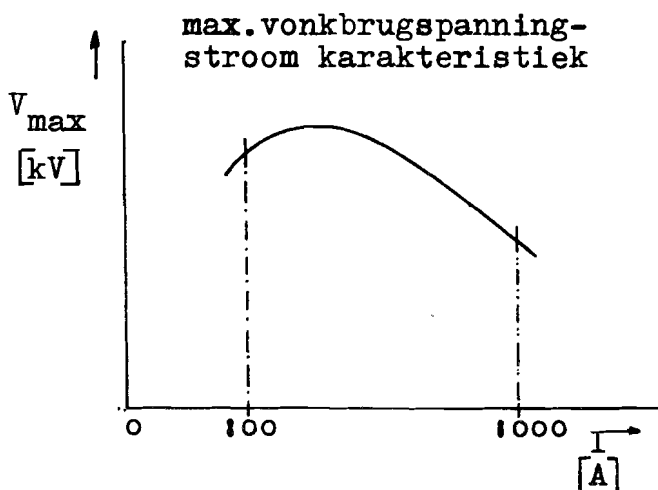
Een veelal gestelde eis aan een overspanningsafleider is het vermogen tot het onderbreken van de volgstroom bij een spanning gelijk aan de topwaarde van de bedrijfsspanning. Dit houdt in dat de vonkbrug een spanning $U_b\sqrt{2}$ moet kunnen ontwikkelen, maar ook enigszins handhaven ondanks het feit dat de stroom door de blaasspoel afneemt.

Daaraantegen mag de resulterende spanning over de overspanningsafleider, de restspanning, bij een hoge stroom niet het gegarandeerde beschermingsnivo overschrijden.

Veronderstellen we een beschermingsnivo van $1,6xU_b$, dan zal bij een hoge stroom en een niet verantwoorde verwaarlozing van de spanning over de weerstand, de vonkbrugspanning zeker niet hoger mogen worden dan $1,6xU_b$.

Volgens het bovenstaande worden enigszins tegenstrijdige eisen aan de vonkbrug gesteld.

Niettemin kan in beperkte mate hieraan voldaan worden door het ontwerp van de vonkbrug zodanig aan te passen dat het verband tussen de maximale spanning en de stroom vastgelegd wordt door de karakteristiek afgebeeld in figuur 7.



Bij een hoge stroom zal de boog zich over de tandvormige contacten heen instellen, waardoor de lengte van de boog en dus ook de spanning afneemt.

figuur 7.

3.3.2. De spanningsafhankelijke weerstand.

De karakteristiek die het gedrag van deze weerstand weergeeft is de spannings-stroom karakteristiek. Vanwege de spanningsafhankelijke weerstandswaarde is het verloop hiervan niet lineair.

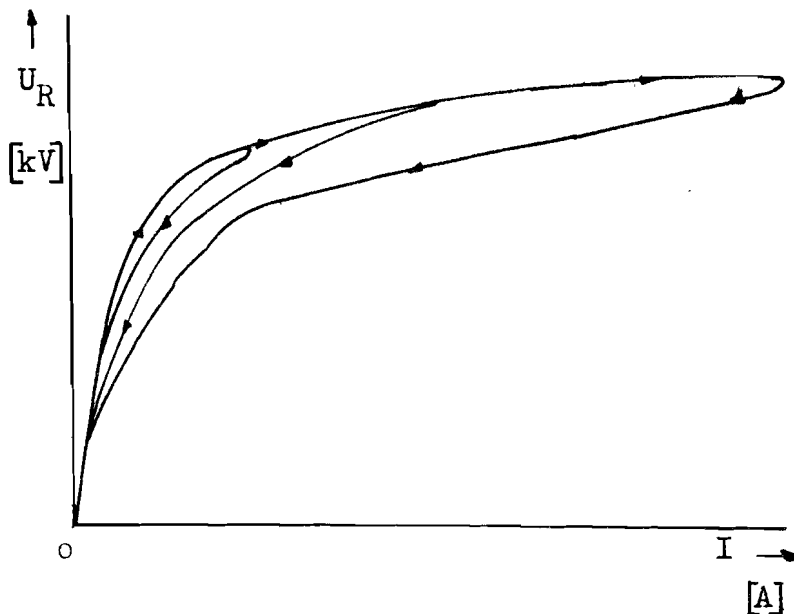
Indien de energiedissipatie van de weerstand in eerste instantie buiten beschouwing blijft, zal het verloop aangeduid kunnen worden als verzadigend bij hogere stromen en onafhankelijk van toe of afname van de stroom.

Bij een herhaald inschakelen van de spanning over de weerstand of een hoge belasting zal de energiedissipatie van de weerstand invloed uitoefenen op het verloop van de karakteristiek.

Bij een overeenkomstige stroom blijkt de spanning over de weerstand verschillend te zijn voor toe- respectievelijk afnemende stroom. Het verschil is groter naarmate de opgenomen energie ook groter is.

Dit effect resulteert in het ontstaan van hysteresislussen in de karakteristiek. Zie figuur 8.

De eigenkapaciteit van deze weerstanden is in dit toepassingsgebied te verwaarlozen. Uit metingen blijkt dat bij een stroomsteilheid van $4 \cdot 10^{11}$ A/sek. de weerstand in 20 nsek. zijn statische waarde bereikt. [5]



u-i karakteristiek van de spanningsafhankelijke weerstand.

figuur 8.

3.4. Een model van een overspanningsafleider.

Onderzoek naar het gedrag van elektrische systemen met behulp van analoge of digitale simulatie vereist nauwkeurige modellen van de apparaten voorkomend in het elektrisch systeem.

De ontwikkeling van een model dient gebaseerd te worden op een gedegen theoretisch onderzoek naar en metingen van de karakteristieke eigenschappen van het werkelijke apparaat.

Indien de eigenschappen bekend zijn, zal de volgende fase zijn het formuleren van de eisen waaraan het model minimaal dient te voldoen.

Enkele algemene eisen die aan het model gesteld kunnen worden, zijn:

- De representatie van het werkelijke apparaat dient zo nauwkeurig mogelijk te zijn.
- Het aantal parameters dient beperkt te blijven tot een gering aantal.
- De flexibiliteit van het model dient zo groot mogelijk te zijn, teneinde alle typen te kunnen representeren.

Het ontwerp van een model van een overspanningsafleider vereist uiteraard dezelfde procedure. Er wordt in dit geval echter, voor wat betreft de metingen, hiervan afgeweken en gebruik gemaakt van de in literatuur beschreven onderzoek-resultaten. [2 t/m 7]

Voor de afzonderlijke elementen van de overspanningsafleider wordt in het volgende een model gegeven, waarvan verondersteld mag worden dat deze samen het gedrag van een overspanningsafleider in het systeem en het doel dat ons voor ogen staat voldoende nauwkeurig simuleren.

De volgende aspecten komen aan de orde:

- Het overslagmechanisme; een vereenvoudiging hiervan.
- Het gedrag van spanning en stroom van de vonkbrug.
- Het niet-lineaire gedrag van de weerstand.

3.4.1. Model van een vonkbrug.

De overslagkarakteristiek wordt hier vervangen door een konstante overslagspanning, die overigens wel instelbaar is.

Het verloop van de spanning als functie van de tijd wordt evenals in het voorgaande onderverdeeld in drie intervallen, en benaderd door rechte lijnen zoals afgebeeld in figuur 9. Op het moment van aanspreken is $t = 0$.

Te onderscheiden zijn:

1. Het interval $0 \leq t < T_1$.

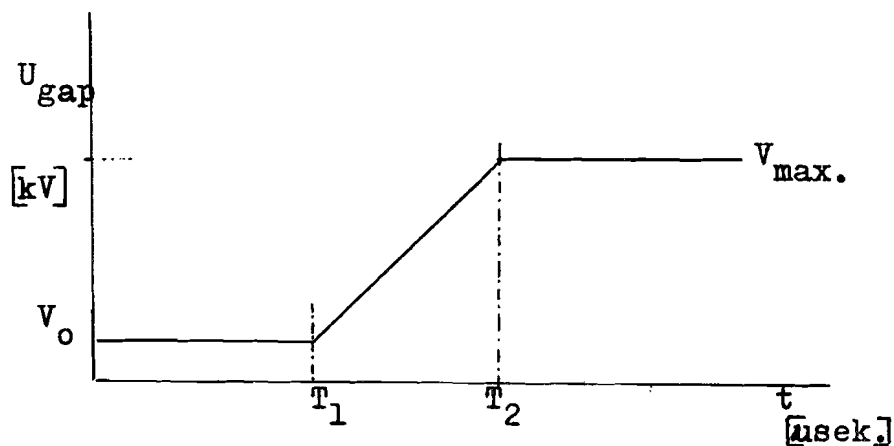
In dit interval is de spanning over de vonkbrug laag in vergelijking tot de normale bedrijfsspanning. De spanning, aangeduid met V_0 , verloopt onafhankelijk van de tijd. Er kan een willekeurige waarde aan toegekend worden. In de literatuur wordt in enkele gevallen de waarde nul toegekend.

2. Het interval van $T_1 \leq t < T_2$.

In dit interval loopt de vonkbrugspanning op van V_0 tot V_{\max} . Aan T_1 , T_2 , V_0 en V_{\max} kunnen in principe willekeurige waarden worden toegekend. Praktische waarden van T_1 liggen in het interval van 200 $\mu\text{sek.}$ tot 1000 $\mu\text{sek.}$, afhankelijk van onder andere de beblazingsgraad en de steilheid van de ontladingsstroom.

3. Het interval $t \geq T_2$.

In dit interval heeft de vonkbrugspanning zijn maximale waarde bereikt en handhaaft deze totdat de stroom door de exerspanningsafleider onderbroken is.



Benaderde u-t karakteristiek van de vonkbrug.

figuur 9.

Met dit model kunnen, door de juiste waarden toe te kennen aan de diverse parameters, de meest uiteenlopende typen vonkbruggen worden gesimuleerd, die zich onderling onderscheiden door een verschil in magnetische beblazing en in afmetingen. Ook de niet-aktieve vonkbrug kan worden gerepresenteerd door T_1 groter te kiezen dan de beschouwingstijd.

In de literatuur worden voor het aangeven van de grootte van de magnetische beblazing, aanduidingen gebruikt als: hoog, gemiddeld en laag.

Voor de keuze van de juiste parameterwaarden kan gebruik worden gemaakt van de karakteristieken weergegeven op pagina 24.

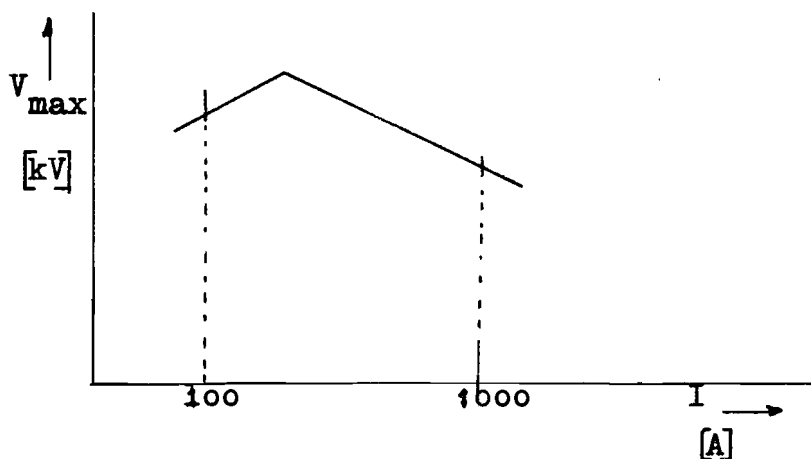
Dit model heeft ook enige beperkingen:

- Het is geen dynamisch model. Voor verschillende situaties dienen de parameters aangepast te worden.
- De overslagkarakteristiek is niet gerepresenteerd.
- De stroomafhankelijkheid van de maximale vonkbrugspanning (V_{\max}) is buiten beschouwing gelaten.

Het is eventueel mogelijk het laatste te ondervangen door het opnemen van deze u-i afhankelijkheid in het model.

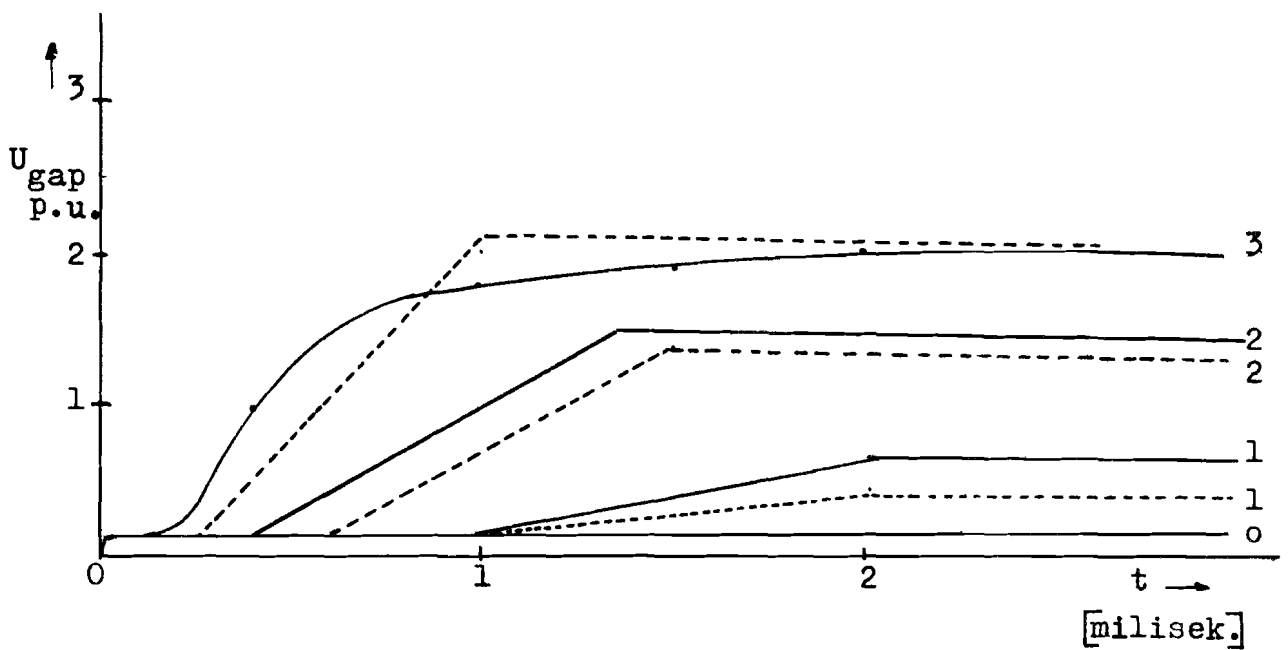
De parameters kunnen weer gekozen worden aan de hand van de karakteristieken op pagina 24.

De benadering vindt plaats met rechte lijnen volgens onderstaand figuur.



Benaderde V_{\max} - I karakteristiek van de vonkbrug.

figuur 10.



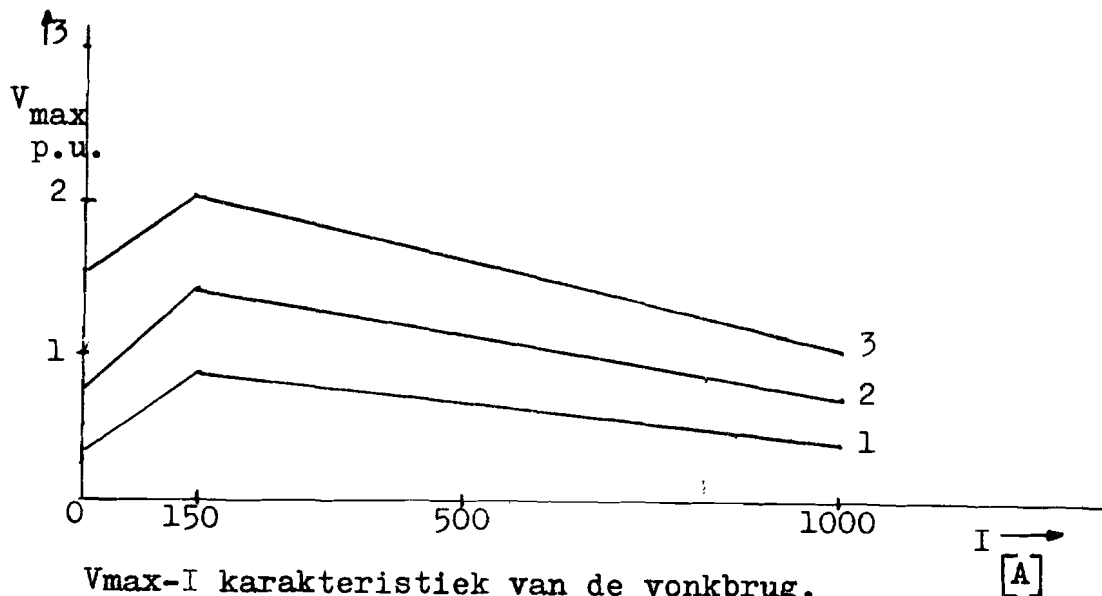
u-t karakteristiek van verschillende vonkbruggen.
parameter: magnetische beblazingsgraad.

- 0 = geen magnetische beblazing.
- 1 = laag
- 2 = gemiddeld
- 3 = hoog

basisspanning: de effectieve bedrijfsspanning, U_b rms.

— Carrara [3]
- - - Husband [4]

figuur 11.



V_{max} -I karakteristiek van de vonkbrug.

parameter: magnetische beblazingsgraad.

basisspanning: de effectieve bedrijfsspanning.

— Husband. [4]

figuur 12.

3.4.2. Model van de spanningsafhankelijke weerstand.

Er zijn verschillende mogelijkheden voor het simuleren van het gedrag van de weerstand van de overspanningsafleider. Enkele hiervan zijn:

- een in afmetingen en bedrijfsspanning gereduceerde weerstand van hetzelfde materiaal. Deze is uiteraard alleen toepasbaar in analoge simulatie-systemen.
- een empirische formule.
- een benadering van de karakteristiek door rechten.

Gekozen is voor de laatste methode. Elk lijnstuk wordt gekarakteriseerd door zijn verschuiving langs de stroom-as en door een helling.

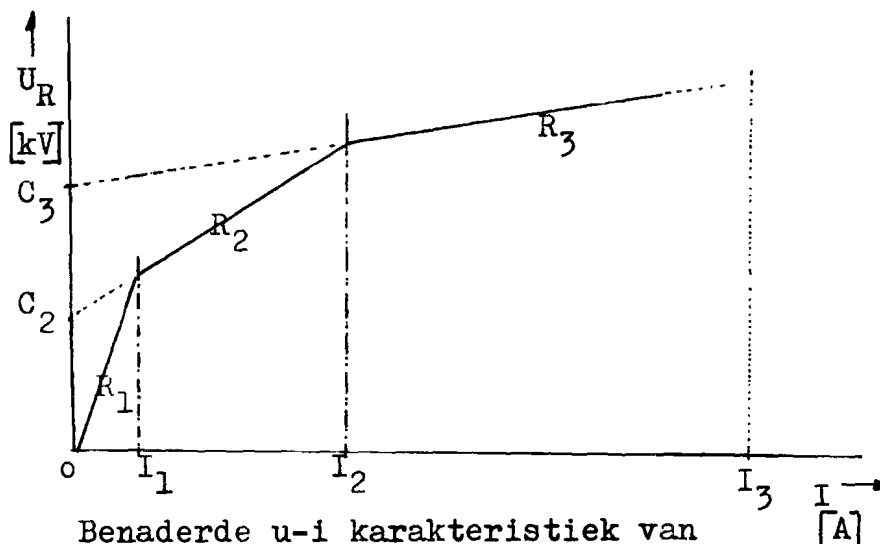
Aan elk lijnstuk wordt een stroom interval toegekend. Slechts in dit interval wordt het verband tussen spanning en stroom door dit lijnstuk vastgelegd.

Naarmate het stroom-interval verder verwijderd is van de oorsprong neemt de helling (de weerstandswaarde) ook af en wordt de verschuiving langs de spannings-as groter.

De nauwkeurigheid van de representatie neemt toe naarmate de karakteristiek door meerdere lijnstukken wordt benaderd.

De beschrijving van de lijnstukken is als volgt:

$$\begin{array}{ll} u = R_1 I + C_1 & \text{voor } 0 \leq I < I_1 \\ u = R_2 I + C_2 & \text{voor } I_1 \leq I < I_2 \\ \vdots & \\ u = R_n I + C_n & \text{voor } I_{n-1} \leq I < I_n \end{array}$$



Benaderde u-i karakteristiek van de spanningsafhankelijke weerstand.

figuur 13.

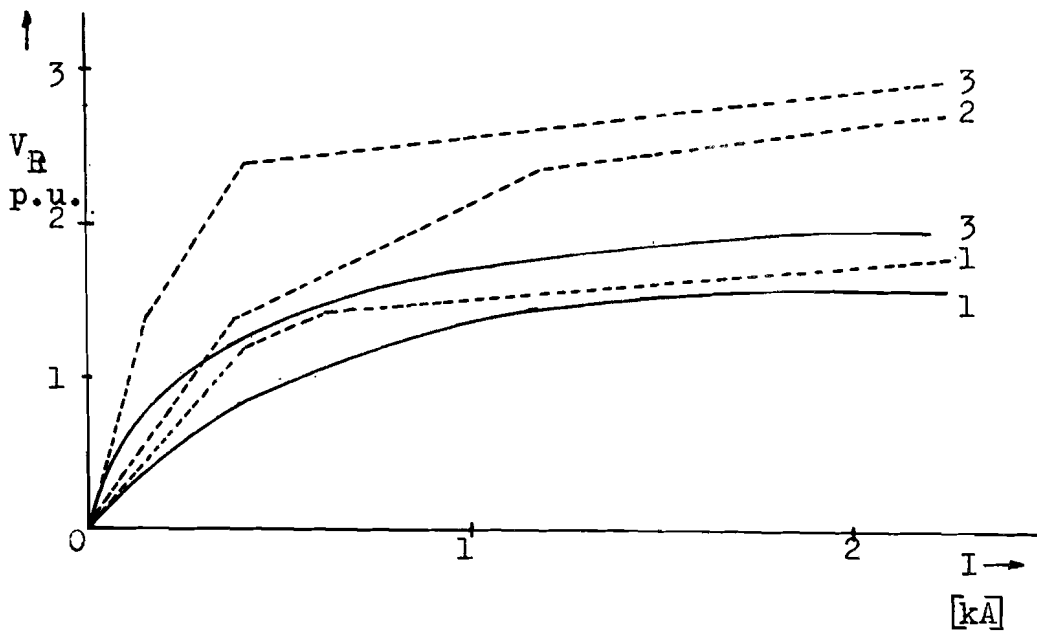
Over het algemeen wordt de u-i karakteristiek van de weerstand benaderd door drie lijnstukken. Het is echter voor digitale toepassingen eenvoudig het model zodanig te ontwerpen dat het aantal intervallen instelbaar wordt. De verschillende weerstandstypen kenmerken zich door verschil in weerstandswaarde en energiedissipatievermogen. De aanduidingen voor de weerstandswaarden zijn: hoog, gemiddeld en laag.

Op pagina 27 zijn enkele u-i karakteristieken weergegeven, waarin de aanduidingen tot uiting komen. Deze karakteristieken kunnen gehanteerd worden bij het bepalen van de parameters.

Het effect van de hysteresis-lussen die ontstaan bij een hoge energiedissipatie van de weerstand is niet in het model opgenomen.

Tot slot kan worden opgemerkt dat niet elke combinatie van vonkbrug en weerstand volgens de karakteristieken op de paginas 24 en 27 een overspanningsafleider simuleert, die voldoet aan de eisen die hieraan gesteld worden.

Een combinatie van een weerstand met een hoge waarde en een vonkbrug met een hoge beblazingsgraad kan leiden tot een spanning over de overspanningsafleider die hoger is dan de aanspreekspanning.



u-i karakteristieken van spanningsafhankelijke weerstanden.

parameter: de weerstandswaarden.

- 1 = laag
- 2 = gemiddeld
- 3 = hoog

basisspanning: de effectieve bedrijfsspanning.

- Carrara [3]
- - - Husband [4]

figuur 14.

3.5. De keuze van de overspanningsafleider.

De parameters voor het model van de overspanningsafleider, zoals onder andere de aanspreekspanningen volgen uit de keuze van het type overspanningsafleider. Deze keuze wordt uitgevoerd aan de hand van de bestaande criteria uit hoofdstuk 2.2.

Volgens deze criteria dienen de maximale mantel-mantel en mantel-aarde spanningen, die onder de diverse type sluitingen ontstaan berekend worden, aangezien deze de bedrijfs-spanning van de overspanningsafleider bepalen.

Een uitgangspunt voor deze berekeningen is de in een geleider (lees mantel) geïnduceerde spanning als gevolg van drie parallel daaraan opgestelde geleiders, die een symmetrische drie-fasen stroom voeren. [11]

De uitdrukking hiervoor is:

$$E_x = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{1}{2} \ln \frac{s_{1x} \cdot s_{3x}}{s_{2x}^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{s_{3x}}{s_{1x}} \right) \quad \text{V/m}$$

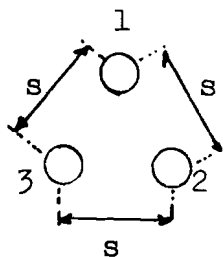
waarbij: I = de effectieve waarde van de stroom in de geleiders. (afgezien van de fase-draaiing).

ω = de hoekfrequentie van het systeem.

s_{ix} = de afstand van de beschouwde geleider (mantel) tot de geleider van de fase i.

De configuratie waarin de geleiders zijn opgesteld, is volgens bovenstaande uitdrukking van grote invloed.

Het -cross bonded- kabelsysteem wordt veelal uitgevoerd in een gelijkzijdige driehoek configuratie of in een platvlak configuratie. Voor deze twee configuraties zijn de mantelspanningen:



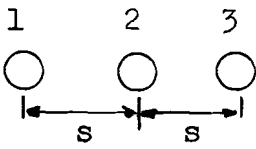
$$E_1 = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \ln \frac{s}{r_m} \quad \text{V/m}$$

$$E_2 = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{s}{r_m} \quad \text{V/m}$$

$$E_3 = 2 \cdot j\omega I \cdot \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \ln \frac{s}{r_m} \quad \text{V/m}$$

met: r_m = de gemiddelde straal van de mantel = $(r_3 + r_4)/2$.
zie bijlage 1.

en:



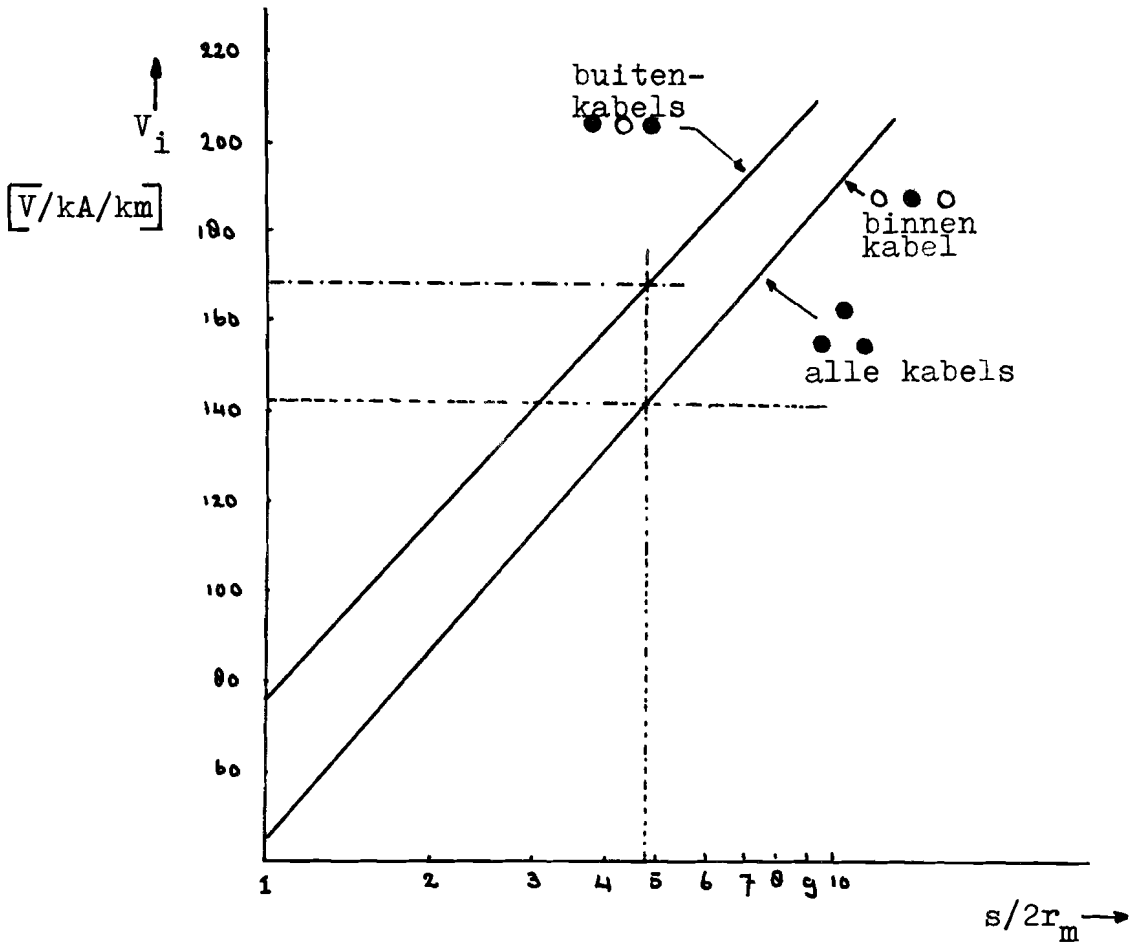
$$E_1 = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{s}{2r_m} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{2s}{r_m} \right) \quad \text{V/m}$$

$$E_2 = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{s}{r_m} \quad \text{V/m}$$

$$E_3 = 2 \cdot j\omega I \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{s}{2r_m} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{2s}{r_m} \right) \quad \text{V/m}$$

De geïnduceerde spanningen blijken derhalve afhankelijk te zijn van de verhouding s/r_m , van de grootte van de maximale (kortsluit-) stroom en van de lengte van de mantel.

In figuur 15 is een grafiek weergegeven van de geïnduceerde mantelspanningen in Volt/kA/km, als functie van de verhouding $s/2r_m$.



figuur 15.

V_i = de geïnduceerde mantel-aarde spanning.

Voor het beschouwde kabelsysteem is $s/2r_m = 4,78$.

Systemen waarin het toepassen van -cross bonded- kabelsystemen voordelen biedt, zijn over het algemeen systemen met een netspanning van 150 kV of hoger, immers bij lagere spanningen kunnen driefasen kabels worden toegepast.

Deze hoogspanningsnetten worden of voorzien van Petersen spoelen of ze zijn effectief geaard. Voor beide situaties geldt dat de homopolaire impedantie Z_0 zeker het viervoud is van de normale impedantie Z_1 , zo niet groter.

Wordt nu nog aangenomen dat de inverse impedantie Z_2 gelijk is aan Z_1 , dan kan gesteld worden dat de grootste kortsluitstroom optreedt bij een symmetrische driefasen kortsluiting.

Voor het hier beschouwde transmissie-systeem is de symmetrische driefasen kortsluitstroom 40 kA, verder geldt:

$$s = 350 \text{ mm} ; r_m = 36.5 \text{ mm} ; s/r_m = 9,56 ; \text{lengte} = 500 \text{ m.}$$

De resultaten van berekeningen die uitgevoerd zijn aan de hand van deze gegevens, zijn ondergebracht in tabel II.

TABEL II.						
geïnduceerde mantelspanningen bij een symm. driefasen-kortsluiting.				Overspanningsafleider.		
spanning	konfiguratie			bedrijfs- spanning. IEC [kV]	aanspreek nivo [kV]	schakel- wijze
	$\begin{matrix} \circ \\ \circ \circ \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \circ \circ \\ \circ \circ \circ \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \circ \circ \\ I_k = 40 \text{ kA}, l = \frac{1}{2} \text{ km} \\ \text{[kV]} \end{matrix}$			
mantel- aarde	142	168	3.36	4.5	17.5	ster geaard
mantel- mantel.	246	321	6.40	9.0	32.5	drie- hoek.

De overige parameters van de vonkbrug hebben betrekking op het verloop van de spanning als functie van de tijd.

Daar echter de 50 Hz-spanningen niet gesimuleerd worden, kan er als gevolg hiervan ook geen toename van de vonkbrugspanning verwacht worden.

De enige oorzaak van een eventuele toename van de vonkbrugspanning is de stroom door de vonkbrug als gevolg van de transiënten. In het geval deze hoogfrequent zijn, en dit is niet onwaarschijnlijk gezien de lengte van de sekties, zal de blaasspoel geen stroom voeren.

De vonkbrugspanning blijft dan laag. Op grond hiervan worden, in eerste instantie, de tijden die het begin en het einde van de spanningstoename vastleggen groter dan de beschouwingstijd gekozen.

Mocht uit de berekeningen blijken dat er een blaasstroom kan ontstaan, dan kunnen deze parameters alsnog worden gekorrigeerd.

De initiële en maximale vonkbrugspanning worden volgens literatuur gegevens vastgesteld:

$$V_0 = 0 \quad \text{kV}$$

$$V_{\text{max}} = 4.5 \text{ kV} = 1.0 \text{ p.u.}$$

De IEC voorschriften geven geen informatie waaruit de verschillende parameters voor de niet-lineaire weerstand van de overspanningsafleiders te bepalen zijn.

Voor deze parameters is men aangewezen op gegevens uit de literatuur en op eventuele specificaties van fabrikanten. Door maximaal gebruik te maken van de beschikbare gegevens is het mogelijk een gebied aan te geven in het I-V vlak waarin de u-i karakteristiek van verschillende typen weerstanden voor overspanningsafleiders zeker onder te brengen zijn.

Dit wordt geïllustreerd in figuur 16. Deze is als volgt tot stand gekomen:

- voor het interval van 0 - 2 kA is gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur.
- het gebied van 2 - 5 kA is verkregen door lineaire extrapolatie, vanwege het ontbreken van noodzakelijke gegevens.
- voor het interval 5 - 10 - 20 kA zijn de gegevens van twee overspanningsafleiders van ASEA maatgevend. De testresultaten hiervan vallen, teruggerekend naar de per unit waarde (basis=bedrijfsspanning), nagenoeg samen. De grenzen van het gebied lopen evenwijdig aan de lijnen door de testresultaten. Opmerkelijk, maar korrekt, is daarbij dat de bovenste grens via de door de IEC voorgeschreven maximale restspanning bij 10 kA loopt. Dit houdt in dat de overspanningsafleiders met een weerstand waarvan de karakteristiek in het aangegeven gebied ligt voldoen aan het genoemde IEC voorschrift.

Voor het model is een karakteristiek gekozen welke opzich een aantal typen kan representeren. Deze karakteristiek is in figuur 16 weergegeven.

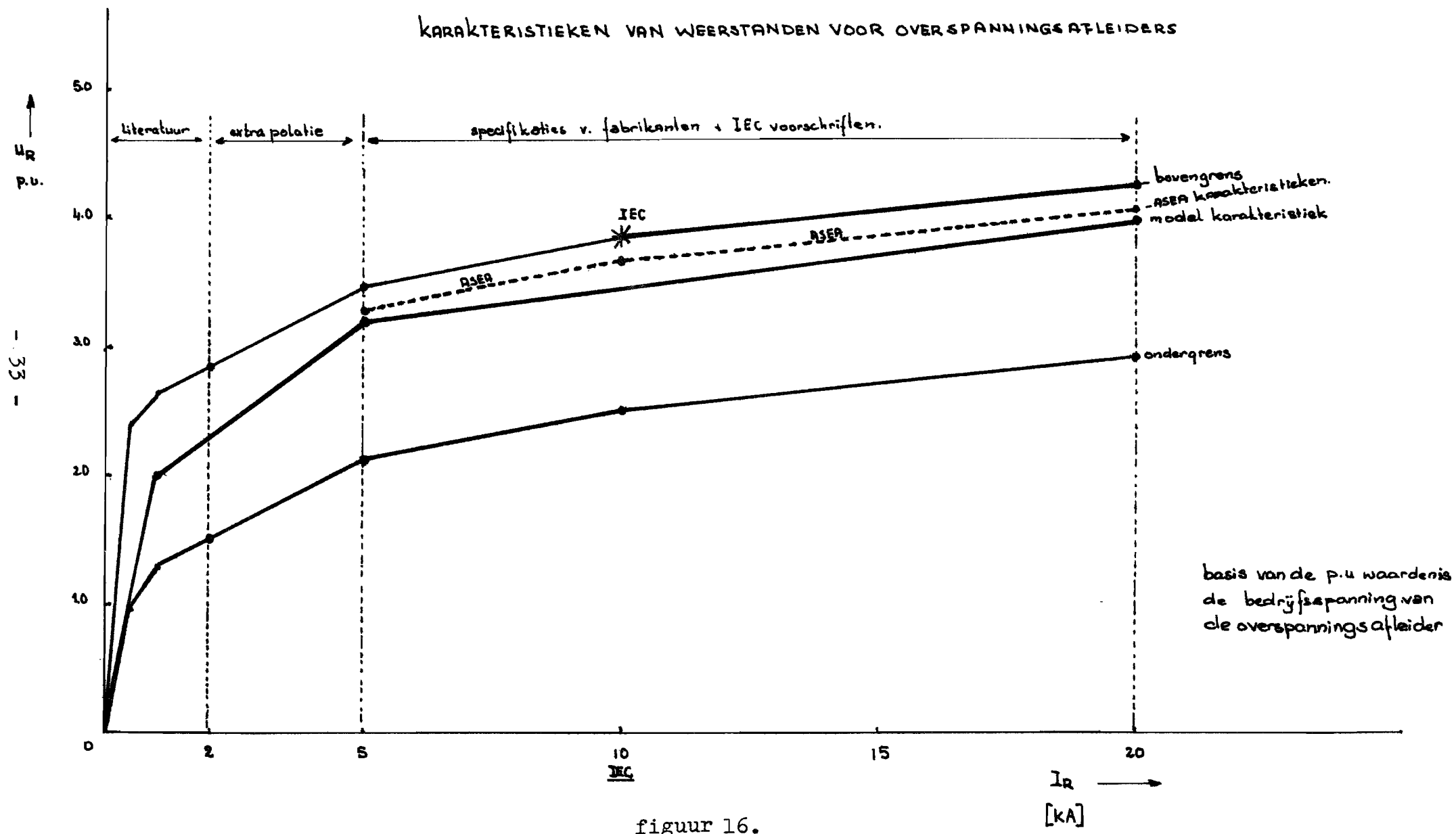
De waarden voor de verschillende parameters zijn in Tabel III opgenomen.

TABEL III.		
Parameters van de weerstand van het overspanningsafleider-model.		
stroomgrenzen. kA.	weerstands- waarden. ohm.	konstante verschuiving. kV.
$I_0 = 0.0$		
$I_1 = 1.0$	$R_1 = 9.00$	$C_1 = 0.00$
$I_2 = 5.0$	$R_2 = 1.35$	$C_2 = 7.65$
$I_3 = 10^{10}$	$R_3 = 0.24$	$C_3 = 13.20$

Daar de 50 Hz-spanningen niet worden gesimuleerd, is het enige mogelijke criterium voor het doven van de overspanningsafleider een nuldoorgang van de stroom door de overspanningsafleider.

Tot slot de opmerking dat er geen uitspraak is gedaan over het energiedissipatie-vermogen van de gekozen overspanningsafleider.

KARAKTERISTIEKEN VAN WEEERSTANDEN VOOR OVERSPANNINGS AFLEIDERS



figuur 16.

3.6. Heavy Duty overspanningsafleiders.

Overspanningsafleiders van het -heavy duty- type worden toegepast in lijncircuits waar de mogelijkheid bestaat dat de fasegeleiders zich via de overspanningsafleiders ontladen. Aan deze overspanningsafleiders worden hoge eisen gesteld met betrekking tot het energiedissipatievermogen.

De lijn kan, afhankelijk van de voorgeschiedenis, opgeladen zijn tot hogere spanningen dan de topwaarde van de hoogst mogelijke bedrijfsspanning, waardoor de ontladingsstroom eveneens hoog op kan lopen. Bovendien heeft de lijn in deze situaties veelal een grote lengte en derhalve ook een grotere energie inhoud. Het gevolg is dat de ontladingsstroom langer zal duren.

Ten einde te onderzoeken of een overspanningsafleider van dit type deze ontladingsstroom en daarmee gepaardgaande energiedissipatie kan doorstaan, zonder defekt te raken, wordt deze, of een basiseenheid van 3 kV tot 12 kV, onderworpen aan een proef, volgens clausule 63.3.2 van IEC publikatie no. 99-1. Deze testprocedure wordt ook wel aanbeduid met -stroompuls van lange duur test-.

Voor systemen met een spanning tot 245 kV wordt volgens deze test een kunstlijn met onderstaande parameters, via de overspanningsafleider ontladen:

- lijnlengte = 300 km ; overspanningsfaktor = 3.0 p.u.
- golfimpedantie = 450 ohm (basis = hoogste fase-aarde spanning)

Een 150 kV lijncircuit met bovenstaande parameters en een capaciteit van $C=7,53$ nF/km heeft een energie inhoud van $W = \frac{1}{2}CV^2 = 294$ kJ.

Een volledige ontlading van de lijn via een overspanningsafleider leidt tot een energiedissipatie van 1,73 kJ/kV.

In de literatuur worden waarden aangegeven van 2 tot 6 kJ/kV. [13]

Deze waarden zijn verkregen uit metingen en berekeningen.

Een overspanningsafleider met een nominale bedrijfsspanning van 4,5 kV is dus bestand tegen een energiedissipatie van 7,78 kJ.

4. Berekeningsmethode.

Het doel van dit onderzoek is zoals reeds eerder is aangegeven het berekenen van het verloop van de spanningen en stromen in het -crossbonded- kabelsysteem, voorzien van overspanningsafleiders.

De belangstelling gaat in het bijzonder uit naar de energiedissipatie van de overspanningsafleiders.

Voor het uitvoeren van berekeningen in een model van een transmissienet, waarvan het kabelsysteem een onderdeel vormt, is het noodzakelijk de vergelijkingen en randvoorwaarden op te stellen voor de essentiële punten in het systeem en deze vervolgens onder te brengen in een rekenprogramma dat een oplossing geeft op verschillende tijdstippen.

Als uitgangspunt dient het reeds bestaande rekenmodel voor een verliesvrije -crossbonded- kabelsysteem zonder overspanningsafleiders en met slechts driemantelsekties, waarmee de spanningen en de stromen op de kruisverbindingen en kabeleinden te berekenen zijn volgens de methode van Bergeron.

In het volgende zal de uitbreiding van dit model aan de orde worden gesteld.

Deze uitbreiding omvat de beschrijving van het kabelsysteem met overspanningsafleiders, de keuze van de parameters van het overspanningsafleider-model, de representatie van een hoogspanningslijn, het dempingsmechanisme en de representatie van een bron in het net. Dit wordt voorafgegaan door een korte beschrijving van het bestaande model.

Het uitgebreide model heeft nog steeds betrekking op een kabelsysteem met drie mantelsekties en biedt dus geen mogelijkheid om met zekerheid vast te stellen of op de kruisverbindingen van de volgende sekties overspanningsafleiders noodzakelijk zijn.

De overige uitgangspunten zijn de criteria en het model van de overspanningsafleider, behandeld in de voorgaande hoofdstukken.

De overspanningsafleiders worden in stergeschakeld en verondersteld wordt dat de sterpunten geaard zijn. Het effect van de aansluitkabels wordt evenals de aardingsweerstand van de overspanningsafleiders buiten beschouwing gelaten.

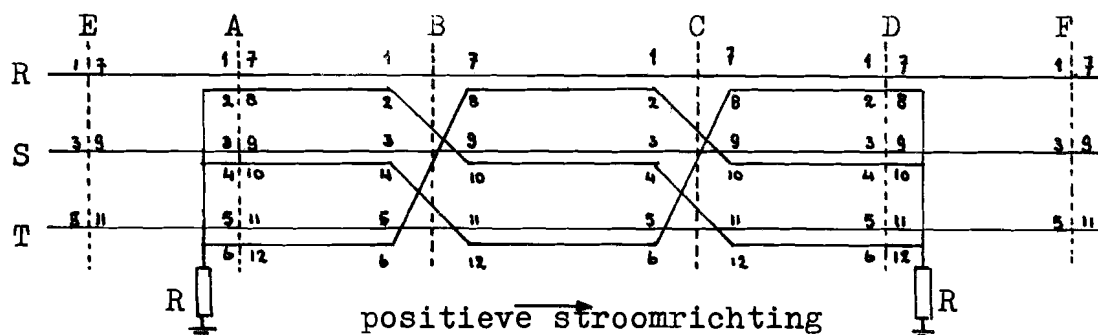
4.1. Toestands- en vierpoolvergelijkingen op de kruisverbindingen en kabeleinden.

Het kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels is weergegeven in figuur 17.

Verstoringen die optreden aan het begin van de kabel planten zich als elektromagnetische golven voort in het systeem en reflektieren gedeeltelijk op de kruisverbindingen. In de hieraan voorafgaande studie van het -cross bonded- kabelsysteem [1] is aangetoond dat het mogelijk is deze elektromagnetische golven te ontbinden in onafhankelijke komponent golven met diskrete voorplantingssnelheden. Ook blijken de bijbehorende golfimpedanties nagenoeg frekwentie onafhankelijk te zijn. Vanwege de ont koppeling is de beschrijving van het systeem in komponentgroot heden eenvoudiger.

De ont koppeling tussen de komponent golven wordt verkregen door een -goede- keuze van de transformatie-matrices voor het transformereren van de fasegroot heden in komponent-groot heden.

Overigens bestaan deze transformatiematrices alleen indien het mogelijk is de voortplantingsmatrices voor de komponent-spanningen en stromen in een diagonaalvorm te schrijven.



figuur 17.

De relaties tussen de komponentgroot heden en de fase-groot heden worden vastgelegd door:

$$[V] = [S][V'] \quad \text{en} \quad [I] = [Q][I']$$

waarin: $[V]$, $[I]$ = de vektornotatie van de zes fasespanning- en respektievelijk zes fasestromen.

$[V']$, $[I']$ = de vektornotatie van de zes komponent-spanningen respektievelijk -stromen.

$[S]$, $[Q]$ = de transformatiematrix voor de spanning, respektievelijk stroom

met:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 0 & -1/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & 2/3 & 0 & -1/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & -1/3 & 1 & 2/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & -1/3 & 0 & 2/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & -1/3 & 0 & -1/3 & 1 & 1/3 \\ 0 & -1/3 & 0 & -1/3 & 0 & 1/3 \end{bmatrix}; \quad [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Voor dit systeem blijken er drie groepen componenten te bestaan. De componenten van een groep hebben dezelfde voortplantings-snelheid en golfimpedantie. Het zijn:

- de geleider-mantelcomponenten, die aangeduid worden met on-even indices. De golfimpedantie voor deze componenten is Z_1' ; de voortplantingssnelheid is u_1 .
- de mantel-mantelcomponenten. De indices voor deze componenten zijn 2,4,8, en 10. De golfimpedantie is Z_2' en de voortplantings-snelheid u_2 .
- de nul- of homopolairekomponent, aangeduid met de indices 6 en 12. De golfimpedantie is Z_3' ; de voortplantingssnelheid u_3 .

De indices 1 t/m 6 en 7 t/m 12 hebben betrekking op spanningen en stromen links respectievelijk rechts van een kruisverbinding of kabeleind.

De golfimpedanties en voortplantingssnelheden zijn berekend voor een 150 kV kabelsysteem. De gegevens van de kabels zijn ondergebracht op bijlage 1.

De verhouding van de voortplantingssnelheden van de geleider-mantelkomponent, de mantel-mantelkomponent en de nulkomponent is $u_1:u_2:u_3 = 15:3:1$, de verhouding van de looptijden is 1:5:15. Het verband tussen de componentspanningen en stromen wordt bepaald door de volgende uitdrukking, waarin $[Z_0']$ de golfimpedantiematrix van een kabelsektie is.

$$[V'] = [Z_0'] [I']$$

waarbij: $[V'] = [V_l'] ; [V_r']$ en $[I'] = [I_l'] , [I_r']$

l = links

r = rechts

Voor het berekenen van spanningen en stromen op de kruis-
 verbindingen en kabeleinden, worden vergelijkingen opgesteld
 die onderverdeeld worden in toestands- en vierpoolvergelijking-
 en.

De toestandsvergelijkingen beschrijven de verplaatsing van
 spanning en stroomgolven in een kabelsektie. Ze geven op
 een willekeurige plaats het voor iedere tijdstip geldende
 verband tussen de spanning en de stroom van een komponent-
 golf.

Een toestandsvergelijking voor de kabelsektie B - C is
 bijvoorbeeld:

$$[V'_{B_r}(t)] - [Z'_0][I'_{B_r}(t)] = [V'_{C_1}(t-kT)] - [Z'_0][I'_{C_1}(t-kT)]$$

met:

$$[V'_{B_r}(t)] = \begin{bmatrix} V'_{B_7}(t) \\ V'_{B_8}(t) \\ V'_{B_9}(t) \\ V'_{B_{10}}(t) \\ V'_{B_{11}}(t) \\ V'_{B_{12}}(t) \end{bmatrix} \quad [I'_{B_r}(t)] = \begin{bmatrix} I'_{B_7}(t) \\ I'_{B_8}(t) \\ I'_{B_9}(t) \\ I'_{B_{10}}(t) \\ I'_{B_{11}}(t) \\ I'_{B_{12}}(t) \end{bmatrix} \quad [V'_{C_1}(t)] = \begin{bmatrix} V'_{C_1}(t-T) \\ V'_{C_2}(t-5T) \\ V'_{C_3}(t-T) \\ V'_{C_4}(t-5T) \\ V'_{C_5}(t-T) \\ V'_{C_6}(t-15T) \end{bmatrix}$$

$$[I'_{C_1}(t-kT)] = \begin{bmatrix} I'_{C_1}(t-T) \\ I'_{C_2}(t-5T) \\ I'_{C_3}(t-T) \\ I'_{C_4}(t-5T) \\ I'_{C_5}(t-T) \\ I'_{C_6}(t-15T) \end{bmatrix} \quad [Z'_0] = \begin{bmatrix} Z'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Z'_2 & 0 & Z'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z'_2 & 0 & 2Z'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3Z'_3 \end{bmatrix}$$

Deze vergelijkingen leggen het verband vast tussen de
 -komponentspanningen en stromen aan de rechterzijde (index r)
 van de 12-poort B op het beschouwingsmoment t- en - de
 componentspanningen en stromen die een looptijd kT eerder zijn
 opgetreden aan de linkerkant van de 12 poort C. (index l).

Op overeenkomstige wijze is de onderstaande vergelijking op te stellen voor de spanningen en stromen aan de linker kant van de 12-poort B voor de rechts van A komende componentgolven.

$$[V_{B_1}'(t)] + [Z_O'] [I_{B_1}'(t)] = [V_{A_r}'(t-kT)] + [Z_O'] [I_{A_r}'(t-kT)]$$

De vierpoolvergelijkingen zijn de randvoorwaarden die een kruisverbinding of kabeleind aan het systeem oplegt.

Het zijn identiteitsrelaties tussen geleider- en mantelgrootheden.

Zo gelden voor de kruisverbinding B de volgende identiteiten en voor de fase grootheden, althans indien verondersteld wordt dat er geen overspanningsafleiders in het systeem zijn opgenomen:

$$\begin{array}{ll} V_1 = V_7 & \text{en} \quad I_1 = I_7 \\ V_2 = V_{10} & I_2 = I_{10} \\ V_3 = V_9 & I_3 = I_9 \\ V_4 = V_{12} & I_4 = I_{12} \\ V_5 = V_{11} & I_5 = I_{11} \\ V_6 = V_8 & I_6 = I_8 \end{array}$$

In matrix vorm en in komponentgrootheden:

$$[S] [V_1'(t)] - [T][S] [V_r'(t)] = [0]$$

$$[Q] [I_1'(t)] - [T][Q] [I_r'(t)] = [0]$$

met:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De combinatie van de toestandsvergelijkingen en de identiteitsrelaties geven 24 vergelijkingen voor evenzoveel onbekenden, 12 komponentstromen en 12 komponentspanningen. Het stelsel is oplosbaar, aangezien er rechts van de gelijktkens bekende grootheden staan. In matrix notatie volgen nu de vergelijkingen voor alle 12-poorten:

Kabeleind A:

$$\begin{bmatrix} [S] & [0] & [A_1] & [Q] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [S] & -[S] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [Q] & -[Q] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{A_1}^i(t)] \\ [V_{A_1}^{i1}(t)] \\ [I_{A_1}^{iR}(t)] \\ [I_{A_1}^{i1R}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [E_1] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{E_1}^i(t-T_L)] \\ [V_{B_1}^{iR}(t-kT)] \\ [I_{E_1}^{i1}(t-T_L)] \\ [I_{B_1}^{iR}(t-kT)] \end{bmatrix}$$

verkort: $[A] \times [X_A^i(t)] = [BE] \times [X_{BE}^i(t-t_1)]$

Kruisverbinding B:

$$\begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [S] & -[T][S] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [Q] & -[T][Q] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{B_1}^i(t)] \\ [V_{B_1}^{i1}(t)] \\ [I_{B_1}^{iR}(t)] \\ [I_{B_1}^{i1R}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{A_1}^i(t-kT)] \\ [V_{C_1}^{iR}(t-kT)] \\ [I_{A_1}^{i1}(t-kT)] \\ [I_{C_1}^{iR}(t-kT)] \end{bmatrix}$$

verkort: $[B] \times [X_B^i(t)] = [AC] \times [X_{AC}^i(t-kT)]$

Kruisverbinding C:

$$\begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [S] & -[T][S] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [Q] & -[T][Q] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{C_1}^i(t)] \\ [V_{C_1}^{i1}(t)] \\ [I_{C_1}^{iR}(t)] \\ [I_{C_1}^{i1R}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [-Z_0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{B_1}^i(t-kT)] \\ [V_{D_1}^{iR}(t-kT)] \\ [I_{B_1}^{i1}(t-kT)] \\ [I_{D_1}^{iR}(t-kT)] \end{bmatrix}$$

verkort: $[C] \times [X_C^i(t)] = [BD] \times [X_{BD}^i(t-kT)]$

Kabeleind D:

$$\begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [S] & [0] & [D_1][Q] \\ [S] & -[S] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [Q] & -[Q] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{D_1}^i(t)] \\ [V_{D_1}^{i1}(t)] \\ [I_{D_1}^{iR}(t)] \\ [I_{D_1}^{i1R}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [Z_0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [F_1] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [V_{C_1}^i(t-kT)] \\ [V_{F_1}^{iR}(t-T_L)] \\ [I_{C_1}^{i1}(t-kT)] \\ [I_{F_1}^{iR}(t-T_L)] \end{bmatrix}$$

verkort: $[D] \times [X_D^i(t)] = [CF] \times [X_{CF}^i(t-t_1)]$

Hierbij is T_L de looptijd van de lijnen waaraan het kabelsysteem verbonden is. De matrices A_1, E_1, D_1 en F_1 bevatten de golfimpedanties van deze lijnen. De eerste twee rijen van elk stelsel vormen de toestandsvergelijkingen, de laatste twee de identiteitrelaties.

Enkele matrices:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} Z_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & R & 0 & R \\ 0 & 0 & Z_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & R & 0 & R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_L & 0 \\ 0 & R & 0 & R & 0 & R \end{bmatrix} = - [D_r]$$

$$[E_r] = \begin{bmatrix} Z_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = - [F_1]$$

$$[S]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[Q]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2/3 & 2/3 & -1/3 & -1/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 & 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$$

R = aardingsweerstand van een kabeleind.

4.2.Overspanningsafleiders op de kruisverbindingen.

Om het -cross bonded- kabelsysteem, waarin overspanningsafleiders zijn opgenomen te kunnen beschrijven, worden overspanningsafleiderstromen geïntroduceerd.

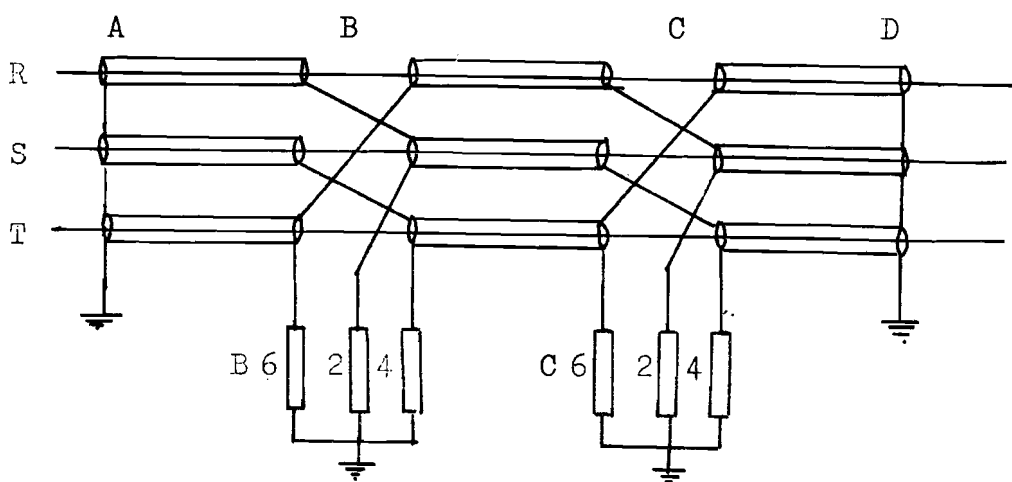
De notatie van deze stromen op de kruisverbinding B is:

$$[I_{B_a}] = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{B_{a2}} \\ 0 \\ I_{B_{a4}} \\ 0 \\ I_{B_{a6}} \end{bmatrix}$$

De letter-index a staat voor overspanningsafleider, de cijfer index komt overeen met het nummer van de mantel waarop de overspanningsafleider is aangesloten.

Indien er geen enkele overspanningsafleider heeft aangesproken zijn de stromen door de overspanningsafleiders nul, ze bestaan niet. De toestandsvergelijkingen en identiteitsrelaties voor de kruisverbindingpunten en de kabeleinden zijn dan identiek aan de eerder opgestelde vergelijkingen, de situatie is immers overeenkomstig. Spreekt een overspanningsafleider aan, dan zal de geleidende verbinding naar aarde de oorspronkelijke stroomrelatie ter plaatse van de kruisverbinding beïnvloeden. De basis voor deze relatie, de stroomwet van Kirchoff, blijft echter gelden, zodat de nieuwe vergelijking eenvoudig te formuleren is. De spanning over de overspanningsafleider wordt nu bepaald door de tijdsafhankelijke vonkbrugspanning en de spanning over de stroomafhankelijke weerstand.

Het aanspreken van een overspanningsafleider heeft een verandering tot gevolg in het aantal en de samenstel van de systeem beschrijvende vergelijkingen.



Het -cross bonded- kabelsysteem met overspanningsafleiders.

figuur 18.

De verandering is afhankelijk van de combinatie van wel en niet aangesproken overspanningsafleiders.

Er zijn acht verschillende combinaties mogelijk. Deze zijn ondergebracht in Tabel I.

Tabel I			
Overspanningsafleider	2	4	6
geen aan	0	0	0
	0	0	1
	0	1	0
	0	1	1
	1	0	0
	1	0	1
	1	1	0
	1	1	1
drie aan	1	1	1
0 = de overspanningsafleider heeft niet aangesproken.			
1 = de overspanningsafleider heeft wel aangesproken.			

Om inzicht in de veranderingen te verkrijgen wordt de situatie waarbij alle drie overspanningsafleiders hebben aangesproken beschouwd.

Allereerst kan worden opgemerkt dat de overspanningsafleiders geen invloed hebben op het voortplantingsmechanisme van de golven in een kabelsectie. De toestandsvergelijkingen ondergaan daardoor geen enkele verandering. In komponentgrootheden en vektornotatie zijn deze voor de kruisverbindingpunt B:

$$[V_{B_1}^i(t)] + [Z_0^i][I_{B_1}^i(t)] = [V_{A_r}^i(t-kT)] + [Z_0^i][I_{A_r}^i(t-kT)]$$

$$[V_{B_r}^i(t)] - [Z_0^i][I_{B_r}^i(t)] = [V_{C_1}^i(t-kT)] - [Z_0^i][I_{C_1}^i(t-kT)]$$

De identiteitsrelaties zijn echter uitgebreider, aangezien nu de stromen door de overspanningsafleiders opgenomen worden in de vergelijkingen die de som van de oorspronkelijke stromen op de knooppunten gelijk stelt aan nul en de spanningen op deze knooppunten bepaald worden door het gedrag van de overspanningsafleiders.

Voor de 12-poort B geldt voor de spanningen:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_7 \\
 V_2 &= V_{10} & V_2 &= I_{a2} \cdot R_{a2} + U_{\text{gap}2} + C_2 \\
 V_3 &= V_9 \\
 V_4 &= V_{12} & \text{en} & \\
 V_4 &= V_{12} & V_4 &= I_{a4} \cdot R_{a4} + U_{\text{gap}4} + C_4 \\
 V_5 &= V_{11} \\
 V_6 &= V_8 & V_6 &= I_{a6} \cdot R_{a6} + U_{\text{gap}6} + C_6
 \end{aligned}$$

In vektornotatie:

$$[V_1(t)] - [T][V_r(t)] = [0]$$

$$[N][\bar{V}_1(t)] - [R_a][I_a(t)] = [K(t, I_a)]$$

De matrix $[T]$ is reeds bekend. De matrices $[N]$, $[R_a]$ en de vektor $[K]$ zijn nieuw:

$$[N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [R_a] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{a4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{a6} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 \\ 0 \\ K_4 \\ 0 \\ K_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{met } [K] = [K(t, I_a)] = [U_{\text{gap}}(t)] + [C(I_a)]$$

$$\text{en } [R_a] = [R_a(I_a)]$$

Opmerkelijk is het structuur van deze matrices. Slechts de even geïndexeerde diagonaalkoefficiënten zijn ongelijk aan nul. Ook de vektor $[K]$ heeft enkel even geïndexeerde elementen ongelijk nul.

Dit is het gevolg van het feit dat er geen overspanningsafleiders op de binnengeleiders zijn aangesloten, de oneven geïndexeerde overspanningsafleiderstromen zijn dus ten alle tijde nul.

Het doel is immers de beschrijving voort te zetten met vierkante matrices en vektoren.

Dit heeft als voordeel dat direkt gebruik kan worden gemaakt van de transformatiematrices voor het transformeren van de fasegrootheden in komponentgrootheden.

De vektornotatie voor de vergelijkingen in komponentgrootheden:

$$[S][V_i(t)] - [T][S][V_r'(t)] = [0]$$

$$[N][S][V_i(t)] - [R_a][Q][I_a'(t)] = [K]$$

Aangezien $[K]$ als bekend wordt verondersteld, is het niet noodzakelijk deze in komponentgrootheden uit te drukken.

Voor de stromen op de 12-poort B geldt:

$$I_1 - I_7 - 0 = 0$$

$$I_2 - I_{10} - I_{a2} = 0$$

$$I_3 - I_9 - 0 = 0$$

$$I_4 - I_{12} - I_{a4} = 0$$

$$I_5 - I_{11} - 0 = 0$$

$$I_6 - I_8 - I_{a6} = 0$$

In matrix vorm:

$$[I_1(t)] - [T][I_r(t)] - [N][I_a(t)] = [0]$$

In komponentgrootheden:

$$[Q][\bar{I}'_1(t)] - [T][Q][\bar{I}'_r(t)] - [N][Q][\bar{I}'_a(t)] = [0]$$

Er zijn in principe zes komponent -overspanningsafleiderstromen-. De transformatie matrix $[Q]$ geeft echter aan dat de komponent- en fasestromen met een oneven index gelijk zijn aan elkaar. In dit geval zijn deze gelijk aan nul.

De vektornotatie van de overspanningsafleiderstromen:

$$[\bar{I}'_a] = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a2} \\ 0 \\ I_{a4} \\ 0 \\ I_{a6} \end{bmatrix} \quad [\bar{I}'_a] = \begin{bmatrix} 0 \\ I'_{a2} \\ 0 \\ I'_{a4} \\ 0 \\ I'_{a6} \end{bmatrix}$$

De matrix notatie voor alle vergelijkingen in komponentgrootheden voor het kruisverbindingspunt B is:

$$\begin{bmatrix} [1] & [0] & [z'_0] & [0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & -[z'_0] & [0] \\ [S] & -[T][S] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [Q] & -[T][Q] & -[N][Q] \\ [N][S] & [0] & [0] & [0] & -[R'_a][Q] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\bar{V}'_{B_1}(t)] \\ [\bar{V}'_{B_r}(t)] \\ [\bar{I}'_{B_1}(t)] \\ [\bar{I}'_{B_r}(t)] \\ [\bar{I}'_{B_a}(t)] \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} [1] & [0] & [z'_0] & [0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & -[z'_0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [1] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\bar{V}'_{A_r}(t-kT)] \\ [\bar{V}'_{C_1}(t-kT)] \\ [\bar{I}'_{A_r}(t-kT)] \\ [\bar{I}'_{C_1}(t-kT)] \\ [K_B] \end{bmatrix}$$

Verkort: $[B] \times [\bar{X}'_B(t)] = [AC] \times [\bar{X}'_{ACB}(t-kT)]$

Deze formulering impliceert dat er zes vergelijkingen aan het oorspronkelijk aantal van vierentwintig zijn toegevoegd. Van deze zes vergelijkingen zijn er drie die een voorwaarde aan het systeem opleggen, de overige drie vormen slechts identiteiten van de vorm $0=0$.

Het werkelijke aantal vergelijkingen (27) is nu in overeenstemming met het aantal onbekenden. Deze situatie is aldus volledig beschreven.

Er zijn nu nog zes mogelijke combinaties van wel en niet aangesproken overspanningsafleiders, welke nog niet besproken zijn. Het zijn de combinaties waarin één of twee overspanningsafleiders hebben aangesproken.

De gegeven beschrijving van het systeem voor het geval er drie overspanningsafleiders hebben aangesproken, kan voor deze situaties ook worden gehandhaaft, indien er veranderingen in de matrices $[N]$ en $[R_a]$ en de vektor $[K]$ worden aangebracht. Welke veranderingen nodig zijn, wordt in het volgende aangegeven.

1. De matrix $[N]$.

De koëfficiënten van deze matrix kunnen voor elke situatie afgelezen worden uit Tabel I. Spreekt een bepaalde overspanningsafleider aan, dan heeft de koëfficiënt met gelijke index een waarde 1, zo niet dan is de waarde 0.

Spreken er drie overspanningsafleiders aan, dan is volgens Tabel I de kode 1,1,1 en de koëfficiënten zijn $n_{22}=1$, $n_{44}=1$ en $n_{66}=1$.

2. De vektor $[K]$.

De aanpassingen zijn overeenkomstig die voor de matrix $[N]$, met het verschil dat de elementen een waarde krijgen, die afhankelijk is van de stroom door de overspanningsafleider en de tijd verstreken sinds deze heeft aangesproken.

3. De matrix $[R_a]$.

De veranderingen in deze matrix zijn afwijkend van het voorgaande. De oorzaak is de tweeledige funktie welke aan deze matrix wordt toegekend.

Heeft een overspanningsafleider aangesproken, dan is de koëfficiënt met dezelfde index gelijk aan de weerstandswaarde van de overspanningsafleider.

Heeft deze echter niet aangesproken, dan zal de stroom door de betreffende overspanningsafleider nul zijn.

Dit is een voorwaarde welke eveneens in het produkt van de matrices $[R_a]$ en $[Q]$ tot uiting moet komen. Het blijkt dan voldoende te zijn de koëfficiënt met dezelfde index als de overspanningsafleider gelijk te stellen aan 1.

Daarbij wordt verondersteld dat de matrix $[N]$ en de vektor $[K]$ volgens het bovenstaande zijn aangepast.

Een voorbeeld ter verduidelijking.

Veronderstel de situatie waarbij de overspanningsafleiders 2 en 6 wel aanspreken en 4 niet. Volgens Tabel I is de kode 1, 0, 1.

De koëfficiënten en elementen zijn dan:

matrix $[N]$	vektor $[K]$	matrix $[R_a]$
$n_{22} = 1$	$k_{22} = K_2$	$r_{a22} = R_{a2}$
$n_{44} = 0$	$k_{44} = 0$	$r_{a44} = 1$
$n_{66} = 1$	$k_{66} = K_6$	$r_{a66} = R_{a6}$

Alle overige koëfficiënten en elementen zijn zoals reeds bekend gelijk aan nul.

Volgens deze beschrijving is, onafhankelijk van het aantal aangesproken overspanningsafleiders, het aantal onbekenden en het aantal vergelijkingen gelijk aan zeventwintig.

Dit impliceert een verschil in het aantal onbekende fase-grootheden en het aantal onbekende komponentgrootheden.

Het zal echter duidelijk zijn dat hier een aantal vergelijkingen in komponentgrootheden een afhankelijkheid introduceren, waardoor het mogelijk is een of twee komponentstromen te elimineren, zodat het aantal onbekenden in fase- en komponentgrootheden niet verschilt.

Uit het vorig voorbeeld: $I_{a4} = 0$ ofwel $I'_{a4} + I'_{a6} = 0$

In het voorgaande is steeds verondersteld dat de vektor $[K]$ bekend is. Het is een voorwaarde voor het kunnen oplossen van de vergelijkingen.

De vektor is samengesteld uit elementen van de vorm:

$$K(t, I_a) = U_{\text{gap}}(t) + C(I_a)$$

$U_{\text{gap}}(t)$ is de vonkbrugspanning als functie van de tijd na het aanspreken van de overspanningsafleider. Het verloop is weergegeven in figuur 4 en 9.

Door registratie van het tijdsverloop sinds het aanspreken is deze spanning aan de hand van de benaderde karakteristieken die hiervoor gelden, eenvoudig te bepalen.

$C(I_a)$ vertegenwoordigt een, van de stroom onafhankelijke spanningsval over de weerstand van de overspanningsafleider. De waarde van deze konstante wordt bepaald door het interval waarin de stroom ligt. Volgens de figuren 8 en 13 is het aantal en de grootte van de intervallen afhankelijk van de nauwkeurigheid waarmee de nietlineaire karakteristiek van de weerstand wordt benadert.

Is het interval, waarin de nog te berekenen stroom door de overspanningsafleider ligt, bekend, dan is behalve de konstante C ook de weerstandswaarde R_a bekend.

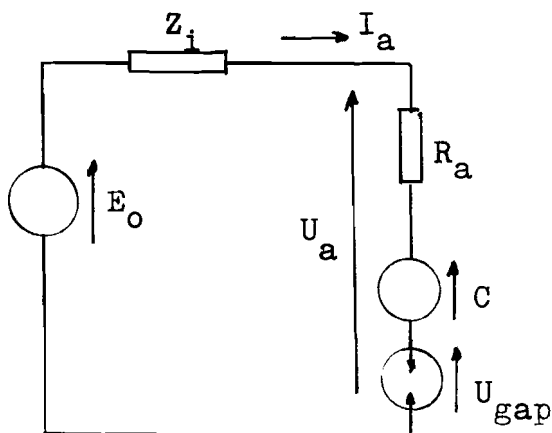
Het uitgangspunt voor de berekeningen zal een gerichte schatting moeten zijn van de stroom, op grond waarvan een instelling van de waarden van C en R_a kan plaatsvinden. Na de berekening dient er gecontroleerd te worden of de stroom in het verwachte interval ligt. Mocht dit niet het geval zijn dan wordt de berekening met andere waarden voor C en R_a herhaald, totdat er een overeenstemming is.

Een eis welke aan deze procedure gesteld wordt, is dat van een snelle convergentie naar de juiste instelling.

Het is daarvoor noodzakelijk dat de eerste schatting nauwkeurig is en zo deze niet juist is er aangegeven kan worden in welk interval de stroom dan naar alle waarschijnlijkheid ligt.

Een schatting van de stroom is mogelijk, indien het gehele systeem, gezien vanuit de punten waartussen een overspanningsafleider wordt aangesloten, vervangen wordt door een spanningsbron en een inwendige impedantie.

Een vervangingsschema is weergegeven in onderstaand figuur.



- E_0 = spanningsbron
- Z_i = inwendige impedantie
- I_a = overspanningsafleiderstroom
- R_a = weerstand van de overspanningsafleider.
- C = spanningsval (bron)t.g.v. niet-lineairiteit van de weerstand.
- U_{gap} = vonkbrugspanning.

figuur 19.

Volgens dit schema is de stroom gelijk aan:

$$I_a = \frac{E_0 - U_{gap} - C}{Z_i + R_a}$$

Indien deze stroom in het derde interval (fig. 9) ligt, welke begrensd wordt door I_2 en I_3 , dan geldt er:

$$I_2 \leq \frac{E_0 - U_{gap} - C_3}{Z_i + R_3} < I_3$$

Hieruit volgt dat de stroom in het derde interval ligt als

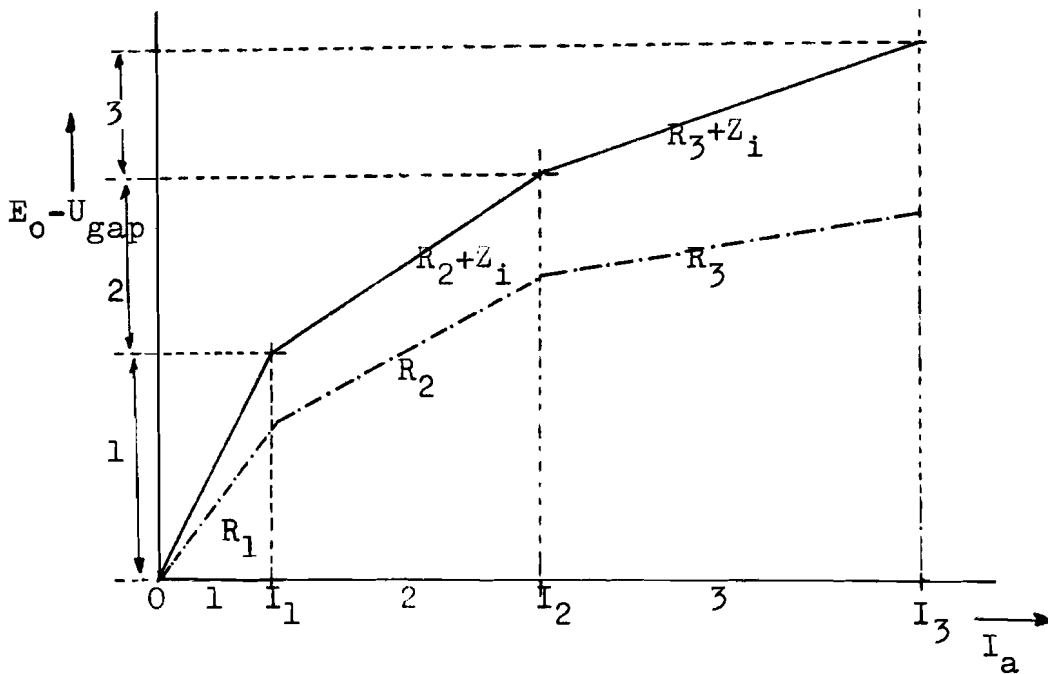
$$I_2 (Z_i + R_3) + C_3 \leq E_0 - U_{gap} < I_3 (Z_i + R_3) + C_3$$

Evenzo geldt er dat de stroom in het tweede interval ligt, als

$$I_1 (Z_i + R_2) + C_2 \leq E_0 - U_{gap} < I_2 (Z_i + R_2) + C_2$$

waarbij: $I_2 (Z_i + R_2) + C_2 = I_2 (Z_i + R_3) + C_3$

Het is dus mogelijk het interval waarin de stroom ligt te bepalen door het spanningsverschil $E_0 - U_{\text{gap}}$ te toetsen aan de $u-i$ karakteristiek van de serie schakeling van de weerstand van de overspanningsafleider en de inwendige impedantie.



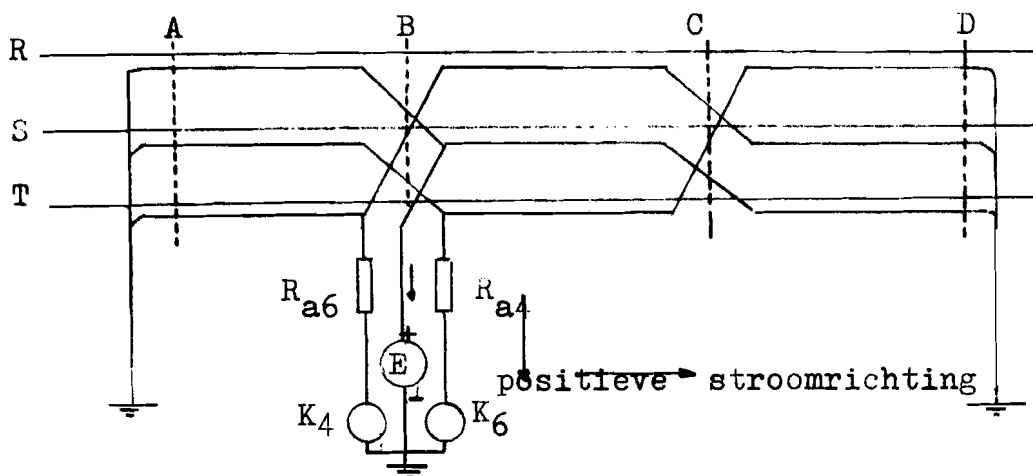
$u-i$ karakteristiek van $R_a + Z_i$

figuur 20.

U_{gap} is bekend. E_0 is de openspanning op de punten waartussen de overspanningsafleider wordt aangesloten.

Deze wordt verkregen door het uitvoeren van een berekening onder de veronderstelling dat de betreffende overspanningsafleider niet in het systeem is opgenomen, immers de spanning ter plaatse wordt bepaald door de componentspanningen en stromen, die een looptijd kT eerder zijn opgetreden bij de aangrenzende l2-poorten.

De inwendige impedantie Z_i , die bepaald wordt door de resulterende golfimpedantie tussen een mantel en aarde en door de weerstanden van de overige overspanningsafleiders, is eveneens te berekenen door de vergelijkingen op te lossen met de randvoorwaarden volgens het schema in figuur 21, waarbij verondersteld wordt dat E een excitatie is en dat het systeem daarvoor in rust was.



figuur 21.

De vergelijkingen in matrix notatie:

$$\begin{bmatrix}
 [1] & [0] & [Z'_0] & [0] & [0] \\
 [0] & [1] & [0] & -[Z'_0] & [0] \\
 [S] & -[T][S] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [Q] & -[T][Q] & -[N][Q] \\
 [N][S] & [0] & [0] & [0] & -[R_a][Q]
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 [v'_{B_1}(t)] \\
 [v'_{B_r}(t)] \\
 [i'_{B_1}(t)] \\
 [i'_{B_r}(t)] \\
 [i'_{B_a}(t)]
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 [0] \\
 [0] \\
 [0] \\
 [0] \\
 [K]
 \end{bmatrix}$$

met: $n_{22} = n_{44} = n_{66} = 1.$

$r_{a22} = 0$ $r_{a44} = R_1, R_2, R_3.$ $r_{a66} = R_1, R_2, R_3.$

$k_{22} = E$ $k_{44} = k_{66} = [U_{gap} + C]$

en $Z_i = -\frac{E}{I_{B_{a2}}}$

Het is niet noodzakelijk Z_i bij elke berekeningsstap te bepalen; het zou leiden tot een grote berekeningstijd per stap. Er kan volstaan worden met een van te voren berekende gemiddelde waarde, aangezien te verwachten is dat de variaties in Z_i ten gevolge van de weerstand van de overspanningsafleiders klein zijn. Bovendien wordt na de berekening gecontroleerd of de stroom in het geschatte interval ligt.

Het aantal herberekeningen is nu ook beperkt aangezien er op basis van het laatste resultaat een vrij nauwkeurige schatting kan worden gemaakt.

Op dezelfde wijze kunnen overspanningsafleiders op punt C worden geïntroduceerd. De beschrijving is identiek aan de voorgaande.

Enkel de hoofdletter-index geeft aan op welke kruisverbinding de spanning of stroom betrekking heeft.

Het is nu mogelijk de vergelijkingen op te lossen voor verschillende tijdstippen.

Door de gunstige verhouding van de looptijden van de komponentgolven, zal bij een konstante -storings-bronspanning de berekeningen voor elk punt slechts om de $2T$ worden herhaald.

T is de looptijd van de komponentgolf met de grootste snelheid, de geleider-mantel golf. ($T=3.27$ usek.)

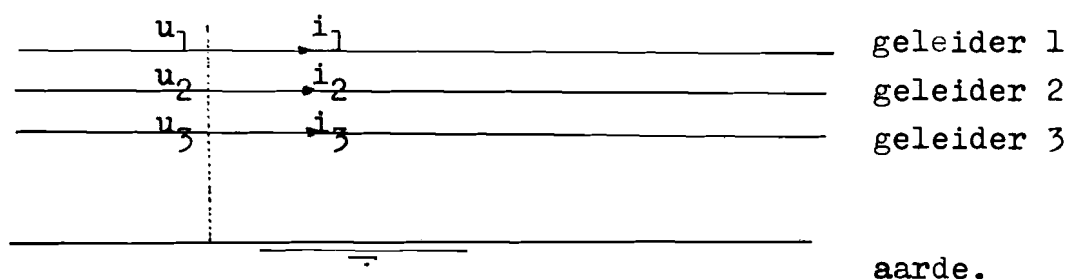
Immers de snelste golf heeft een tijd $2T$ nodig om zich eerst te verplaatsen naar de eerstvolgende kruisverbinding of kabeleind en vervolgens, na de reflectie, terug te keren naar het uitgangspunt. In dat tijdsinterval zijn er geen veranderingen waar te nemen op het uitgangspunt.

Dit houdt tevens in dat er gelijktijdig veranderingen plaatsvinden op punten die op een afstand $2u_1 T$ van elkaar verwijderd zijn, zodat berekeningen hiervoor plaatsvinden op tijdstippen die een even veelvoud zijn van T , en die voor de overige punten op oneven veelvoud van T , of omgekeerd afhankelijk van de plaats van de verstoring.

4.3. De representatie van de hoogspanningslijn.

Het kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels zal veelal deel uitmaken van een transmissienet. Het is in de praktijk mogelijk dat deze aan één of beide einden gekoppeld is aan, of overgaat in een hoogspanningslijn.

Een onderzoek naar de invloed van lijnen op het kabelsysteem en op de overspanningsafleiders vereist een model van een lijn, welke gebaseerd is op kenmerkende eigenschappen hiervan, en welke eenvoudig kan worden opgenomen in het rekenmodel.



enkelcircuit, driefasenlijn.

figuur 22.

Uitgaande van een symmetrisch enkelcircuit, verkregen door regelmatig transponeren, zijn de volgende vergelijkingen in het frekwentie domein aan te geven.

$$- \frac{d[\underline{U}]}{dx} = [\underline{Z}] [\underline{I}] \quad \text{of herleid:} \quad \frac{d^2[\underline{U}]}{dx^2} = [\underline{Z}] [\underline{Y}] [\underline{U}]$$

$$- \frac{d[\underline{I}]}{dx} = [\underline{Y}] [\underline{U}] \quad \frac{d^2[\underline{I}]}{dx^2} = [\underline{Y}] [\underline{Z}] [\underline{I}]$$

waarin:

$$[\underline{U}] = [\underline{U}(x, \omega)] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad [\underline{I}] = [\underline{I}(x, \omega)] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

De impedantie matrix $[\underline{Z}]$ en de admittantie matrix $[\underline{Y}]$ zijn volledig -gevulde- matrices:

$$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \quad [\underline{Y}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{12} \\ Y_{12} & Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & Y_{12} & Y_{11} \end{bmatrix}$$

De vergelijkingen hebben daardoor een onderlinge koppeling die het berekenen van de oplossingen niet vergemakkelijkt. Deze vergelijkingen zijn echter te herleiden tot een onafhankelijk stelsel door een transformatie op de spanningen en stromen toe te passen.

De transformatiematrix die voor dit systeem zal worden toegepast is $[S1]$. Deze is afgeleid uit de eigenvektoren van de produktmatrix $[Z][Y]$.

$$[S1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad [S1]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Aangezien $[Z][Y] = [Y][Z]$ is $[S1]$ de transformatiematrix voor zowel de spanningen als de stromen.

De transformatie is als volgt gedefiniëerd:

$$\begin{aligned} [U] &= [S1] [U'] & [U'] &= [S1]^{-1} [U] \\ [I] &= [S1] [I'] & [I'] &= [S1]^{-1} [I] \end{aligned}$$

$[U']$ en $[I']$ worden aangeduid als komponentspanningen, respectievelijk stromen.

Het verband tussen de komponentspanningen en -stromen wordt vastgelegd door de diagonaalmatrix $[Z1']$.

$$[Z1'] = \begin{bmatrix} Z1'_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z1'_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z1'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 240 & 0 & 0 \\ 0 & 240 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}$$

Zie bijlage 2 voor de gegevens van de lijn.

met: $Z1'_1 = \sqrt{Z_b/Y_b} = \sqrt{(Z_{11} - Z_{12}) / (Y_{11} - Y_{12})}$;

$$Z1'_o = \sqrt{Z_o/Y_o} = \sqrt{(Z_{11} + 2Z_{12}) / (Y_{11} + 2Y_{12})}$$

b = bedrijfs-(impedantie, admittantie)

o = homopolaire-(impedantie, admittantie).

Er zijn volgens bovenstaande matrices twee luchtgolven te onderscheiden, die zich tussen de geleiders verplaatsen en een homopolaire golf, die zich verplaatst tussen de gezamenlijke geleiders en de aarde.

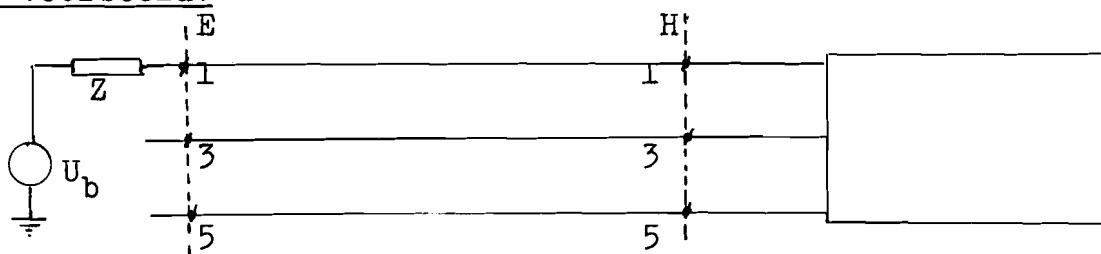
Deze golven planten zich voort met de golfsnelheden v_b respectievelijk v_o , welke als volgt gedefinieerd zijn:

$$v_b = \frac{\omega}{\text{Im} \sqrt{Z_b \cdot Y_b}} \quad \text{en} \quad v_o = \frac{\omega}{\text{Im} \sqrt{Z_o \cdot Y_o}}$$

De bijbehorende looptijden, die uiteraard afhankelijk zijn van de lengte van de lijn, worden aangeduid met Tl_b en Tl_o , of in het algemeen met Tl .

Voor de genoemde componentgolven kunnen toestandsvergelijkingen worden opgesteld, die samen met de randvoorwaarden een berekening van de spanningen en stromen op een bepaald tijdstip mogelijk maken.

Een voorbeeld:



figuur 23.

De vektornotatie van de toestandsvergelijkingen en de randvoorwaarden voor punt E zijn:

$$\begin{bmatrix} U_{E1}'(t) \\ U_{E3}'(t) \\ U_{E5}'(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11}' \\ Z_{13}' \\ Z_{15}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{E1}'(t) \\ I_{E3}'(t) \\ I_{E5}'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{H1}'(t-Tl) \\ U_{H3}'(t-Tl) \\ U_{H5}'(t-Tl) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11}' \\ Z_{13}' \\ Z_{15}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{H1}'(t-Tl) \\ I_{H3}'(t-Tl) \\ I_{H5}'(t-Tl) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} U_{E1}' = U_b - I_{E1}' Z \\ I_{E3}' = 0 \\ I_{E5}' = 0 \end{cases} \quad \text{of} \quad \begin{cases} U_{E1}' + U_{E3}' + U_{E5}' = U_b - Z(I_{E1}' + I_{E3}' + I_{E5}') \\ I_{E1}' - 2I_{E3}' + I_{E5}' = 0 \\ -2I_{E1}' + I_{E3}' + I_{E5}' = 0 \end{cases}$$

In matrix vorm:

$$\begin{bmatrix} [1] & [-Z1'] \\ [S1_1] & [QZ] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{U}'_E(t)] \\ [\bar{I}'_E(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [-Z1'] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{U}'_H(t-T1)] \\ [\bar{I}'_H(t-T1)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ [U_b] \end{bmatrix}$$

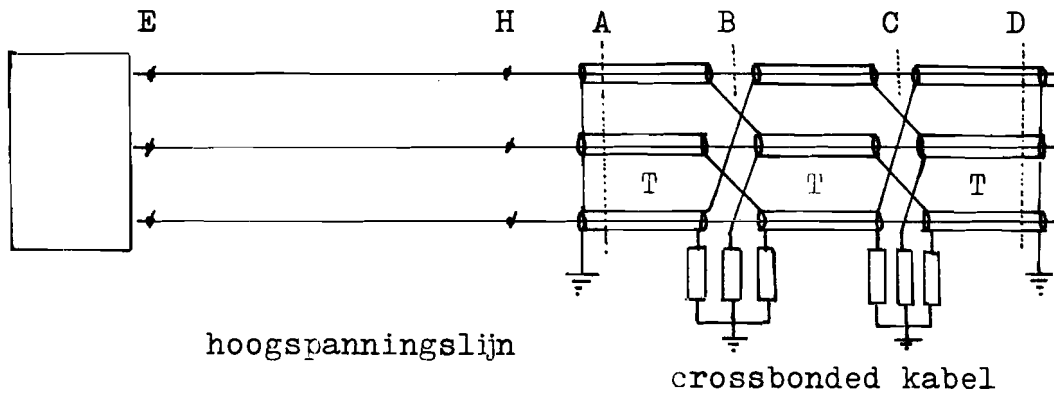
Indien de komponentspanningen en stromen in een vektor worden ondergebracht, wordt de beschrijving:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -Z1'_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -Z1'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -Z1'_0 \\ 1 & 1 & 1 & Z & Z & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U'_{E_1}(t) \\ U'_{E_2}(t) \\ U'_{E_3}(t) \\ I'_{E_1}(t) \\ I'_{E_3}(t) \\ I'_{E_5}(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -Z1'_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -Z1'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -Z1'_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U'_{H_1}(t-T1_1) \\ U'_{H_3}(t-T1_1) \\ U'_{H_5}(t-T1_0) \\ I'_{H_1}(t-T1_1) \\ I'_{H_3}(t-T1_1) \\ I'_{H_5}(t-T1_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

verkort: $[EL] \times [\bar{U}, I'_E(t)] = [HL] \times [\bar{U}, I'_H(t-T1)] + [U_b]$

Het rekenmodel van het -cross bonded- kabelsysteem legt enkele beperkingen op aan de lengte van de lijn. Dit wordt aan de hand van de volgende situatie toegelicht.



figuur 24.

De toestandsvergelijkingen voor het punt E voor de van H komende golven in komponentgrootheden van de lijn luidt:

$$[\bar{U}_E'(t)] - [Zl'] \cdot [\bar{I}_E'(t)] = [\bar{U}_H'(t-Tl)] - [Zl'] \cdot [\bar{I}_H'(t-Tl)]$$

De berekeningen in het kabelsysteem vinden, zoals reeds bekend, plaats op tijdstippen die een even of oneven veelvoud zijn van de looptijd T van de geleider-mantel golf.

De berekeningen voor punt E kunnen worden uitgevoerd gelijktijdig met de berekeningen voor A en C of gelijktijdig met die voor B en D.

In het eerste geval zullen beide looptijden van de lijn even veelvoud van T moeten zijn, in het tweede geval oneven veelvoud, aangezien er enkel op momenten, die een oneven veelvoud van T zijn, er informatie uit het verleden over spanningen en stromen op punt H, beschikbaar is.

Bovendien moet het produkt van looptijd en golfsnelheid van zowel de luchtgolven als de homopolaire golf tot hetzelfde resultaat leiden. Dit produkt geeft de lengte aan van de lijn.

In vergelijkingen vertaald:

$$L = v_b \cdot Tl_b = v_o \cdot Tl_o$$

$$Tl_b = n \cdot T$$

$$Tl_o = m \cdot T$$

m, n beide even of beide oneven.

Gebaseerd op het bovenstaande en de gegevens van de lijn (bijlage 2) zijn voor dit onderzoek een tweetal lengten vastgesteld.

Deze zijn: $L_1 = 8,7 \text{ km}$ met: n=9 en m=11

$L_2 = 53 \text{ km}$ met: n=55 en m=67

Voor beide lengten zijn n en m oneven, zodat de berekeningen voor E plaatsvinden gelijktijdig met die voor B en D.

Heeft de lijn een grote lengte, zodanig dat de looptijden van dezelfde orde grootte zijn als de beschouwingstijd, dan hebben de reflecties geen invloed op het verloop van de spanningen en stromen in het kabelsysteem.

Bij een karakteristiek afgesloten lijn zijn er geen reflecties. In beide situaties kan de lijn gerepresenteerd worden door een eenvoudig afsluitnetwerk, welke verkregen wordt door het herleiden van vergelijkingen in komponentgrootheden, die gelden voor een karakteristiek afgesloten lijn, naar vergelijkingen in fase grootheden.

De vergelijkingen in komponent grootheden zijn:

$$[U'] = [Zl'] \cdot [I']$$

In fasegrootheden:

$$[U] = [S1][Zl'] [S1]^{-1} [I]$$

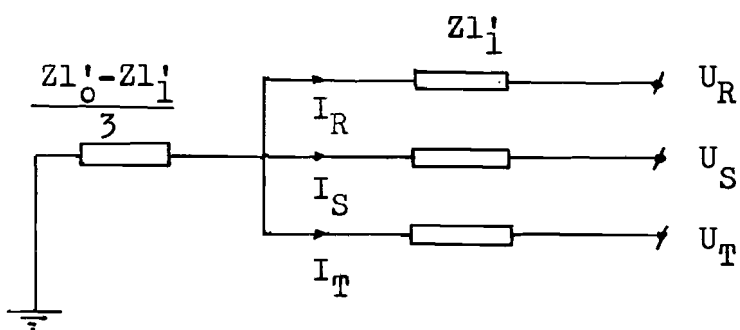
met:

$$[S1] \cdot [Zl'] \cdot [S1]^{-1} = \begin{bmatrix} 2Zl'_1 + Zl'_0 & Zl'_0 - Zl'_1 & Zl'_0 - Zl'_1 \\ Zl'_0 - Zl'_1 & 2Zl'_1 + Zl'_0 & Zl'_0 - Zl'_1 \\ Zl'_0 - Zl'_1 & Zl'_0 - Zl'_1 & 2Zl'_1 + Zl'_0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3}$$

Een splitsing van de matrix $[Z_1] = [S_1] [Z_1'] [S_1]^{-1}$ in twee afzonderlijke matrices geeft de volgende notatie mogelijkheid:

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix} = \frac{Z_{10}' - Z_{11}'}{3} \cdot \sum \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11}' & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11}' & 0 \\ 0 & 0 & Z_{11}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

Het equivalent netwerk welke volgens deze vergelijkingen kan worden opgesteld, is weergegeven in onderstaand figuur.



Vervangingsschema voor een -oneindig- lange lijn, of een karakteristiek afgesloten lijn.

figuur 25.

Voor de enkel-circuitlijn in dit onderzoek geldt:

$$Z_{11}' = 240 \text{ ohm.}$$

$$\frac{Z_{10}' - Z_{11}'}{3} = 86,7 \text{ ohm}$$

4.4. Damping in het transmissienet.

De golven die zich in het systeem voortplanten ondervinden een demping, welke veroorzaakt wordt door de verdeelde serieweerstand van de geleiders, door de van nul verschillende geleidingscoëfficiënt, door coronaverschijnselen en in de kabel door ontladingen bij hoge spanningen in luchtocclusies van het isolatiemateriaal.

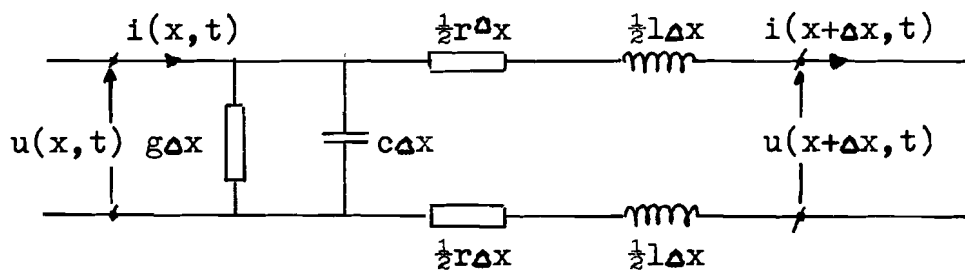
Voor wat betreft de kabel worden de hierboven genoemde verliesfactoren, met uitzondering van de serieweerstand, vertegenwoordigd door de $\tan \delta$, althans onder normale bedrijfsomstandigheden.

Vast staat dat hun invloed bij transiënten toeneemt, in welke mate is echter niet te voorspellen, gezien de complexe spannings-, frekwentie- en temperatuursafhankelijkheid.

Om deze redenen worden zij in het vervolg buiten beschouwing gelaten.

Overigens is de invloed van de geleiding bij zowel het lijncircuit als het kabelsysteem verwaarloosbaar ten opzichte van de invloed van de betreffende capaciteiten van beide systemen.

Om na te gaan op welke wijze de verliezen gerepresenteerd kunnen worden, is het noodzakelijk uit te gaan van de differentiaalvergelijkingen die voor een éénfase systeem gelden.



Equivalent network.

figuur 26.

Deze zijn:

$$-\frac{du(x,t)}{dx} = r \cdot i(x,t) + l \cdot \frac{di(x,t)}{dt}$$

$$-\frac{di(x,t)}{dx} = g \cdot u(x,t) + c \cdot \frac{du(x,t)}{dt}$$

De Fourier transformatie van deze vergelijkingen geeft:

$$-\frac{dU}{dx} = ZI \quad \text{of herleid:} \quad \frac{d^2U}{dx^2} = ZYU = k^2U$$

$$-\frac{dI}{dx} = YU \quad \frac{d^2I}{dx^2} = YZI = k^2I$$

waarbij:

$$U = U(x, \omega) \quad Z = r + j\omega l$$

$$I = I(x, \omega) \quad Y = g + j\omega c$$

$$k^2 = (r + j\omega l)(g + j\omega c)$$

De algemene oplossing van deze vergelijkingen in het frekwentiedomein is:

$$U(x, \omega) = A(\omega) \cdot e^{-kx} + B(\omega) \cdot e^{kx}$$

$$I(x, \omega) = \frac{A(\omega) \cdot e^{-kx} - B(\omega) \cdot e^{kx}}{Z_g}$$

waarin $A(\omega)$ en $B(\omega)$ konstanten zijn, vastgelegd door de randvoorwaarden en

$$Z_g = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$$

De verwaarlozing van de geleiding g en de veronderstelling dat $r/\omega l \ll 1$ leidt tot de onderstaande vereenvoudiging:

$$k \approx r/2Z_0 + j\omega\sqrt{l \cdot c}$$

$$Z_g \approx Z_0$$

met: $Z_0 = \sqrt{l/c}$

Substitutie in de algemene oplossingen levert:

$$U(x, \omega) = A(\omega) \cdot e^{-(r/2Z_0)x} \cdot e^{-j\omega\sqrt{l \cdot c} \cdot x} + B(\omega) \cdot e^{(r/2Z_0)x} \cdot e^{j\omega\sqrt{l \cdot c} \cdot x}$$

$$I(x, \omega) = \frac{A(\omega) \cdot e^{-(r/2Z_0)x} \cdot e^{-j\omega\sqrt{l \cdot c} \cdot x} - B(\omega) \cdot e^{(r/2Z_0)x} \cdot e^{j\omega\sqrt{l \cdot c} \cdot x}}{Z_0}$$

Getransformeerd naar het tijdsdomein:

$$u(x,t) = e^{-(r/2Z_0)x} \cdot f(x-vt) + e^{(r/2Z_0)x} \cdot g(x+vt)$$

$$i(x,t) = \left[\frac{e^{-(r/2Z_0)x} \cdot f(x-vt) - e^{(r/2Z_0)x} \cdot g(x+vt)}{Z_0} \right]$$

met: $v = 1/\sqrt{1/c}$

De toestandsvergelijkingen worden:

$$u_a(t) - Z_0 \cdot i_a(t) = [u_b(t-T) - Z_0 \cdot i_b(t-T)] \cdot e^{-(r/2Z_0) \cdot L}$$

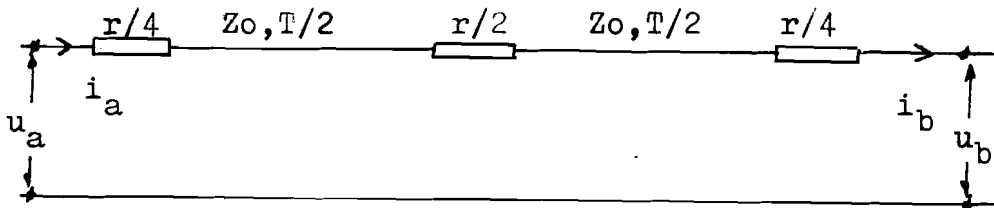
$$u_b(t) + Z_0 \cdot i_b(t) = [u_a(t-T) + Z_0 \cdot i_a(t-T)] \cdot e^{-(r/2Z_0) \cdot L}$$

waarbij: L = afstand tussen a en b.

Indien niet voldaan wordt aan de eerdere veronderstellingen, is de representatie van de verliezen zoals boven aangegeven niet toelaatbaar.

Een minder eenvoudige representatie is dan mogelijk.

Deze wordt gerealiseerd door op verschillende plaatsen in het verliesvrije systeem serieweerstanden aan te brengen, [15] zoals in onderstaande figuur is aangegeven.



figuur 27.

De toestandsvergelijkingen zijn nu:

$$u_a(t) - Z_1 \cdot i_a(t) = \frac{Z_0}{Z_1} \cdot [u_b(t-T) - Z_2 \cdot i_b(t-T)] + \frac{r}{4Z_1} \cdot [u_a(t-T) + Z_2 \cdot i_a(t-T)]$$

$$u_b(t) + Z_1 \cdot i_b(t) = \frac{Z_0}{Z_1} \cdot [u_a(t-T) + Z_2 \cdot i_a(t-T)] + \frac{r}{4Z_1} \cdot [u_b(t-T) - Z_2 \cdot i_b(t-T)]$$

met: r = de totale weerstand van de lijn.

Z₀ = de golfimpedantie = $\sqrt{1/c}$

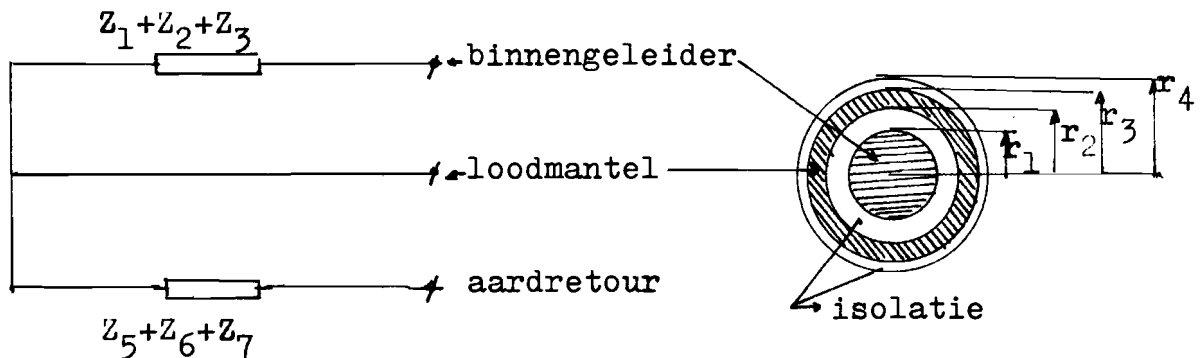
Z₁ = Z₀ + r/4 en Z₂ = Z₀ - r/4

De dempingsfactoren worden gebaseerd op een frekwentie van 1 kHz, in aansluiting op de voorgaande studie. [1]

Op blz 67 zijn een aantal grafieken opgenomen, die het verloop weergeven van $r/\omega l$ als functie van de frekwentie voor de verschillende componentgolven in het systeem.

De weerstanden r en zelfinducties l voor de componentgolven van de kabel worden bepaald aan de hand van:

- de voortplantingskonstanten van deze golven. [1]
- het onderstaand vervangingsschema voor een in de grond begraven éénfase kabel, opgesteld door prof. Wedepohl. [14]



Vervangingsschema van een eenfase kabel in de grond.

figuur 28.

waarin:

$$Z_1 = \frac{\rho_m \cdot I_0(mr_1)}{2\pi r_1 I_1(mr_1)} = \text{de impedantie van de binnengeleider.}$$

$$Z_2 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \text{de impedantie t.g.v. het magnetisch veld in de hoofdisolatie.}$$

$$Z_3 = \frac{\rho m}{2\pi r_2} \coth m\Delta - \frac{\rho}{2\pi r_2(r_2+r_3)} = \text{de impedantie van het binnenoppervlak van de mantel.}$$

$$Z_5 = \frac{\rho m}{2\pi r_3} \coth \Delta m + \frac{\rho}{2\pi r_3(r_2+r_3)} = \text{de impedantie van het buitenoppervlak van de mantel.}$$

$$Z_6 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3} = \text{de impedantie t.g.v. het magnetisch veld in de mantelisolatie.}$$

$$Z_7 = \frac{\mu_0\omega}{8} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,85 \sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{r_3} = \text{de impedantie van de aardretour}$$

Alle impedanties in Ohm/m. $\Delta = r_3 \cdot r_2$; $m = \sqrt{j\omega\mu/\rho}$

Het relatief laag magnetisch veld in de mantel is verwaarloosd. Er bestaat dus geen magnetische koppeling tussen het buiten en binnen oppervlak van de mantel.

Indien de binnengeleider en de mantel, respectievelijk de mantel en de aardretour als circuits worden beschouwd, is de volgende impedantiematrix op te stellen:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_7 & Z_5 + Z_6 + Z_7 \\ Z_5 + Z_6 + Z_7 & Z_5 + Z_6 + Z_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{22} \\ Z_{22} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

De wederzijdse koppeling tussen de kabels van de verschillende fasen geeft een impedantie:

$$Z_{33} = \frac{\mu\omega}{8} + \ln \frac{1,85 \sqrt{\rho/a/\mu\omega}}{s}$$

s = de afstand tussen de kabels.

ρ/a = soortelijke weerstand van de aarde

De voortplantingskonstanten van de componentgolven van de kabel zijn voor:

$$\begin{aligned} \text{-geleider-mantel component} & k_1 = \sqrt{(Z_{11} - Z_{22}) \cdot Y_1} \\ \text{-mantel -mantel component} & k_2 = \sqrt{(Z_{22} - Z_{33}) \cdot Y_2} \\ \text{-homopolaire component} & k_0 = \sqrt{(Z_{22} + 2Z_{33}) \cdot Y_2} \end{aligned}$$

De volgende relaties gelden nu:

$$\begin{aligned} r_1 &= \operatorname{Re} [Z_{11} - Z_{22}] & (\omega l)_1 &= \operatorname{Im} [Z_{11} - Z_{22}] \\ r_2 &= \operatorname{Re} [Z_{22} - Z_{33}] & (\omega l)_2 &= \operatorname{Im} [Z_{22} - Z_{33}] \\ r_0 &= \operatorname{Re} [Z_{22} + 2Z_{33}] & (\omega l)_0 &= \operatorname{Im} [Z_{22} + 2Z_{33}] \end{aligned}$$

De gegevens van de lijn (r, l en c) zijn ontleend aan de resultaten van computerberekeningen voor een bestaand 150 kV lijncircuit (Geertruidenberg-Breda), uitgevoerd door ir. Birkhölzer. Deze gegevens zijn ondergebracht op bijlage 2.

Uit de grafieken blijkt dat voldaan wordt aan $r/\omega l \ll 1$ voor alle componentgolven. Bovendien zijn de waarden bij 1 kHz voldoende laag om de demping met een exponentiële faktor te representeren.

De grafieken op blz. 67 geven ook de demping in dB/km weer als funktie van de frekwentie, berekend volgens:

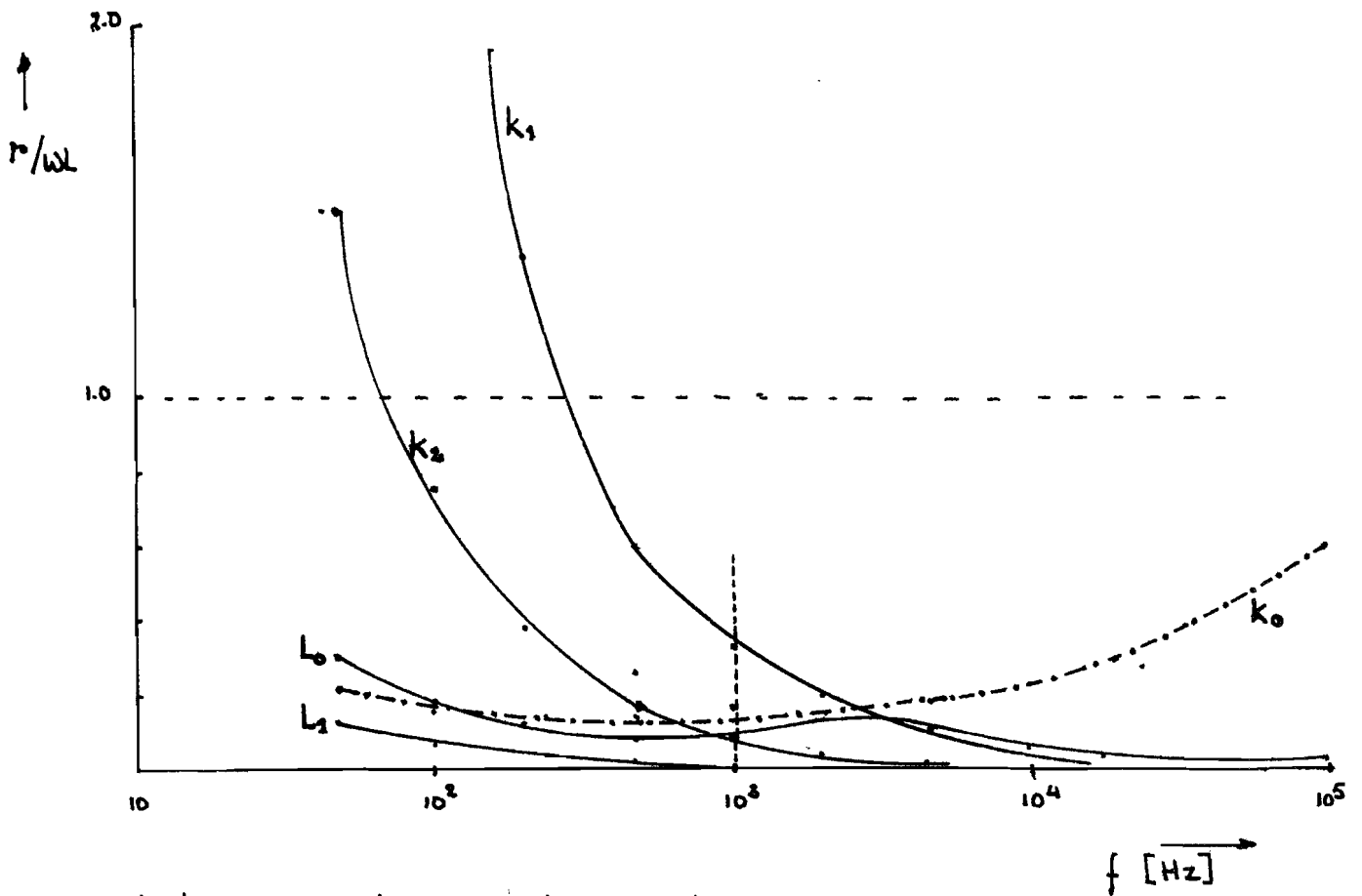
$$\text{aantal dB} = 20 \cdot \log e^{r/2Z} = 8,68(r/2Z)$$

Indien de lengte L bekend is, kunnen de exponentiële dempingsfactoren als volgt uit de grafiek worden bepaald:

$$e^{-(r/2Z) \cdot L} = \exp \left[- \frac{\text{aantal dB}}{8,68} \cdot L \right]$$

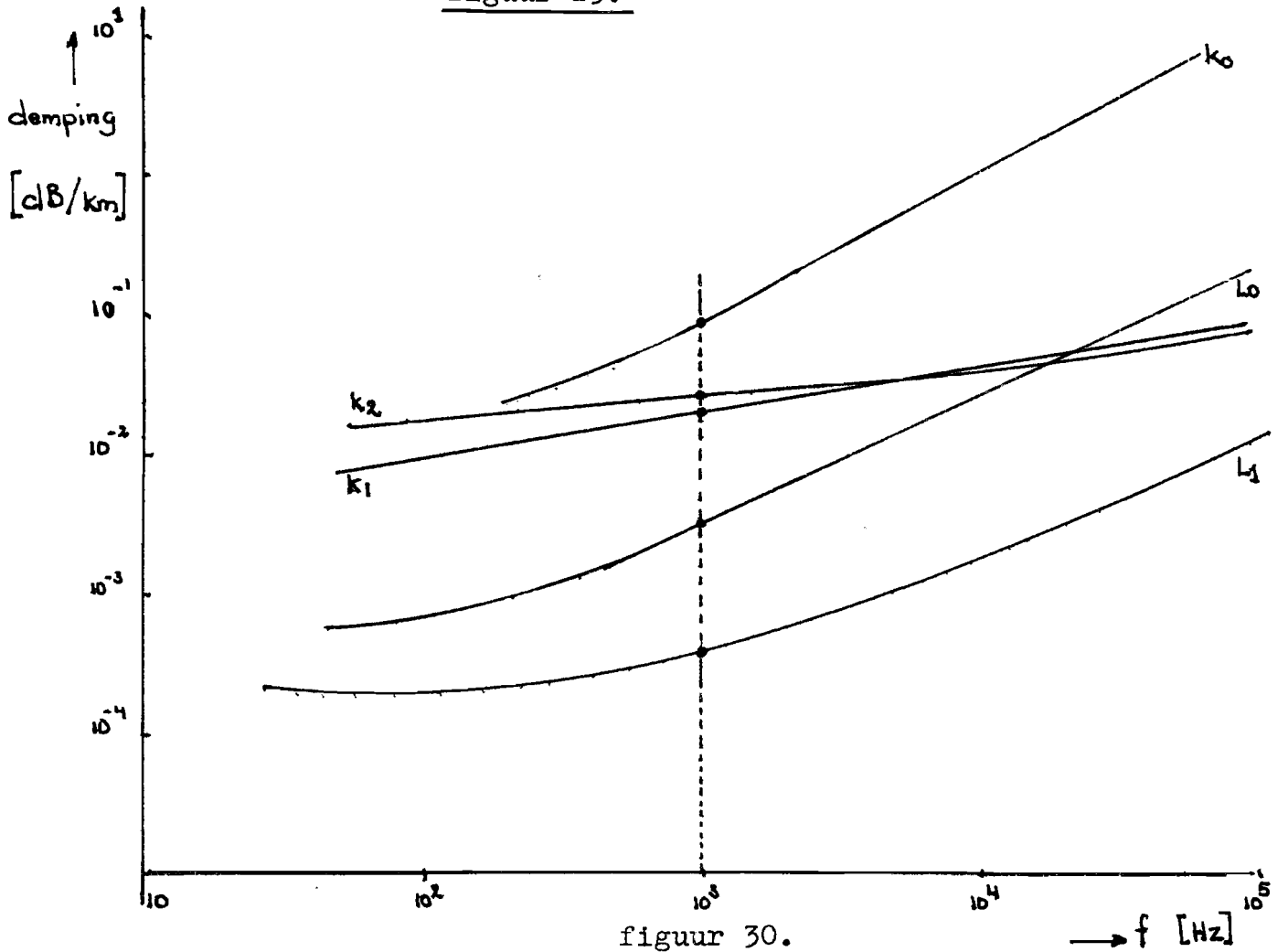
Voor de verschillende komponentgolven zijn de exponentiële dempingsfactoren:

TABEL IV						
Exponentiële dempingsfactoren v.d. komponentgolven.						
kabel			lijn			
geleider- mantel	mantel- mantel.	homo- polaire	geleider- geleider.		homopolaire	
$\frac{1}{2}$ km	$\frac{1}{2}$ km	$\frac{1}{2}$ km	8.7 km	53 km	8.7 km	53 km
0.996	0.995	0.981	0.999	0.984	0.989	0.938



L = Lyn
 K = KABEL
 0 = homoplaire komponent.
 1 = Lucht komp. resp geleider-mantel komponent.
 2 = mantel - mantel komponent.

figuur 29.



figuur 30.

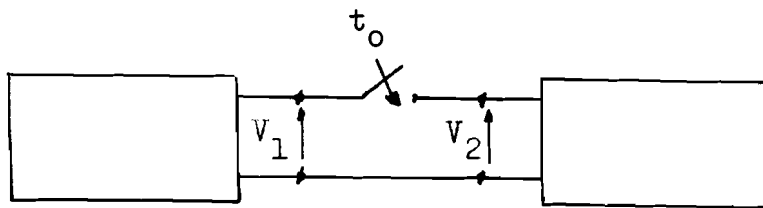
4.5. Bron-representatie.

Veranderingen in de stationaire toestand van een net, veroorzaakt door schakelhandelingen of storingen, kunnen bij model-studies volgens de komplementaire methode worden gesimuleerd.

Bij deze methode wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen de stationaire situatie en de verstoring, de oorzaken en gevolgen hiervan worden afzonderlijk beschouwd. Naderhand worden de resultaten, voor zover nodig, volgens het superpositiebeginsel verenigd.

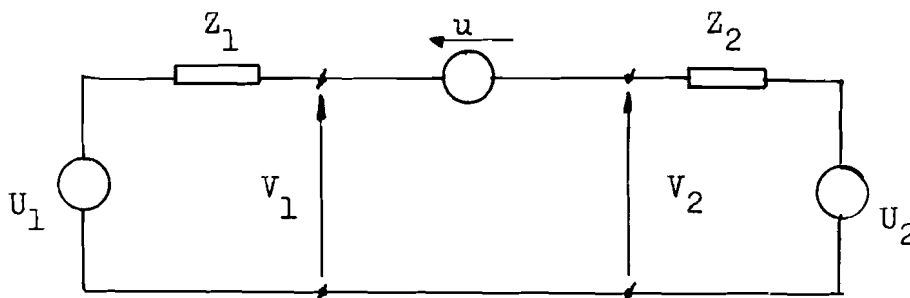
Een voorbeeld:

Veronderstel dat de schakelaar in onderstaand schema geopend is en dat deze op het tijdstip t_0 gesloten wordt.



figuur 31.

Deze situatie wordt gerepresenteerd door de volgende voorstelling:

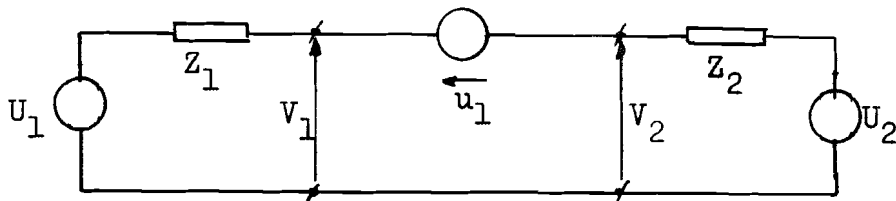


figuur 32.

waarin:

$$u = \begin{cases} V_1 - V_2 & \text{voor } t < t_0 \\ 0 & \text{voor } t \geq t_0 \end{cases}$$

De scheiding in stationaire situatie en verstoring:

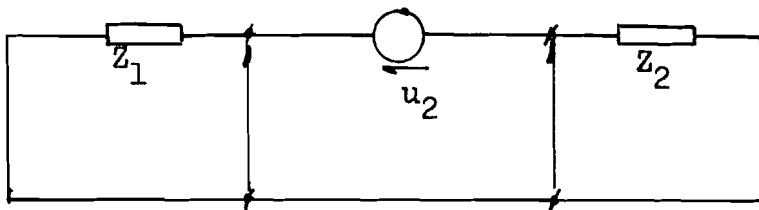


figuur 33.

met:

$$u_1 = V_1 - V_2$$

en:



figuur 34.

met:

$$u_2 = \begin{cases} 0 & \text{voor: } t < t_0 \\ -(V_1 - V_2) & \text{voor: } t > t_0 \end{cases}$$

De berekeningen worden volgens bovenstaande schemas afzonderlijk uitgevoerd, daarna vindt de superpositie plaats. Deze komplementaire methode leent zich bijzonder goed voor toepassing in het rekenmodel voor het -crossbonded- kabelsysteem.

In de stationaire situatie verkeert namelijk, zoals reeds bekend, het gehele mantelcircuit in rust, zodat enkel de gevolgen van de verstoring berekend moeten worden.

Van belang zijn de volgende situaties:

- het inschakelen- de schakelaar wordt vervangen door een seriebron.
- kortsluiting- > -de fase-aardeverbinding die de kortsluiting
- ontlading > vormt, respektievelijk de aardingschakelaar worden vervangen door een bron tussen fase en aarde.

De grootte en het verloop van de spanningen van deze bronnen komen in het volgend hoofdstuk, voor specifieke situaties, aan de orde.

5. Berekeningen aan het kabelsysteem in een transmissienet.

Het kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels vormt veelal een onderdeel van een transmissiesysteem, waarin, naar gelang de vraag naar elektrische energie, voortdurend veranderingen worden aangebracht in de configuratie. Deze veranderingen vereisen schakelhandelingen, zoals het in- en uitschakelen, maar ook het aarden van bovengrondse lijnen, die eerder buiten bedrijf zijn gesteld.

Behalve deze overgangssituaties, die gewenst zijn, komen er echter ook kortsluitingen voor die een verstoring in de gewenste bedrijfstoestand teweeg brengen.

Het uitvoeren van schakelhandelingen en het optreden van kortsluitingen in het transmissienet zullen, afhankelijk van de aard en de plaats van de verstoring die zij veroorzaken, invloed hebben op het verloop van spanningen en stromen in het kabelsysteem.

Met de modellen die in het voorgaande behandeld zijn, is het mogelijk een aantal eenvoudige, maar wel realistische transmissiesystemen te representeren, welke voor nader onderzoek in aanmerking komen.

De richtlijnen voor de keuze van de configuraties waarvoor berekeningen interessant zijn, volgen uit de beschikbare gegevens.

Allereerst blijkt uit eerder uitgevoerde berekeningen, dat er een verband bestaat tussen de grootte van een invallend golf op één fase en de grootte van de hoogste en tevens initiële mantelspanningen op de eerste kruisverbinding.

Zonder een uitspraak te doen over het gedrag van het objekt of systeem, welke de oorzaak is van de binnen-dringende golf aan het begin van het kabelsysteem, kan gesteld worden dat deze in eerste instantie te vervangen is door een spanningsbron en een inwendige impedantie. Naarmate deze impedantie lager is en de spanning van de bron hoger is, zullen de golven die het systeem binnendringen groter zijn, en in het geval het één fase betreft, zeker leiden tot de hoogste mantelspanningen.

Als tweede uitgangspunt zijn bovengeschetste situaties, die tijdens de normale bedrijfsvoering voorkomen, aan te wijzen.

Het in- of uitschakelen van circuits zijn handelingen die zeker vaker voorkomen.

Deze handelingen mogen in principe er niet toe leiden dat de overspanningsafleiders aanspreken, aangezien het frekvent aanspreken tot meer onderhoud kan leiden.

Het zal echter van het circuit, welke aan het kabelsysteem gekoppeld wordt, afhangen of deze handeling probleemloos verloopt.

Om de effecten, waaronder de spanningsopbouw in de geleiders van de kabels en uiteraard het verloop van de mantelspanningen, na te gaan, worden een aantal berekeningen uitgevoerd voor schakelhandelingen, die gerangschikt kunnen worden onder het direkt- en indirekt inschakelen van het kabelsysteem.

Het direkt inschakelen houdt in dat de schakelaars zich aan het begin van het kabelsysteem bevinden. Bij het indirekt inschakelen is een lijn- of kabelcircuit tussen het -cross bonded- kabelsysteem en de schakelaars opgenomen.

De schakelaars in de driefasen zullen niet gelijktijdig sluiten om zowel mechanische als elektrische redenen.

Het tijdsverloop tussen het sluiten van twee schakelaars kan onder deze omstandigheden voldoende groot zijn om een éénfase inschakeling te beschouwen. Deze veronderstelling zal in de praktijk niet altijd gelden, niettemin wordt bij het uitvoeren van berekeningen, dit als uitgangspunt gekozen.

Verondersteld wordt dat de inschakeling plaatsvindt bij de topwaarde van de spanning.

Deze is voor een 150 kV systeem gelijk aan $U_b = \frac{170\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 139 \text{ kV}$.

Dit is tevens de spanningswaarde van de bron die de schakelaar representeert.

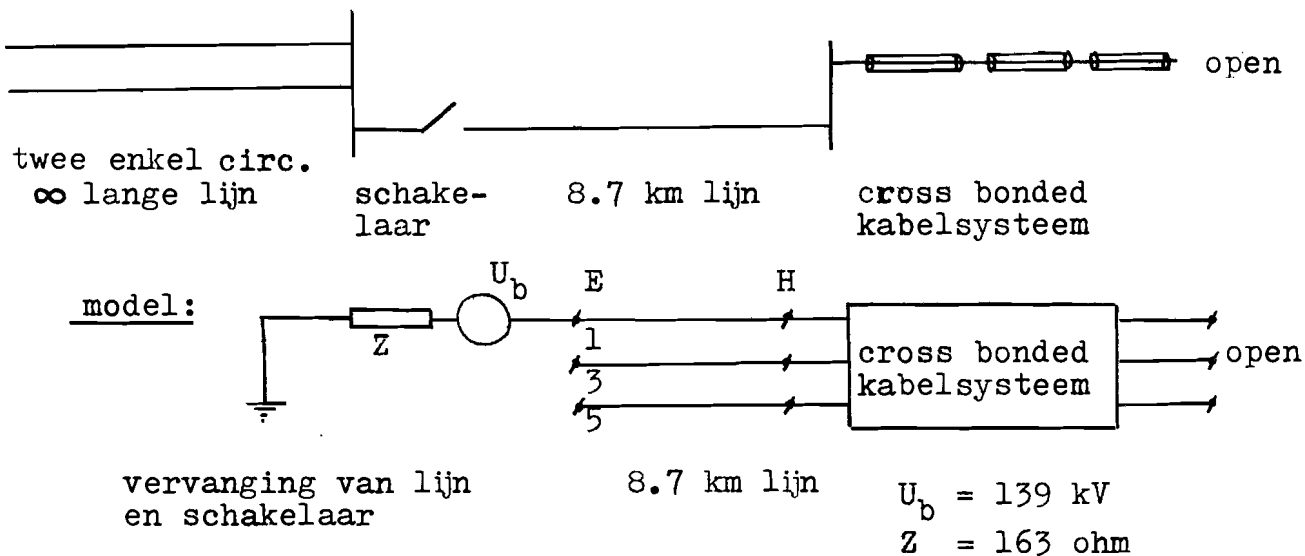
Het verloop van de spanning is sinusvormig, maar wordt bij de berekeningen konstant verondersteld, daar de spanningssteilheid bij het maximum klein is. De geleidelijke daling van de spanning zal niet leiden tot grote veranderingen in het mantelcircuit.

De resultaten bij een konstante spanning geven aldus een bovengrens aan. De beschouwingstijd mag echter niet veel groter zijn dan twee millisekonden, aangezien de spanning dan gedaald is tot 80% van de topwaarde, terwijl ook de steilheid toegenomen is.

De configuraties waarvoor berekeningen zijn uitgevoerd, worden in het volgende schematisch weergegeven en toegelicht.

5.1. Inschakelen.

a. Indirekt.



figuur 35.

Het kabelsysteem wordt ingeschakeld via een hoogspanningslijn van 8.7 km. Deze lijn en de daaraan voorafgaande langere lijn worden gerepresenteerd volgens de twee methoden aangegeven in paragraaf 4.4.

De waarde van de impedantie Z wordt verkregen uit de parallelschakeling van twee vervangingsschema's voor een oneindig lange lijn. (zie figuur 25)

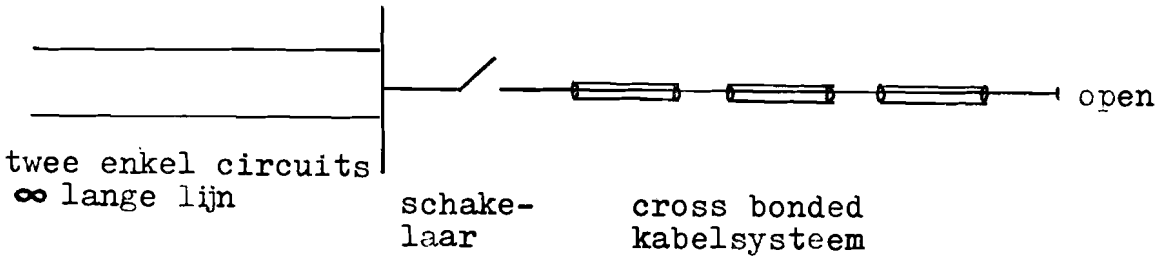
De inwendige impedantie gezien vanuit het kabelsysteem wordt gevormd door de golfimpedanties van beide lijnen. Deze impedantie is veel groter dan de impedantie van de kabel, waardoor verwacht wordt dat de geleiderspanningen van de kabel geleidelijk zullen toenemen, en dat als gevolg daarvan de mantelspanningen niet het aanspreekniveau van de overspanningsafleiders bereiken.

De resultaten van deze berekeningen kunnen een indruk geven van de invloed van de reflecties en van de onderlinge koppeling van de lijnen op het kabelsysteem.

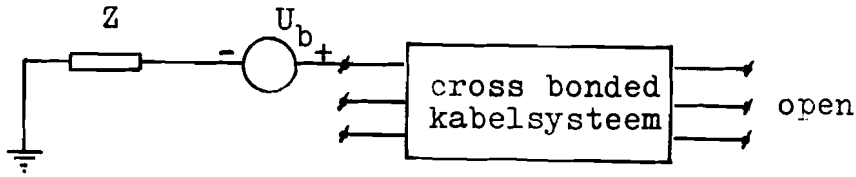
b. Direkt.

Om een uitspraak te doen over het effect van reflecties van een korte lijn is het noodzakelijk de resultaten van de korte lijn te vergelijken met de resultaten van een lange lijn, waarbij geen reflecties optreden.

Het schema voor deze situatie is:



model:



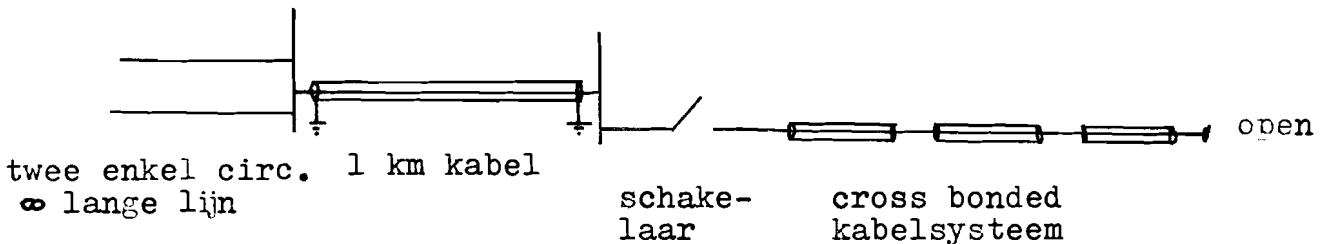
vervanging van
de enkel circuits

$$U_b = 139 \text{ kV}$$

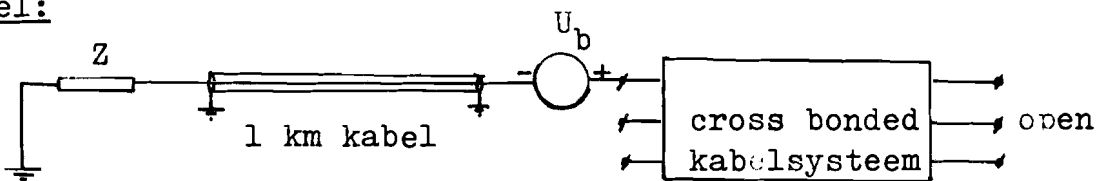
$$Z = 163 \text{ ohm}$$

figuur 36.

Een voorbeeld van het inschakelen via een lage impedantie is het koppelen van twee kabels, zoals weergegeven in figuur



model:



vervanging van
de enkel circuits

$$U_b = 139 \text{ kV}$$

$$Z = 163 \text{ ohm}$$

figuur 37.

Het is mogelijk dat de hoge reflectie aan het begin van de 1 km kabel ten gevolge van de hoge impedantie van de lange lijn een nadelige invloed heeft op de spanningen in het cross bonded kabelsysteem. Interessant is of de mantelspanningen zo hoog worden dat er overspanningsafleiders aanspreken. De representatie van de korte kabel in het rekenmodel vindt op dezelfde wijze plaats als de kabels in het cross bonded kabelsysteem. Er is echter maar een componentgolf, de geleidermantel component.

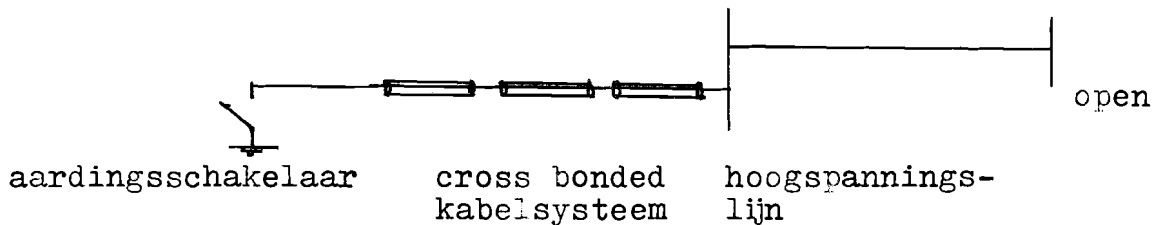
Een ander voorbeeld van een schakelhandeling, waarop al eerder gewezen is, betreft het aarden van een buiten bedrijf gestelde lijn of kabel.

De lijn of de kabel kan na het uitschakelen nog opgeladen zijn tot spanningen die gelijk of zelfs hoger zijn dan de maximale spanning van het systeem.

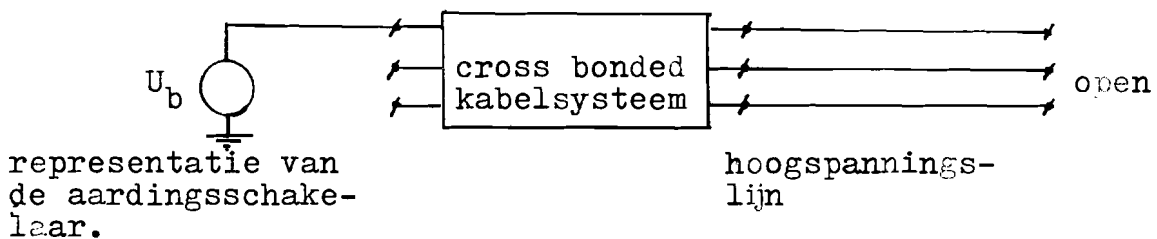
Door aarding wordt de energie naar aarde afgeleid. Er ontstaat daarbij een stroompuls, waarvan de duur afhankelijk is van de energieinhoud van het systeem. Op deze stroompuls zijn de IEC voorschriften waaraan de heavy duty overspanningsafleiders moeten voldoen, gebaseerd.

Of er bij het ontladen van een lijn via een cross bonded kabelsysteem een grote energie overdracht naar het mantelcircuit plaats vindt, welke vervolgens door de overspanningsafleiders wordt afgevoerd, wordt bepaald uit de resultaten van berekeningen voor de volgende situatie:

5.2. Ontlading.



model:



$$U_b = 139 \text{ kV}$$

figuur 38.

Verondersteld wordt dat de ontlading zo dicht mogelijk bij het kabelsysteem plaats vindt. Deze is dan te representeren door een spanningsbron zonder inwendige weerstand.

Onder deze omstandigheden mag verwacht worden dat de mantelspanningen veel groter zullen zijn dan in de voorgaande gevallen.

Om na te gaan of de lengte van de lijn, en dus de energie-inhoud van het systeem in verband staat met de energiedissipatie van de eventueel aangesproken overspanningsafleiders in het mantelcircuit, worden de berekeningen uitgevoerd voor verschillende lengten van de lijn, namelijk 0 km, 8.7 km en 53 km.

Verder wordt verondersteld dat het systeem is opgeladen tot een spanning die gelijk is aan de topwaarde van de maximale systeemspanning. Deze is 139 kV, zodat ook in het model $U_b = 139$ kV.

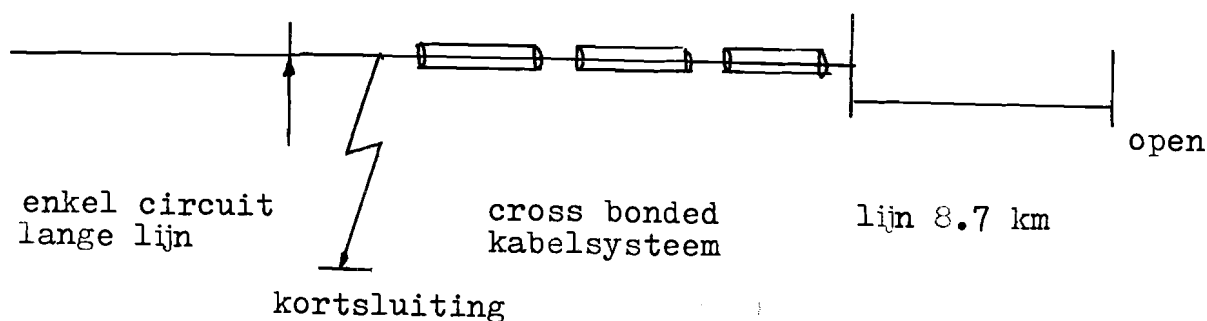
Een storings situatie welke ook voor nader onderzoek in aanmerking komt is de kortsluiting. Deze situatie is enigszins te vergelijken met het aarden van een lijn of kabel. In beide gevallen is een geleider met aarde verbonden. De transiënte verschijnselen gaan hier echter over in een stationaire toestand, gekenmerkt door bedrijfsfrequentie spanningen en stromen, althans voor zover de beveiliging niet heeft aangesproken.

Evenals de lijnontlading is de representatie van de kortsluiting terug te voeren tot een bron en een inwendige impedantie.

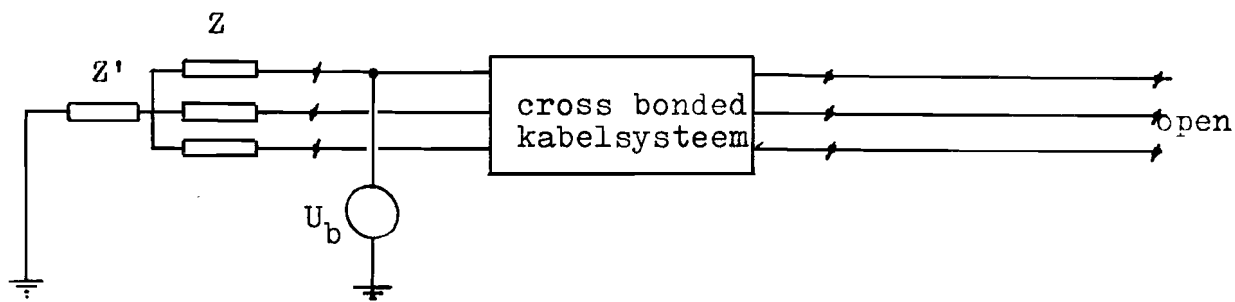
De inwendige impedantie is afhankelijk van de plaats van de fout en van de impedantie van de sluiting zelf. Derhalve treden de grootste overspanningen op bij een sluiting nabij het kabelsysteem op het moment dat de spanning maximaal is.

Het laatste is veelal het geval, zodat ook in dit geval aan de spanningsbron een waarde van 139 kV wordt toegekend.

5.3. Kortsluiting.



model:



vervanging van
het enkelcircuit

representatie
van de kort-
sluiting

8.7 km lijn

$$U_b = 139 \text{ kV}$$

$$Z = 240 \text{ ohm}$$

$$Z' = 86,7 \text{ ohm}$$

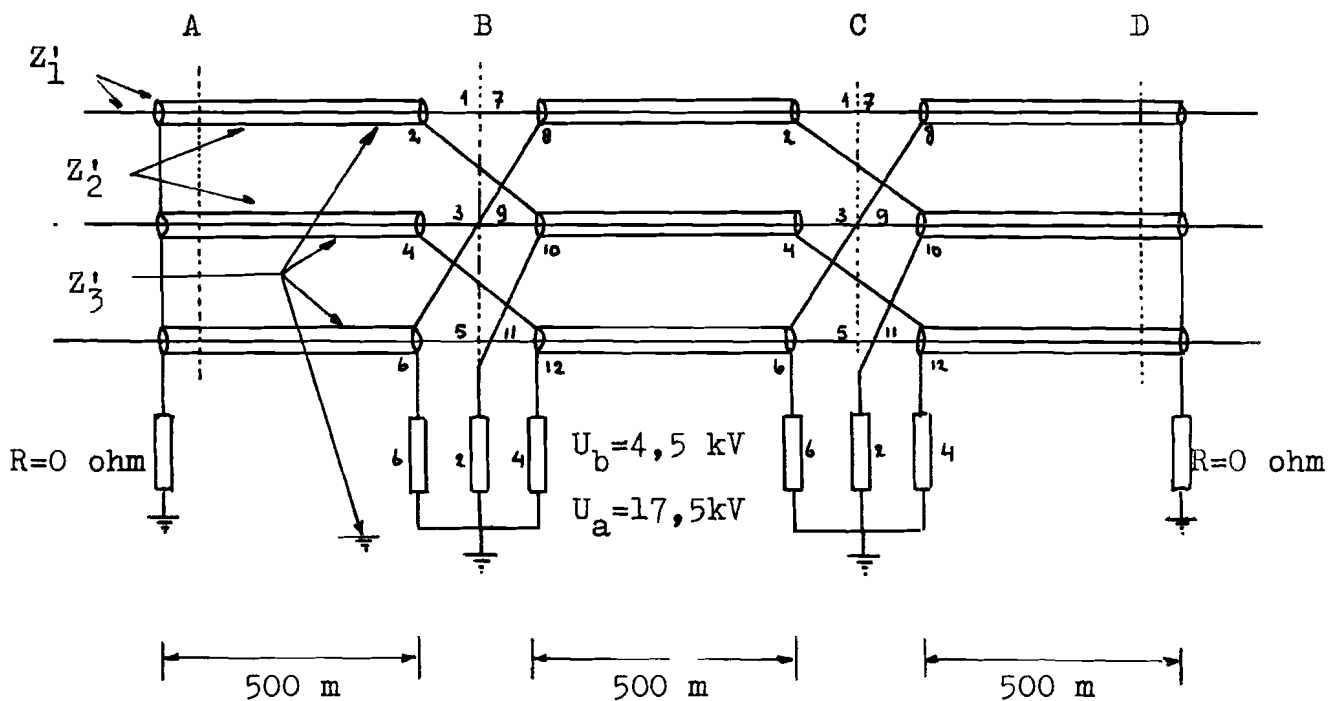
figuur 39.

Er wordt een eenpolige fout verondersteld, daar meerpolige fouten niet of zelden gelijktijdig in alle fasen optreden, en de transiënten uitgedempt zullen zijn als de andere fase sluiting maakt. De impedantie van de fout wordt gelijk aan nul verondersteld.

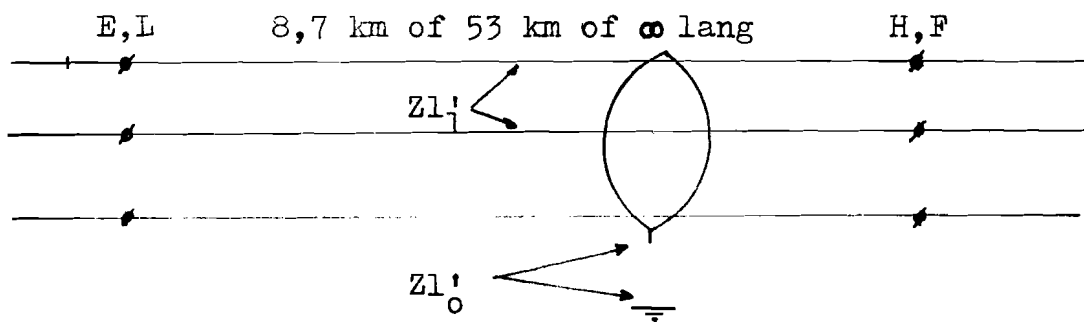
De bovenstaande netkonfiguraties worden geacht representatief te zijn voor een groot aantal mogelijkheden, die tot de hoogste spanningen en stromen in het mantelcircuit kunnen leiden. Het verschil in de beschouwde configuraties strekt zich ook uit tot de verandering in de reflectie factoren voor de golven in het kabelsysteem aan het begin en het einde van de kabels.

6. Berekeningsresultaten.

Alvorens over te gaan tot het bespreken van enkele van de vele resultaten, verkregen uit berekeningen voor de geselecteerde systeemconfiguraties, worden een aantal gegevens samengevat, welke in het volgende van belang zijn als achtergrond-informatie.



Het kabelsysteem.



Het lijncircuit.

figuur 40.

De nu volgende systeem- en modelgegevens worden gerangschikt onder het (deel-)systeem waar zij betrekking op hebben:

algemeen.

- de systeemspanning is 150 kV.
- de symmetrische driefasen kortsluitstroom $I_k = 40 \text{ kA}$.

- het model berekent enkel de transiënte verschijnselen; de 50-Hz spanningen worden niet gesimuleerd.
- de demping is voor alle komponentgolven in het kabel- en of lijnsysteem gerepresenteerd.

het kabelsysteem.

- het kabelsysteem is 1,5 km lang; de mantels zijn onderverdeeld in drie sekties van elk 500 m lengte.
- op beide kruisverbindingen, B-en C, zijn overspanningsafleiders opgesteld.
- de mantels aan de kabeleinden zijn onderling doorverbonden en direkt geaard; de aardingsweerstand is derhalve nul ohm.
- de golfimpedanties en de looptijden van de drie groepen onafhankelijke komponentgolven in het kabelsysteem zijn, voor de geleider-mantelkomponent: $Z_1' = 20$ ohm, $T_1 = T = 3,27$ usek.
mantel -mantelkomponent: $Z_2' = 14$ ohm, $T_2 = 5T$.
homopolaire komponent : $Z_3' = 42,6$ ohm, $T_3 = 15T$.

de bovengrondse lijnen.

- in het model hebben de lijnen een lengte van 8,7 km, 53 km of ze worden als oneindig lang beschouwd.
- de golfimpedanties van de geleider-geleider- en homopolaire-komponentgolven zijn: $Z_{l_1}' = 240$ ohm
 $Z_{l_0}' = 500$ ohm.
- de looptijden zijn voor:
8,7 km: $T_{l_1} = 9T$ en $T_{l_0} = 11T$.
53 km: $T_{l_1} = 55T$ en $T_{l_0} = 67T$.

de overspanningsafleiders.

- de overspanningsafleiders zijn in ster geschakeld en het sterpunt is geaard.
- de nominale bedrijfsspanning is 4,5 kV; de aanspreekspanning is 17,5 kV.
- de niet lineaire karakteristiek van de weerstand wordt benaderd door drie rechten. ($R = 9 - 1,35 - 0,24$ ohm)
- de blussende werking van de aktieve vonkbrug is uitgeschakeld, daar de 50 Hz spanningen niet gesimuleerd worden.
- het bluskriterium is een stroom-nuldoorgang; dit kriterium zal later vervallen, de overspanningsafleiders doven dan niet.

Voor de uitvoering van de berekeningen werd gebruik gemaakt van een digitale computer, de Burroughs 7700, opgesteld in het Rekencentrum van de Technische Hogeschool Eindhoven. Het programma is geschreven in een voor deze computer gemodificeerde vorm van Algol-60.

Voor een maximale beschouwingstijd van 1,635 millisekonden, overeenkomend met 500T, welke voortvloeide uit de resultaten zelf, werden voor de systeemkonfiguraties, aangegeven in het voorgaande hoofdstuk de volgende grootheden berekend:

- de geleider- en mantelspanningen op de kruisverbindingen en kabeleinden.
- de stroom door de overspanningsafleiders.
- de geleiderspanningen en -stromen aan het begin en het eind van de lijn of kabel, gekoppeld aan het kabelsysteem.

In een enkele geval werden ook de geleider- en mantelstromen aan het begin van het kabelsysteem, waar de verstoring optreedt, berekend.

De energie, gedissipeerd door de verschillende overspanningsafleiders, werd berekend door de sommatie van het produkt van de spanning over en de stroom door de overspanningsafleider en een tijdsinterval $2T$, verkregen bij elke berekeningsgang. Enkele resultaten zijn in de vorm van grafieken weergegeven in de figuren 41 t/m 58.

De bespreking van de resultaten vindt bij uitstek plaats volgens de eerder aangehouden volgorde bij de selectie van de configuraties.

Het inschakelen.

Het indirekt inschakelen van het kabelsysteem via een lijn van 8,7 km, volgens het schema van figuur 35, veroorzaakt geen ontoelaatbare spanningen in het mantelcircuit.

De mantelspanningen bereiken het aanspreeknivo van de overspanningsafleider niet.

De hoogst voorkomende mantelspanning is 3,81 kV en treedt op bij punt C4 op het moment $t=34T$.

In het verloop van de mantelspanningen is geen periodiciteit te herkennen, zoals onder andere blijkt uit figuur 44, waarin de mantelspanning op punt B2 als functie van de tijd is weergegeven.

De initiële geleiderspanningen op de punten A1 en B1 zijn 6,95 kV en 6,93 kV. De initiële mantelspanning op punt B2 is -3,39 kV, hetgeen 49% is van de initiële geleiderspanning op punt B1.

In de inleiding is aangegeven dat dit percentage 23 bedraagt. De omstandigheden zijn echter gewijzigd.

De oorzaak van de relatief hogere initiële mantelspanning op punt B2 en van het niet-periodieke verloop van de mantelspanningen is de koppeling tussen de fasegeleiders van het lijncircuit, waardoor er via de andere geleiders in eerste instantie spanningsgolven met een polariteit, tegengesteld aan die van de ingeschakelde fasegeleider, het kabelsysteem binnendringen.

De spanningsopbouw van de ingeschakelde geleider is weergegeven in figuur 43.

De spanningen in het kabelsysteem vormen geen bedreiging voor de hoofdisolatie, mantelisolatie of mantelstektie-isolatoren.

Het direct inschakelen van het kabelsysteem via een lange lijn, volgens het schema van figuur 36, leidt eveneens niet tot het aanspreken van de overspanningsafleiders.

De hoogste mantelspanning treedt weer op bij mantel C4 op het moment $t=22T$ en is gelijk aan 5,13 kV.

De initiële mantelspanning op punt B2 is gelijk aan 23% van de initiële geleiderspanning op punt A1.

De mantelspanningen worden uitsluitend bepaald door de twee mantel-mantelcomponenten, aangezien de homopolaire component niet gegenereerd wordt. Het laatste blijkt uit de sommatie van de mantelspanningen, die ten alle tijde nul geeft.

De overige componentgolven leveren geen bijdrage in de mantelspanningen.

Uit figuur 42 en andere, niet weergegeven grafieken, blijkt dat het verloop van de mantelspanningen enigszins periodiek is, met een herhalings-tijd van ongeveer $30T$.

Dit is tevens de tijd, welke een mantel-mantelgolf nodig heeft om zich eenmaal door het gehele kabelsysteem te verplaatsen. (B-C-D-C-B-A-B).

Dit duidt erop dat de reflekties aan het begin en het einde van de kabel bepalend zijn, hetgeen niet verwonderlijk is gezien de kortsluiting van de mantels aan de kabeleinden. In dit geval wordt een herhalingsstijd van $4 \times 3 \times 5T = 60T$ verwacht. Men moet daarbij echter bedenken dat op de kruisverbindingen mantel-mantel golven ontstaan, die zich naar links en naar rechts verplaatsen, die niet op gelijke tijdstippen op de kabeleinden reflektieren.

Het samenspel van deze golven kan leiden tot een halvering van de verwachte herhalingsstijd.

De spanningsopbouw van de ingeschakelde geleider is weergegeven in figuur 41. Deze wordt bepaald door de tijdsconstante van het systeem, $\tau = Z \cdot C_1 = 80 \text{ usek.} = 24,4T$.

De geleidelijke toename van deze spanning heeft tot gevolg dat de spanning over de hoofdisolatie eveneens langzaam toeneemt.

Een direkte inschakeling van het kabelsysteem via een betrekkelijk korte kabel, volgens het schema van figuur 37, heeft tot gevolg dat de overspanningsafleiders C2 en C4 op $t=19T$ aanspreken.

Als gevolg van reflekties wisselen de spanningen over de overspanningsafleiders reeds na 13 usek. ($4T$) van polariteit. Wegens het ohmse karakter van de overspanningsafleiders gaat de stroom door nul en doven deze volgens het in paragraaf 3.5. opgezette model.

De daarop volgende spanningen bereiken het aanspreeknivo niet. De verandering van polariteit voltrekt zich binnen $2T$. Men kan zich nu afvragen of een overspanningsafleider in deze korte tijd dooft en zich diëlektrisch herstelt.

Er zijn geen gegevens bekend op grond waarvan een antwoord op deze vraag mogelijk is.

De veronderstelling dat de overspanningsafleider onder deze omstandigheden niet dooft, zal leiden tot een grotere energiedissipatie van de overspanningsafleider, maar is onvermijdelijk in het geval een uitspraak over de energiedissipatie onder de meest ongunstige omstandigheden het doel is van de beschouwing.

Onder bovengenoemde veronderstelling zijn berekeningen herhaald. De figuren 45 t/m 48 geven enkele resultaten.

De spanningsopbouw van de geleider aan het begin van het kabelsysteem, op punt A1, wordt duidelijk beïnvloed door de negatieve reflectie van de korte kabel, maar vormt geen enkele bedreiging voor de hoofdisolatie.

De mantelspanningen zijn nogal verschillend, zoals blijkt uit figuur 47 en 48, waarin de mantelspanningen op B2 en C2 als functie van de tijd worden weergegeven.

Na het aanspreken van de overspanningsafleiders op $t=19T$ dempt de spanning op punt C2 zeer snel uit.

De componenten, waaruit de mantelspanning op punt B2 is samengesteld, zijn niet in het verloop van deze spanning herkenbaar.

Opmerkelijk is wel dat er op mantel B2, na het aanspreken van de overspanningsafleiders C2 en C4, en wel vanaf het moment $t=(19+15)T$ er topwaarden met een regelmaat van $30T$ voorkomen, die zeer waarschijnlijk toe te schrijven zijn aan de verplaatsing van de in punt C gegenereerde en elders reflekterende homopolaire component.

Na $360T$ is het verloop min of meer periodiek met een herhalings-tijd van ongeveer $20T$. Het systeem dat bepalend is voor de mantelspanning B2 is als het ware gereduceerd tot de twee sekties tussen A en C.

De energiedissipatie als functie van de tijd is weergegeven in figuur 46. Deze neemt aanvankelijk snel toe, maar stabiliseert bij $200T$.

De energiedissipatie van de overspanningsafleider C2 is groter dan dat van C4 en bedraagt bij $500T$ ongeveer 0.4 kJ.

Bij een extrapolatie naar een halve periodetijd van de bedrijfs-frekwentie neemt de dissipatie tot 0.5 kJ.

Het is echter de vraag, gezien het verloop van de spanning over en de stroom door de overspanningsafleiders, of deze dan nog aan zijn.

Ontlading.

Het schema van het systeem, waarin een fasegeleider van een lijncircuit via het kabelsysteem wordt geaard en ontladen, is weergegeven in figuur 38.

Volgens dit schema zijn berekeningen uitgevoerd voor lijnlengtes van 0 km, 8,7 km en 53 km. Met een lijnlengte van 0 km wordt het kabelsysteem bedoeld zonder de lijn. Deze wordt dan ontladen.

Verondersteld is dat aangesproken overspanningsafleiders niet meer doven.

De figuren 49 t/m 58 geven enkele resultaten weer.

Bij elk beschouwde lijnlengte blijken de overspanningsafleiders B2, B6, C2 en C6 direkt aan te spreken en C4 op $t=9T$.

Door het aanspreken van de overspanningsafleiders wordt de initiële mantelspanning op punt B2 met 13 kV de hoogste spanning die in het mantelcircuit voorkomt bij elk beschouwde lijnlengte. Deze waarde ligt onder de maximaal toegelaten restspanning van de overspanningsafleider, die evenals de aanspreekspanning gelijk is aan 17,5 kV.

Een vergelijking van het verloop van de mantel- en geleider- spanningen op de punten B2 respektievelijk B1 leert dat tengevolge van de reflekties van de spanninggolven in het lijncircuit, de oscillaties in het kabelsysteem minder snel dempen.

Het effect van de lijnen is het duidelijkst herkenbaar in het verloop van de mantelspanningen en is beter te onderscheiden naarmate de lengte van de lijn toeneemt.

In figuur 51 is het verloop weergegeven van de mantelspanning op punt B2 als funktie van de tijd, voor het geval de lijn een lengte heeft van 53 km. De topwaarden met wisselende polariteit verschijnen om de $2x55T$ en $2x67T$.

Voor zover het verloop van de mantelspanningen niet verstoord wordt door de spanninggolven uit het lijncircuit, blijkt deze periodiek te zijn. Zie figuur 49.

De herhalingsstijd van $10T$ geeft aan dat de mantel-mantel-komponentgolven het verloop bepalen.

De geleiderspanning op B1, zie figuur 52, neemt in het geval de overspanningsafleiders aanspreken, kort na het inschakelen van de aardingschakelaar een hoge waarde aan.

Een hoge waarde is eveneens geregistreerd in het verloop van de spanning op punt Cl en Dl, echter steeds een tijdstip eerder.

De oorzaak is de reflectie aan het einde van de kabel, van de invallende golf, die zich tussen de geleider en de mantel en over de aangesproken overspanningsafleiders verplaatst.

Het verdere verloop is periodiek en heeft evenals de mantelspanningen een herhalingsstijd van $10T$.

De hoogst berekende topwaarde treedt op bij het kabelsysteem zonder de lijn en is 228 kV, maar dit is een verschuiving ten opzichte van de stationaire toestand.

Aangezien voor de representatie van de aardingschakelaar een positieve spanning is aangenomen, is de geleiderspanning in de stationaire toestand -139 kV.

De spanning over de hoofdisolatie wordt aldus:

$$U = 228 - 139 + 4 = 93 \text{ kV.} \quad (\text{de mantelspanning is } 4 \text{ kV})$$

Een ontlading vormt derhalve geen enkel probleem voor de hoofdisolatie.

In de figuren 55, 56 en 57 is het verloop als functie van de tijd geregistreerd van de totaal gedissipeerde energie van elke overspanningsafleider.

Er komen aanmerkelijk hogere waarden voor dan bij het inschakelen vanuit de 1 km kabel. Ook in dit geval neemt de dissipatie aanvankelijk sterk toe, maar stabiliseert later.

Deze stabilisatie is de reden dat de berekeningen tot $500T$ is begrensd.

Het verschil in verloop van de energiedissipatie bij de verschillende lijnlengtes vindt zijn oorzaak in de reflekterende golven in het lijncircuit.

Vergelijkt men de grootte van de energie, gedissipeerd door een specifieke overspanningsafleider, bijvoorbeeld C2, bij verschillende lijnlengtes, dan blijkt dat er tussen de lijnlengte en de gedissipeerde energie geen direkt verband bestaat dat algemeen geldig is.

Voor de overspanningsafleiders B2 en B6 geldt een omgekeerde evenredigheid, met het toenemen van de lengte, neemt het gedissipeerde energie af.

Dit geldt echter niet voor de overspanningsafleiders op de kruisverbinding C.

De totale energiedissipatie van de vijf aangesproken overspanningsafleiders na 500T is bij de lijnlengtes van 0 km, 8,7 km en 53 km achtereenvolgens 4,19 kJ, 4,47 kJ en 3,98 kJ.

Ook de totaal in het mantelcircuit gedissipeerde energie staat niet in een evenredig verband met de lijnlengte. Het bovenstaande geeft een aanwijzing dat de in het mantelcircuit gedissipeerde energie niet eenduidig gerelateerd is aan de ontladingsenergie.

Bij het ontladen van een lijn ontbreken de 50 Hz-spanningen en stromen in het systeem.

De blaasspoel van de overspanningsafleider zal vanwege de hoge dI/dt van de stroom door de overspanningsafleider geen stroom voeren. Er ontstaat derhalve geen vonkbrugspanning die een blussing kan versnellen.

De boog in de vonkbrug dooft pas als de toegevoerde elektrische energie kleiner is dan de als warmte afgevoerde energie en zeer waarschijnlijk bij een nuldoorgang van de stroom.

De wederkerende spanning mag niet tot een hernieuwde doorslag leiden. Het juiste moment waarop de overspanningsafleiders doven is niet te voorspellen.

Gezien het dempende verloop van de spanningen en stromen van de overspanningsafleiders en het feit dat die verliezen in het kabelsysteem welke niet gerepresenteerd zijn, zeker tot een snellere demping van de oscillaties leiden, kan men zich afvragen of deze langer dan 2 tot 3 millisek. aan zullen zijn.

Kortsluiting.

De berekeningen voor het geval er een kortsluiting optreedt in de direkte nabijheid van het kabelsysteem, werden uitgevoerd volgens het schema van figuur 39, in de veronderstelling dat:

1. de overspanningsafleiders normaal aanspreken en niet meer doven.
2. de overspanningsafleiders niet aanspreken.

In het eerste geval spreken de overspanningsafleiders B2, B6, C2 en C6 direkt aan, C4 spreekt op $t=9T$ aan.

Er blijkt verder weinig verschil te zijn tussen het verloop van de spanningen en stromen in deze situatie en de overeenkomstige grootheden bij de ontlading van het kabelsysteem gekoppeld aan de lijn van 8.7 km.

Het verwaarloosbare verschil is het gevolg van een kleine wijziging in de reflektiefactoren aan het begin van het kabelsysteem (punt A).

Het verloop van de spanning op punt B2 is als funktie van de tijd weergegeven in figuur 50.

Dit verloop wordt bepaald door de wisselwerking tussen het kabelsysteem en de beide lijnen waaraan het kabelsysteem gekoppeld is.

De looptijden van de komponentgolven in het 8.7 km lijncircuit zijn $9T$ en $11T$. De invloed van deze lijn wordt herkenbaar na $t=140T$.

Er verschijnen dan met regelmaat van 20 à $22T$ afwisselend negatieve en positieve topwaarden in het verloop.

In figuur 58 is het verloop geregistreerd van de mantelspanning B2 voor het geval de overspanningsafleiders niet aanspreken.

In de figuur is tevens de omhullende van de overeenkomstige spanning weergegeven voor het geval de overspanningsafleiders wel aanspreken en niet meer doven.

Het aanspreekniveau wordt diverse malen overschreden.

De mantelspanningen dempen nauwelijks. De hoogste waarde treedt nu op bij punt C2 op het moment $t=19T$ en is 37,2 kV.

Er is een periodiek verloop te onderscheiden dat duidelijk bepaald wordt door de reflekties van de lijn van 8.7 km lengte.

De herhalingstijd is namelijk gelijk aan $40T$ en komt overeen met het viervoud van de gemiddelde looptijd van de komponentgolven van de lijn.

Aangetekend moet worden dat in dit geval ook geen homopolaire golven in het kabelsysteem gegenereerd worden, immers de overspanningsafleiders spreken niet aan.

Het verloop van de energiedissipatie van de verschillende overspanningsafleiders is weergegeven in figuur 56.

De maximale energiedissipatie bij $500T$ is 1,3 kJ.

De stroom door de betreffende overspanningsafleider neemt echter na 400T waarden aan die kleiner zijn dan 5 Ampere en er zijn momenten waarop de stroom zelfs kleiner wordt dan 1 Ampere.

Aangezien de spanning over de overspanningsafleider, vanwege het ohmse karakter, dan ook kleiner is dan 45 Volt, kan men zich ook in deze situatie afvragen of de overspanningsafleiders dan niet zouden doven.

Bovendien zal de 50-Hz mantelspanning die als gevolg van de kortsluitstroom ontstaat, voor een 50 Hz componentstroom door de blaasspoel van de actieve vonkbrug kunnen zorgen. Hierdoor zal de vonkbrugspanning toenemen en volgt er een versnelde blussing.

De kabeleinden.

Berekeningen uitgevoerd voor het geval de kabeleinden via een weerstand R met een waarde van 4 ohm geaard zijn, geven aan dat de initiële mantel-aarde spanning op de kabeleinden hoger wordt dan de aanspreekspanning en aldus ontoelaatbaar zou zijn.

Indien de weerstand de representatie is van de aardverspreidingsweerstand, dan zal het spanningsverschil tussen de mantel en de direkte omgeving van de mantelisolatie niet de berekende waarde aannemen, immers de spanningsafbouw in de aarde vindt geleidelijk plaats.

Het berekeningsresultaat geeft wel aan dat aandacht moet worden besteed aan het aarden van de mantels bij de kabeleinden.

De verbindingen tussen de mantels, ook op de kruisverbindingpunten, dienen laag ohmig te zijn.

7. Nabeschuwing.

Het oorspronkelijk rekenmodel van het kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels, ontwikkeld door ir. Schouten, is in het voorgaande uitgebreid met een overspanningsaf-leider-model, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Het aldus verkregen model van een beveiligd kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels is vervolgens opgenomen in een aantal netkonfiguraties voor transmissie-doeleinden, waarin verschillende schakelhandelingen, zoals bijvoorbeeld het inschakelen en het ontladen van het systeem, en een kortsluiting werden gesimuleerd.

De hiervoor noodzakelijke modellering van een driefasen transmissielijn en van een schakelaar of sluiting is in hoofdstuk 4 ondergebracht. Daarin is tevens een paragraaf gewijd aan de dempingen voorkomend in zowel het kabelsysteem als in de eventueel daaraan gekoppelde transmissielijnen.

Uit de resultaten van de berekeningen voor de beschouwde netkonfiguraties en veronderstelde verstoringen blijkt dat de maximaal in een overspanningsafleider gedissipeerde energie, voor het geval de overspanningsafleiders aanspreken en niet meer doven, gelijk is aan 1,4 kJ.

Uit de eisen, die gesteld worden aan overspanningsafleiders van het type -heavy duty-, volgt dat een overspanningsafleider van dit type, met een nominale bedrijfsspanning van 4,5 kV berekend is op een energiedissipatie van minimaal 7,8 kJ.

Het zal duidelijk zijn dat de keuze van een overspanningsafleider van dit type voor toepassing in het hier beschouwde kabelsysteem met kruiselings verbonden mantels tot een onnodige overdimensionering leidt.

De vraag of volstaan kan worden met een 10 kA overspanningsafleider van het -light duty- type is voorhands niet te beantwoorden.

De niet-lineaire weerstand van deze overspanningsafleiders wordt volgens IEC voorschriften beproefd op een stroompuls van 150 A met een duur van 2 millisekonden en dient aldus bestand te zijn tegen een energiedissipatie van I^2Rt .

Uit de literatuur blijkt dat de weerstandswaarde van de niet-lineaire weerstand R in het interval van 0 - 150 A gelijk is aan 10 à 20 ohm.

Bij 20 ohm is de energiedissipatie gelijk aan 0,9 kJ.

De light-duty overspanningsafleider voldoet dus niet, althans niet in het beschouwde systeem, waarbij:

- de overspanningsafleiders niet doven,
- het kabelsysteem uit slechts drie sekties is opgebouwd, met aan het begin en het eind een hoge positieve reflektiefactor voor de geleider-mantelgolven.

De meervoudige reflectie van de geleider-mantel golven, vooral in de verstoorde fase, heeft een hogere energiedissipatie in de overspanningsafleiders tot gevolg.

De reflektiefactoren spelen derhalve een belangrijke rol.

In de beschouwde configuraties voor de kortsluiting of de ontlading zijn de reflektiefactoren aan het begin en het einde van het kabelsysteem voor de geleider-mantelgolven positief en hoog vanwege de overgang op een lijncircuit of een veronderstelde open eind.

Ter plaatse van de spanningsbron reflekteert deze golf op een impedantie van nul ohm.

Is het kabelsysteem opgebouwd uit meerdere series van drie sekties, dan ontmoet de geleider-mantelgolf geen diskontinuiteit bij punt D en verplaatst zich zonder te reflekteren naar de volgende serie van drie sekties.

Het uitblijven van reflecties op punt D heeft tot gevolg dat er minder energie in de overspanningsafleiders op de voorgaande kruisverbindingen wordt gedissipeerd.

Mogelijk voldoen dan de overspanningsafleiders van het -light duty- type.

Een voorwaarde is dat de reflecties aan het einde van de laatste serie niet meer doordringen tot de eenheden aan het begin van de kabels waarin overspanningsafleiders zijn aangesproken.

Deze voorwaarde zal tot uiting komen in het aantal eenheden (of series) waaruit het kabelsysteem minimaal moet bestaan. Om dit aantal te bepalen is het noodzakelijk te weten welke demping de geleider-mantelgolf in de verstoorde fase ondervindt bij verplaatsing in de eenheden waarin de overspanningsafleiders wel en waarin zij niet zijn aangesproken.

Voor het geval de overspanningsafleiders zijn aangesproken blijkt, uit de resultaten van de ontlading van het kabelsysteem (lijnlengthe = 0 km), dat de initiële spanning op punt D1 gelijk wordt aan $0,81xU$, indien er één of meerdere series van drie sekties volgen en dus de reflektiefaktor bij D gelijk is aan nul.

De initiële spanningen van de geleiders D3 en D5 zijn gelijk aan $0,09U$ en hebben dezelfde polariteit als de initiële spanning op D1. De initiële spanning op B2 van de volgende serie zal derhalve minder zijn dan 23% van de invallende golf, afkomstig van de voorgaande serie.

Onder verwaarlozing van het effect van de spanning op de geleiders D3 en D5, is het mogelijk het aantal series waarin de overspanningsafleiders direkt aanspreken te berekenen, door het oplossen van de vergelijking:

$$\frac{23}{100} (0,81)^n U \leq U_{\text{aanspr.}} = 17,5$$

mantelspanning \leq aanspreekspanning.

n = het aantal series van drie mantelsekties, waarin de overspanningsafleiders aanspreken.

De demping per eenheid is konstant verondersteld. Bij een spanning van 139 kV is het aantal eenheden gelijk aan drie ($n=3$). De initiële mantelspanning is dan gedaald tot $0,53xU$.

Voor het geval de overspanningsafleiders niet aanspreken is de demping groter. Dit is een direkt gevolg van het feit dat relatief hogere mantelspanningen toelaatbaar zijn, die overigens niet boven het aanspreeknivo komen.

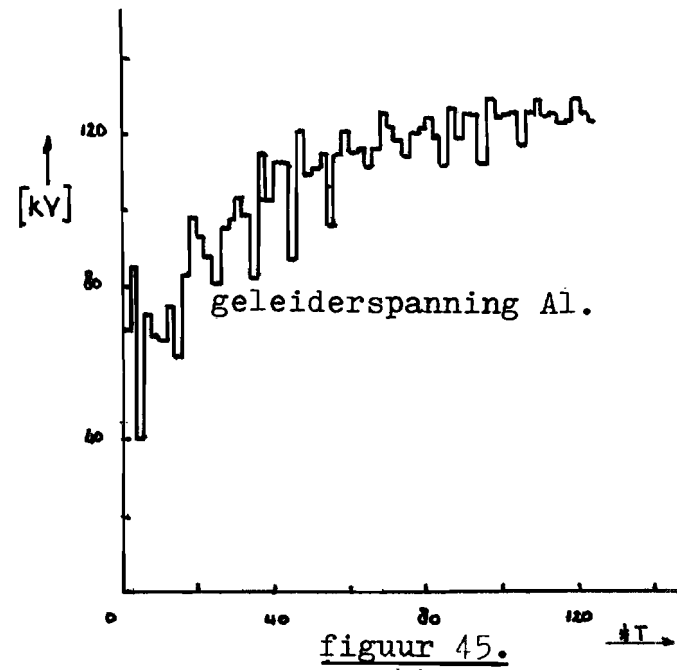
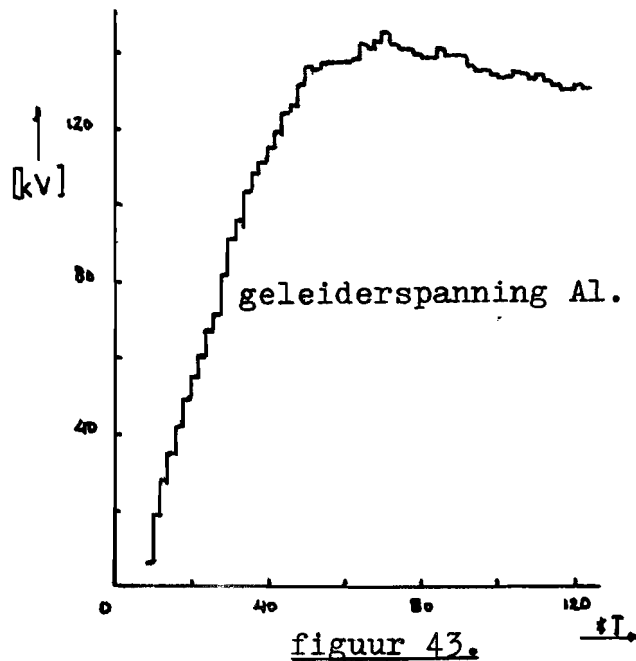
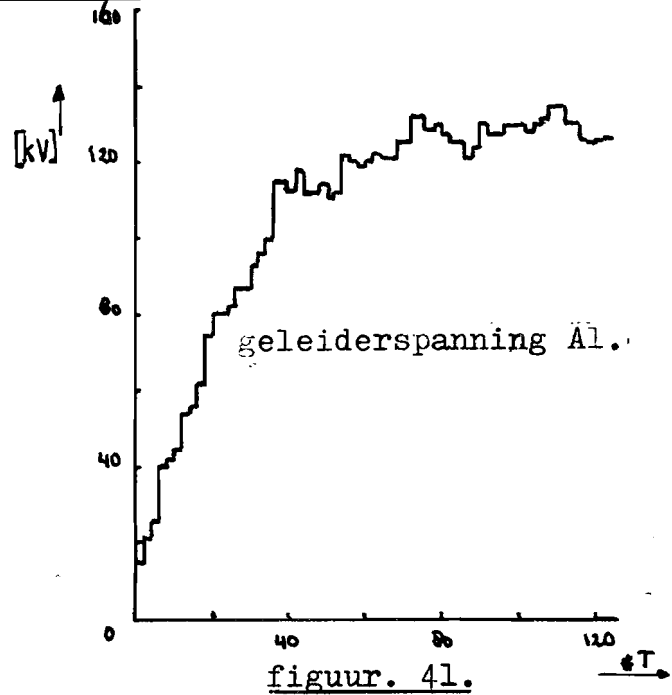
Uit de resultaten van de beschouwde kortsluitsituatie, waarbij de overspanningsafleiders niet aanspreken blijkt dat de initiële spanning op D1 gelijk is aan $0,76xU$.

Uitgaande van een reflektiefaktor $r=1$ aan het einde van de kabel en de eis dat de topwaarde van de gereflekteerde golf bij aankomst op punt D van de derde serie kleiner moet zijn dan $0,1xU$ volgt dat het kabelsysteem uit minstens acht eenheden moet bestaan.

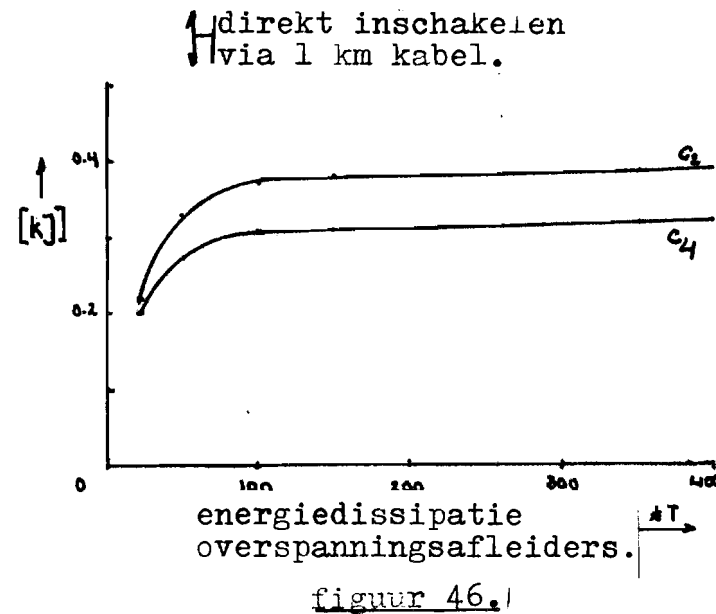
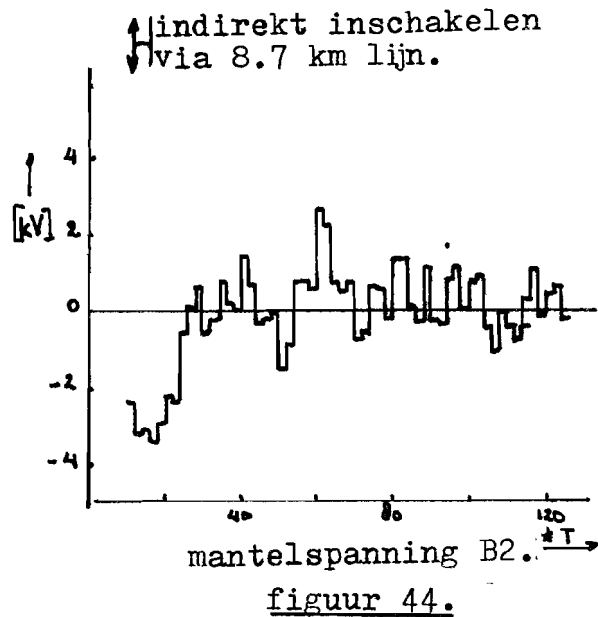
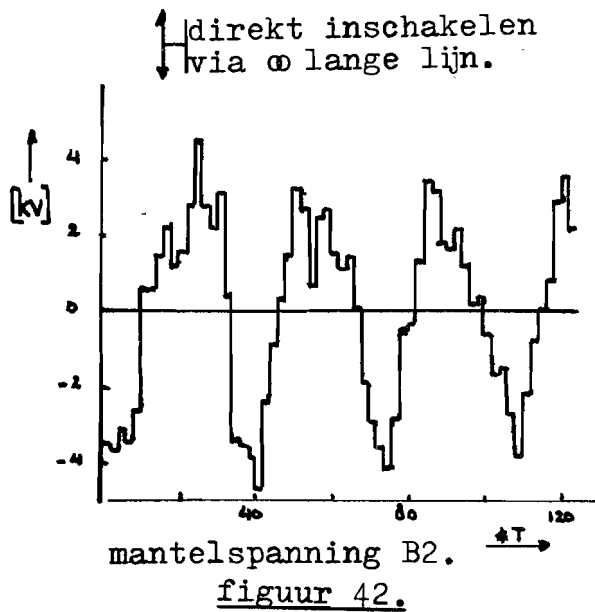
Dit komt overeen met een kabellengte van 12 km.

De voorgaande beschouwing en de overige resultaten leiden tot de volgende konklusies:

- Het inschakelen van het kabelsysteem via een bovengrondse lijn veroorzaakt geen ontoelaatbare spanningen in het mantel- of hoofdcircuit.
Het direkt inschakelen van het kabelsysteem via een korte kabel leidt tot het aanspreken van twee overspanningsafleiders. Hun energiedissipatie is hoogstens 6% van de toelaatbare energiedissipatie van een -heavy duty- type overspanningsafleider.
- Het ontladen van een bovengrondselijn via het kabelsysteem of een kortsluiting in de nabijheid van dit kabelsysteem veroorzaakt dermate hoge spanningen in het mantelcircuit dat vijf overspanningsafleiders aanspreken. De hoogste energiedissipatie van één overspanningsafleider is in dit geval 20% van de toelaatbare energiedissipatie in een -heavy duty- type overspanningsafleider, maar is 160% van de toelaatbare dissipatie in een -light duty- type overspanningsafleider.
Het grote verschil in energiedissipatievermogen van de bestaande types overspanningsafleider noodzaakt de keuze van het -heavy duty- type.
- De overspanningsafleiders geven voldoende bescherming aan het kabelsysteem. Het aanspreken voorkomt het ontstaan van hoge mantelspanningen. De restspanning blijft onder de maximaal toelaatbare waarde, zodat de mantelisolatie niet wordt overbelast. Het aanspreken van de overspanningsafleiders leidt niet tot ontoelaatbare spanningen over de hoofdisolaties van de kabels.
- Het verloop van de spanningen en stromen in het kabelsysteem wordt voornamelijk bepaald door de mantel-mantelkomponentgolven. Verstoringen van dit verloop worden veroorzaakt door reflekterende spannings- en stroomgolven in systemen, gekoppeld aan het kabelsysteem.
- Er is geen éénduidige relatie gekonstateerd tussen de ontladingsenergie van een lijn die over het kabelsysteem wordt geaard en de totale energiedissipatie van de overspanningsafleiders in het mantelcircuit.

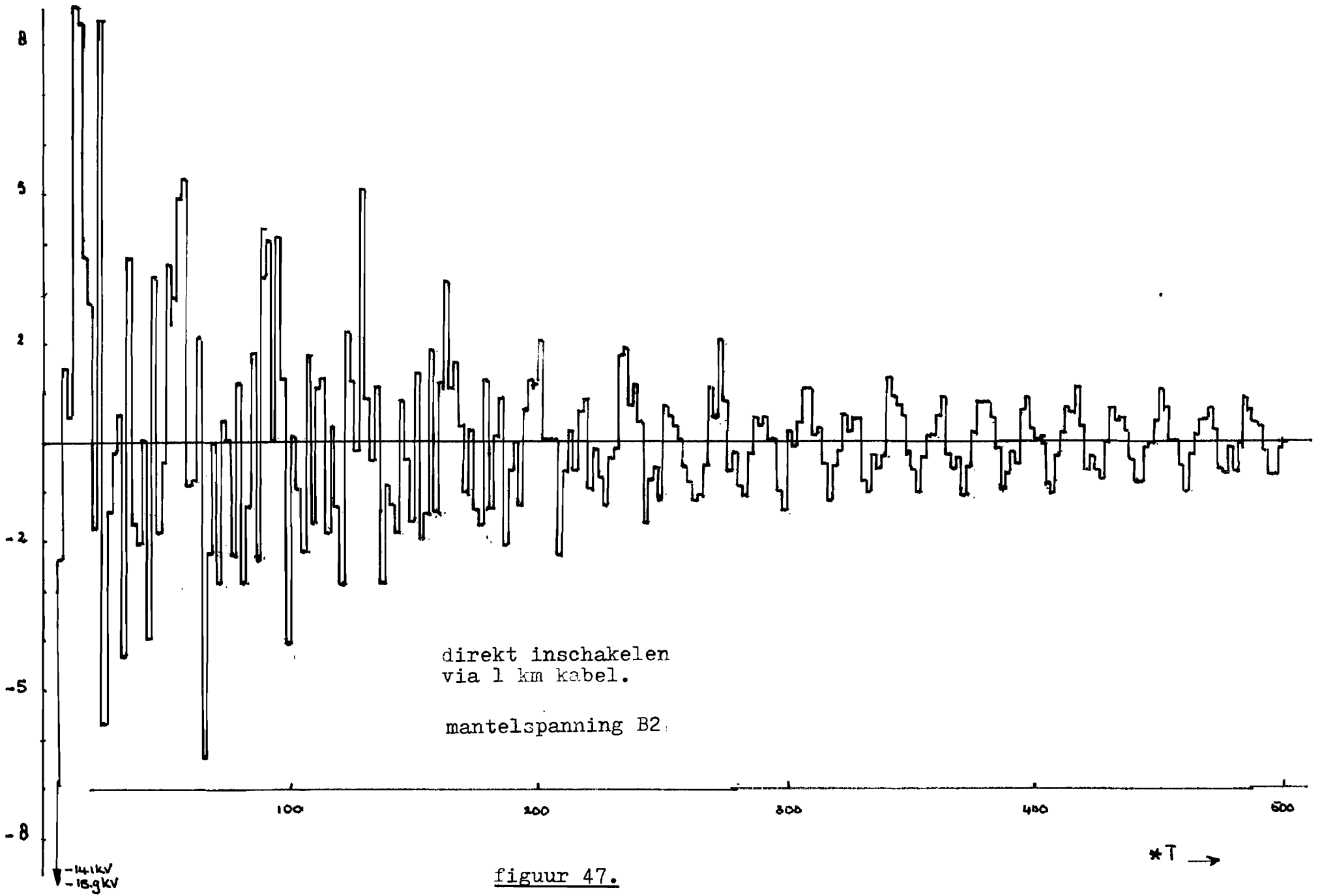


- 92 -



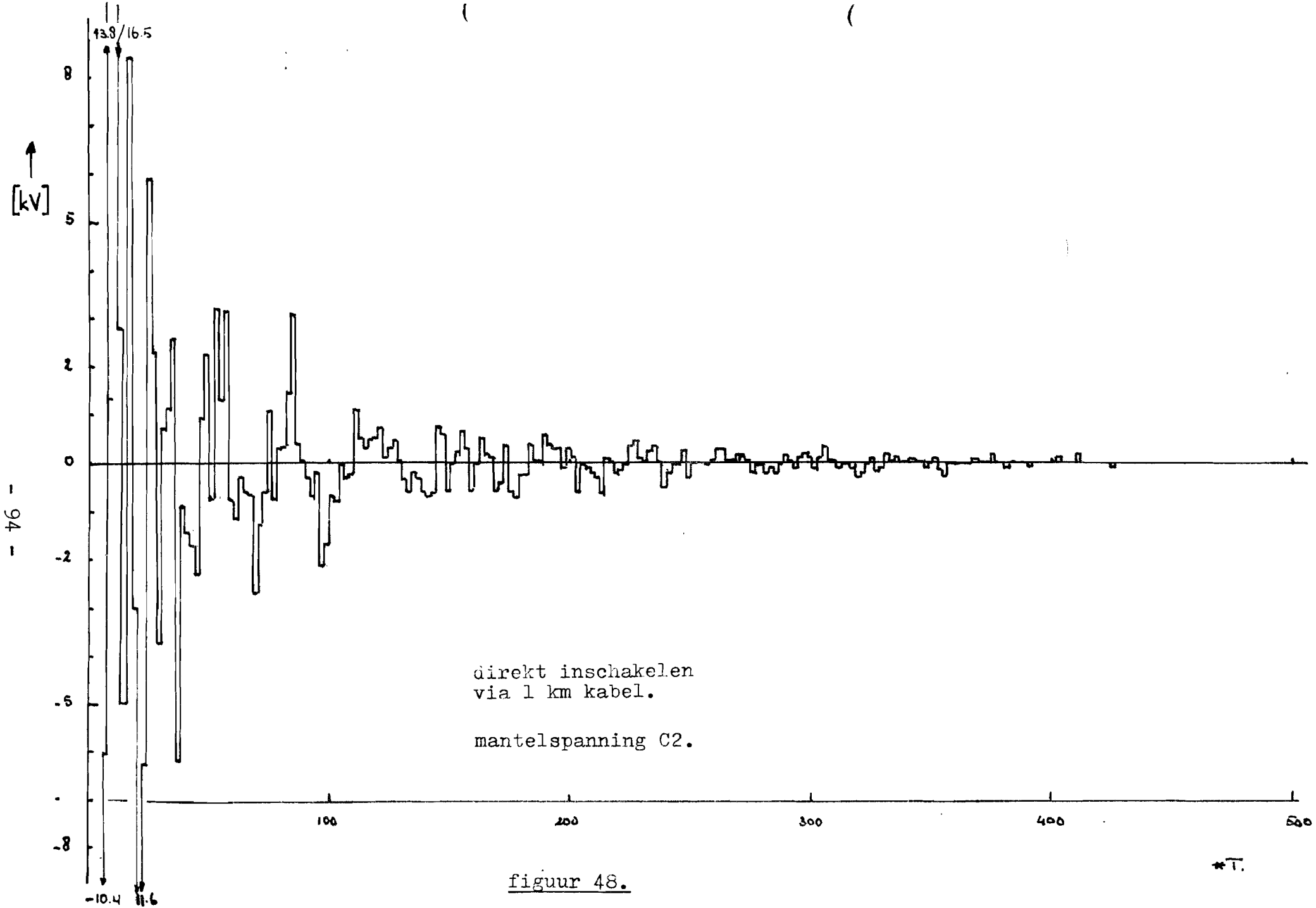
[kV] ↑

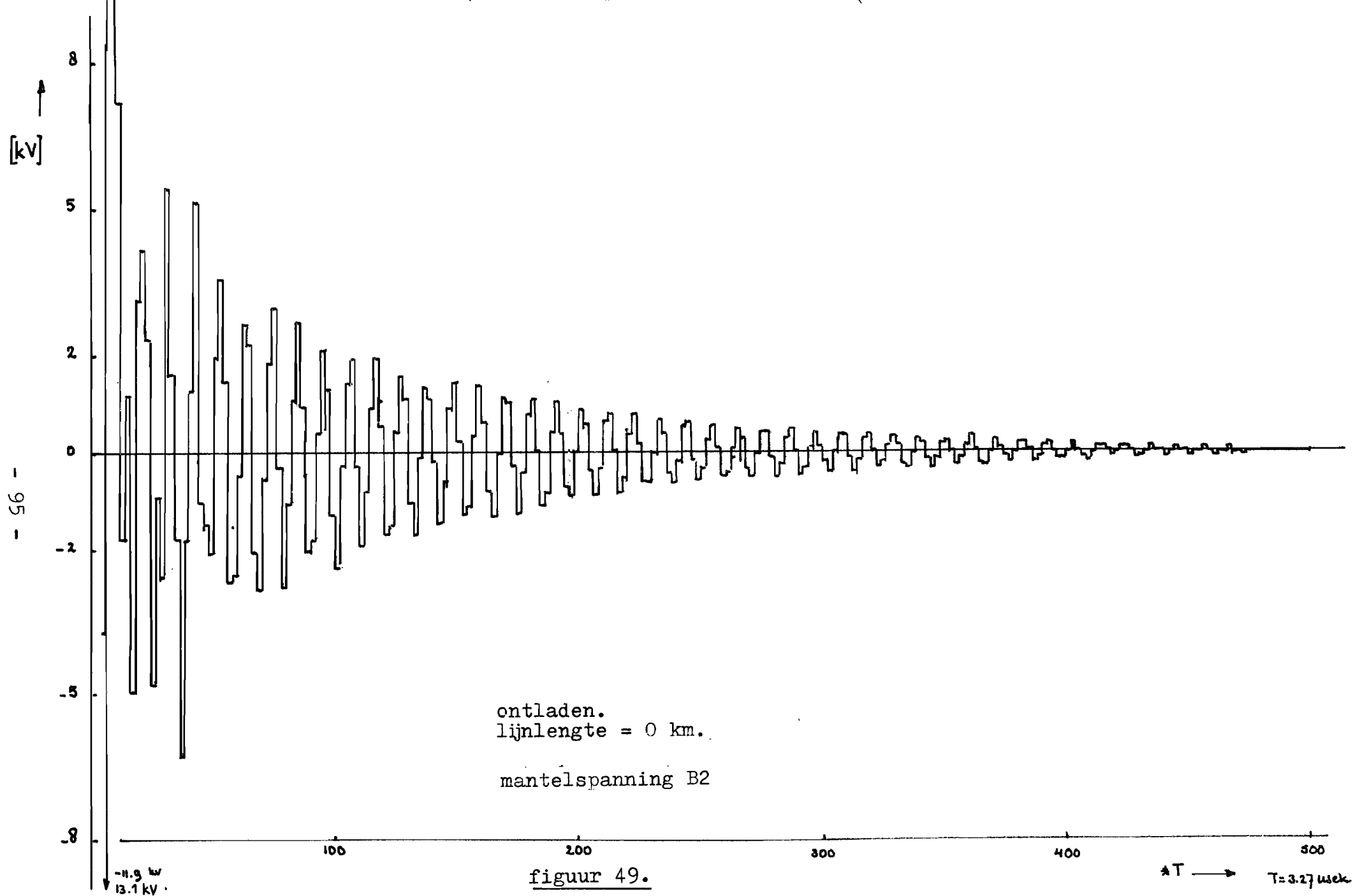
- 93 -



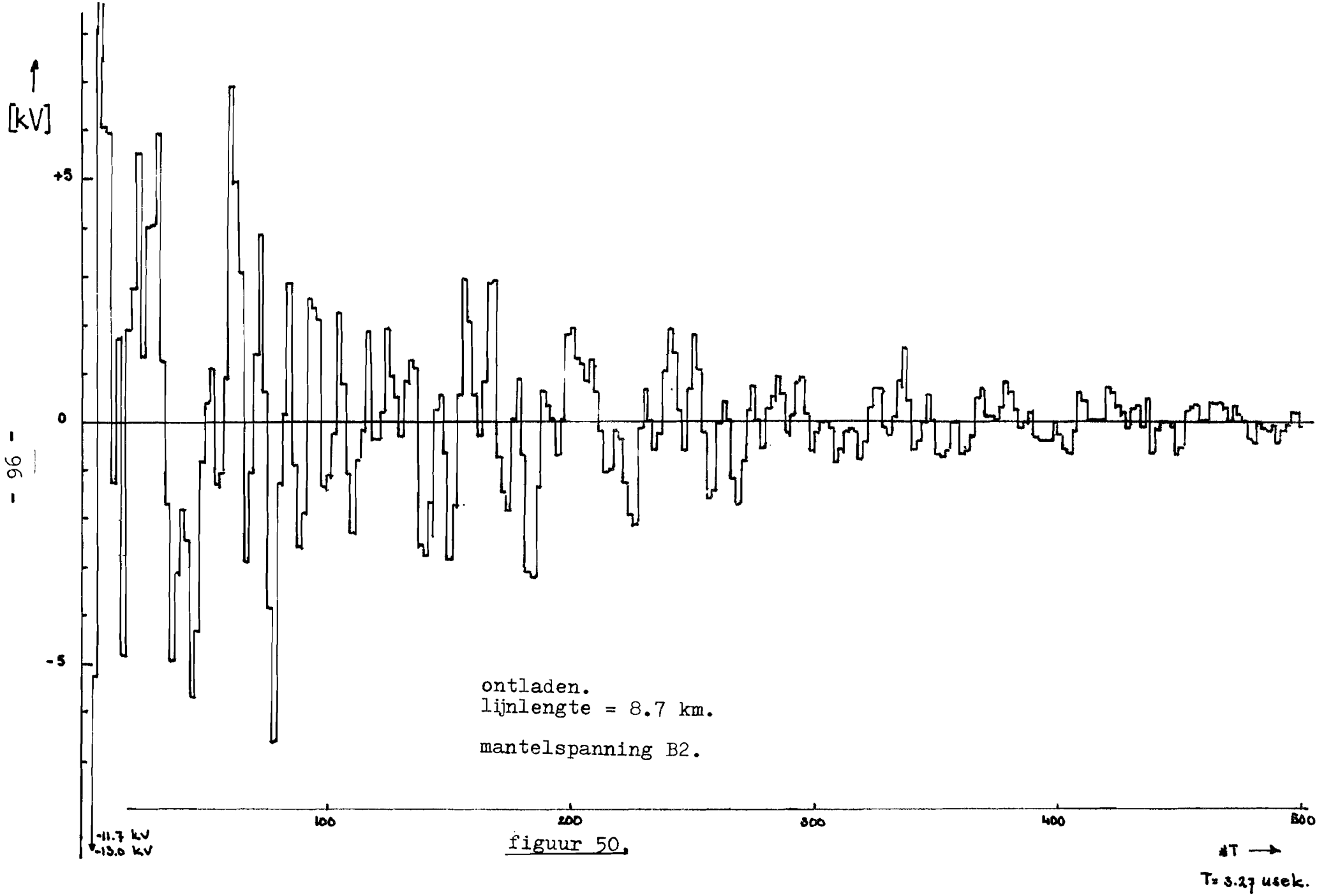
direkt inschakelen
via 1 km kabel.
mantelspanning B2.

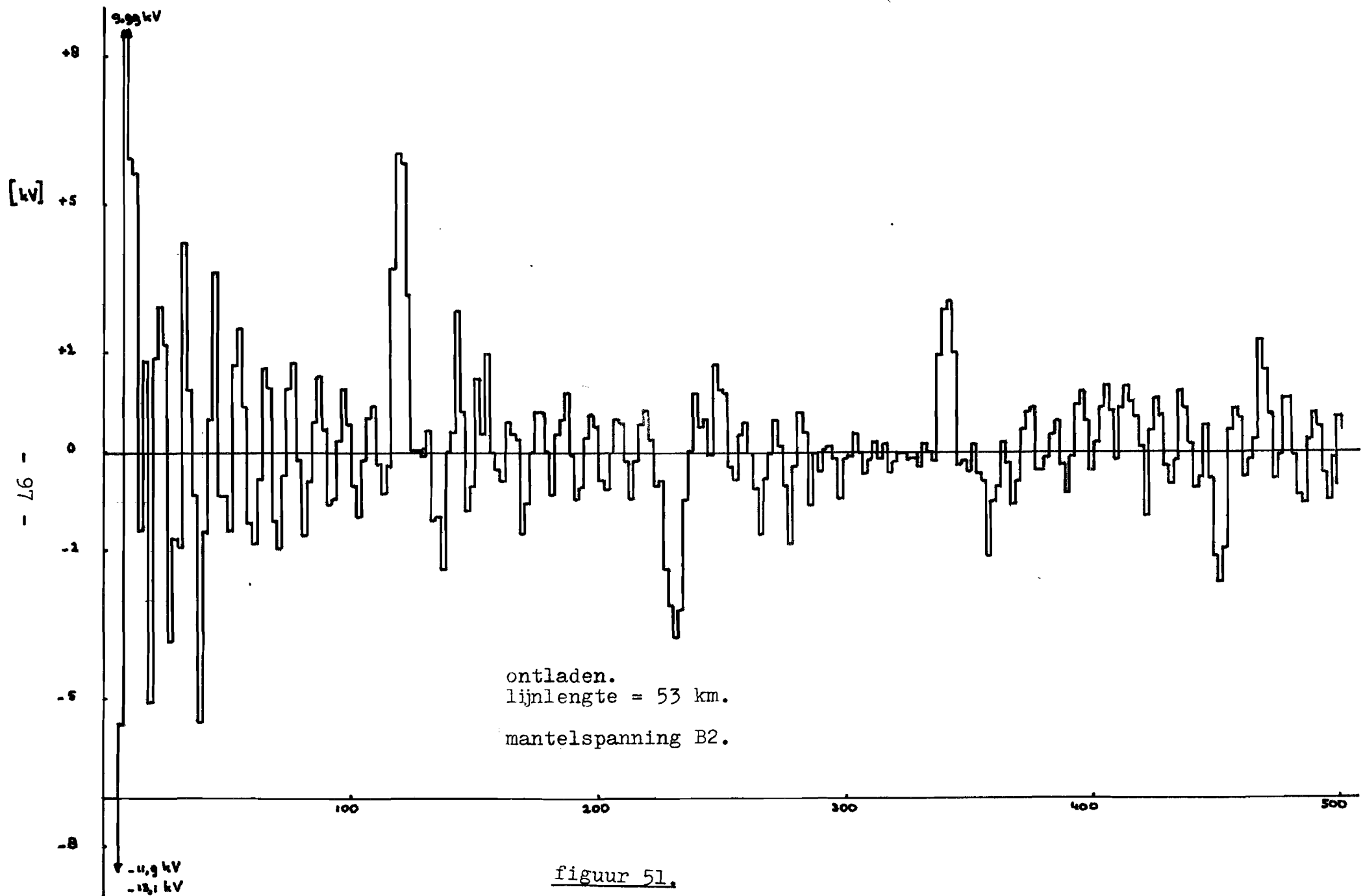
figuur 47.

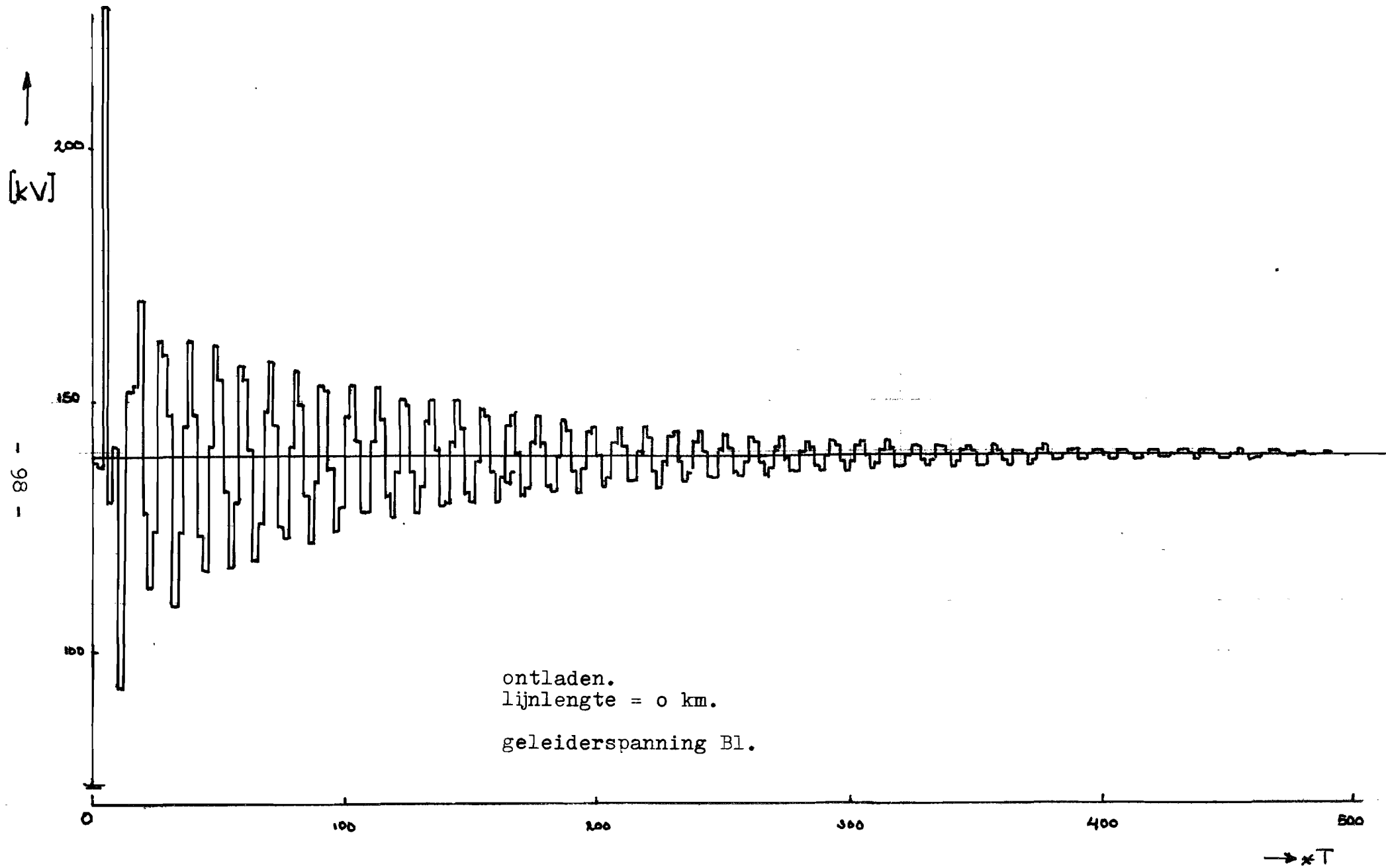




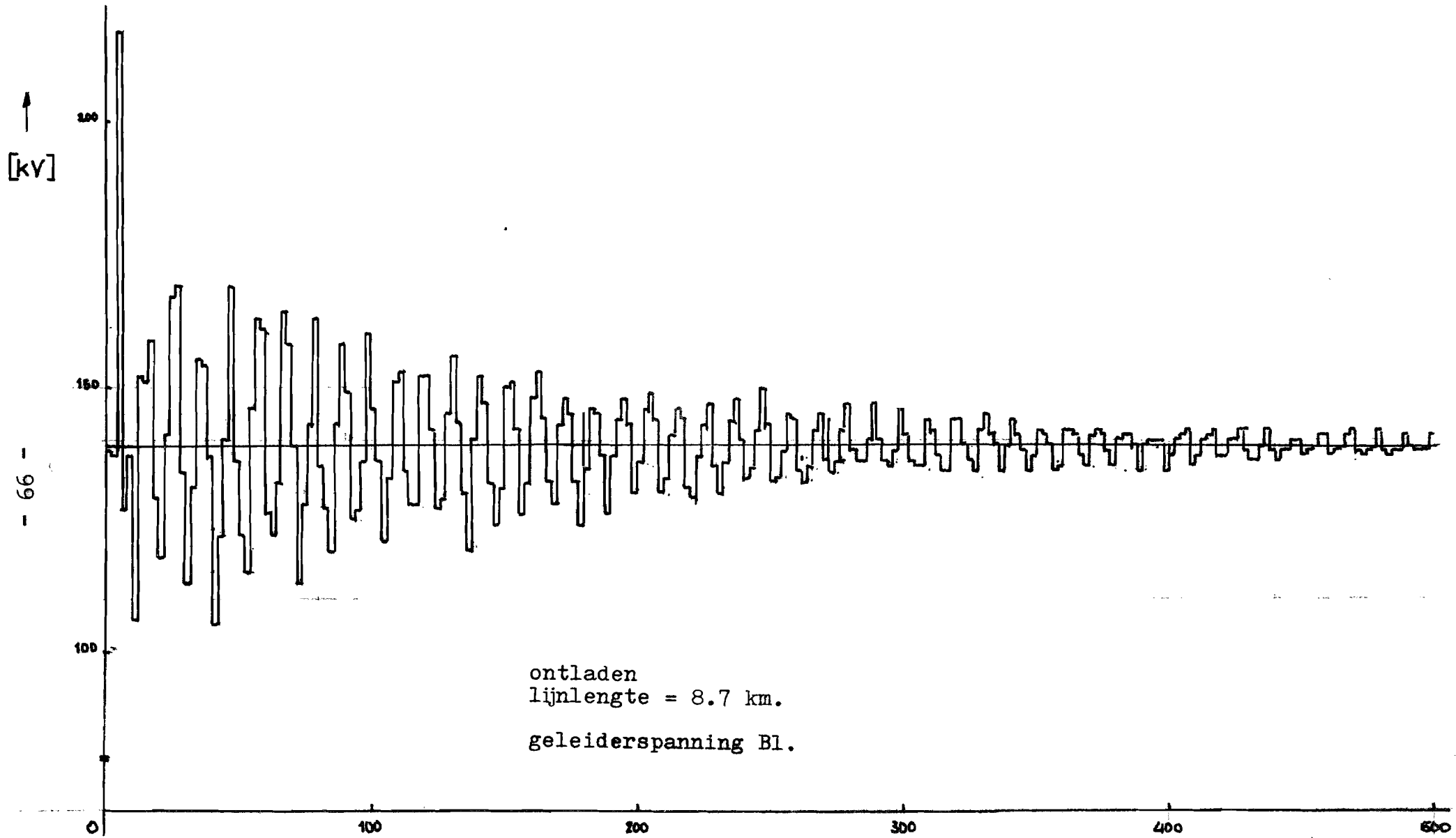
figuur 49.





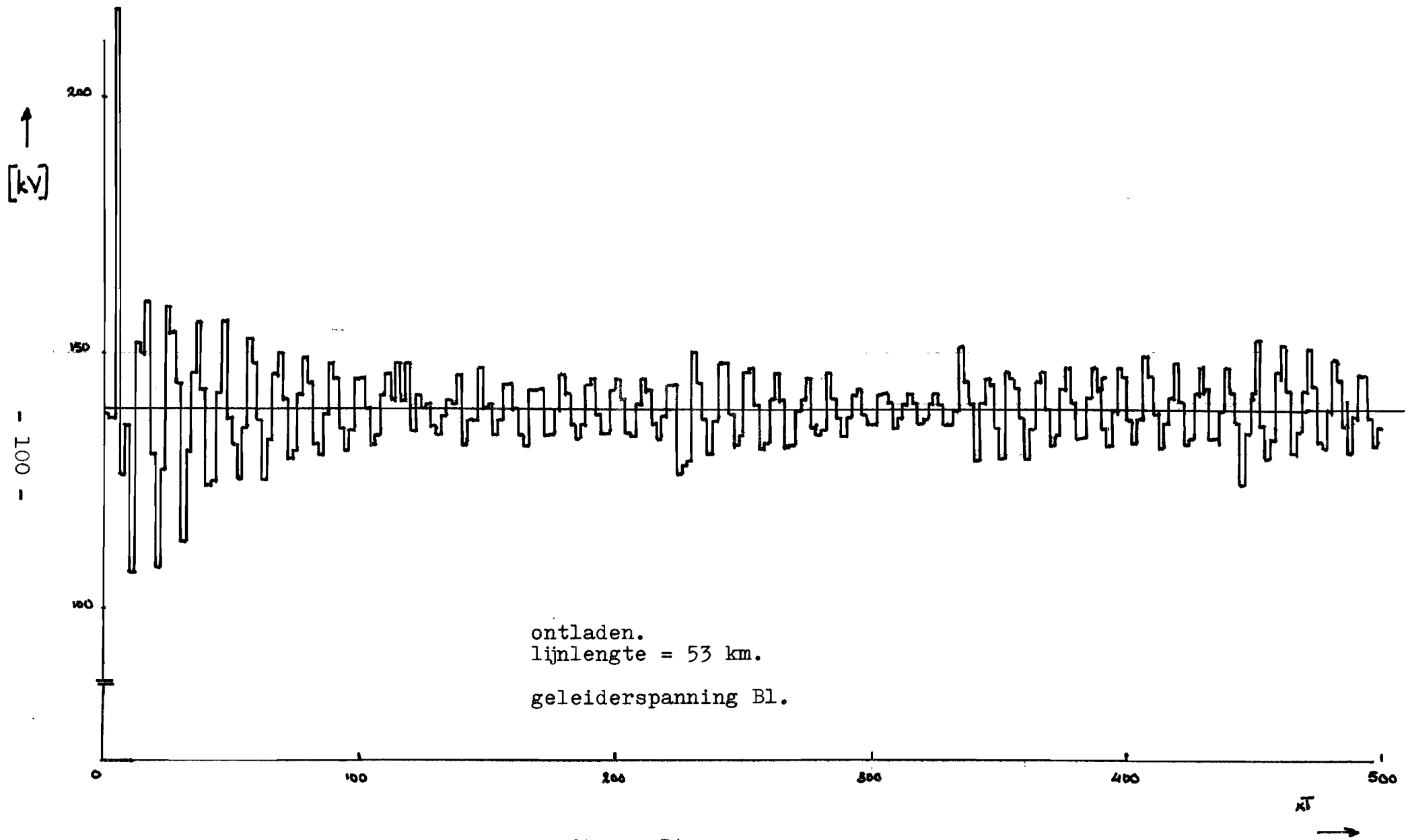


figuur 52.

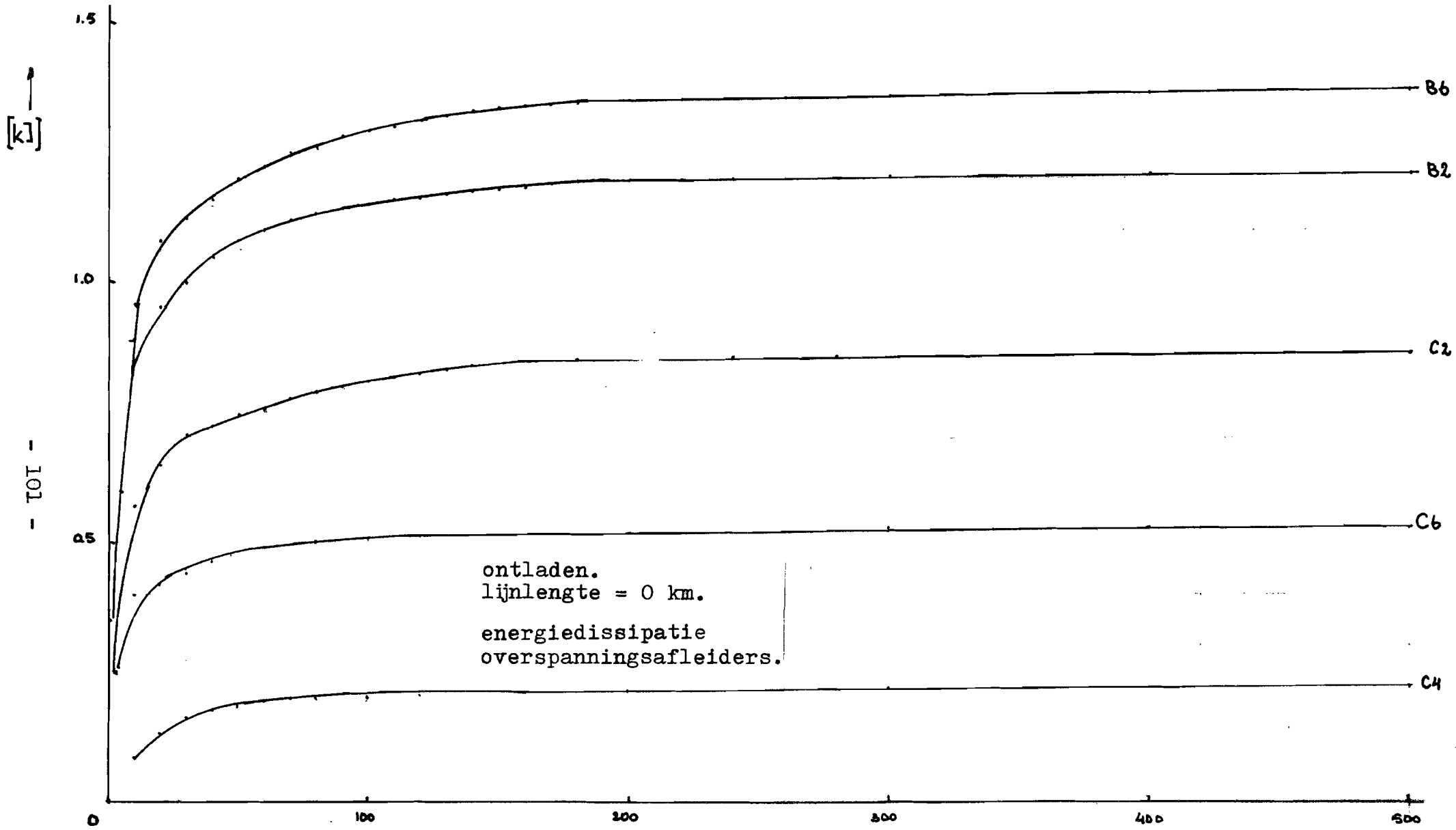


figuur 53.

* T →
T = 3.27 usek



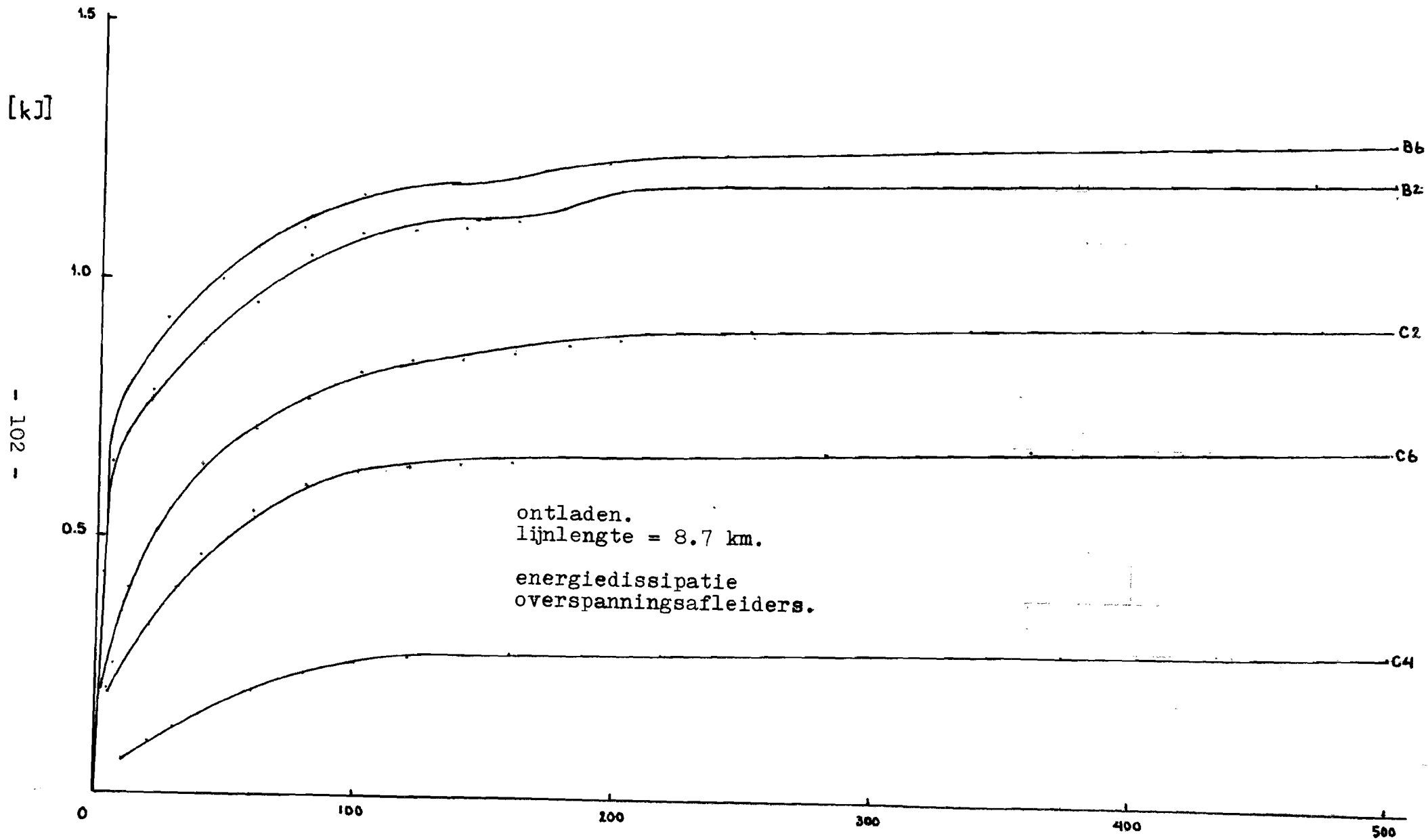
figuur 54.



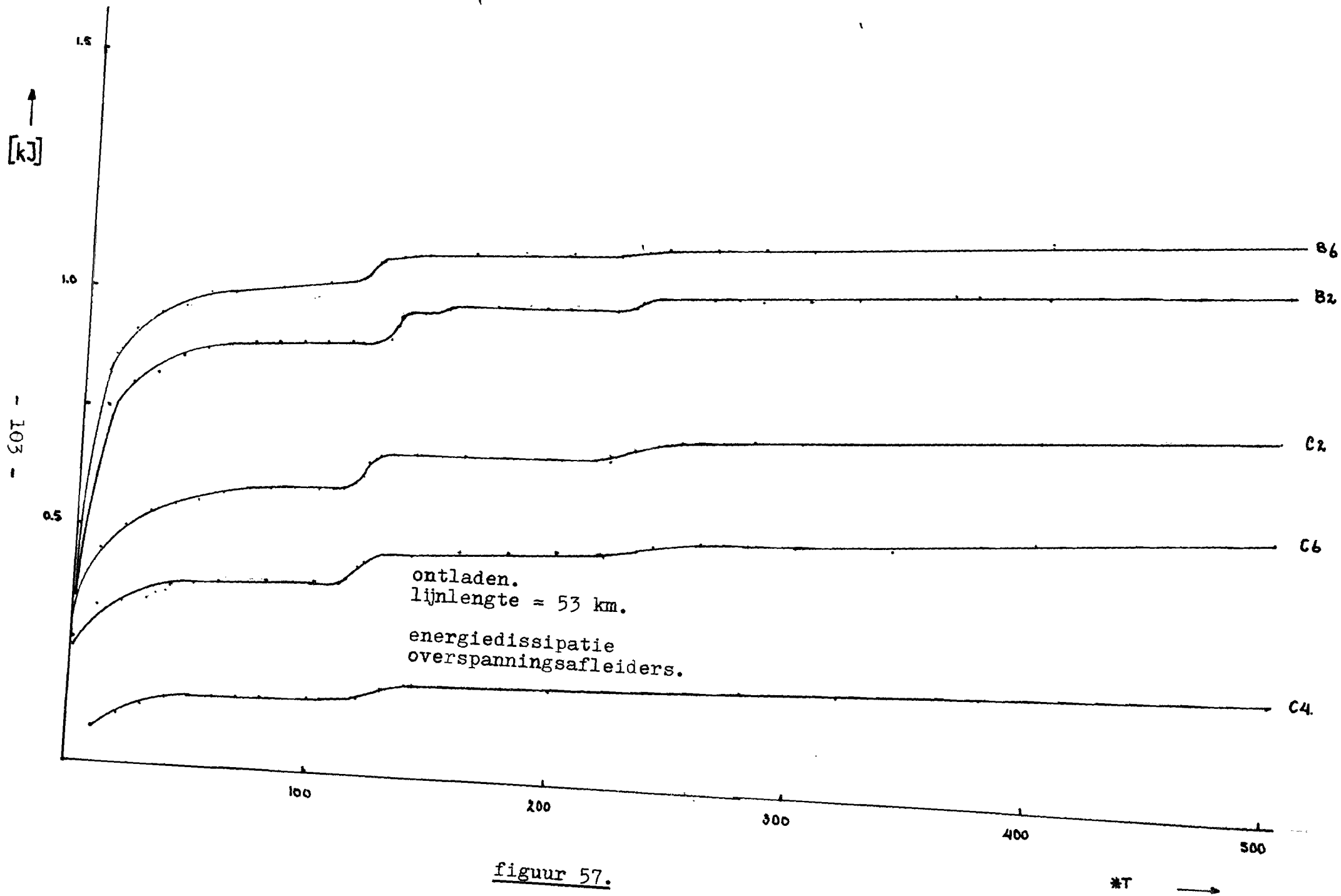
figuur 55.

$\ast T \rightarrow$

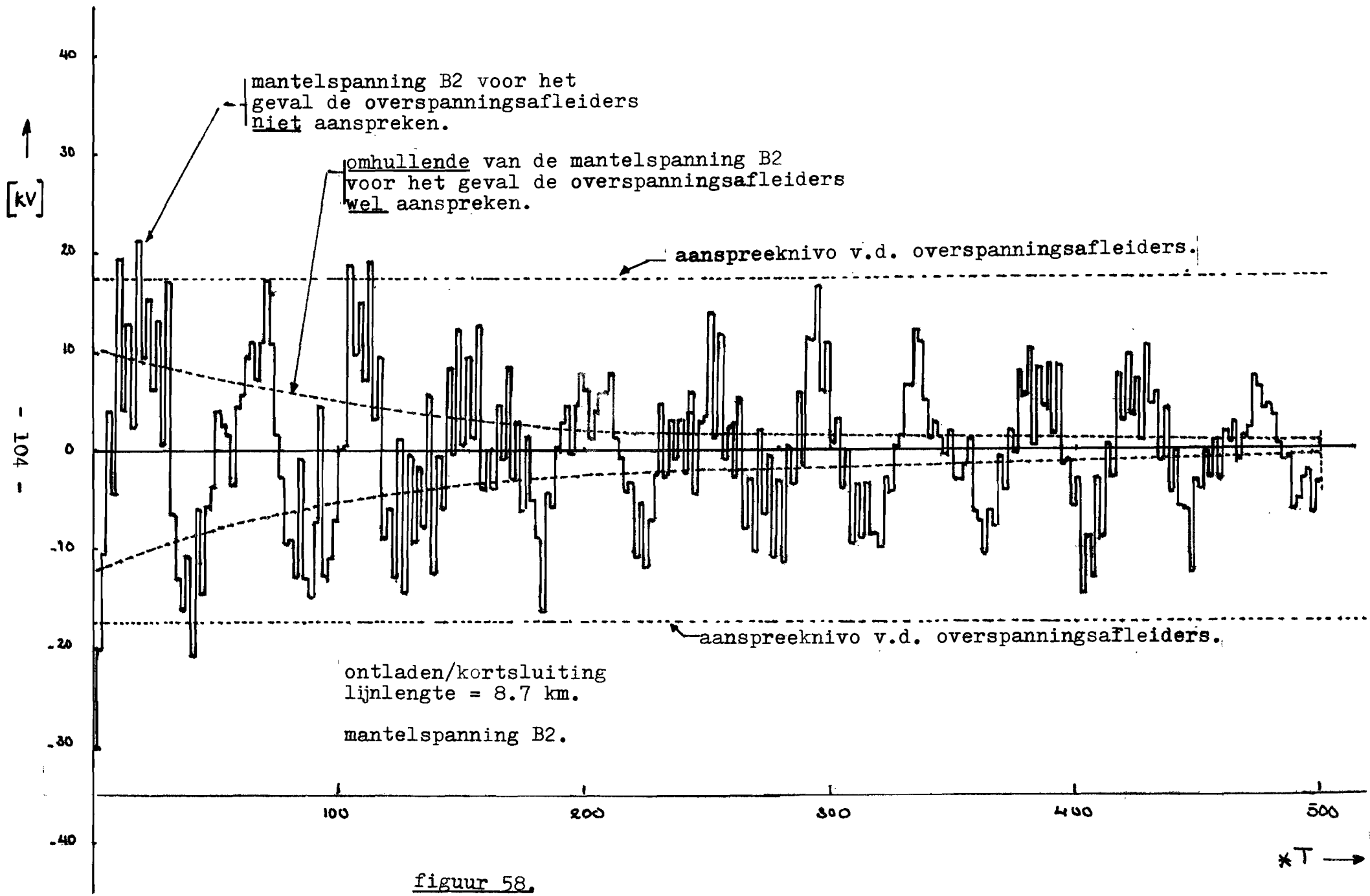
$T = 3.27 \mu\text{sek}$



figuur 56.



figuur 57.



figuur 58.

LITERATUURLIJST.

[1.] Schouten, A.J.

Berekenen van overspanningen in een kabeltransmissiesysteem met kruislings verbonden mantels.

Afstudeerverslag EO.76.A.24.

[2.] Sakshaug, E.C.

Current-limiting gap arrester-some fundamental consideration.

IEEE Winter Power Meeting, Jan.31-Feb.5,1971
TP 48 PWR.

[3.] Carrara G, Clerici A, Mazza G, Taschini A.

TNA and Laboratory Study of the Switching-Surge Behavior of Lighting Arresters.

IEEE-T, vol. PAS-88, no. 10, Okt. 1969.

[4.] Husband D, Morsztyn K, Dillon B.

Influence of surge diverters on overvoltage probability distributions.

Proc. IEE, vol. 121, no. 5, Mei 1974

[5.] Brauner, G.

Berechnung der Eigenschaften von Überspannungsableitern.

ETZ-A Bd.96, (1975) H.5.

[6.] Carroll, D., Flugum R, Kalb J, Peterson H.

A dynamic surge arrester model for use in power system transient studies.

IEEE-T, vol. PAS-91, 1972, pp. 1057-1066.

[7.] Taylor, E., Merry S.

Switching surge duty on modern arrestors.

IEEE-T, vol. PAS-90, 1971. pp.1103-1111.

[8.] Flugum, R., Kalb J.

Operation of surge arresters on low surge impedance circuits.

IEEE PES Winter Meeting, Jan.27-Feb.1, 1974.
T 74 198-8.

[9.] Flugum, R.

Operation of lighting arresters on abnormal power frequency voltages.

IEEE-T, vol. PAS-89, 1970, pp. 1444-1451.

- [10] Sakshaug, E., Schei A, Clerici A, Mazza G, Santagostino G,
Taschini A.

Requirements on EHV and UHV surg arresters,
comparison of energy and current duties between
field and laboratory conditions by means of
TNA simulation.

CIGRE, Paper 33-10, 1976, Aug.25-Sept.2,
Int. Conference on large HV electric systems.

- [11] Brookes, A.

The design of specially bonded cable systems.I.
Working Group 07, Study Committee no. 21.
Electra, Mei 1973.

- [12] Skipper, D.

The design of specially bonded cable systems II.
Working Group 07, Study Committee no. 21.
Electra, Juli 1976.

- [13] Sarbach, E.

Switching Surge Duty of Lighting Arresters.
IEEE-T, vol. PAS-87, no. 6, Juni 1968.

- [14] Wedepohl, L., Wilcox D,

Transient analysis of underground power-
transmission systems.

Proc. IEE, vol. 120, no. 2, Feb. 1973.

- [15] Dommel, H.

Digital Computer Solution of Electromagnetic
Transients in Single- and Multiphase Networks.

IEE-T, vol. PAS-88, no. 4, Apr. 1969.

Bijlage 1.

Gegevens van het 150 kV kabelsysteem. [1]

drie een-fase kabels 90/150 kV, 800 mm²

lengte	: 3 x 500 m
ligging	: in driehoek
hart op hart afstand tussen de kabels	: s = 35 cm
gemiddelde liggingsdiepte	: 100 cm
straalholle kern	: $r_0 = 8$ mm
buitenstraal kabelader	: $r_1 = 19$ mm
binnenstraal loodmantel	: $r_2 = 34,5$ mm
buitenstraal loodmantel	: $r_3 = 38,5$ mm
buitenstraal kabel	: $r_4 = 42,5$ mm
soortelijke weerstand koper	: $\rho_{Cu} = 17 \cdot 10^{-8}$ ohm m
soortelijke weerstand lood	: $\rho_{Pb} = 21 \cdot 10^{-7}$ ohm m
diëlektrikum ader-mantel	: $\epsilon_{r1} = 35$
diëlektrikum mantel-aarde	: $\epsilon_{r2} = 4$
soortelijke weerstand grond	: $\rho_a = 50$ ohm m

De golfimpedanties van:

-de geleider-mantelkomponent	$Z_1^i = 20$ ohm
-de mantel-mantelkomponent	$Z_2^i = 14$ ohm
-de nulkomponent	$Z_3^i = 42,6$ ohm

De voortplantingssnelheid van de:

- geleider-mantel golven	$u_1 = 153 \cdot 10^6$ m/sek.
- mantel-mantel golven	$u_2 = 30,6 \cdot 10^6$ m/sek.
- nulkomponent golven	$u_3 = 10,2 \cdot 10^6$ m/sek.

De looptijden voor een sectie van 500 m. van:

-de geleider-mantelkomponent	$T_1 = 3,27 \cdot 10^{-6}$ sek.	k = 1
-de mantel-mantel komponent	$T_2 = 16,34 \cdot 10^{-6}$ sek.	k = 5
-de nulkomponent	$T_3 = 48,92 \cdot 10^{-6}$ sek.	k = 15

Algemeen: kT met $T = T_1$

Bijlage 2.

Gegevens van de hoogspanningslijn. (Geertruidenberg-Breda).

Aantal bundelgeleiders	6
Aantal draden per bundel	4
Straal geleider	0.009 m
Straal bundelgeleider	0.284 m
Soortelijke weerstand	2.8×10^{-8} Ohm.m
Soortelijke weerstand aarde	50 Ohm.m
Lengte	10.8 km

<u>B</u> edrijfskapaciteit	$C_b = 14.114$ nF/km
<u>H</u> omopolaire-kapaciteit	$C_h = 8.297$ nF/km

Overige parameters:

Frekwentie	R_b	L_b	R_h	L_h
Hz.				
50	34.44	0.825	200.86	2.422
200	37.65	0.823	337.68	2.212
800	61.34	0.819	975.85	2.075
1600	89.56	0.816	1863.00	1.998
3200	136.92	0.814	3584.00	1.918
6400	223.89	0.811	6782.00	1.839

R_b en R_h in milli-ohm/km

L_b en L_h in milli-H /km

Deze gegevens zijn overgenomen uit:

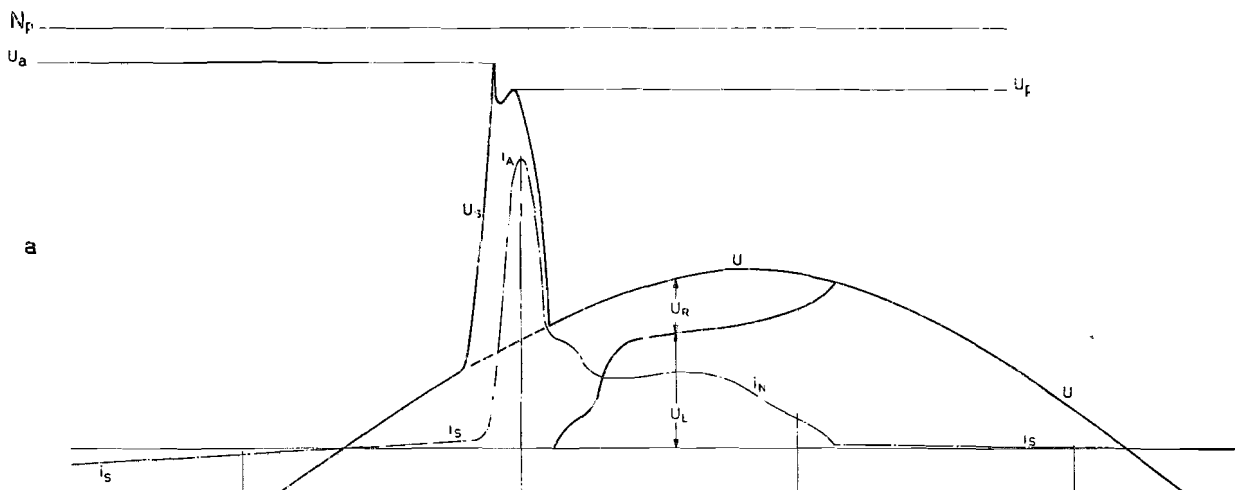
Job CARSON.

uitgevoerd door ir. Birkhölzer.

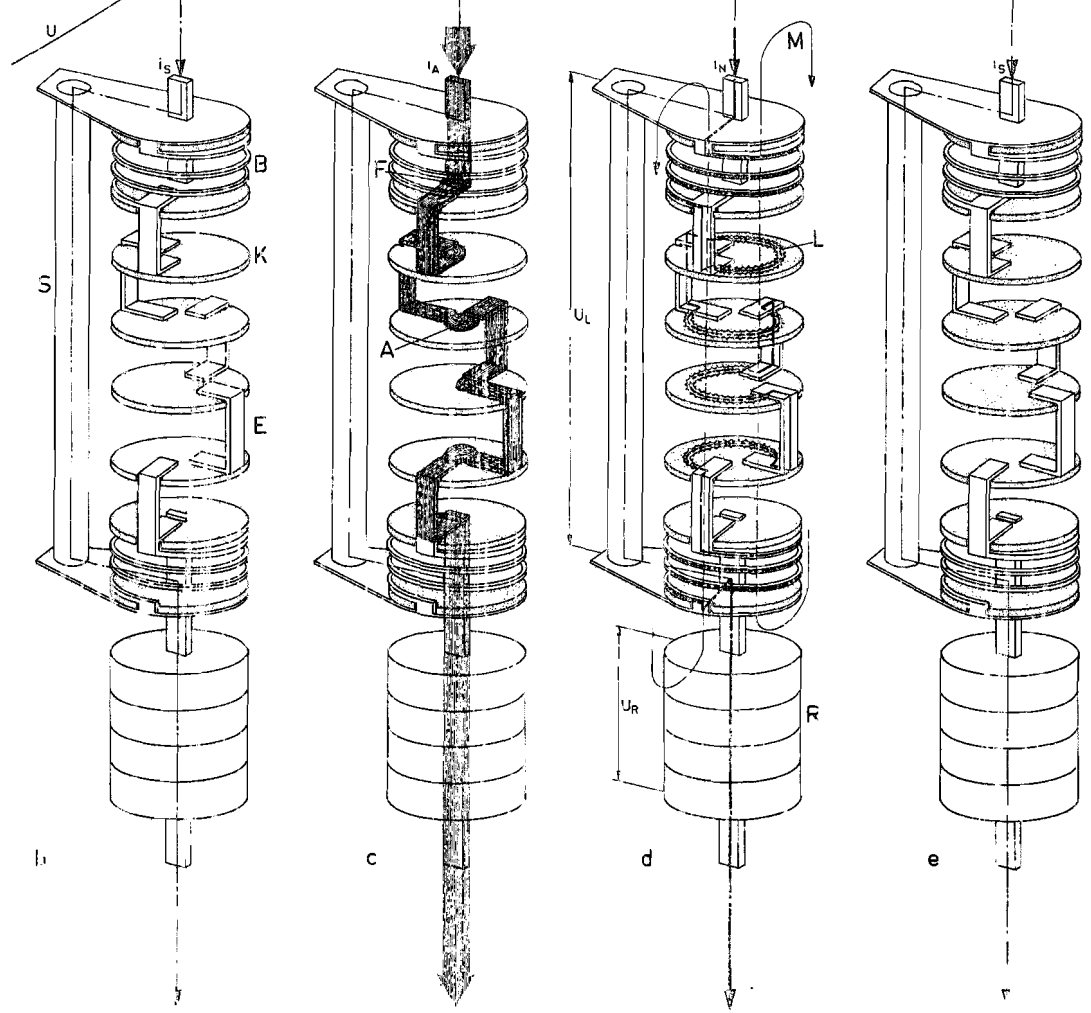
TH-Eindhoven.

$f = 1000$ Hz.

golfimpedantie:	$Z_b = 240$ ohm	$Z_h = 500$ ohm
golfsnelheid :	$v_b = 2,95 \cdot 10^8$ m/sek.	$v_h = 2,42 \cdot 10^8$ m/sek.



a



b

c

d

e

OVERSPANNINGSAFLEIDER MET MAGNETISCH GEBLUSTE VONKBRUGGEN

Verklaring:

- a Verloop van de elektrische grootheden tijdens het aanspreken en blussen
 - b Afleider in normale bedrijfstoestand
 - c Afleider doorlopen door de afleidingsstootstroom
 - d Afleider doorlopen door de reststroom
 - e Afleider in normale bedrijfstoestand
-
- A Lichtboog, gevormd door de afleidingsstroom
 - B Blaasspoel
 - E Vonkbrug elektroden
 - i_A Afleidingsstroom
 - i_N Reststroom
 - i_S Stuurstroom
 - K Bluskamerwand
 - L Lichtboog tijdens het blussen
 - M Magnetische veldlijnen
 - B_p Gegarandeerd beschermingsniveau
 - R Spanningsafhankelijke weerstanden
 - S Stuurweerstand
 - U Bedrijfsspanning
 - U_a Aanspreekspanning
 - U_L Lichtboogspanning tijdens het blussen
 - U_p Restspanning
 - U_R Spanning over de spanningsafhankelijke weerstanden tijdens het blussen
 - F Vonkbrug
 - U_s Stootspanning.