

MASTER

Het onderbreken van inductieve stromen m.b.v. hoogspanningsscheiders

Huijbrechts, F.A.J.M.

Award date:
1981

[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.

4379

AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Technieken van de Energievoorziening

Het onderbreken van inductieve
stromen m.b.v. hoogspanningsseiders

EH.81.A.63
F.A.J.M. Huijbrechts

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:
Prof.dr.ir. W.M.C. van den Heuvel
dr.ir. V.K.I. Kalasek

oktober 1981

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN

Inhoudsopgave

Samenvatting	1.
Inleiding	2
1. Definities, theorie en schakelsituaties	3.
1.1 Definities	3.
1.2 Theorie	5.
1.21 Inleiding	5.
1.22 Boogontlading	5.
1.23 Boogverschijnselen	5.
1.24 Boogeigenschappen	6.
1.25 Boogkarakteristiek	6.
1.26 Boogenergie	7.
1.27 Onderbreken van een boog	7.
1.3 Schakelsituaties	9.
1.3.1 Afschakelen van onbelaste transformatoren en spoelen	9.
1.3.2 Afschakelen van onbelaste lijnen en kabels	10.
1.3.3 Het afschakelen van nominale stromen in netdelen	11.
1.3.4 Het afschakelen van een parallelle lijn	12
1.3.5 Het afschakelen van een parallel staande transformator	13.
1.3.6 Het in- en uitschakelen van railstromen	14.
2 Literatuurstudie	16.
2.1 Interrupting ability of horn gap switches	16.

2.2 Dielectric and other problems in the design of a new 330 kV outdoor air-switch	21.
2.3 Field measurements of surges when switching in 345 kV stations	22.
2.4 345 kV switching surge tests exploring dynamic voltage and arrester performance	22.
2.5 Switching the magnetic current of large 345 kV transformers with double break air switches	23.
2.6 Results of survey on interrupting ability of air break switches	24.
2.7 Isolator as a substitute for a 110kV transformer breaker	27.
2.8 Breaking capacity of isolators as a function of their opening speed	29.
2.9 Alternating current disconnectors (isolators) and earthing switches	31.
2.10 Closing and tripping autotransformers by 330 kV isolators	32.
2.11 Samenvatting literatuurstudie	34.
3. Het onderbreken van kleine inductieve stromen (0 tot 5A) m.b.v. een scheider	36.
3.1 Inleiding	36.
3.2 Bepaling van de houdspanning als functie van de contactafstand	36.
3.3 Beproevingscircuit	37.
3.4 Meetmethode	44.
3.5 Metingen	45.

3.6	Meetresultaten	49.
3.7	Conclusies	59.
3.8	Mogelijke oplossingen	62.
4.	Het in- en uitschakelen van een stroom van 750 A bij een spanning van 300 V	66.
4.1	Inleiding	66.
4.2	Eisenpakket	66.
4.3	Beproevingscircuit	67.
4.4	Meetmethode	68.
4.5	Het beproeven van de diverse constructies	69.
4.5.1	Zweep	69.
4.5.2	Afbrandhoorns	79.
4.5.3	Knikstaven	83.
4.5.4	Nylonstripjes	96.
4.6	Conclusies	96.
	Literatuurlijst	97.
	Bijlagen	99.

Samenvatting.

In dit verslag wordt ingegaan op het onderbreken van stromen m.b.v. hoogspanningsseiders.

Het eerste deel behandelt de resultaten van een literatuur studie.

De experimenten die vervolgens zijn verricht vallen uiteen in twee groepen.

1. Het onderbreken van kleine inductieve stromen (0 tot 5A) bij een spanning van 110 kV (zoals optreden bij het onderbreken van onbelaste transformatoren).

Het doel van deze experimenten was, vast te stellen welke stroom de scheider in staat is te onderbreken en tevens om te onderzoeken wat de invloed van de openingssnelheid op de boogduur en de reikwijdte van de boog is.

De onderzochte scheider kan stromen tot ongeveer 5A onderbreken.

Het verhogen van de openingssnelheid van ca 0,4 m/sec tot ca 20 m/sec, leverde de volgende resultaten op.

- de totale boogduur neemt af tot ca 30%.

- de reikwijdte van de boog neemt echter in veel geringere mate af, namelijk tot ca 80 % .

In het verslag worden ook enkele suggesties aangegeven om tot beperking van boogduur en reikwijdte te komen.

2. Het in- en uitschakelen van een inductieve stroom van 750 A bij een spanning van 300 V (een dergelijke stroom kan optreden bij het omschakelen van railsysteem).

Het doel van deze experimenten was om verschillende commutatiecontacten te onderzoeken.

Aan de hand van de experimenten met diverse constructies is er een ontwerp gekozen dat reeds een praktische realisatie heeft gevonden.

Inleiding.

In de meeste onderstations wordt een scheider alleen in- en uitgeschakeld wanneer het systeem stroomloos is. Het komt echter in de praktijk meer en meer voor dat men systemen die wel stroom voeren m.b.v. scheiders uit wil schakelen. Men moet hierbij bijvoorbeeld denken aan het uitschakelen van onbelaste transformatoren of onbelaste hoogspanningslijnen. In hoofdstuk 1 onder de paragraaf "schakelsituaties" wordt hierop nader ingegaan. De voordelen die dit soort schakelsituaties bieden zijn vooral van economische aard, omdat men dan doorgaans kan afzien van een vermogensschakelaar welke zeer kostbaar is.

Het onderbreken van stromen m.b.v. een scheider kan men indelen in twee groepen:

1. Het onderbreken van kleine stromen (0-10 A) bij een hoge spanning. Dit treedt bijvoorbeeld op bij het afschakelen van een onbelaste transformator.
2. Het in- en uitschakelen van grote stromen (tot 750 A) bij een lage spanning. Dit treedt bijvoorbeeld op bij omschakeling van railsystemen.

In het eerste gedeelte van het verslag zijn veel voorkomende begrippen gedefinieerd, is er een theoretische beschouwing gegeven over boegontladingen en zijn er schakelsituaties aangegeven waarin scheiders stromen zouden kunnen onderbreken.

Om een nader inzicht te verkrijgen in afschakel-verschijnselen in vrije lucht is er een literatuur onderzoek over dit onderwerp verricht. De uitkomsten hiervan zijn in het tweede gedeelte van het verslag vermeld.

In het derde gedeelte is ingegaan op het onderbreken van kleine stromen (0-5 A) bij een spanning van 110 kV. Na een korte inleiding wordt nader ingegaan op het beproevingscircuit, de meetmethode en worden de verkregen meetresultaten vermeld aan de hand van grafieken en tabellen. Aansluitend worden de resultaten geanalyseerd en worden er mogelijke oplossingen aangegeven

In het vierde gedeelte van het verslag is ingegaan op het in- en uitschakelen van een grote stroom (750 A) bij een spanning van ongeveer 300 V m.b.v. een scheider welke geschikt is voor een spanning van 110 kV. Na een korte inleiding worden in dit gedeelte het beproevingscircuit, een eisenpakket, de meetmethode en de meetresultaten behandeld. Tevens wordt ingegaan op de mechanische eigenschappen van de gekozen constructies. Aansluitend worden de resultaten geanalyseerd en wordt er een oplossing aangegeven voor dit probleem.

1 Definities, theorie en schakelsituaties.

Inleiding.

Dit deel van het verslag is opgedeeld in drie stukken. In het eerste deel worden veelvoorkomende begrippen gedefinieerd. In het tweede stuk wordt kort ingegaan op de theoretische aspecten met betrekking tot boogontladingen. In het derde stuk worden schakelsituaties aangegeven waarin men scheiders in plaats van "dure" vermogensschakelaars zou kunnen toepassen.

1.1 Definities.

Boog (arc): Boogontlading die ontstaat na contactscheiding.

Boogpad (arc path): De "zichtbare" weg die de boog tussen anode en kathode vormt.

Boogduur (arc duration): De tijd die verloopt tussen het moment van de eerste ontlading en het moment waarop ontlading definitief dooft.

Booglengte (arc length): De werkelijke en volledige lengte van het onregelmatige en kronkelende boogpad.

Booghoogte (arc reach): De afstand welke er bestaat tussen een punt gelegen in het midden van de verbindingslijn van de voetpunten van de boog en het verst verwijderde punt van het boogpad op het moment dat de booglengte maximaal is.

Boogspanning (arc voltage): De spanning tussen anode en kathode gedurende de boogduur.

Boogstroom (arc current): De stroom die door de boog loopt gedurende de boogduur.

Onderbrekingscapaciteit (breaking capacity): De maximale stroom die een scheider kan onderbreken.

Schakeltijd (operation time): De tijd die de scheider nodig heeft om van gesloten toestand in geheel geopende toestand te komen.

Schakelsnelheid (opening speed): De gemiddelde snelheid waarmee het uiteinde van de scheiderarm zich beweegt dit in m, radialen of graden per sec.

Contactafstand (terminal separation): De momentane minimale afstand tussen de

scheidende contacten tijdens het openen van de scheider.

Stabiele boog (stable arcing): Het proces waarbij de stroom continu loopt en niet afbreekt tijdens de boogduur.

Instabiele boog (instable arcing): Het proces waarbij korte onderbrekingen in de boogstroom optreden tijdens de boogduur.

Kritische lengte (critical length): Die booglengte waarbij de boogparameters zodanig zijn dat de boog op het punt staat te doven.

R.R.R.V. (Rate of Rise of Recovery Voltage): De aanvangsstijtheid waarmee de spanning terugkeert.

p.u. (per unit): De verhouding tussen de gemeten waarde en de waarde in normaal bedrijf.

1.2 Theorie.

1.21 Inleiding.

De belangrijkste functie van een scheider is om een zichtbare scheiding te bewerkstelligen tussen onder spanning zijnde delen van een hoogspanningsstelsel en spanningsloze delen van een hoogspanningsstelsel. Doorgaans is de situatie zo dat het openen en sluiten van een scheider in stroomloze toestand wordt gedaan. In die gevallen waarbij men kleine stromen bij hoge spanning of grote stromen bij lage spanning moet in- of uitschakelen ontstaat er een overgangsfase waarbij er een boogontlading tussen de contacten ontstaat. De eigenschappen van de boogontlading worden mede bepaald door de omgeving waarin de boogontlading staat.

1.22 Boogontlading.

Stroomgeleiding in gassen is slechts mogelijk, als er zich tussen de elektroden elektronen en ionen bevinden. De voor de ontlading noodzakelijke elektronen worden uit de kathode vrijgemaakt.

Het vrijmaken van elektronen kan op verschillende manieren gebeuren

- foto-emissie
- elektronen-emissie
- thermische-emissie

De sterke elektronen-emissie treedt op bij verwarming van de elektrode. De door de kathode geëmitteerde elektronen worden door het veld tussen anode en kathode naar de anode getrokken. Zij botsen daarbij op gasatomen waardoor nieuwe elektronen ontstaan. Deze stootionisaties dragen bij tot verhoging van de temperatuur van de boogontlading.

1.23 Boogverschijnselen.

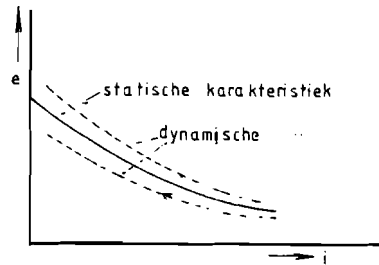
Bij wisselstroomonderbrekers wordt de boog bij iedere stroomnuldoorgang gebiust en kan er herontsteking optreden als de transient wederkerende spanning groter is dan de doorslagspanning.

Het gedrag van de boog is afhankelijk van:

1. Aard en druk van het medium
2. De wijze van koeling
3. Het materiaal van de elektroden
4. De afstand en de vorm van de ruimte tussen de elektroden

1.24 Boogeigenschappen.

Een grafiek van de momentane waarde van de boogspanning als functie van de boogstroom wordt in onderstaande karakteristiek (figuur 1.1) weergegeven.



figuur 1.1 Boogspanning als functie van de boogstroom.

Bij toename van de boogstroom nemen temperatuur en ionisatieproces toe. Hierdoor zal de geleidbaarheid toenemen wat tot gevolg heeft dat de boogspanning zal dalen. Verdere toename van de stroom heeft geen toename van de geleidbaarheid tot gevolg. Een hoge ontsteekspanning e_i veroorzaakt na stroomnuldoorgang herontsteking van de boog.

Wanneer de stroom snel verandert spreekt men van een dynamische karakteristiek, bij een stroom die langzaam verandert spreekt men van een statische karakteristiek.

Omdat bij grote stromen gedurende het grootste gedeelte van een halve periode $(di/dt)/i$ klein is, wordt de karakteristiek voor het overgrote deel statisch.

Bij stroomnuldoorgang is dit niet het geval.

1.25 Boogkarakteristieken

Warrington(11) heeft een formule voor de boogspanning bepaald voor bogen in "open" lucht.

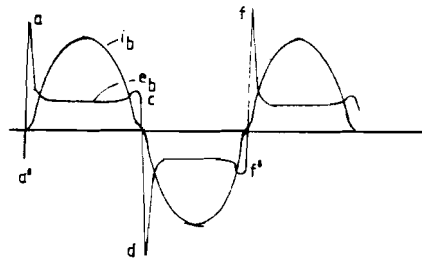
$$e_b = (2667 \cdot (S + 4,40 \cdot v \cdot t)) / I \quad (1.1)$$

- e_b = de boogspanning in V.
- S = de contactafstand in m.
- v = de windsnelheid in m/s.
- t = de boogduur in s.
- I = de boogstroom in A.

Een wisselstroomboogontlading verandert voortdurend met de stroom i en met de verandering van de stroom in de tijd di/dt .

Indien men de boogspanning en de boogstroom in een grafiek uitzet krijgt men karakteristieken die afhankelijk zijn van:

- het medium (SF_6 , lucht, olie etc.)
- het contactafstand
- de manier van koeling
- de frekwentie



figuur 1.2 Boogstroom en boogspanning als functie van de tijd

Figuur 1.2 toont een grafiek waarbij men boogstroom en boogspanning als functie van de tijd heeft opgenomen.

In a en d ontstaat er een herontsteking van de boog. In de punten c en f dooft de boog. In de intervallen tussen a-a' en c-d en f-f' is de boog onstabiel.

1.26 Boogenergie.

Tijdens de ontlading wordt er een hoeveelheid energie (bijna geheel in de vorm van warmte) in de directe omgeving van de boog vrijgemaakt.

Deze energie wordt door de volgende formule bepaald:

$$W = \int_0^t i^2 e_b dt \quad (1.2)$$

- i = de momentane waarde van de stroom
- e_b = de momentane waarde van de boogspanning
- t = de boogduur

1.27 Het onderbreken van een boog.

In het algemeen kan men twee manieren aangeven waardoor boogonderbreking tot stand

komt.

a. Het onderbreken door gebruik te maken van een hoge boogweerstand.

In dit geval wordt de boog zodanig gestuurd dat zijn effectieve weerstand, welke in serie staat met het net, sterk toeneemt. Hierdoor moet de stroom afnemen terwijl tevens de nuldoorgang van de stroom wordt versneld. Het resultaat is, dat de boogenergie gering kan zijn, ondanks de hoge boogspanning en dat door het in fase komen van stroom en spanning er geen hoge overspanningen ontstaan na definitieve doving van de boog.

De boogweerstand kan worden vergroot door:

- verlenging van de boog
- een effectieve koeling
- het opdelen van de boog

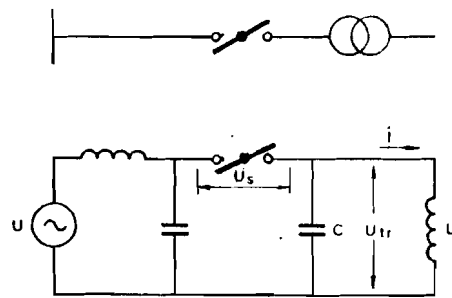
b. Het onderbreken door gebruik te maken van een lage boogweerstand het zgn. onderbreken bij "natuurlijke" stroomnuldoorgang.

Bij deze manier van onderbreken tracht men de boogenergie laag te houden, zodat men door zeer sterke koeling en turbulenties de boog tijdens een stroomnuldoorgang definitief kan doven.

1.3 Schakelsituaties.

Er zijn schakelsituatie waarin men alleen een scheider zou kunnen gebruiken. Men kan in die gevallen een "dure" vermogensschakelaar weglaten. In de hierop volgende paragrafen worden enige schakelsituaties besproken waarin men dit zou kunnen toepassen.

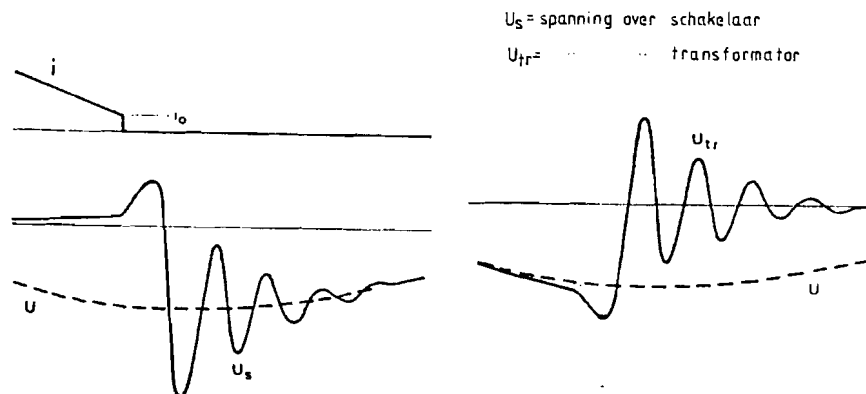
1.3.1 Afschakelen van onbelaste transformatoren en spoelen.



figuur 1.3 Het afschakelen van een onbelaste transformator

Door het instabiele karakter van een lichtboog kan er een voortijdige onderbreking van de stroom optreden de zgn. stroombreking (current chopping).

De op het moment van stroombreking in de transformator of spoel aanwezige energie $0.5Li^2$ zal getransformeerd worden in elektrostatische energie in diens eigen capaciteit C.



U_s = spanning over schakelaar
 U_{tr} = spanning over transformator

figuur 1.4 Stroom en wederkerende spanning

De maximale overspanning over de transformator wordt bereikt wanneer de gehele beschikbare elektromagnetische energie in de condensator is verzameld.

$$0,5 C U_m^2 = 0,5 L i_0^2 + 0,5 C \hat{U}^2$$

$$U_m = \sqrt{\frac{L}{C} i_0^2 + \hat{U}^2} \quad (1.3)$$

\hat{U} = de spanning over de capaciteit op $t=0$

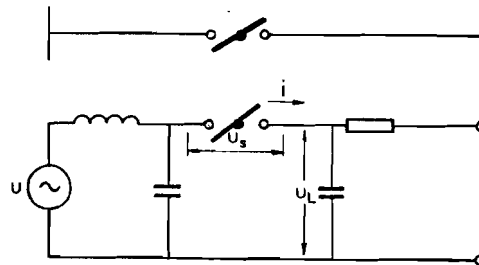
De spanning over de schakelaar bestaat uit een oscillerende spanning, gesuperponeerd op de momentane en maximale waarde van de voedingsspanning bij stroombreking. Bij een kleine contactbreuk zal de grote steilheid van de wederkerende spanning aanleiding kunnen geven tot herontsteking.

Wanneer er geen stroombreking optreedt dan kan de wederkerende spanning slechts oplopen tot twee maal de poolspanning. De poolspanning zelf kan, afhankelijk van de aarding van het systeem, 1,5 maal de fasespanning zijn. Deze wederkerende spanning kan ook aanleiding geven tot herontsteking bij kleine contactafstand

1.3.2 Afschakelen van onbelaste lijnen en kabels.

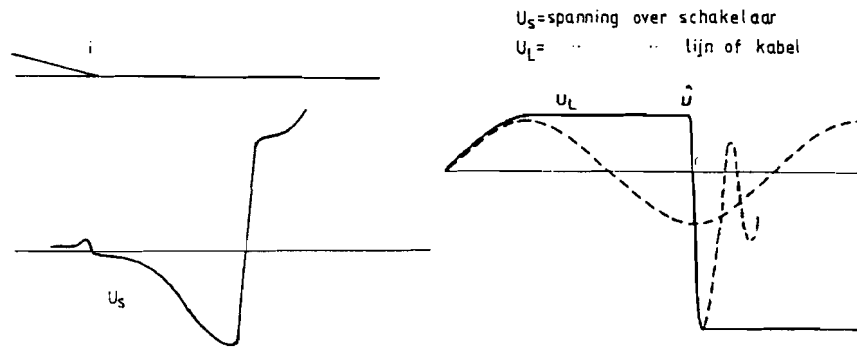
Het afschakelen van lange onbelaste lijnen en kabels vereist een onderbreking van relatief grote capacatieve stromen. Er treedt onderbreking bij de nuldoorgang van de stroom op. Dit is tevens het moment waarop de lijn of kabel zich op maximale spanning bevindt.

De capaciteiten behouden enige tijd hun lading, de daarbij behorende (gelijk)spanning verdwijnt slechts langzaam.



figuur 1.5 Het afschakelen van een onbelaste lijn

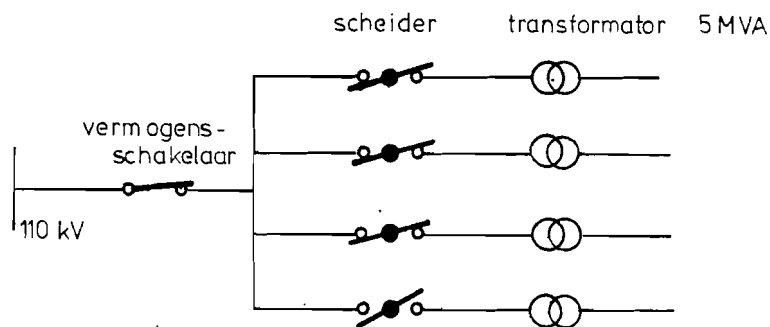
Na een halve periode zal de spanning over de schakelaar, als deze al niet eerder is doorgeslagen, tweemaal de fase spanning bedragen.



figuur 1.6 Stroom en wederkerende spanning

Indien er nu een herontsteking optreedt zal de lijn of kabel zich over de reactantie van de bron willen ontladen, hetgeen resulteert in een transient overgangsverschijnsel. Het verloop van de spanningen is in figuur 1.6 aangegeven. Het is mogelijk dat de stroom bij diens eerstvolgende nuldoorgang weer wordt onderbroken. In dat geval zal de lijn of kabel opgeladen blijven met een spanning met een tegengestelde polariteit als voor de herontsteking, doch met ca. 3 maal zo grote amplitude. Om exorbitante overspanningen te voorkomen zal men derhalve herontstekingen moeten vermijden.

1.3.3 Het afschakelen van nominale stromen in netdelen.



figuur 1.7 Het afschakelen van nominale stromen

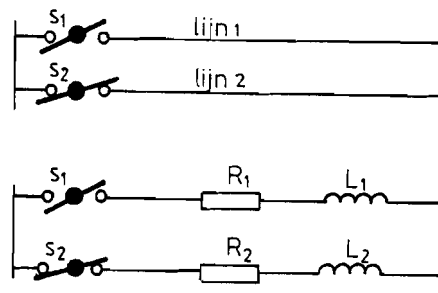
Gaan we uit van een nominale primaire spanning van 110 kV en van transformatoren met een nominaal vermogen van 5 MVA. De nominale stroom die dan moet worden onderbroken wordt dan:

$$I = \frac{P}{U\sqrt{3}} = 26,2 \text{ A} \quad (1.6)$$

Bij kortsluiting in een netdeel wordt het totale net door de vermogensschakelaar uitgeschakeld. Nadat het betreffende kortgesloten netdeel door de scheider van de rest van het net is geïsoleerd wordt de vermogensschakelaar weer gesloten. Deze manier van schakelen brengt een geringe afname van de totale betrouwbaarheid van energievoorziening met zich mee.

De wederkerende spanning is afhankelijk van de uitgeschakelde belasting.

1.3.4 Het afschakelen van een parallelle lijn.



figuur 1.8 Het afschakelen van een parallelle lijn

Het afschakelen van een parallelle lijn komt voor als men in het kader van bedrijfsvoering of voor onderhoud een lijn spanningsloos wil maken.

Nemen we aan dat S1 opent. Op dat moment is $I_1 Z_1 = I_2 Z_2$. Er zal een ontlading ontstaan met een boogspanning U_b . Daardoor zal I_1 afnemen met I en I_2 toenemen met hetzelfde bedrag.

Dus:

Dus:

$$(I_1 - i)Z_1 + U_{\text{boog}} = (I_2 + i)Z_2$$

$$I_2 Z_2 - I_1 Z_1 = U_{\text{boog}} = i(Z_1 + Z_2)$$

$$I_2 Z_2 - I_1 Z_1 \leq U_{\text{boog}}$$

In principe kan de boog blijven branden zolang

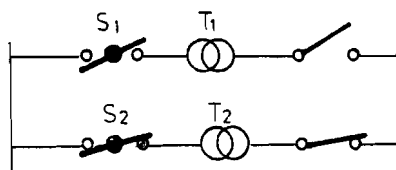
$$U_{\text{boog}} + (I_1 - i)Z_1 = (I_2 + i)Z_2$$

met $I_1 + I_2 = I = \text{constant}$, een oplossing heeft voor U_{boog}

De spanning over de scheider wordt bepaald door:

$$U_s = (I_1 + I_2)Z_2$$

1.3.5 Het afschakelen van een parallel staande transformator.



figuur 1.9 Het afschakelen van een
parallele transformator

De reden dat men een parallel staande transformator zou willen afschakelen is, dat wanneer de belasting laag is men met één transformator kan volstaan.

Hierdoor treedt een sterke vermindering van de transformator verliezen op waardoor de bedrijfsvoering wordt verbeterd.

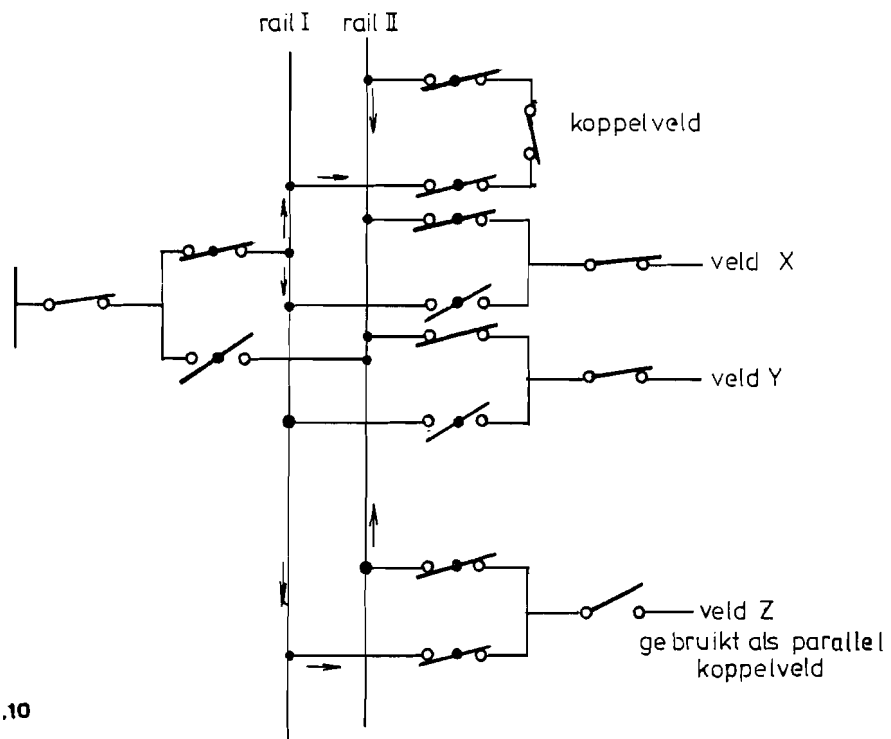
Ook worden in bedrijven met 100% reserve transformator de beide transformatoren om beurt gebruikt.

Als men transformator 1 zou willen afschakelen dan moet eerst deze transformator aan de secundaire zijde met een vermogensschakelaar worden geopend.

Is dit geschiedt dan kan de nu onbelaste transformator m.b.v. scheider 1 worden afgeschakeld. Het afschakelen van een onbelaste transformator is in 1.3.1. behandeld.

Kortsluitingen in de transformator zelf kunnen niet met een scheider worden afgeschakeld.

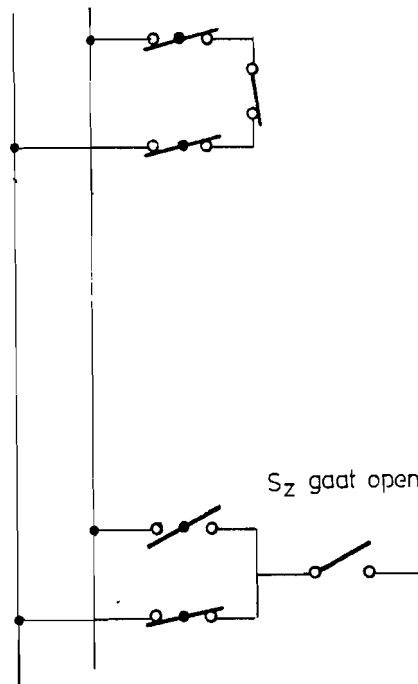
1.3.6 Het onderbreken van railstromen.



figuur 1.10

In figuur 1.10 is een situatie getekend welke voorkomt bij het omschakelen van het ene railsysteem naar het andere railsysteem.

Een van de scheiders in veld Z, dat in deze situatie als parallel koppelveld wordt gebruikt, moet in staat zijn grote stromen in- en uit te schakelen bij een relatief lage spanning



De stromen die moeten worden onderbroken kunnen daarbij oplopen , afhankelijk van het railsysteem, tot 1000 A bij een spanning van 20 tot 300 V. In principe zijn dezelfde formules als die bij het onderbreken van een parallelle lijn (1.3.4) geldig.

2. Literatuurstudie.

In de navolgende paragrafen worden artikelen behandeld die betrekking hebben op het onderbreken van kleine stromen bij een hoge spanning m.b.v. een scheider. Bij de titel van het artikel zijn het jaartal waarin het artikel is verschenen en het nummer van het artikel in de literatuurlijst opgenomen.

2.1. Interrupting ability of horn gap switches. (1950) (1)

In het artikel wordt studie gemaakt van:

1. De boogdimensies zoals die bij verschillende schakelsituaties optreden.
2. De onderbrekingscapaciteit van bestaande scheiders in verschillende schakelsituaties.
3. De noodzakelijke afstand tussen de scheiders in een drie-fase systeem.

Men geeft drie eigenschappen voor bogen in de open lucht

- a. De booglengte is rechtevenredig met de boogspanning.
- b. Een boog zal altijd doven indien de omgeving de benodigde groei tot een kritische lengte toestaat, mits de contactafstand groot genoeg is om herontsteking te voorkomen.
- c. Een toename in de booglengte gaat gepaard met een toename in de boogweerstand en een afname in de boogstroom.

Er wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen booglengte en booghoogte (voor de definitie zie 1.2). De booghoogte is vooral van praktische waarde betekenis om te weten welke afstand men tussen de scheiders moet aanhouden om overslag naar nabijgelegen apparatuur te voorkomen.

Er waren op het tijdstip waarop het artikel werd geschreven twee formules voor de booglengte van bogen in open lucht bekend:

$$\ell = I^{\frac{1}{2}} V^{0,102} 10^{-3} \quad (\text{Ackerman}) \quad (12) \quad 21$$

$$\ell = I^{\frac{1}{2}} V^{0,095} 10^{-3} \quad (\text{Monseth en Robinson}) \quad (13) \quad 22$$

in deze formules is:

- ℓ de booglengte in m
- V de boogspanning in V
- I de boogstroom in A

Het gebruik van de scheider werd in verschillende schakelsituaties onderzocht. Deze waren:

1. Het afschakelen van een 33 kV transmissielijn.
2. Het afschakelen van onbelaste transformatoren.
3. Het afschakelen van ombelaste lijnen.

Uit beproevingen met verschillende scheidertypen bleek dat het onderlinge verschil in onderbrekingscapaciteit en booglengte erg klein was. Daarom werden de daaropvolgende beproevingen uitgevoerd aan eenzelfde scheider (met een onderbrekingsplaats en met een scheiderarm die in geopende toestand in een verticale positie stond).

Resultaten van de diverse beproevingen.

Het afschakelen van een belaste 33 kV lijn.

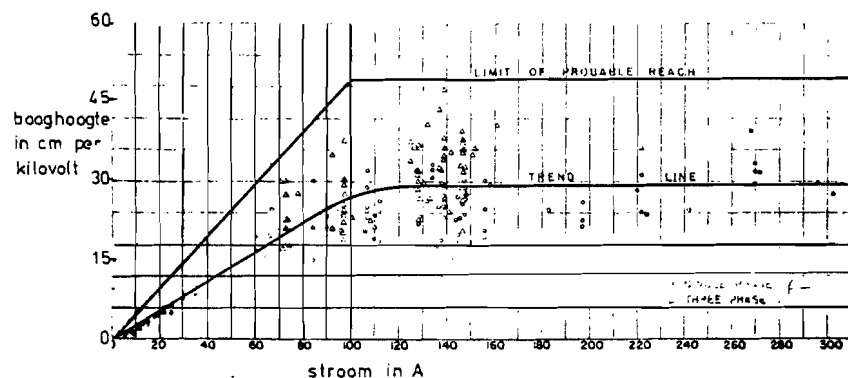
Deze beproevingen werden uitgevoerd waarbij men stromen van 56 tot 312 A onderbrak. De bijbehorende boogspanningen liepen daarbij van 1 tot 7,5 kV op en de maximale booglengte was 7,6 m.

Het afschakelen van onbelaste transformatoren.

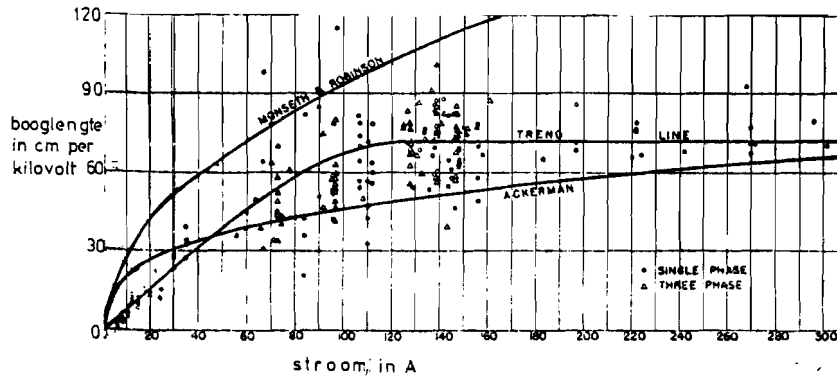
Deze beproevingen werden uitgevoerd bij spanningen die lagen tussen 12 en 49 kV. De nullaststroom was in een geval 35 A (enkele transformatoren parallel geschakeld) en de langste boog die werd gemeten was 13,4 m.

Door gebruik te maken van de verkregen meetresultaten heeft men de grafieken 21 en 22 gemaakt.

We zien uit de grafieken dat er een grote spreiding in de metingen optreedt. Deze spreiding wordt door de schrijvers toegeschreven aan variaties in de atmosferische omstandigheden, magnetische en thermische effecten en fouten bij het bepalen van moeilijk te determineren boogpaden op foto's die van de boogontladingen werden genomen.



Grafiek 21 De booghoogte als functie van de onderbroken stroom



Grafiek 2.2 De booglengte als functie van de onderbroken stroom

Aan de hand van grafiek 2.2 heeft men de volgende twee formules voor de booghoogte afgeleid:

$$\text{van } 0 \text{ tot } 100 \text{ A} \quad R = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ V I} \quad 23$$

$$\text{boven } 100 \text{ A} \quad R = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ V} \quad 24$$

In deze formules is:

R de booghoogte in m.

V de effectieve waarde van de open spanning in V.

I de effectieve waarde van de stroom voor onderbreking in A.

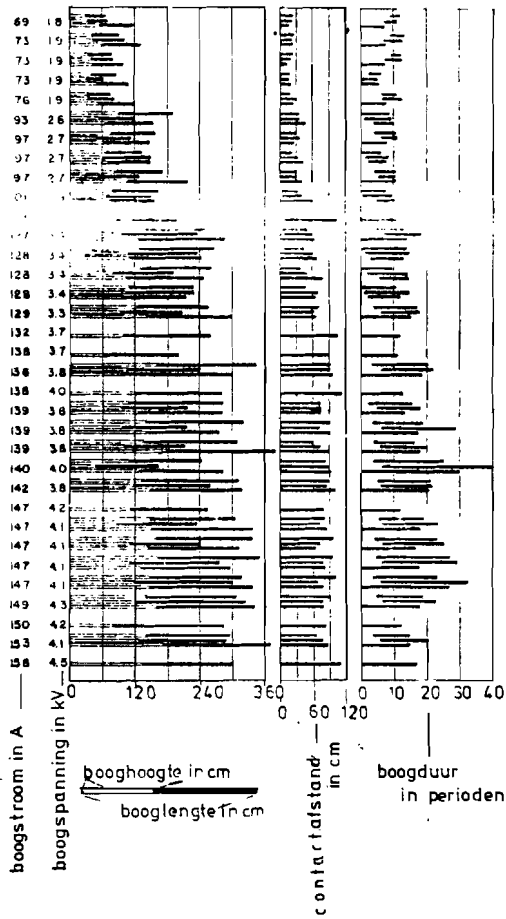
Figuur 2.1 geeft de booghoogte, booglengte, contactafstand, boogstroom, boogspanning en boogduur weer voor eenfasige- en driefasigeonderbrekingen bij een spanning van 33 kV.

We zien dat de grootste contactafstand optreedt bij eenfase onderbrekingen (b.v. bij 158 A). Bij snelle onderbrekingen bleek dat de boog een nagenoeg recht kanaal vormde totdat de maximale contactbres werd bereikt. Vervolgens verbreedde de boog zich op een normale manier totdat de kritische booglengte werd bereikt.

Het afschakelen van onbelaste lijnen bij een bedrijfsspanning van 132 kV.

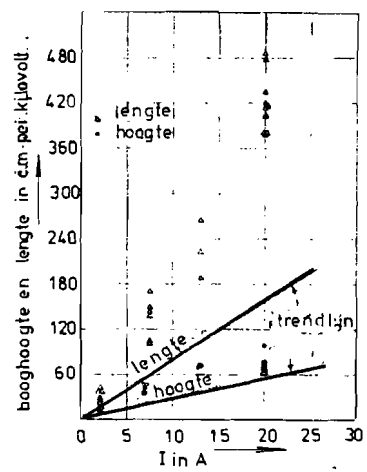
De resultaten van deze onderbrekingen zijn in grafiek 2.3 aangegeven. In deze grafiek zijn ook de trendlijnen van de booghoogte en booglengte voor inductieve- en resitieve stromen getekend.

We zien dat het afschakelen van onbelaste lijnen een grotere booghoogte en booglengte tot gevolg heeft dan het onderbreken van inductieve- en resitieve stromen van gelijke grootte.

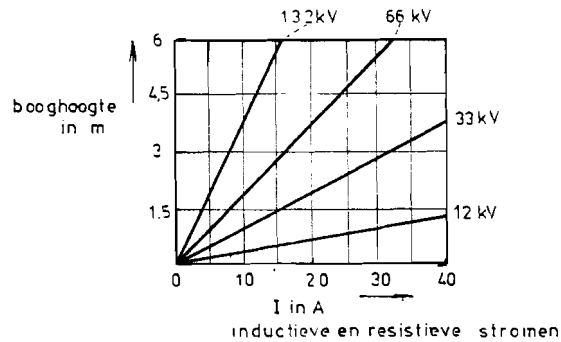


figuur 21

Grafiek 23 De booghoogte en booglengte
als functie van de boogstroom voor inductieve-
en capacitieve stromen



In grafiek 24 kan men direct de booghoogte bepalen bij een bepaalde spanning als men de te onderbreken inductieve- en resistieve stroom kent.



Grafiek 24 De booghoogte als functie van de inductieve- of resistieve stroom die onderbroken wordt.

Conclusies die werden getrokken aan de hand van de verrichte beproevingen.

1. Een scheider zal met succes een stroom onderbreken als de afmetingen voldoende zijn om de boog naar zijn kritische lengte te laten groeien en als de contactafstand voldoende is om herontsteking te voorkomen.
2. Bij conventionele scheidertypes zijn booghoogte en booglengte onafhankelijk van het scheidertype en van de schakelsnelheid.
3. Twee bogen in serie hebben ongeveer dezelfde totale lengte als een enkele boog onder dezelfde omstandigheden. Een van de bogen die in serie staan kan daarbij veel langer zijn dan de andere boog.
4. Bogen zijn langer indien er onbelaste lijnen mee worden afgeschakeld dan wanneer er overeenkomstige inductieve- en resistieve stromen mee worden afgeschakeld.
5. De booghoogte voor stromen beneden 100 A hangt zowel van de boogspanning als van de boogstroom af.

$$R = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ V I}$$

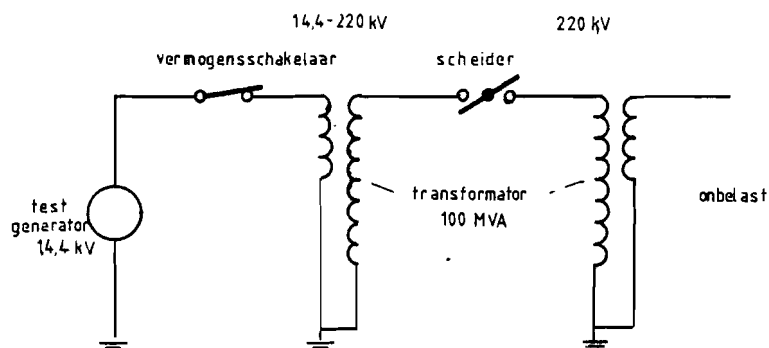
6. De booghoogte voor stromen van 100 tot 320 A is evenredig met de boogspanning maar onafhankelijk van de boogstroom.

$$R = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

7. Scheiders welke geschikt zijn voor een bedrijfsspanning van 132 kV en die een isolatieafstand tussen de fasen van 4,8 m hebben kunnen stromen tot 7 A veilig afschakelen. Grotere stromen kunnen alleen bij gunstige omstandigheden worden onderbroken.

2.2 Dielectric and other problems in the design of a new 330 kV outdoor air-switch.
(1954) (2)

Er is in dit artikel uitvoerig ingegaan op de doorslagvastheid en isolatiecoördinatie van een bepaald type scheider. Men geeft hiervoor beproevingsmethoden aan. Ook is er een paragraaf gewijd aan het afschakelen van een onbelaste transformator. Het beproevingsschema is in figuur 22 weergegeven.



figuur 22 Beproevingsschema

De voedingsspanning van de onbelaste transformator varieerde men van 190 tot 216 kV. De nullaststroom varieerde hierbij van 3,7 tot 12,5 A. De scheider schakelde alle stromen zonder problemen af. De contactafstand waarbij de boog definitief doofde varieerde van 0,76 tot 0,91 m bij een schakelsnelheid van 0,55 m/s. De boogduur was ongeveer 1,5 seconde. Opgemerkt dient te worden dat de scheider uitgerust was met een veersysteem.

23 Field measurements of surges when switching in 345 kV stations. (1964) (3)

Het artikel heeft betrekking op het in- en uitschakelen van transformatoren en railsystemen m.b.v. vermogensschakelaars en scheiders.

Men gebruikte voor de beproevingen scheiders met één onderbrekingsplaats. De spanning waarbij men de in- en uitschakelingen uitvoerde was 345 kV.

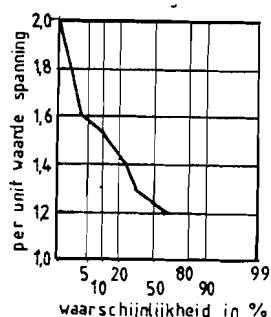
Men maakt in het artikel onderscheid tussen een stabiele en een instabiele boog (voor de definities zie 1.2). Uit metingen bleek dat instabiele booggebieden in het begin en aan het einde van de boogduur de grootste overspanningen veroorzaakten. Deze overspanningen hadden een grootste waarde bij het inschakelen van 1,7 p.u. en van 2,0 p.u. bij het uitschakelen. Instabiele bogen traden vooral op als het waaide. De reden is dat dan de boog sneller dooft en dat er herontstekingen ontstaan waardoor er hoge overspanningen optreden. De frekwentie van deze overspanningen is doorgaans hoog.

24 345 kV switching surge tests exploring dynamic voltage and arrester performance. (1965) (4)

Overspanningen die ontstaan bij het schakelen van onbelaste transformatoren al dan niet in combinatie met een hoogspanningslijn werden onderzocht.

Men heeft in een bestaande netsituatie op drie verschillende plaatsen in totaal 32 maal geschakeld. Er ontstonden hierbij 89 transiente overspanningen met een p.u. groter dan 1,1. In grafiek 25. is de waarschijnlijkheid, dat de transiente overspanning groter is dan een bepaalde p.u. waarde, weergegeven.

De hoogst gemeten overspanningswaarde was 1,9 p.u. en in een op de tien gevallen was de overspanning groter dan 1,53 p.u.. Bij het inschakelen was de maximale overspanning 1,9 p.u. en bij het uitschakelen was de maximale overspanning 1,3 p.u..



De hoge overspanningen gingen gepaard met hoge frekwenties die afhankelijk waren van de plaats waar men schakelde.

De onbelaste transformator had een nominaal vermogen van 200 MVA.

De waarden van de geschakelde nullaststromen werden niet vermeld.

Grafiek 25 De waarschijnlijkheid dat de overspanning een bepaalde p.u. waarde overschrijdt

25 Switching the magnetic current of a large 345 kV transformer with double-break air switch. (1965) (5)

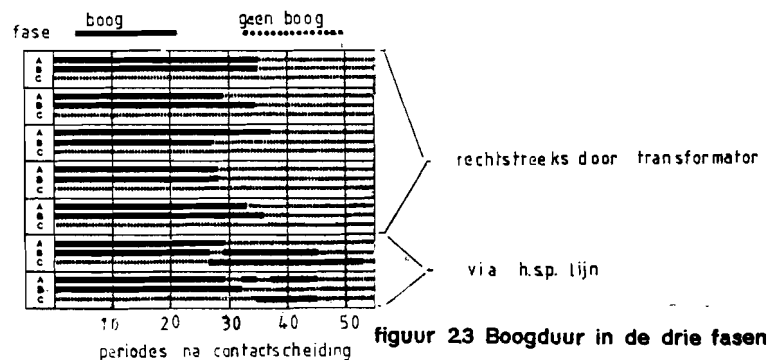
Het gebruik van scheiders met twee onderbrekingsplaatsen heeft volgens de schrijvers van dit artikel de volgende voordelen.

- Ze nemen de minste ruimte in beslag.
- Er is geen tegengewicht nodig.
- Er is een gering aantal onderdelen nodig waardoor de bedrijfszekerheid toeneemt.

M.b.v. de in het artikel beschreven scheider heeft men 14 maal onbelaste transformatoren in- en uitgeschakeld. De vorm van de boog werd door een camera, die 64 foto's per seconde nam, geregistreerd. In het artikel is een fotoserie van een onderbreking van 6,6 A bij een bedrijfsspanning van 330 kV opgenomen.

Door aan de scheider een veersysteem toe te voegen werd de openingsnelheid vertienvoudigd. De boogduur werd hierdoor tot ongeveer 15% gereduceerd en werd 80 ms.

De resultaten van de in- en uitschakelingen met het veersysteem zijn in figuur 23 vermeld.



Er werden ook beproevingen verricht waarbij niet direct door een transformator werd gevoed zoals bij de eerder genoemde beproevingen het geval was maar via een 345 kV lijn. Het resultaat was, dat de boogduur met ongeveer 50% toenam en dat deze langere boogduur doorgaans gepaard ging met hogere overspanningen.

Conclusies die door de schrijvers worden getrokken aan de hand van de beproevingen.

1. De boogduur is de helft van die van een scheider met een onderbrekingsplaats waarvan de openingsnelheid gelijk is.
2. Snelle onderbrekingen verminderen de boogduur tot 15%.

3. Het onderbreken van nullaststromen leidt tot hogere overspanningen wanneer de voeding geschiedt vanuit een transmissielijn dan wanneer er gevoed wordt vanuit een nabijgelegen transformator.

4. Een kortere boogduur houdt niet in dat er dan ook een grotere stroom kan worden onderbroken.

26 Results of survey on interrupting ability of air-break switches. (1966) (6)

Deze Amerikaanse onderzoeken tonen aan dat er in de praktijk gebruik wordt gemaakt van scheiders om "kleine" stromen te schakelen. Het onderzoek gaat uit van een enquête die gehouden werd onder 71 bedrijven die werkzaam waren op het gebied van de energievoorziening.

Men stelde de volgende vragen.

Vraag A. Gebruikt u scheiders om nullaststromen te onderbreken?

De resultaten zijn in figuur 24 weergegeven. We zien dat er van de 84 gemelde onderbrekingen 71 100% succesvol waren en dat slechts 13 onderbrekingen 90 tot 99% succesvol waren. De nullaststromen lopen daarbij op tot b.v. 10A bij 115 kV.

Vraag B. Gebruikt u scheiders om een parallel staande lijn af te schakelen?

Uit de antwoorden bleek dat 60% dit meer dan driemaal per jaar deed. 24% deed dit een tot driemaal en 16% geeft geen indicatie over het aantal maal dat er op deze manier werd geschakeld.

In figuur 25 zijn de resultaten vermeld. We zien dat men in sommige gevallen van 400 A met succes onderbrak. Van de 107 op deze manier verrichte onderbrekingen waren er 9 minder dan 90% succesvol en 21 tussen de 90 tot 99% succesvol.

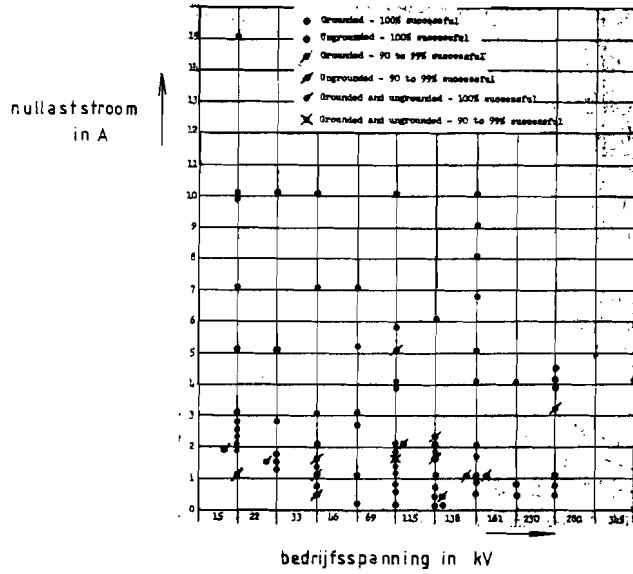
Vraag C. Gebruikt u scheiders om onbelaste lijnen mee af te schakelen.

Uit de antwoorden op deze vraag bleek dat 38% meer dan driemaal per jaar zo'n onderbreking uitvoerde en dat 27% dit een tot driemaal per jaar deed. 27% gaf geen antwoord en 15% gaf aan dat men voor het onderbreken van onbelaste lijnen de scheider niet gebruikte.

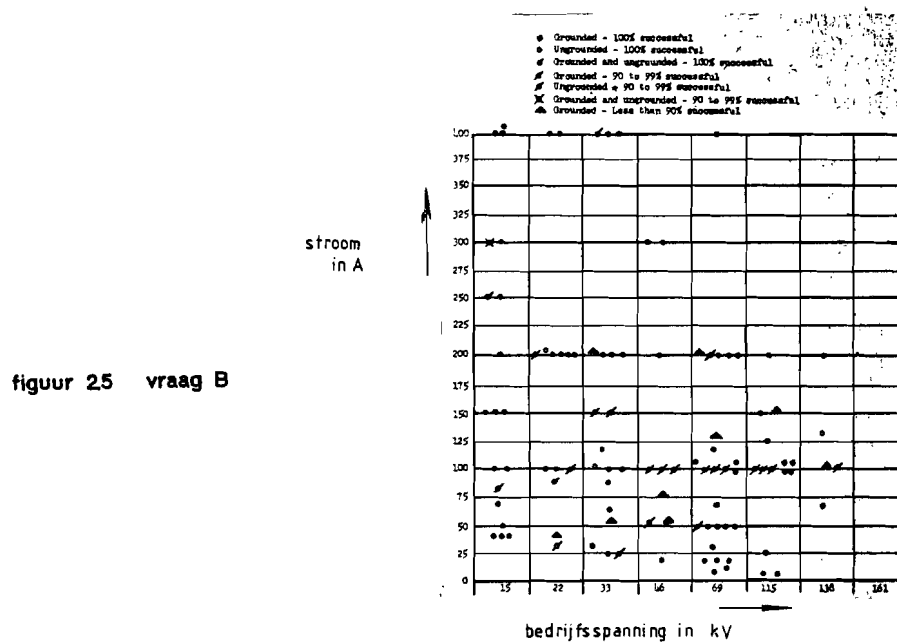
In figuur 26 zijn de resultaten vermeld. We zien dat er van de 70 onderbrekingen er 58 100% succesvol waren en dat er 12 90 tot 99% succesvol waren.

Vraag D. Gebruikt u scheiders om onbelaste kabels af te schakelen?

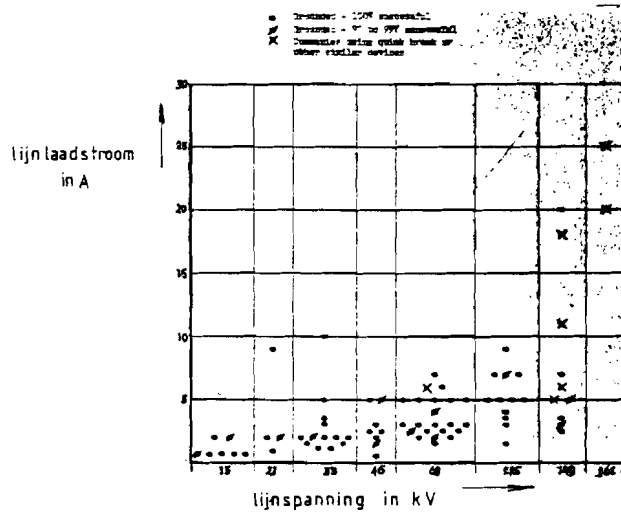
Uit de antwoorden bleek dat men doorgaans hiervoor geen scheider gebruikte. We zien in figuur 27 dat in die gevallen waarin men wel een scheider gebruikte de onderbrekingen succesvol waren.



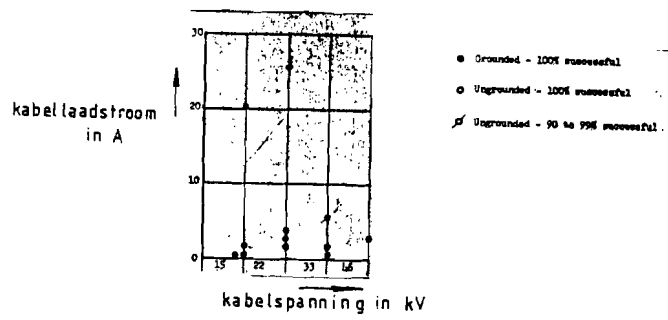
figuur 24 vraag A



figuur 25 vraag B



figuur 26 vraag C



figuur 27 vraag D

27 Isolator as a substitute for a 110 kV transformer breaker. (1966) (7)

In het artikel zijn de resultaten vermeld van beproevingen, die men gedurende een periode van twee jaar, aan 110 kV scheiders heeft verricht.

De vermogensschakelaar bij een transformator beschermt alleen de transformator en het daarbij behorende railsysteem. Men kan deze vervangen door een scheider zonder dat daardoor de betrouwbaarheid van het totale systeem in gevaar komt. Belangrijk is dan wel dat de vermogensschakelaar aan het begin van de voedingslijn snel genoeg is om een storing in de transformator af te schakelen. De scheider die de vermogensschakelaar vervangt moet wel in staat zijn om de nullaststroom van de transformator te kunnen onderbreken.

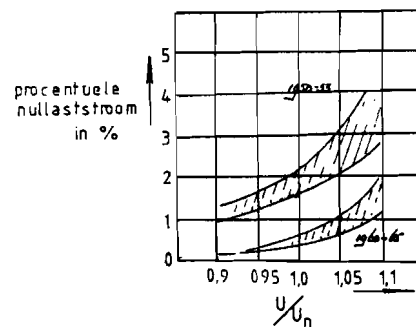
De nullaststroom van een transformator kan oplopen tot 2,2% van de nominale stroom (1966). Hoe het verloop van de nullaststroom t.o.v. de primair aangelegde spanning is wordt in figuur 28 aangegeven.

Bij een transformator met een nominaal vermogen van 20 MVA en een primaire spanning van 110 kV wordt bij een procentuele nullaststroom van 2% de werkelijke nullaststroom 2 A.

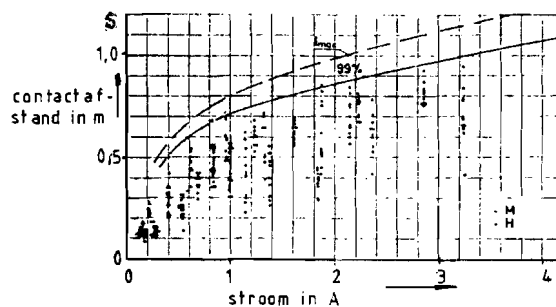
Bij moderne transformatoren is de procentuele nullaststroom aanzienlijk minder (0,5%).

Men onderbrak onbelaste transformatoren welke een nominaal vermogen van 10 tot 20 MVA hadden. De spanning waarbij deze onderbrekingen werden uitgevoerd varieerde tussen de 100 en 120 kV.

De resultaten van deze beproevingen zijn in de grafieken 26 en 27 verwerkt. Alle onderbrekingen slaagden.



figuur 28 procentuele nullaststroom



S is de contactafstand op het moment dat de boog definitief dooft in meters.
M motoraandrijving 80°/s
H handbediening 100-200°/s

Grafiek 26 De contactafstand als functie van de stroom

Men kan aan de hand van grafiek 26 formules afleiden voor de contactafstand.

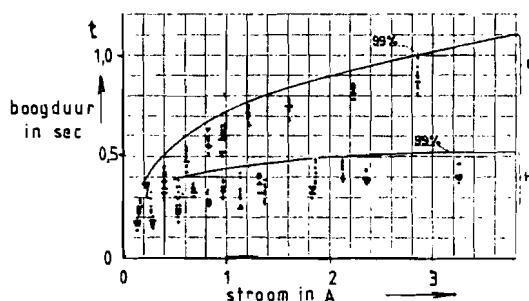
$$s_{99} \approx 0,70 \sqrt[3]{I} \quad 25$$

s_{99} is de contactafstand in m, met een waarschijnlijkheid van 99% en I de te onderbreken stroom in A

$$s_{100} \approx 0,80 \sqrt[3]{I} \quad 26$$

s_{100} is de contactafstand, in m met een waarschijnlijkheid van 100% en I de te onderbreken stroom in A

Bij een gegeven configuratie kan men hiermee de maximale stroom berekenen die kan worden onderbroken.



t is de boogduur in sec.
M motorbediening 80°/s
H handbediening 100-200°/s

Grafiek 27 De boogduur als functie van de stroom

Men heeft aan de hand van grafiek 27 een formule afgeleid voor de boogduur.

$$t_{99} \approx 0,70 \sqrt[3]{I} \quad 27$$

t_{99} is de boogduur in s, met een waarschijnlijkheid van 99% en I de te onderbreken stroom in A

Deze formule geldt voor de scheider met motoraandrijving. Bij de scheider met handbediening (100° tot 200° per sec) bleef de boogduur onder de 0,5 s ongeacht de te onderbreken stroom.

Extra trage handbediening leverde extreem lange bogen op. De resultaten hiervan zijn niet in het artikel vermeld. Bij sterke wind constateerde men een kortere boogduur en booglengte t.g.v. de dan optredende sterke koeling.

Bogen tot 1 A gaven een nagenoeg recht boogpad te zien, hogere stromen veroorzaakten een gekromd boogpad. Bij het inschakelen waren de bogen veel korter (10 tot 13 cm) dan bij het uitschakelen.

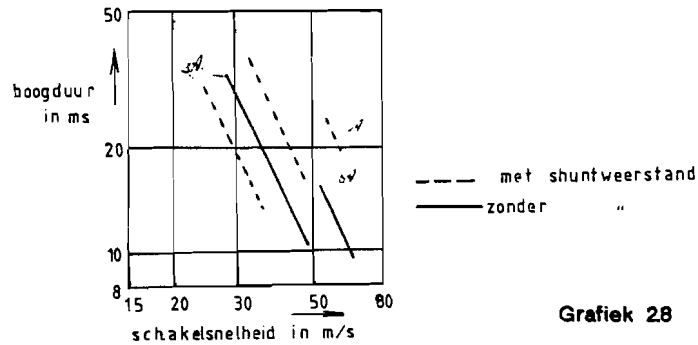
De spreiding in de meetresultaten wordt door de schrijvers toegeschreven aan fouten

in de meetmethode, variaties in de boogeienschappen en de weersomstandigheden. In het laatste gedeelte van het artikel gaat men in op de schakelmethode en de beveiligingsmiddelen, die men zou moeten toepassen indien men de vermogensschakelaar bij een transformator door een scheider zou willen vervangen.

28 Breaking capacity of isolators as a function of their opening speed. (1967) (8)

Men beschrijft hierin de geschiktheid van scheiders om "kleine" stromen te onderbreken als functie van de schakelsnelheid. Bij de beproevingen is gebruik gemaakt van 110 kV scheiders waarbij men de schakelsnelheid varieerde tussen de 15 en 75 m/s. De stromen die men afschakelde varieerden daarbij tussen de 3 en 45 A.

De beproevingen werden uitgevoerd bij verschillende spanningen waarbij men bij een constante stroom de schakelsnelheid van de scheider varieerde. Op deze manier werd de boogduur bepaald bij verschillende schakelsnelheden. De resultaten van deze beproevingen bij een spanning van 110 kV zijn in grafiek 28 opgenomen.



Grafiek 28

Er werden ook beproevingen uitgevoerd waarbij men een vaste contactafstand nam en men vaststelde of de boog na opening wel of niet gedoofd was. De variabelen hierbij waren de te onderbreken stroom en de schakelsnelheid. De resultaten hiervan zijn in grafiek 29 uitgezet.

Er is aan de hand van grafiek 29 een formule voor de onderbrekingscapaciteit afgeleid.

$$I = 0,7 \cdot S^{0,5} \cdot v^{1,5} \cdot U^{-0,8}$$

28

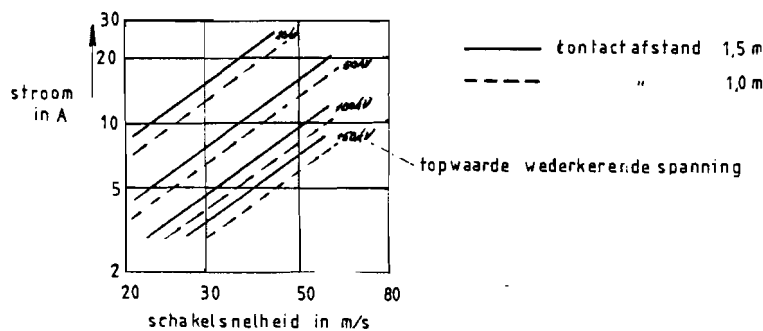
I is de stroom die nog juist kan worden onderbroken in A.

S is de maximale contactafstand in m.

v is de schakelsnelheid in m/s.

U is de wederkerende spanning in kV

(R.R.R.V. is 100 a 200 V/us)



Grafiek 29 De stroom als functie van de schakelsnelheid

Er werden ook beproevingen uitgevoerd aan twee in de praktijk voorkomende snelle scheiders. De eerste was een 20 kV scheider die een schakelsnelheid van 25 m/s had. De onderbrekingscapaciteit was 14 A ($\cos \phi = 0,7$). De tweede was een 110 kV handbediende scheider waarvan de hoeksnelheid 4 rad/s was. De aanvangsschakelsnelheid werd door een veersysteem het vijftenvoudige van de gemiddelde schakelsnelheid.

Conclusies die uit de beproevingen werden getrokken.

1. Tengevolge van de lange boogduur kan de onderbrekingscapaciteit van een gewone scheider niet met grote zekerheid worden bepaald. Dit komt omdat men rekening moet houden met weersomstandigheden zoals windsnelheid en windrichting.
2. De beproevingen toonden aan dat de relatie tussen de onderbrekingscapaciteit en de schakelsnelheid de vorm heeft van een machtsfunctie met een gemiddelde exponent van 1,5 (verg. 28).
3. Bij gebruik van scheiders met een hoge schakelsnelheid wordt de boogduur beperkt en de invloed van de wind verkleind.

4. De onderbrekingscapaciteit is voor een snelle scheiderv nauwkeuriger te bepalen dan voor een normale scheiderv.

29 Alternating current disconnectors (isolators) and earthing switches. (1975) (9)

Deze publicatie van de "International Electrotechnical Commission" I.E.C. heeft betrekking op wisselstroom scheidervs en aardingsschakelaars ontworpen voor binnen en buiten installaties voor spanningen vanaf 1000 V bij een bedrijfsfrequentie tot 60 Hz. Deze voorschriften hebben betrekking op houdspanningen, toegestane nominale en kortsluitstromen etc. Over het onderbreken van "kleine" stromen wordt niets voorgeschreven behalve een korte passage in de definitie van een scheiderv.

De definitie van een scheiderv is:

A mechanical switching device which provides, in the open position an isolating distance in accordance with specified requirements.

A disconnector is capable of opening and closing a circuit with either negligible current is broken or made, or when no significant change in the voltage across the terminals of each of the poles of the disconnector occurs. It is also capable of carrying currents under normal circuit conditions and carrying, for a specified time, current under abnormal conditions such as those of short-circuit.

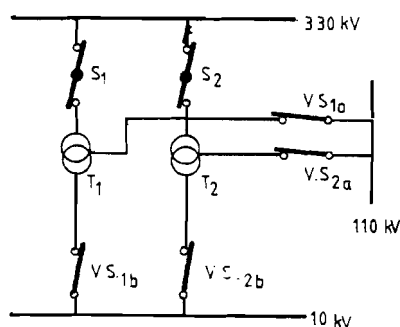
note-

"Negligible current" implies currents such as capacitance currents of bushings, busbars, connections, very short lines of cables, currents of permanently connected grading impedances of circuit-breakers and current and voltage transformers and dividers. For rated voltages of 420 kV and below, a current not exceeding 0,5 A is deemed to be negligible for the purpose of the definition.

Uit de voorafgaande definitie blijkt dat scheidervs slechts stromen tot 0,5 A moeten kunnen onderbreken. Beproevingen hiertoe worden niet voorgeschreven.

2.10 The disconnection and connection of 330 kV autotransformers with switches. (1974)
(10).

In dit russische artikel stelt men dat t.g.v. de toenemende vraag naar elektriciteit men steeds meer en meer gebruik maakt van onderstations met een of meer parallel geschakelde transformatoren die aan hoogspannings-zijde in plaats van met een vermogensschakelaar met een scheider met de lijn zijn verbonden (figuur 29).



Het achterwege laten van de vermogensschakelaar is vooral op economische overwegingen gebaseerd.

De beperkende factoren bij het in- en uitschakelen van parallel staande transformatoren zijn de te onderbreken stroom en de wederkerende spanning.

De nullaststroom voor T_1 was 3,4 A en voor T_2 1,0 A.

figuur 29 Schakelschema

Men voerde de in- en uitschakelingen op twee manieren uit:

- In- of uitschakeling in alle drie de fasen gelijktijdig.
- In- of uitschakeling van iedere fase afzonderlijk.

Bij de tweede manier constateerde men bij het onderbreken van de eerste fase geen boog en geen overspanningen. De stromen in de andere fasen werden 1,5 tot 2,0 maal de oorspronkelijke waarde.

In tabel 21 zijn de magnetiseringsstromen aan de 330 kV zijde van T_1 vermeld.

In zijde fasen	I_R in A	I_S in A	I_T in A	I_o in A
R,S,T	4,0	2,2	4,0	0,96
S,T	-	4,4	6,4	10,4
R,T	4,9	-	5,0	10,4
R,S	6,8	4,4	-	10,4
R	4,0	-	-	4,0
S	-	1,4	-	1,4
T	-	-	4,0	4,0

Tabel 21

Bij het onderbreken van de tweede en derde fase ontstonden er intensieve lichtbogen welke gepaard gingen met herontstekingen. Er ontstonden hierbij pulserende stromen die wel tot 50 maal de oorspronkelijke nullaststroom oplepen. De schakelcontacten

brandden niet in omdat de eindpunten van de boog zich naar de afbrandcontacten verplaatsten. De booglengte varieerde van 1,2 tot 1,5 m. Er ontstonden nog langere booglengten (2,0 tot 2,5 m) wanneer men vertraagde handbediening toepaste inplaats van motorbediening.

Bij het inschakelen van een onbelaste transformator was de booglengte 30 tot 40% korter als bij het inschakelen. Bij gelijktijdig uitschakelen was de booglengte 0,6 tot 1,0 m.

De maximale overspanningen die optraden zijn in tabel 2.2 vermeld.

Uitschakelen	inschakelen	
eerste fase 1,0	eerste fase 1,57	
tweede fase 1,67	tweede fase 1,73	
derde fase 1,4	derde fase 1,0	
gelijktijdig 1,4	gelijktijdig 1,4	Tabel 2.2

Bij het in- en uitschakelen wanneer de transformator belast is nemen boogduur en booglengte toe met het vermogen dat wordt geschakeld.

De formule voor het vermogen is:

$$S_d = I_f * U_t \quad 29$$

S_d het vermogen in VA
 I_f de fasestroom in A
 U_t de spanning over de scheider in V

Tot een vermogen van 2500 kVA per fase veroorzaakt de boog geen schade aan de scheider. Wanneer S_d 1000 kVA per fase is dan ontstaat er slechts een kleine boog en treden er geen overspanningen op.

Conclusie van de schrijvers aan de hand van de beproevingen is.

Men kan met de beproefde scheider nullaststromen (3,4 A) van transformatoren tot 25 MVA bij een spanning van 330 kV zonder problemen onderbreken. Het is daarbij wel wenselijk een schakelprocedure te volgen waarbij men de fasen afzonderlijk in- of uitschakelt.

2.11 Samenvatting van het literatuuronderzoek

Het onderbreken van "kleine" stromen m.b.v. scheiders komt in de praktijk voor. De mogelijke schakelsituaties waarin men scheiders zou kunnen gebruiken worden in 1.3 behandeld.

Er bestaan echter weining recente artikelen over dit onderwerp. Uit de artikelen die wel gevonden zijn, zijn de belangrijkste conclusies samengevat.

- Het is moeilijk om een grens voor de onderbrekingscapaciteit te bepalen. De oorzaken die hiervoor genoemd worden zijn:

- weersomstandigheden (windsterkte, windrichting etc.)
- de lange boogduur
- de schakelsnelheid

- Inschakelen heeft doorgaans een kortere boogduur en booglengte tot gevolg (in artikel 10 wordt een 30 tot 40% kortere boogduur en booglengte gevonden) dan uitschakelen.

- Als moeilijkste schakelsituatie wordt het uitschakelen van onbelaste lijnen gezien. Men heeft een toename van 50% van de boogduur geconstateerd t.o.v. de boogduur bij het afschakelen van onbelaste transformatoren.

- Bij het inschakelen zijn de overspanningen groter dan bij het uitschakelen. De schakeloverspanningen zijn echter ook afhankelijk van de schakelsituatie en plaats waar men schakelt.

In tabel 2.3 zijn de maximale gemeten overspanningen vermeld.

artikel 3	inschakelen 1,7 p.u.	uitschakelen 2,0 p.u.	
artikel 4	inschakelen 1,3 p.u.	uitschakelen 1,9 p.u.	Tabel 2.3
artikel 10*	inschakelen 1,4 p.u.	uitschakelen 1,4 p.u.	
artikel 10	inschakelen 1,7 p.u.	uitschakelen 1,7 p.u.	

10* gelijktijdig inschakelen van de fasen

10 na elkaar inschakelen van de fasen

- Er worden formules gegeven voor de booghoogte, booglengte en de boogduur. Het nadeel van deze formules is dat ze gelden bij een bepaalde schakelsnelheid welke doorgaans niet vermeld is.

In artikel 8 wordt een formule gegeven waarin wel de schakelsnelheid is opgenomen. Deze luidt:

$$I = 0,7 \xi^{0,5} v^{1,5} U^{-0,8}$$

I is de stroom die nog juist kan worden onderbroken in A.

ξ is de maximale contactafstand in m.

v is de schakelsnelheid in m/s.

U is de wederkerendespanning in kV

(R.R.R.V. is 100 a 200 V/us)

- Onderbreking van nullaststromen van transformatoren.

Tabel 24

artikel	2	5	6	7	10
transformator	100 MVA	400 MVA	—	20 MVA	125 MVA
spanning	190-216 kV	345 kV	138 kV	110 kV	330 kV
nullaststroom	3,7-12,5 A	13,2 A	6 A	3 A	3,4 A
schakelsnelheid	0,55 m/s	—	—	80°/s	—

- Onderbreking van onbelaste lijnen.

artikel	1	6
lijnsparing	132 kV	138 kV
stroom	7A	6A
schakelsnelheid	—	—

Tabel 25

- Onderbreking van kleine belastingsstromen

artikel	8	8
spanning	110 kV	20 kV
stroom	3,45 A	14 A (cos φ = 0,7)
schakelsnelheid	15,75 m/s	25 m/s

Tabel 26

3. Het onderbreken van " kleine" stromen bij een hoge spanning m.b.v.een scheider.

3.1 Inleiding.

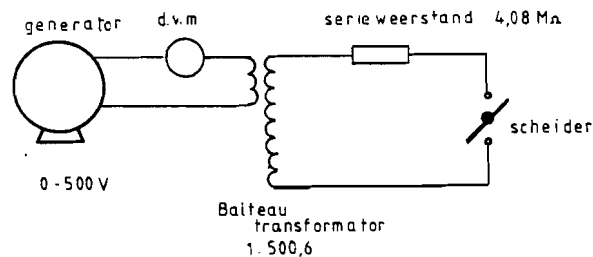
Er is weinig bekend over het blussen van een lange wisselstroomboog in open lucht. De vraag was in eerste instantie welke stroom een normale scheider zonder extra voorzienigen kan onderbreken en of snellere contact-opening gevolgen heeft voor de booglengte en de booghoogte.

Om op deze vragen een antwoord te geven zijn er eerst enige inleidende metingen verricht waarna er een definitief beproevingscircuit voor het onderbreken van stromen van 0-5 A is opgebouwd.

3.2 Bepaling van de houdspanning als functie van de contactafstand.

Door het meten van de houdspanning als functie van de contactafstand kan de minimale boogduur worden berekend.

Voor de bepaling hiervan is het onderstaande circuit opgebouwd (figuur 3.1).



figuur 3.1 Beproevingscircuit voor de houdspanning

De belasting bestond uit 34 weerstanden van 120 kΩ, welke in serie geschakeld waren. De stroom is dan bij 110 kV.

$$110.000 / (34 \cdot 120.000) = 0,027A$$

De meetmethode is als volgt:

De scheider wordt geopend, waarna de spanning aan de primaire zijde wordt ingesteld. Bij deze ingestelde spanning wordt bepaald bij welke contactafstand er doorslag optreedt. Vervolgens verhoogt men de spanning aan primaire zijde en bepaald opnieuw de bij deze spanning behorende contactafstand waarbij doorslag optreedt. De resultaten zijn verwerkt in grafiek 3.1.

We zien dat er een vrijwel lineair verband bestaat tussen de contactafstand en de houdspanning.

$$U = c \cdot S \quad (3.1)$$

U is de houdspanning in kV
c is een constante (4,4 kV/cm)
S is de contactafstand in cm

We zien ook dat de doorslag-afstand bij 110 kV ongeveer 24 cm is. Bij bediening door middel van een motoraandrijving betekent dit, dat de minimale boogduur 1,2 sec bedraagt (zie grafiek 3.3).

Opmerking: De meting is in het laboratorium verricht.

3.3 Beproevingscircuit

Het schema van het beproevingscircuit voor het onderbreken van kleine stromen is in figuur 3.2 gegeven. De diverse onderdelen van dit circuit worden in de onderstaande paragrafen behandeld.

10 kV installatie.

De 10 kV installatie is uitgevoerd met zekeringen van 100 A. Als er een scheiderstroom loopt van 5 A dan worden de stromen welke in de 10 kV installatie lopen als volgt:

R-fase 55 A
S-fase 55 A
T-fase 0 A

Vermogensschakelaar.

De vermogensschakelaar wordt bij iedere beproeving in- en uitgeschakeld. Het in- en uitschakeltijdstip is vrij te kiezen.

Transformator I.E.O..

Nominale primaire spanning 10 kV

Nominale secundaire spanning 380/220 V

Nominaal schijnbaar vermogen 800 kVA

relatieve kortsluitspanning 3,56%.

Het maximale schijnbare vermogen is bij een scheiderstroom van 5 A.

$$220 \cdot 2500 = 550 \text{ kVA}$$

Totale belastingstroom secundair is dan

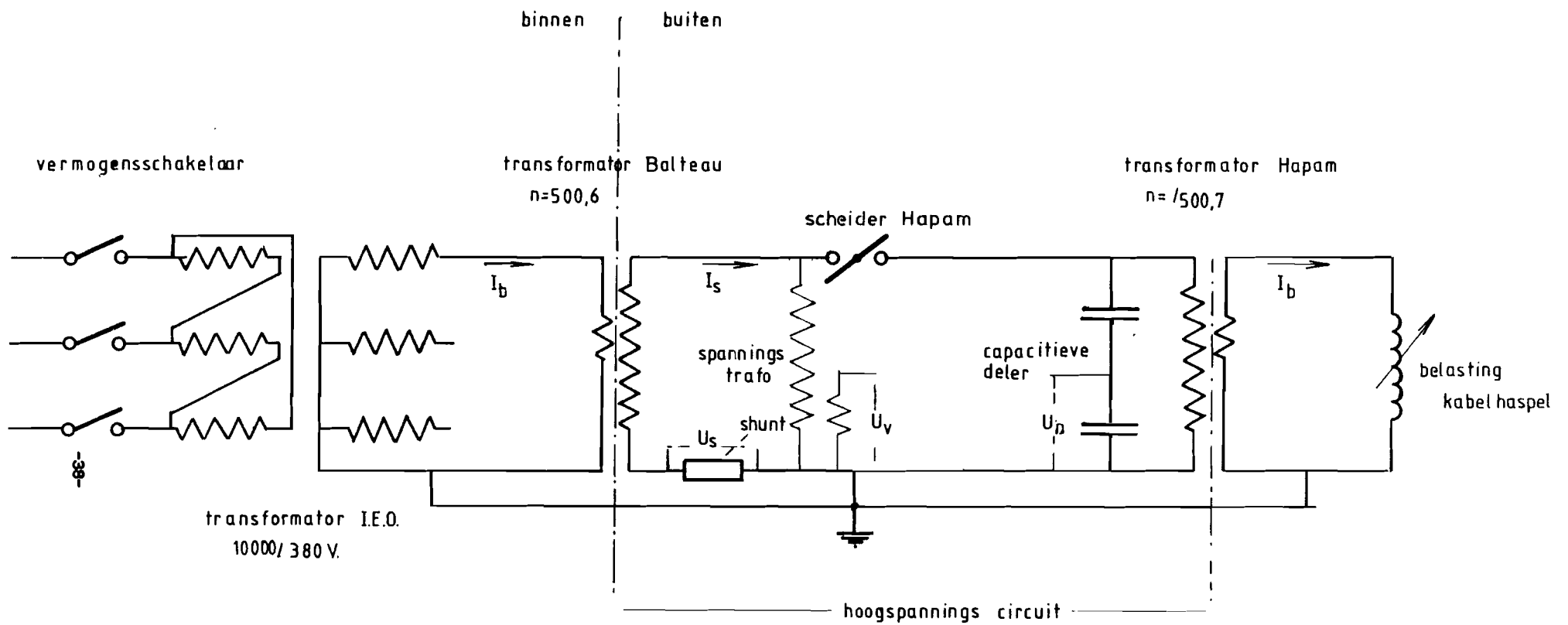
$$2500 \text{ A.}$$

Nominale belastingstroom van de transformator is

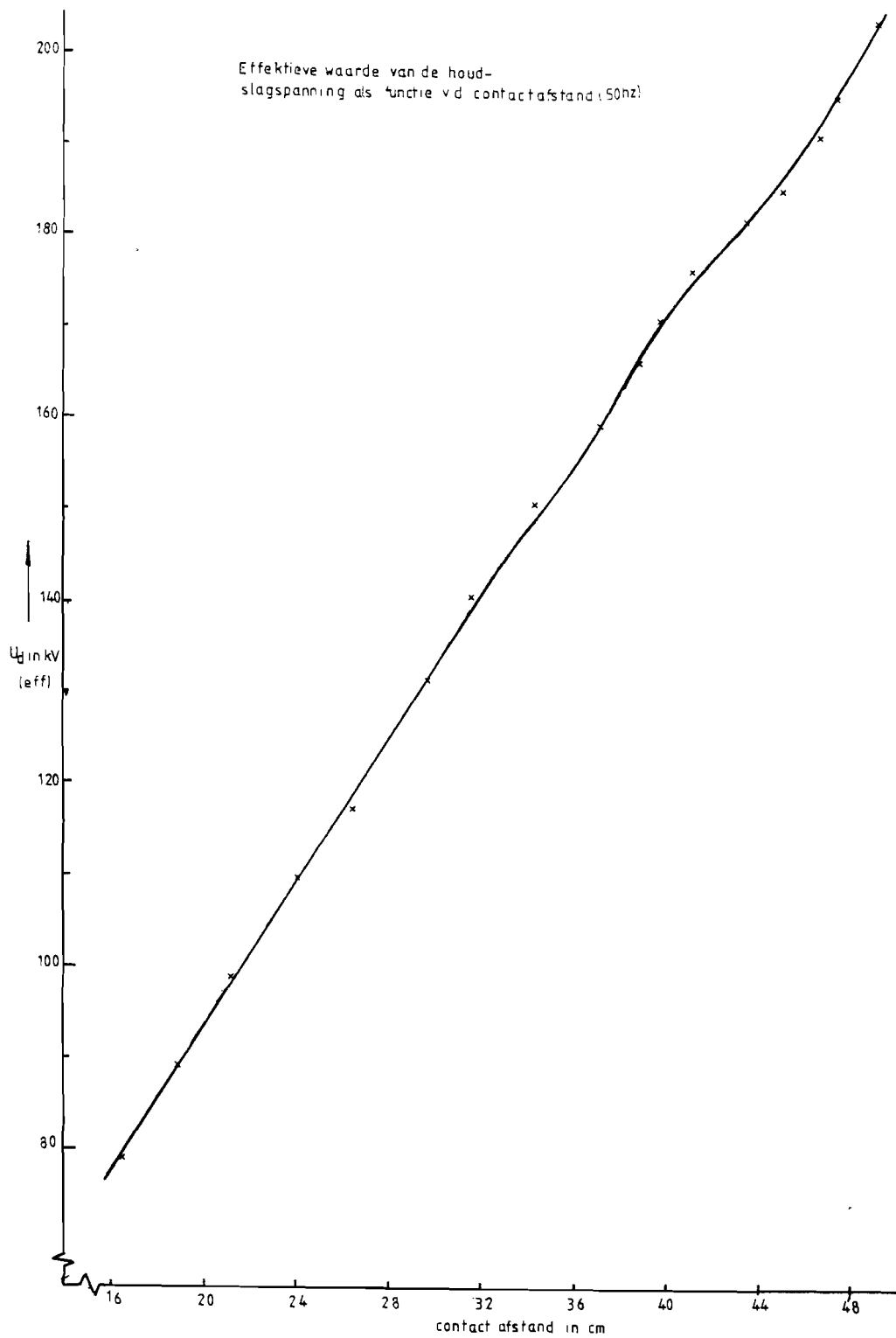
$$800.000 / 220 \cdot 3 = 1212 \text{ A.}$$

Overbelastingsfactor is dan

$$2500 / 1212 = 2,06$$



figuur 3.2 Beproevingscircuit voor het onderbreken van kleine inductieve stromen (0-5 A) bij een spanning van 110 kV



Grafiek 3.1 Houdspanning als functie van de contactafstand
Bij 110 kV is de contactafstand 24 cm

Transformator Balteau.

Hoogspanningstranformator type TEG 250
Nominale primaire spanning 500 V
Nominale primaire stroom 400 A
Nominale secundaire spanning 250 kV
Nominale secundaire stroom 0,8 A
overzetverhouding 500,6
relatieve kortsluitspanning 2,16 %

Scheider HAPAM.

123 kV

Transformator HAPAM.

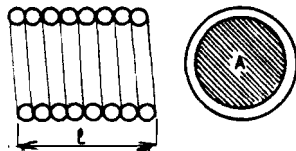
Hoogspanningstranformator (ontwerp Kolev)
Nominale primaire spanning 250 kV
Nominale primaire stroom 0.6 A
Nominale secundaire spanning 500 V
Nominale secundaire stroom 300 A
overzetverhouding 1/500,7
relatieve kortsluitspanning 0,7 %

Belasting.

De regelbare belasting wordt gevormd door een kabelhaspel waarop een Wmvk kabel 4*35 mm² gewikkeld is. De impedantie van de belasting wordt bepaald door het aantal windingen op deze haspel en de manier waarop de aders van de kabel met elkaar worden verbonden.

Voor de berekening van de impedantie van de kabelhaspel gaan we uit van de algemene formule:

$$L = (\mu_0 n^2 A) / \ell \quad (3.2)$$

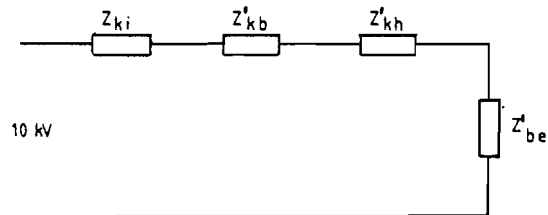


figuur 3.3 Kabelhaspel

L is de zelfinductie in henry
 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ de permeabiliteit van
lucht in N/A²
n is het aantal windingen
A is het oppervlak van een winding
in m²
 ℓ is de lengte van de spoel in m

De berekening van de belasting die nodig is om een bepaalde stroom door de scheider te laten lopen is als volgt:

We gaan uit van een sterk 10 kV net. We kunnen dan het vervangingschema zoals in figuur 3.4 getekend opstellen.



figuur 3.4 Vervangingschema

Z_{ki} is de kortsluitimpedantie van de I.E.O. transformator.

$$Z_{ki} = e (U_{nom}/I_{nom}) = 0,0356 (10.000/46) = 7,71 \Omega$$

(e = de relatieve kortsluitspanning)

Z_{kb} is de kortsluitimpedantie van de Balteau transformator.

$$Z_{kb} = e (U_{nom}/I_{nom}) = 0,0216 (500/400) = 0,027 \Omega$$

$$Z'_{kb} = Z_{kb} (10.000/220)^2 = 55,8 \Omega$$

Z_{kh} is de kortsluitimpedantie van de Hapam transformator.

$$Z_{kh} = e (U_{nom}/I_{nom}) = 0,007 (250.000/0,6) = 2916,7 \Omega$$

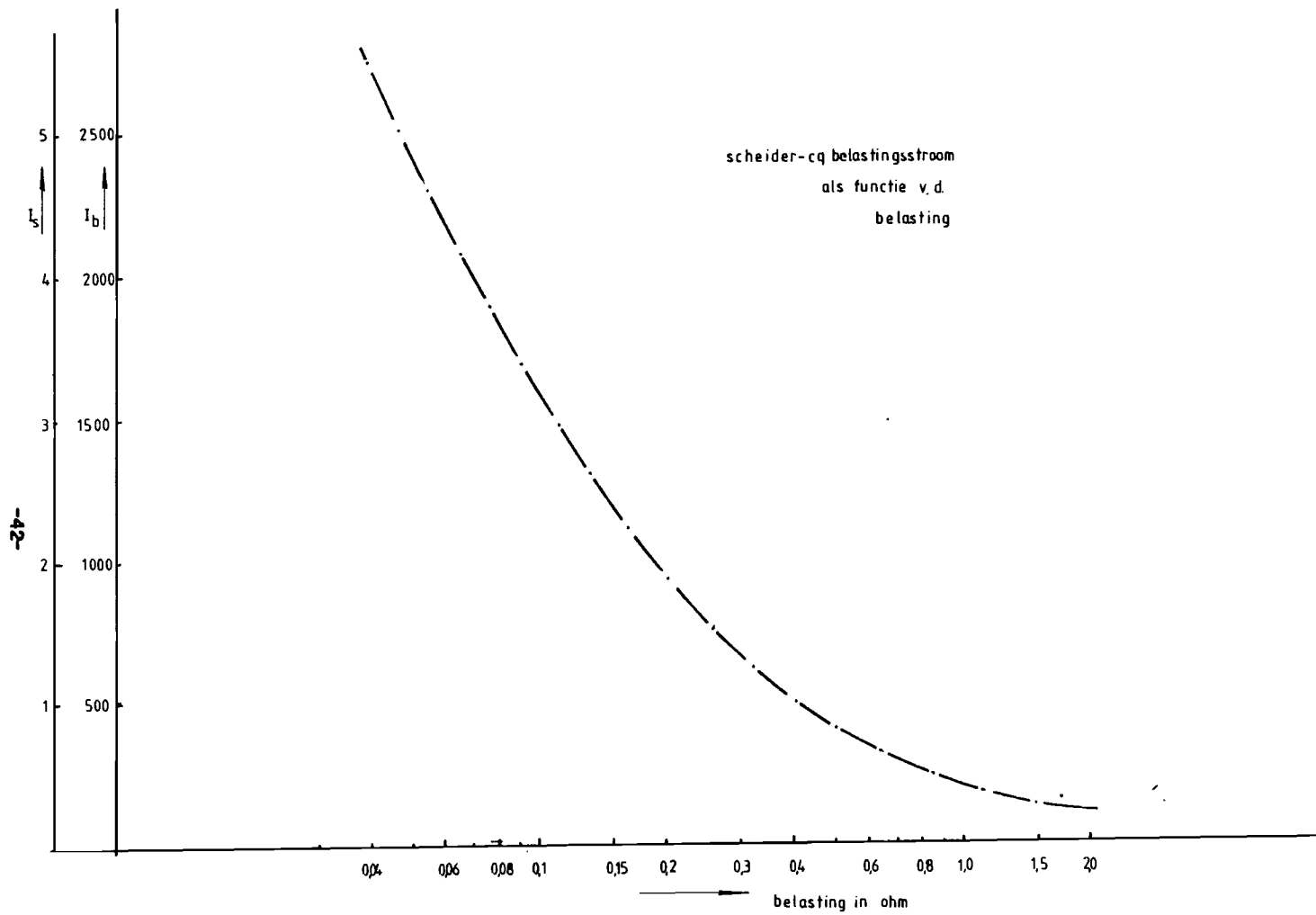
$$Z'_{kh} = Z_{kh} (10.000/220)^2 (1/500,6)^4 = 2916,7 = 24,05 \Omega$$

Z_{be} is de impedantie van de belasting.

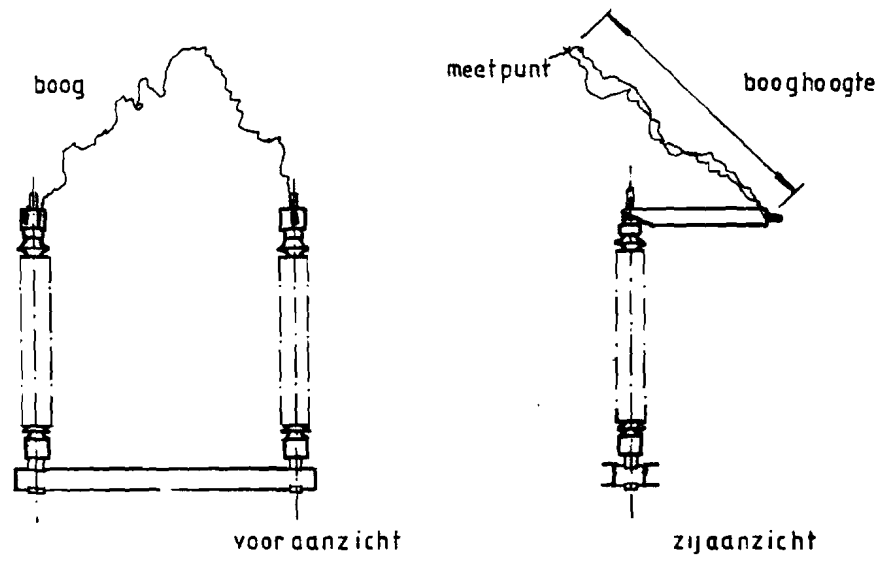
$$Z_{be} = w \cdot L_{be}$$

$$Z'_{be} = Z_{be} (10.000/220)^2 (1/500,6)^2 (500,7)^2 = 2067 \cdot Z_{be} \Omega$$

Aan de hand van dit rekenmodel is grafiek 3.2 gemaakt.



Grafiek 3.2 De scheiderstroom I_s als functie van de impedantie van de belasting
De belastingsstroom I_b als functie van de impedantie van de belasting



figuur 3.5 Scheideropstelling met boogontlading

3.4 Meetmethode.

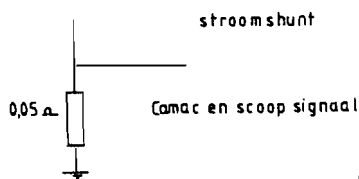
Om visueel inzicht te verkrijgen over boogontladingen in open lucht is er van iedere beproeving een video-opname gemaakt. In figuur 3.5 is er een vooraanzicht en zijaanzicht van een scheider en een boog getekend.

De reden waarom men voor video-opnamen heeft gekozen is dat de verschijnselen lang duren (0,5 tot 5 sec). Een verder voordeel is dat men op eenvoudige wijze een opname beeld voor beeld kan bekijken. De opname capaciteit van de video-recorder was 40 beelden per seconde.

Om een direct verband te kunnen leggen tussen datgene wat men ziet en het verloop van boogspanning en boogstroom heeft men deze m.b.v. een mixer in het beeld van de boogontlading geprojecteerd. Ook heeft men m.b.v. van deze mixer een teller in beeld gebracht zodat men op eenvoudige wijze de boogduur kan bepalen.

Om te bepalen wat de invloed van de openingssnelheid op het booghoogte is, zijn er metingen verricht waarbij men de opnamen van opzij heeft genomen in plaats van vanvoren.

Het meten van boogstroom en boogspanning.

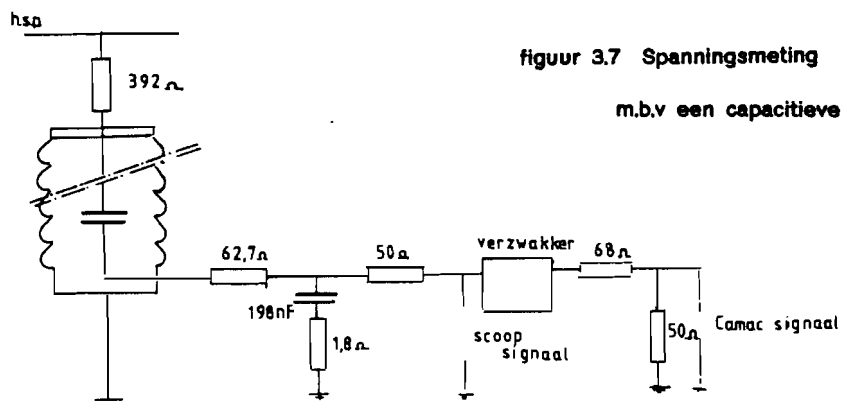


De boogstroom wordt bepaald door gebruik te maken van een shunt (zie beproevingscircuit) welke aangesloten is aan de geaarde zijde van de Balteau transformator.

figuur 3.6 Stroommeting

Voor het meten van de boogspanning heeft men gebruik gemaakt van twee meetsystemen.

Van het ene meetsysteem de (capacitieve deler) is in figuur 3.7 het aansluitschema getekend.



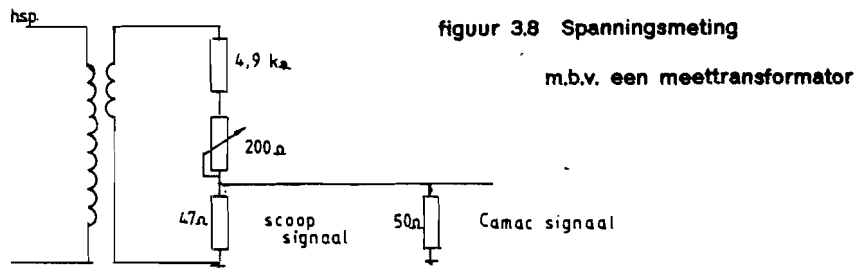
figuur 3.7 Spanningsmeting

m.b.v een capacitieve deler

Voor de waarden van de diverse weerstanden verwijs ik naar het verslag van J.A. Bartels (EH.75.A.33) die door gebruik te maken van een analoge computer tot deze configuratie is gekomen.

Het schema van de verzwakker die het signaal van ongeveer 30 V terugbrengt tot 0,5 V vindt men in bijlage 1. Er is ook frequentie-karakteristiek opgenomen van de capacitieve deler met verzwakker. Deze frequentie-karakteristiek vindt men in bijlage 2.

Het andere meetsysteem is een spanningsmeettransformator. In figuur 3.8 is het meetschema getekend.



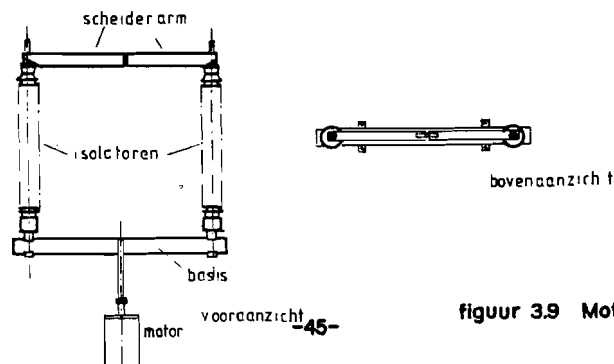
Om aan de differentiaal-ingang van de oscilloscoop de meetspanningen bij gesloten scheider gelijk te maken is er een potentiometer opgenomen.

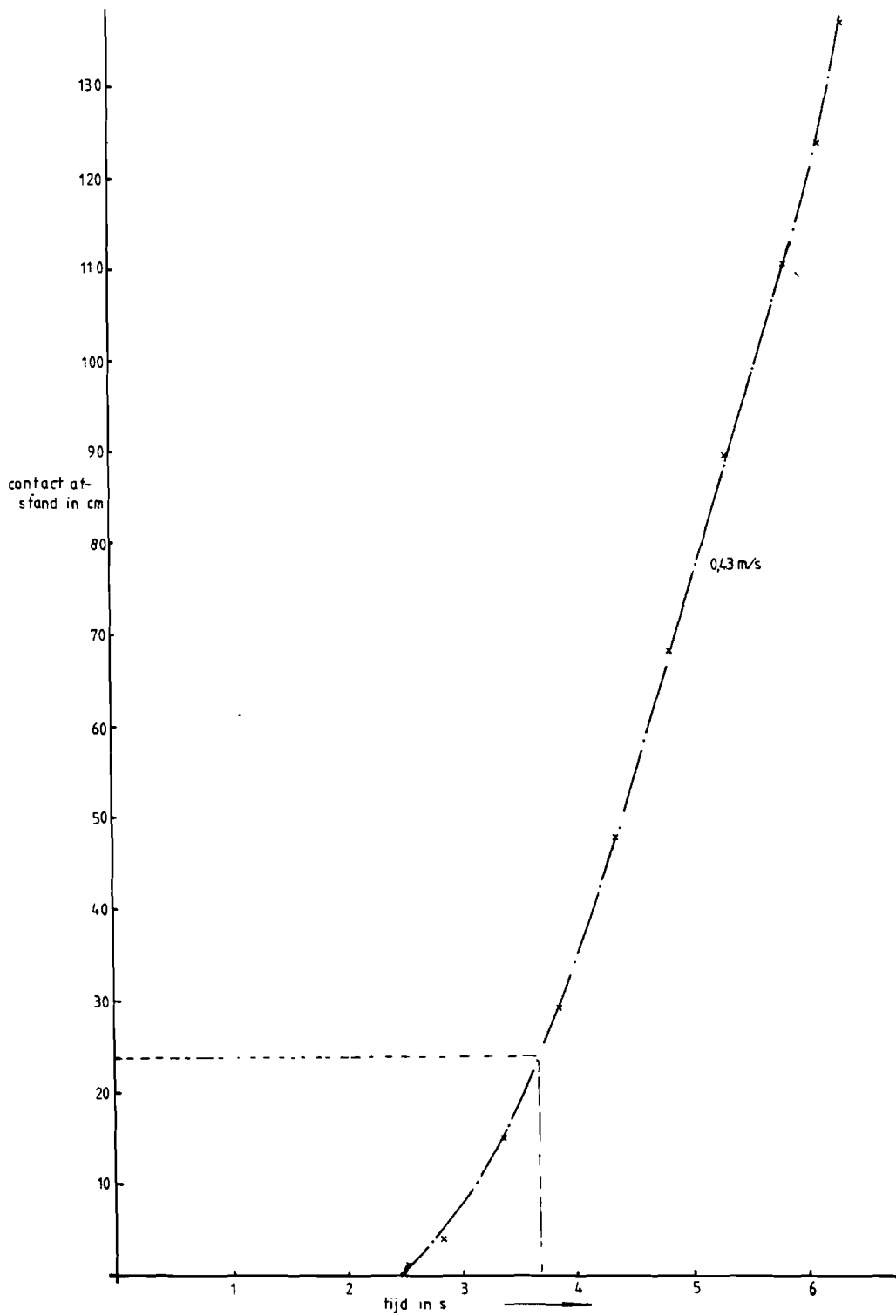
Door het van elkaar aftrekken van de beide meetsignalen krijgt men de boogspanning. In de oscilloscoop gebeurt dit aftrekken door gebruik te maken van een differentiaal verzwakker. In het Camac systeem wordt dit aftrekken door middel van een rekenprogramma gerealiseerd nadat de signalen opgeslagen zijn op een diskette (magnetische opslag).

3.5 Metingen.

3.5.1 Met motorbediening. Hierbij zijn bij diverse stromen onderbrekingen uitgevoerd. De gemiddelde openingssnelheid is 0,4 m/s (zie bijlage 3).

In figuur 3.9 is de scheider-configuratie met motorbediening in gesloten toestand getekend.

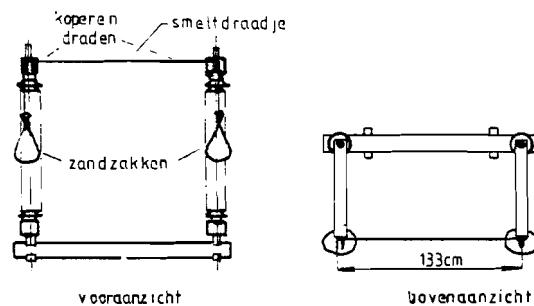




Grafiek 3.3 De korste afstand tussen de scheiderarmen als functie van de tijd
Op $t=0$ wordt het commando om te openen gegeven.

Bij iedere ingestelde stroom werden zeven onderbrekingen uitgevoerd welke alle op video werden vastgelegd. Tevens werd van enkele onderbrekingen stroom en spanning opgenomen in het Camac systeem.

3.5.2 Met een koperen draad waarin een smeltdraadje is opgenomen gespannen tussen de contacten (zie figuur 3.10)



figuur 3.10 Met zandzakken

Door de stroom zal het draadje smelten waardoor de zandzakken, ieder met een gewicht van 500 gram, naar beneden vallen.

Voor de vallende zakken geldt:

$$0,5 \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h \quad (3.3)$$

$$h = 0,5 \cdot g \cdot t^2 \quad (3.4)$$

hierin is:

m de massa in kg

v de snelheid in m/s

g de gravitatieversnelling $9,8 \text{ m/s}^2$

h de afgelegde weg in m

t is de tijd in s

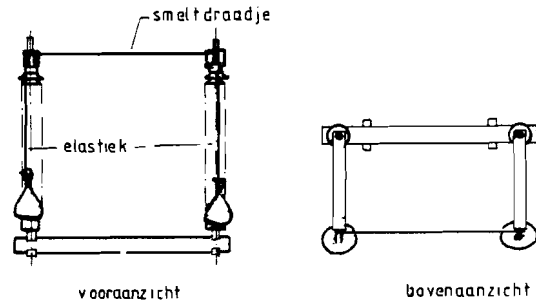
M.b.v. deze formules kan men een gemiddelde openingsnelheid bepalen.

De gemiddelde snelheid bij een contactafstand van 100 cm is 3,12 m/s

De gemiddelde snelheid bij een contactafstand van 133 cm is 3,61 m/s

De stromen die werden onderbroken waren groter dan 0,8 A omdat bij lagere stromen het smeltdraadje niet onderbrak. Ook hierbij is bij iedere ingestelde stroom zeven maal onderbroken en werden er van alle onderbrekingen video-opnamen gemaakt. Tevens werd van een groot aantal onderbrekingen stroom en spanning opgenomen.

3.5.3 Met een koperen draad waarin een smeltdraadje is opgenomen. In plaats van rechtstreeks aan de koperen draad zijn de zandzakken via elastieken met de koperen draad verbonden (zie figuur 3.11)

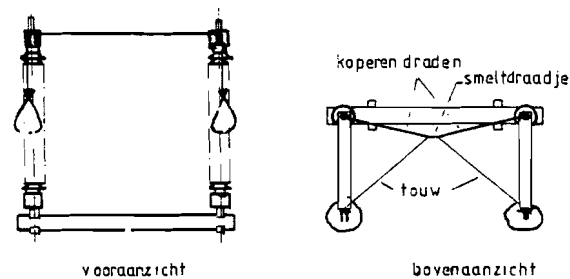


figuur 3.11 Met zandzakken en elastieken

De gemiddelde openingssnelheid is bepaald aan de hand van video-opnamen en is ongeveer 20 m/s.

Het aantal onderbrekingen bij dezelfde stroom was zeven. Er werd wederom van alle onderbrekingen een video-opname gemaakt en van het merendeel stroom en spanning opgenomen.

3.5.4 Met een koperen draad die verbonden is via een smeltdraadje tussen de aansluitklemmen van de scheider (zie figuur 3.12).



figuur 3.12

De koperen draden zullen door de touwtjes naar de scheider armen getrokken worden.

Deze metingen werden bij drie stroomwaarden verricht.

3.5.5 Deze metingen hadden tot doel om na te gaan wat de invloed was van de openingssnelheid op het boogbereik. Daartoe zijn er metingen uitgevoerd zoals beschreven in 3.5.1 en 3.5.2 alleen nu werden de video-opnamen van opzij genomen in plaats van vanvoren.

Er werden in totaal bij een stroom van 2,64 A veertig onderbrekingen uitgevoerd welke alle op video werden opgenomen.

3.6 Meetresultaten.

Van een groot aantal metingen zijn naast de video-opnamen ook de boogstroom en de spanningen voor en achter de scheider opgenomen en op diskette vastgelegd. Om het overzicht te bewaren zijn de meetresultaten in de vorm van grafieken weergegeven.

3.6.1 De meetresultaten van het openen van de scheider m.b.v. de motoraandrijving zijn verwerkt in de grafieken 3.4, 3.5 en 3.6

In grafiek 3.4 zien we dat de spreiding in de metingen erg groot is; daarom is in grafiek 3.5 de gemiddelde waarde met de bijbehorende standaard-deviatie uitgezet van de metingen zoals die in grafiek 3.4 voorkomen.

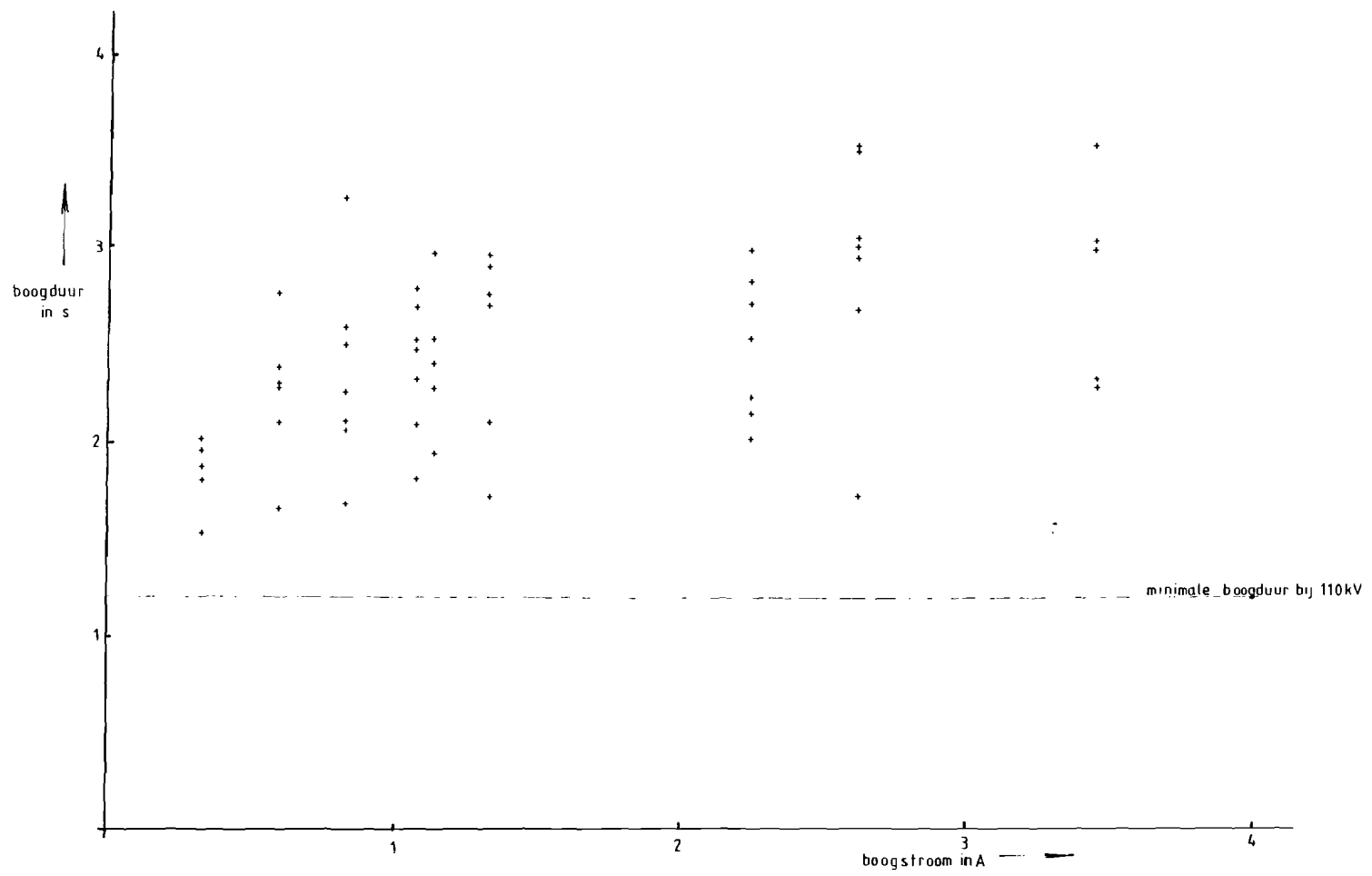
Er bestaat een lineair verband tussen boogstroom en boogduur in het gebied van 0,7 tot 3,8 A, bij kleine waarden van de stroom is het verband niet meer lineair. Dit komt waarschijnlijk omdat men dan in het gebied van de glimontlading komt.

In grafiek 3.6 zien we ook een lineair verband maar nu tussen de contactafstand waarbij de boog definitief dooft en de boogstroom. Indien we deze lijn zouden doortrekken dan zal, met in achtneming van de standaard-deviatie, al bij een stroom van 5 A de maximale contactafstand worden bereikt zonder dat dan de boog gedooft is. De kans dat de boog niet dooft wordt dan groot.

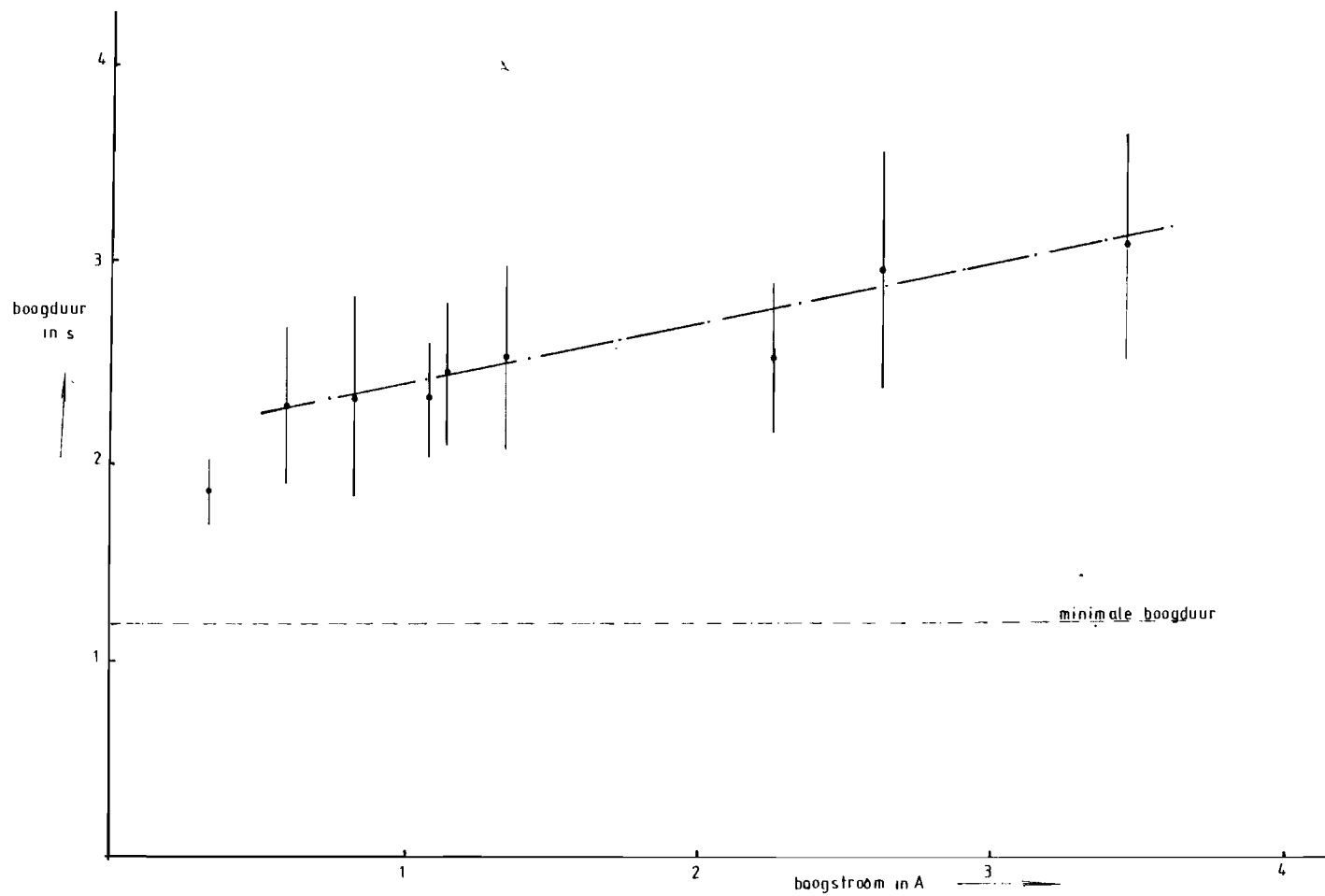
Bij het scheiden van de contacten ontstaat er een boogontlading welke snel in lengte toeneemt. Heeft de boog een bepaalde lengte dan klapt deze plotseling ineen terwijl ook de boogspanning sterk afneemt. Vervolgens neemt de lengte van de boog weer toe. Dit proces treedt in een onderbreking vaak op. Het aantal is sterk afhankelijk van de stroomsterkte en van de windsnelheid. In de bijlagen kan men oscillogrammen van onderbrekingen vinden.

3.6.2 De meetresultaten van de beproevingen zoals beschreven in 3.5.2 en 3.5.3 zijn verwerkt in de grafieken 3.7, en 3.8.

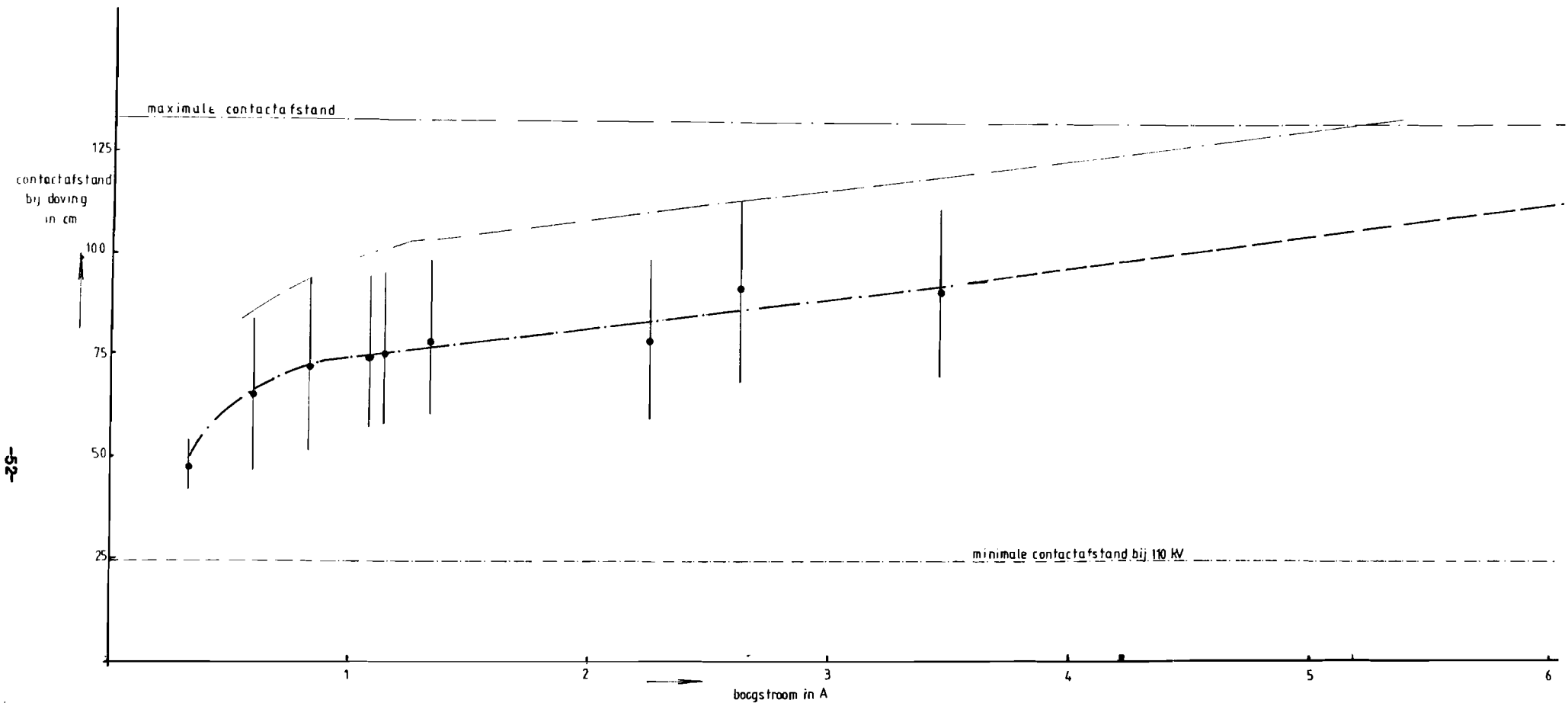
We zien dat ook bij snelle onderbreking er een aanzienlijke spreiding in de boogduur optreedt. Ten opzichte van de resultaten met motorbediening zien we dat de boogduur aanzienlijk korter is en dat de boogduur voor stromen groter dan 2 A bij een contactafstand van 100 cm sterk toeneemt.



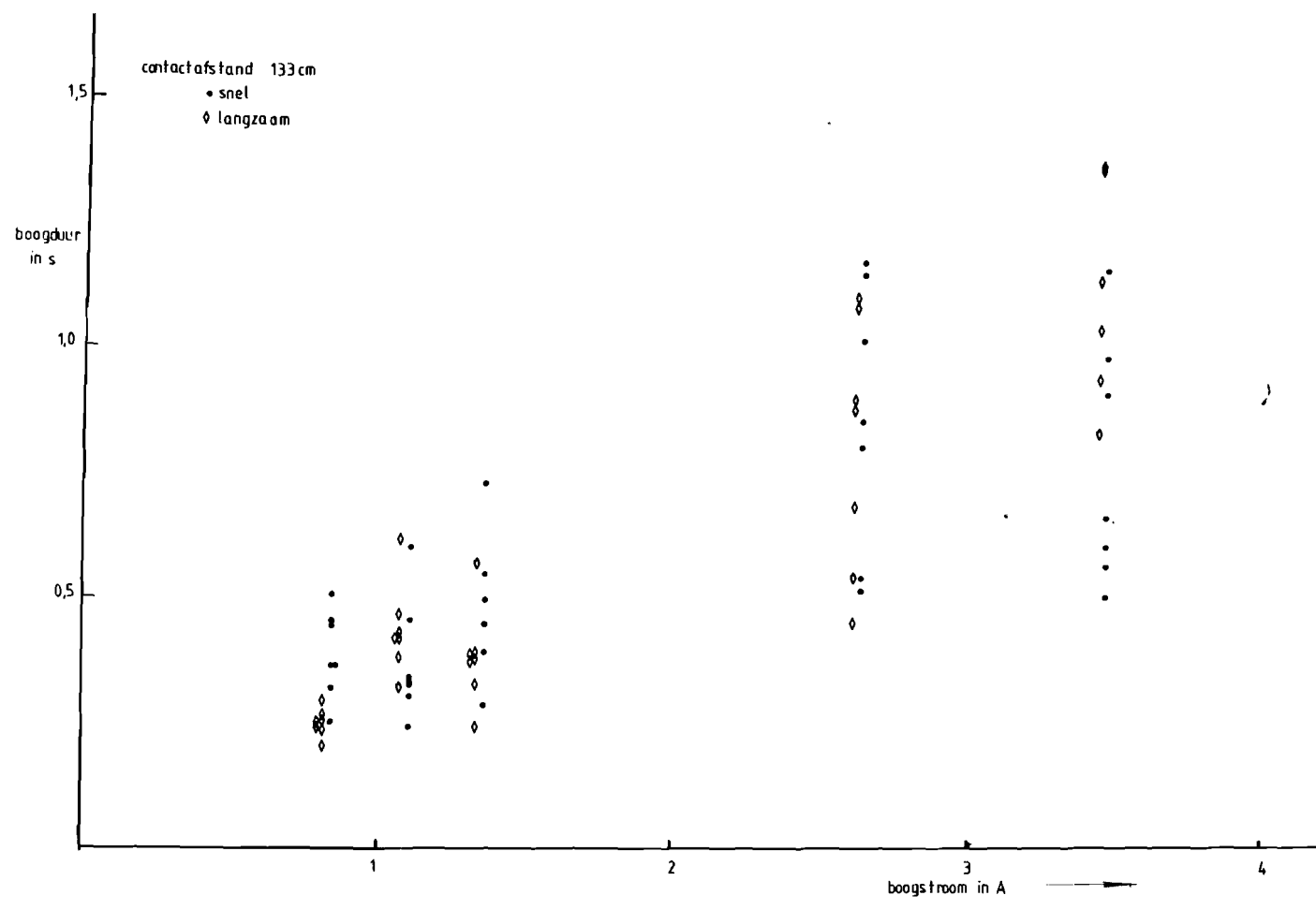
Grafiek 3.4 Boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV.
Motorbediening (3.5.1)



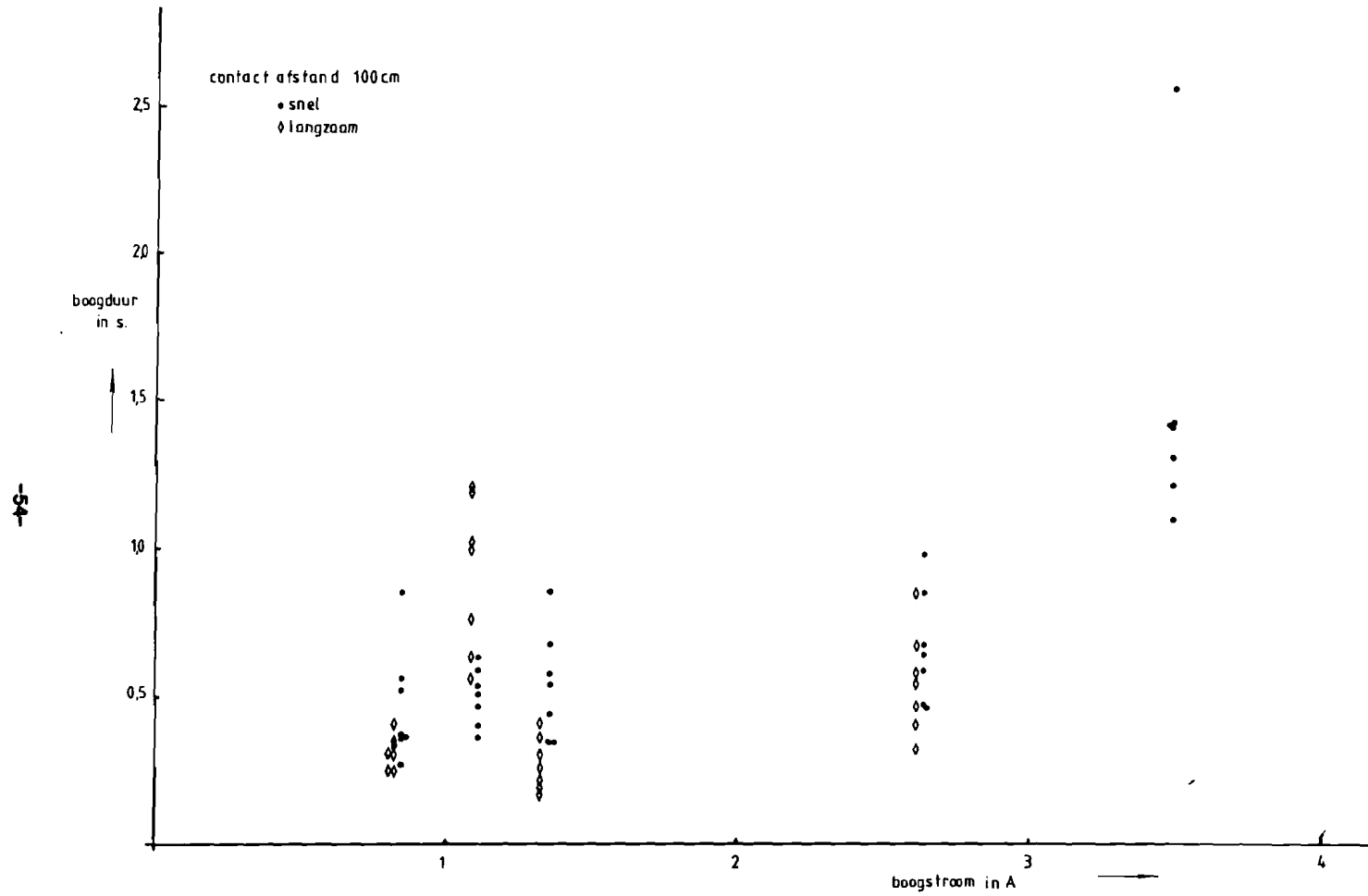
Grafiek 3.5 Boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV.
Motorbediening (3.5.1)



Grafiek 3.6 Contactafstand als functie van de boogstroom bij 110 kV
Motorbediening (3.5.1)



Grafiek 3.7 Boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV (contactafstand 133 cm)
Zandzakken (3.5.2 en 3.5.3)



Grafiek 3.8 Boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV (contactafstand 100 cm)
Zandzakken (3.5.2 en 3.5.3)

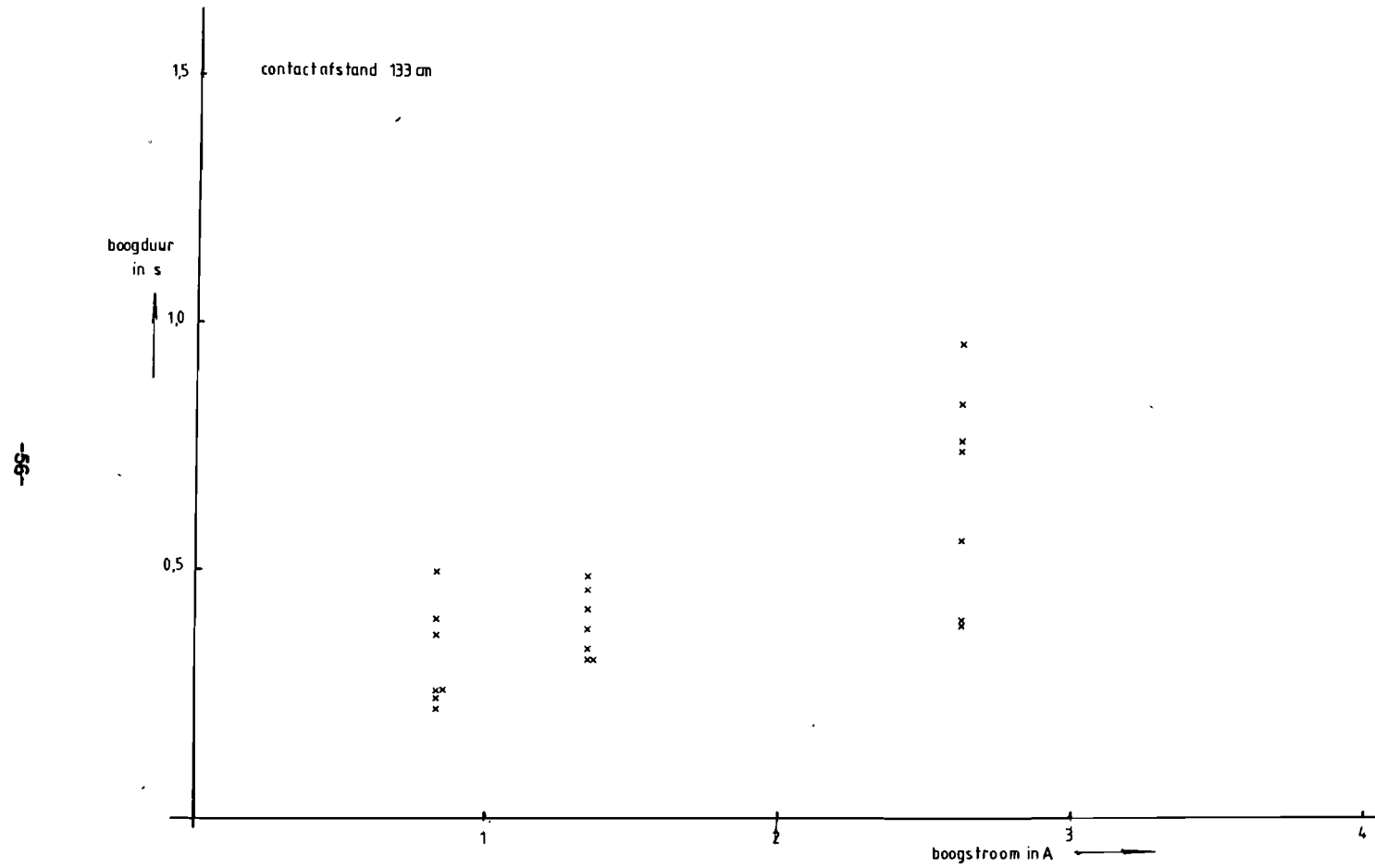
3.6.3 De beproevingen met een korte smeltdraad, beschreven in 3.5.4 zijn verwerkt in grafiek 3.9. De resultaten zijn overeenkomstig met die welke in grafiek 3.7 zijn vermeld.

3.6.4 De voorafgaande beproevingen hadden tot doel om een beter inzicht te verkrijgen over de boogduur als functie van de te onderbreken stroom en over de invloed van de openingssnelheid op de boogduur. Het is wellicht nog belangrijker te weten wat de invloed van de openingssnelheid op de booghoogte is. Daarom zijn er metingen bij een stroom van 2,64 A verricht die tot doel hadden dit te onderzoeken.

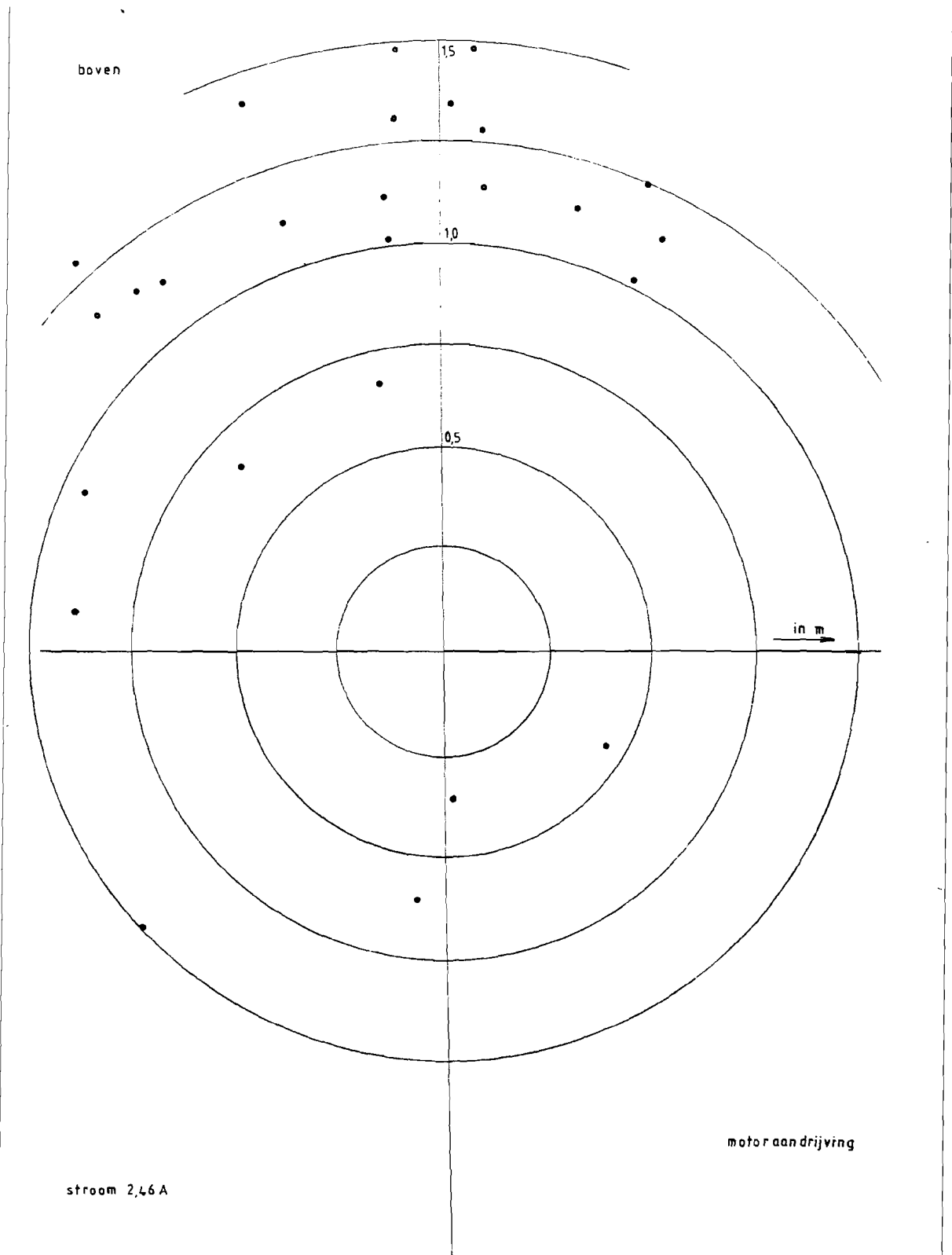
In grafiek 3.10 zien we de resultaten van onderbrekingen met motorbediening. Een kruisje vertegenwoordigt een meetpunt, zoals aangegeven in figuur 3.5, van de boog juist voordat deze definitief dooft. We zien dat de grootte en richting van de booghoogte sterk wisselt maar toch overwegend boven de scheiderarm voorkomen.

In grafiek 3.11 zijn de resultaten vermeld van onderbrekingen met een gemiddelde openingssnelheid van 20 m/s.

We zien dat ook hier de grootte en richting van de booghoogte sterk wisselt.

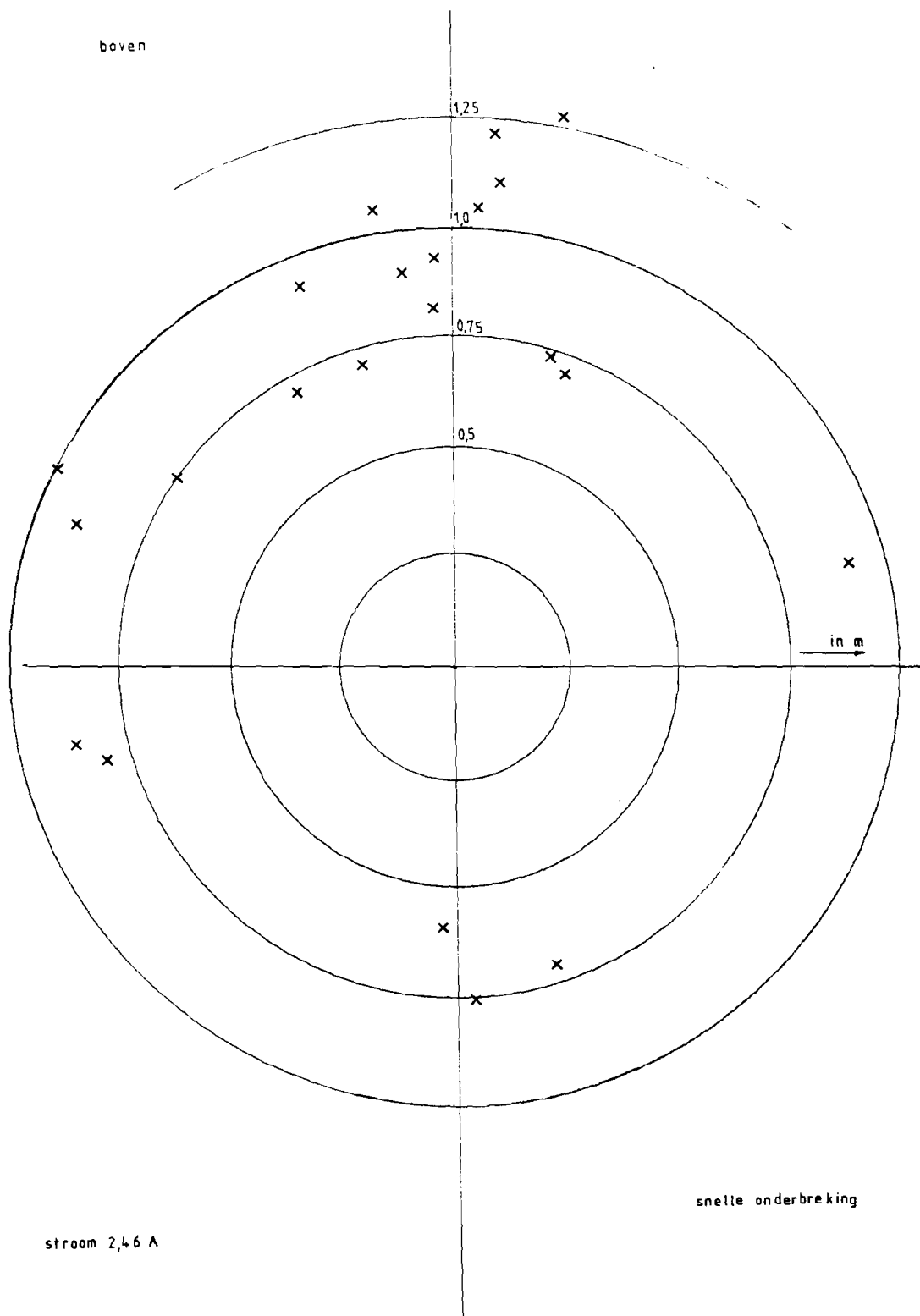


Grafiek 3.9 Boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV.
Zandzakken (3.5.4)



Grafiek 3.10 De booghoogte en de richting waarin de boog zich beweegt (figuur 3.5)

Motorbediening



Grafiek 3.11 De booghoogte en de richting waarin de boog zich beweegt. (figuur 3.5)

3.7 Conclusies.

Wanneer we de oscillogrammen van de diverse onderbrekingen bekijken dan zien we dat bij gebruik van de motorbediening een onderbreking wordt gekenmerkt door een proces van toename van de boogspanning waarna plotseling deze naar een veel lagere waarde terugvalt. Dit proces treedt vaak op tijdens een onderbreking. Als we de video-opnamen bekijken dan zien we dat deze terugval van de boogspanning overeenkomt met een plotseling kleiner worden van het boogpad doordat er kortsluitingen in het boogpad zelf optreden. Bij snelle onderbreking komt het proces van toename en plotselinge terugval vrijwel niet voor. Deze onderbrekingen worden gekenmerkt door een geleidelijke toename van de boogspanning tot een waarde van de ontsteekspanning welke ongeveer gelijk is aan de bedrijfsspanning waarna de boog dooft.

Bij gesloten scheider is het faseverschil tussen stroom en spanning ongeveer 84° . Bij het definitief doven van de boog is dit faseverschil teruggelopen tot ongeveer 36° . Tevens zien we dat ook de boogstroom kleiner wordt naarmate de boogspanning groter wordt. Dit is te verwachten omdat een langere boog een toename van de boogweerstand tot gevolg heeft.

Er zijn dus twee verschijnselen die het doven van de boog gemakkelijker maken:

- afname van de boogstroom
- het in fase komen van stroom en spanning

Door het laatste verschijnsel wordt de kans op overspanningen gering. Er zijn dan ook in onze metingen geen overspanningen geconstateerd.

Als we de meetresultaten samenbrengen in een grafiek (grafiek 3.12) dan zien we dat de boogduur door verhoging van de openingsnelheid sterk wordt gereduceerd. Bij 1 A is de boogduur van snelle onderbrekingen 16% van de waarde zoals die bij onderbrekingen met motorbediening is (2,4 sec). Bij een stroom van 3,5 A is voor snelle onderbreking (133 cm) dit percentage 28% en voor snelle onderbreking (100 cm) is dit percentage opgelopen tot 50 % t.o.v. de waarde bij motorbediening (3,2 sec).

De stroom waarbij de kans aanwezig is dat de boog blijft staan is voor de motorbediening ongeveer 5 A.

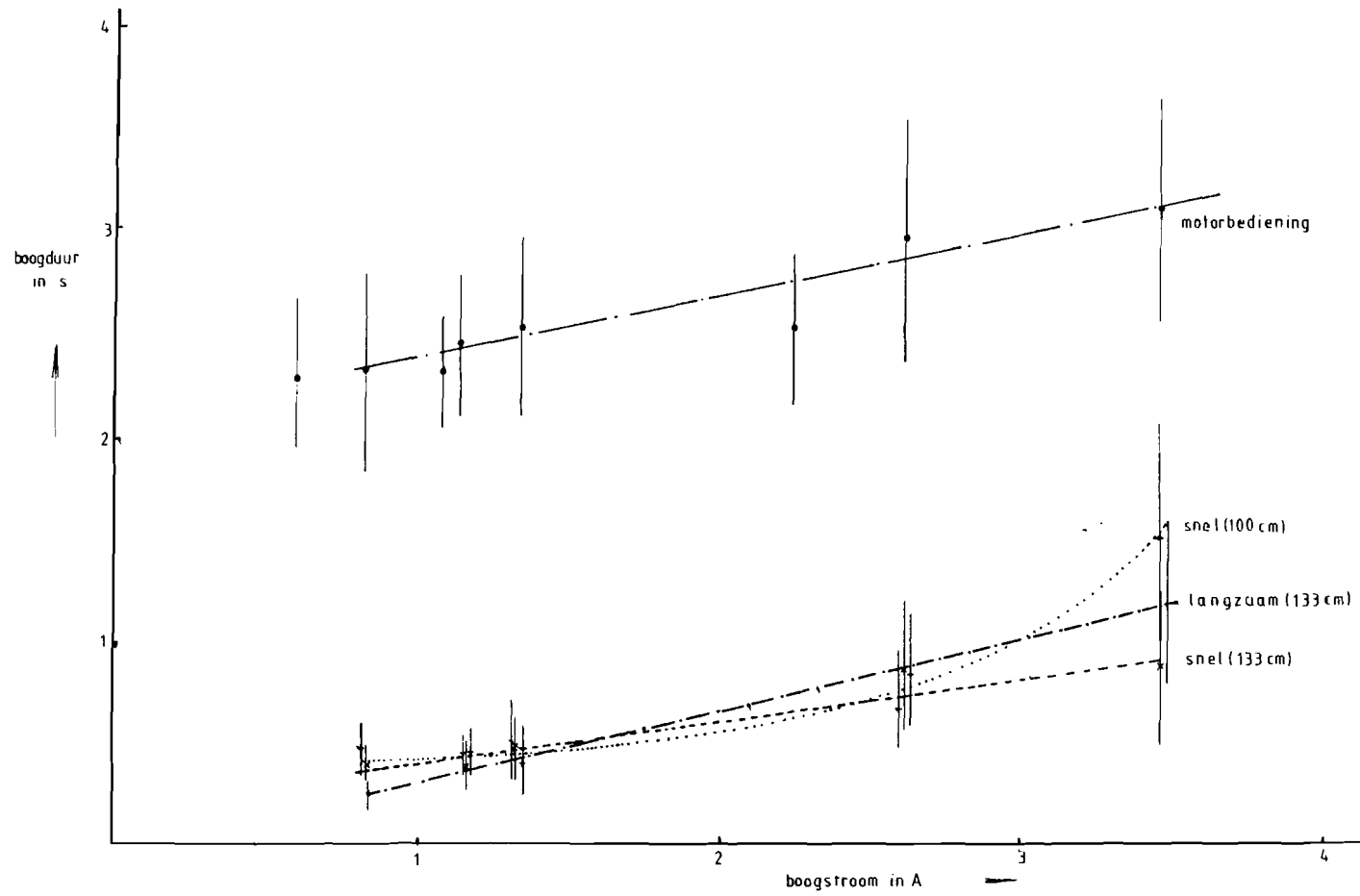
In artikel 7 wordt de bovengrens van de contactafstand als functie van de stroom gegeven als:

$$s_{99} = 0,70 \sqrt[3]{I}$$

waarin

I de stroom in A
 s_{99} de contactafstand bij
doving met een
waarschijnlijkheid van 99%
in m,

-09-



Grafiek 3.12 De boogduur als functie van de boogstroom bij 110 kV

Uit grafiek 3.5 kunnen we afleiden dat

$$S_{39} = 0,90 \sqrt[4]{I}$$

We zien dat de grootte-orde van de contactafstand gelijk is.

Een soortgelijke vergelijking voor de boogduur is er niet te maken omdat de door ons beproefde scheider aanzienlijk trager was dan de in artikel 7 beproefde scheider.

Als we naar de booghoogte gaan kijken dan zien we dat snelle onderbreking slechts een gering voordeel oplevert t.o.v. onderbreking m.b.v. de motoraandrijving. Voor onderbrekingen m.b.v. de motoraandrijving vinden we een gemiddelde booghoogte van 110 cm met een standaard deviatie van 23 cm en voor de snelle onderbreking vinden we een gemiddelde booghoogte van 88 cm en een standaard deviatie van 17 cm. Dit bij een stroom van 2,64 A.

Vergelijken we deze resultaten met de formule zoals beschreven in artikel 1:

$$0 \text{ tot } 100 \text{ A} \quad R = 5,0 \cdot 10^{-6} V I$$

waarin

R de booghoogte in m

V de spanning in V

I de stroom in A,

dan vinden we met V is 100 kV en I is 2,6 A een booghoogte van 130 cm hetgeen overeenkomt met de 110 cm met een standaard deviatie van 23 cm die door ons wordt gevonden.

Samenvattend kan men concluderen dat snelle onderbreking wat betreft de booghoogte weinig voordeel oplevert. Er zal dus in een andere richting moeten worden gezocht om de booghoogte te beperken.

3.8 Mogelijke oplossingen.

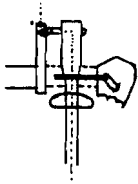
Men kan de oplossing zoeken in diverse richtingen:

1. Extra koeling door externe beblazing van de boog door b.v. perslucht. De vraag hierbij is wel of dit tot reductie van de booghoogte zal leiden. Voordeel is echter wel dat de richting waarin de boog zich beweegt vooraf bepaald is.

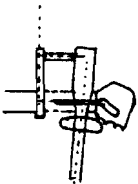
2. Door drukverhoging welke veroorzaakt wordt door b.v. "hardgas" (vrijmaking van gas uit een geschikt isolatiemateriaal waardoor de druk plaatselijk sterk toeneemt en de koel-eigenschappen van het gas sterk wijzigt).

3. Door in serie met de scheider een kleine SF₆ - puffer te schakelen welke als eerste de stroom onderbreekt waarna de scheider in stroomloze toestand wordt geopend.

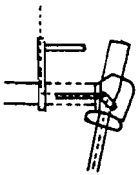
figuur 3.13 Extra voorziening om de boog te doven
door gebruik te maken van het
"hardgas" principe



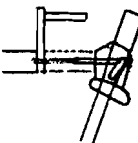
1. Gesloten toestand



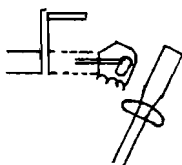
2. Stroom wordt door hulponderbreker overgenomen



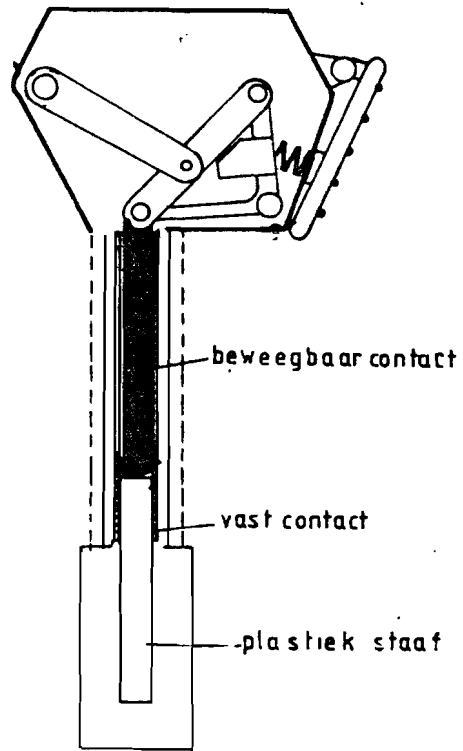
3. Stroom is door hulponderbreker overgenomen



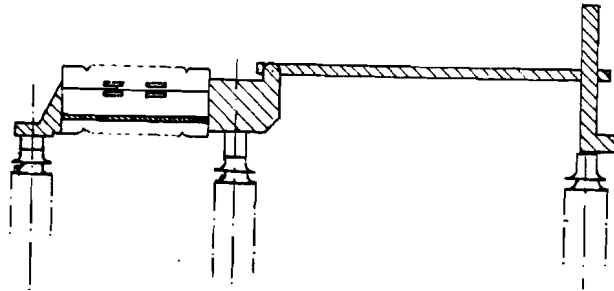
4. De scheiderarm geeft een commando aan de hulponderbreker om te openen ("hardgas" productie)



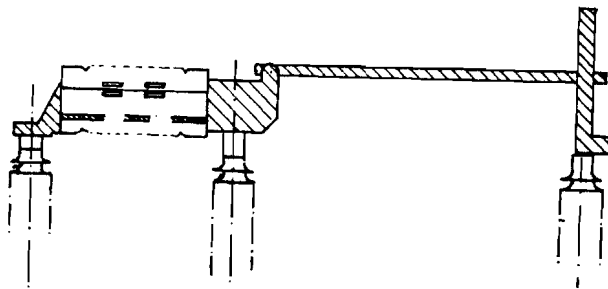
5. De scheiderarm gaat door naar de open toestand



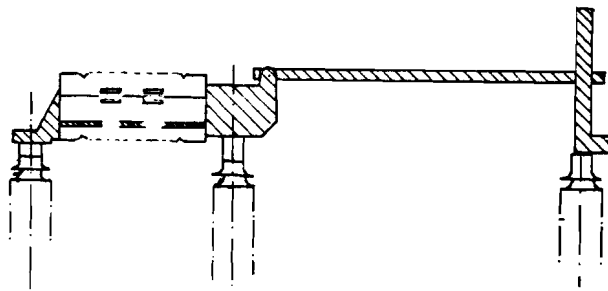
hulp onderbreker



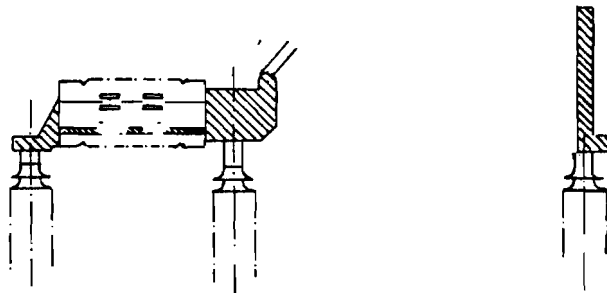
1. De scheidder in gesloten toestand



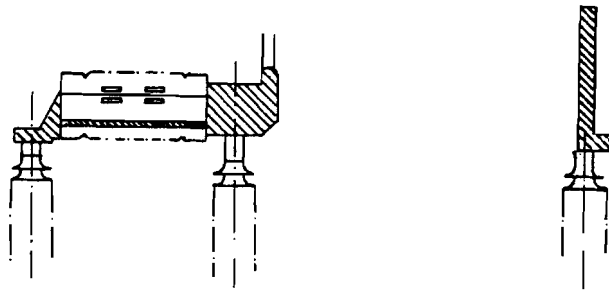
2. De hoofcontacten in het schakelaartje gevuld met SF₆ openen waardoor de stroom door de hulpcontacten wordt overgenomen



3. De hulpcontacten in het schakelaartje openen waardoor er een boogontlading ontstaat, door de pufferwerking dooft de boog snel



4. De scheider opent waardoor er een zichtbare scheiding ontstaat



5. De scheider heeft zijn maximale contactafstand bereikt en de hoofdcontacten en hulpcontacten in het schakelaartje worden weer gesloten.

figuur 3.14 Extra puffer schakelaartje gevuld met SF₆ om de kleine stroom te onderbreken

4. Het in- en uitschakelen van een inductieve stroom van 750 A bij een spanning van 300 V met een open lucht scheider.

4.1 Inleiding.

Het onderbreken van grote stromen m.b.v. een scheider treedt op bij omschakeling van railsystemen zoals beschreven in schakelsituatie 1.3.6 .

Gebleken was dat een scheider zonder extra voorzieningen ernstige beschadigingen kan oplopen bij dergelijke schakelmanipulaties.

Er werd daarom in de richting van het toepassen van hulpcontacten gezocht, die bij uitschakelen eerst de stroomdoorgang overnemen waarna de hoofdcontacten kunnen openen. Bij het inschakelen moeten de hulpcontacten eerst sluiten voordat de hoofdcontacten sluiten.

Om tot een goede constructie voor de hulpcontacten te komen moet men op enige zaken letten.

- mechanische aspecten van de constructie zoals materiaal, vorm, lengte, doorsnede etc,
- keuze van contactmateriaal, afmetingen van de contacten, vorm van de contacten,
- constructies om tot verbetering van de bluswerking te komen.

Nadat er een eisenpakket was opgesteld zijn er diverse constructies beproefd om te kijken of deze aan het eisenpakket voldeden.

4.2 Het eisenpakket .

1 Er moeten in totaal 100 schakeloperaties "IN - T1 - UIT - T2" achtereenvolgend worden verricht in een beproevingscircuit volgens figuur 4.1.

Hierbij wordt een stroom van 750 A (eff) in, resp. uitgeschakeld bij een open spanning van ca. 300 V (eff). De tijden T1 en T2 zijn niet voorgeschreven. Men kan hierbij denken aan enkele minuten met zonnodig na b.v. 10 operaties een extra pauze van 15 minuten. Tijdens een serie mag niets aan de scheider worden gewijzigd of verbeterd.

2 Voor en na deze beproevingsserie wordt de overgangsweerstand van de hoofdcontacten van de scheider gemeten. Men kan rekenen op een waarde tussen 40 en $80 \cdot 10^{-7}$ ohm, voor de beproeving. Na de beproeving mag deze weerstand niet groter zijn dan ervoor.

3 Na de beproevingsserie mogen de hoofdcontacten geen enkel spoor van inbranden vertonen.

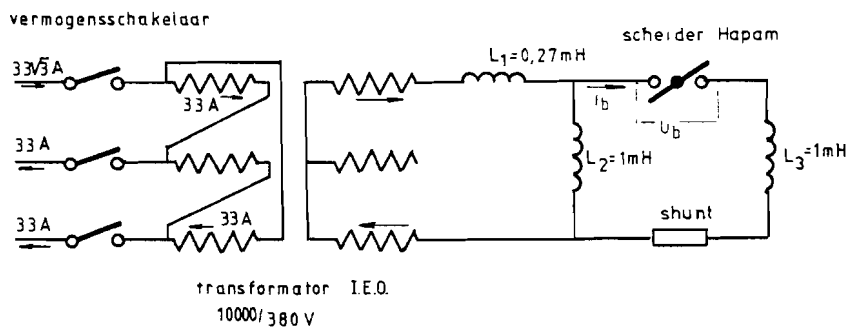
4 Voor de beproevingsserie worden de In-stand en UIT-stand van de scheidercontactarmen nauwkeurig bepaald. Na de beproeving moeten beide standen overeenstemmen met die van voor de beproeving.

5 De constructie moet corona-vrij zijn binnen de IEC-eisen.

6 Bovenomschreven eisen moeten ook gelden onder extreme winterse condities, waarbij vooral intensieve ijsafzetting gevaarlijk kan zijn.

4.3 Beproevingscircuit

In onderstaande figuur 4.1 is het schema van het beproevingscircuit getekend.



figuur 4.1 Beproevingsschema

In de navolgende paragrafen worden de diverse onderdelen van het beproevingscircuit beschreven.

10 kV installatie.

Als er door het circuit aan secundaire zijde een stroom van 1500 A loopt dan is de stroom door de primaire wikkeling

$$(220/10.000) \cdot 1500 = 33 \text{ A}$$

Transformator I.E.O.

Nominale primaire spanning 10 kV

Nominale secundaire spanning 220/380 V

Nominaal schijnbaar vermogen 800 kVA

Nominale stroom aan secundaire zijde

$$800.000/380\sqrt{3} = 1215 \text{ A}$$

Belasting

De belasting wordt gevormd door drie zelfinducties. Voor de zelfinductie van 0,27 mH is gebruik gemaakt van de eerder genoemde kabelhaspel. De zelfinducties van 1 mH werden gemaakt door van een stuk Vmvk kabel $4 \times 35 \text{ mm}^2$ een spoel met vijf windingen te maken. De diameter van deze spoelen was ongeveer 1 m.

De waarden van de zelfinductie werden vooraf bepaald door een stroomspanningsmeting.

$$L1 = 0,271 \text{ mH}$$

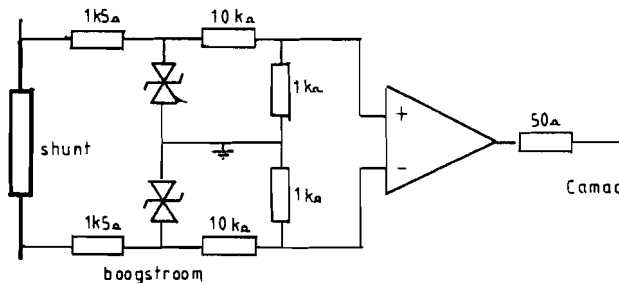
$$L2 = 1,03 \text{ mH}$$

$$L3 = 0,95 \text{ mH}$$

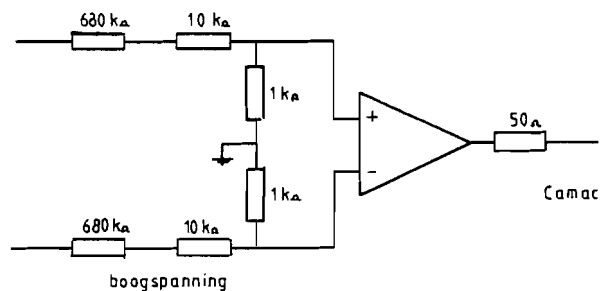
4.4 Meetmethode.

Voor het berproeven van diverse constructies werden enige in- en uitschakelingen verricht waarna bekeken werd of het zinvol was om met de constructie door te gaan. Het maken van video-opnamen had door de zeer korte boogduur en de hoge lichtintensiteit van de boogontlading weinig zin. Wel zijn boogstroom en boogspanning van enige in- en uitschakelingen opgenomen.

In de figuren 4.2 en 4.3 zijn de aanpassingen getekend voor het Camac systeem.



figuur 4.2 Meting van de boogstroom



figuur 4.3 Meting van de boogspanning

4.5 Het beproeven van de diverse constructies.

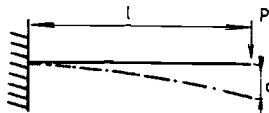
4.5.1 Zweep.

Mechanische eigenschappen van de zweep.

Het probleem van de voorgespannen en losschietende zweep is te herleiden tot de eenzijdig ingeklemde stang, die aan het uiteinde met een dwarskracht is belast (zie figuur 4.4). Voor de maximale uitwijking a geldt de bekende formule.

$$a = \frac{P l^3}{3E I} \quad (4.1)$$

met a = de uitwijking in m
 P = de kracht in N
 l = de lengte in m
 E = de elasticiteitsmodulus in N/m^2
 I = het traagheidsmoment v.d. doorsnede in m^4



figuur 4.4 Eenzijdige inklemming

voor een ronde stang is $I = (\pi/64) d^4 \approx 0,05 d^4$ (4.2)

voor een rechthoekige stang $I = (1/12) b h^3$ (4.3)

met d = de diameter in m
 b = de breedte in m
 h = de hoogte in m

Met 4.1 kan men het volgende berekenen:

- De contactdruk op het moment dat de hoofdcontacten scheiden. Deze moet groot genoeg zijn om de stroom zonder problemen in het zweepcontact te doen commuteren.
- De contactdruk tijdens het verschuiven naar de eindstand van de zweep. Deze moet voldoende groot zijn om de stroom zonder boogvorming, of zelfs vastlassen, te geleiden.
- De contactslag na het losschieten.

Na het losschieten trilt de zweep in zijn eigen frekwenties uit. In principe ontstaat er daarbij een grote reeks van frekwenties maar praktisch kan in dit geval gerekend worden met de grondfrekwentie:

$$f = 0,560 \sqrt{\frac{E I}{m l^4}} \quad (4.4)$$

met $m =$ de massa per lengte eenheid in kg/m
 $m = \rho A$ (4.5)
 $\rho =$ de soortelijke massa in kg/m³
 $A =$ de oppervlakte van de doorsnede van de stang in m²

De cirkelfrekwentie $w = 2\pi f$ wordt nu

$$w = 3,52 \sqrt{\frac{E I}{m l^4}} \quad (4.6)$$

Voor de ronde staaf vinden we uit (2) en (4), resp.

$$f = 0,14 \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.7)$$

$$w = 0,88 \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

De trilling van het uiteinde verloopt in eerste instantie volgens

$$s = a \cos wt \quad (4.8)$$

Hierin is a de maximale uitwijking op het moment van losschieten van de zweep, gegeven door (4.1).

Wanneer de stang ongeveer in zijn neutrale stand is gekomen wordt hij tegengehouden en strek gedempt door een remconstructie. Omdat nu de maximale slag bereikt is, moet de boog geblust zijn.

Deze maximale slag wordt bereikt in een kwart periode van de trilling, dus in een

tijd $T_{(max)} = (1/4)/f$
zodat

$$T_{(max)} = 1,78 \frac{l^2}{d} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (4.9)$$

De stang heeft op dit moment zijn maximale snelheid, gegeven door $v_{(max)} = aw$, dus

$$v_{(max)} = 0,88 \frac{a d}{\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.10)$$

De momentane waarde van de snelheid tot aan de afremming wordt gevonden uit $V = -ds/dt$ met (4.8):

$$v = aw \sin wt$$

De gemiddelde snelheid bedraagt $v_{(gem)} = a/T_{(max)}$ zodat

$$v_{(gem)} = 0,56 \frac{ad}{\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.11)$$

De formules (4.7), (4.9), (4.10) en (4.12) gelden voor staven met een ronde doorsnede.

In de tabellen 4.1 en 4.2 zijn voor verenstaal en beryllium-koper numerieke waarden gegeven van w en $T_{(max)}$ als functie van de stang-diameter d en de lengte tot aan de inklemming ℓ .

Beproefde zweep.

De zweep die werd beproefd had een lengte van 70 cm en een diameter van 10 mm en was gemaakt van berylliumkoper.

Bij het uitschakelen is de werking als volgt:

- tijdens het openen van de scheider wordt de zweep ingeschakeld en voorgespannen, terwijl de hoofdcontacten nog gesloten zijn
- na het openen van de hoofdcontacten neemt de zweep de stroomgeleiding over
- de stroom wordt uitgeschakeld doordat na het bereiken van de uiterste stand de zweep met grote snelheid wegschiet

Bij het inschakelen is de werking omgekeerd

- tijdens het sluiten van de scheider zal de zweep contact maken, terwijl de hoofdcontacten nog geopend zijn, waardoor er stroomgeleiding ontstaat
- na het sluiten van de hoofdcontacten zullen deze de stroomgeleiding mede verzorgen
- de stroom door de hulpcontacten wordt verbroken zodat alleen de hoofdcontacten de stroomgeleiding verzorgen

d (cm) →	0,6		0,8		1,0		1,2		1,4	
	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)
20	698	2,3	930	1,7	1163	1,35	1395	1,13	1630	0,97
40	174	9,0	233	6,8	291	5,4	349	4,5	407	3,9
60	78	20	103	15	129	12,2	155	10,1	181	8,7
80	44	36	58	27	73	22	87	18	102	15
100	28	56	37	42	47	34	56	28	65	24
120	19	81	26	61	32	49	39	41	45	35
	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms

Tabel 4.1

Cirkelfrekwentie ω en tijd T_{\max} vanaf lossen tot aan de neutrale stand
Materiaal; Verenstaal ronde doorsnede
 $\rho = 7,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $E = 21,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
voor niet opgegeven waarden: $\omega = 4,65 \cdot 10^3 \text{ d/l} = (\pi/2)/T_{\max}$

d (cm) →	0,6		0,8		1,0		1,2		1,4	
	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)	ω	T _(max)
20	518	3,0	690	2,3	863	1,8	1035	1,5	1210	1,3
40	129	12	173	9,1	216	7,3	259	6,1	302	5,2
60	58	27	77	21	96	16	115	13,7	134	11,7
80	32	49	43	36	54	29	65	24	76	21
100	21	76	28	57	35	46	41	38	48	33
120	14	109	19	82	24	66	29	55	34	47
	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms	rad/s	ms

Tabel 4.2

Cirkelfrekwentie ω en tijd T_{\max} vanaf lossen tot aan de neutrale stand
Materiaal; Berylliumkoper ronde doorsnede
 $\rho = 8,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $E = 12,7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
voor niet opgegeven waarden: $\omega = 3,45 \cdot 10^3 \text{ d/l} = (\pi/2)/T_{\max}$

In de oscillogrammen 4.1,4.2 en 4.3 zien we de boogstroom en de boogspanning van een uitschakeling m.b.v. de zweep. We zien dat de boogduur 33 ms is en dat het faseverschil van het circuit van 75° terug loopt tot ongeveer 30° bij definitieve doving van de boog. Ook blijkt dat er geen overspanningen optreden.

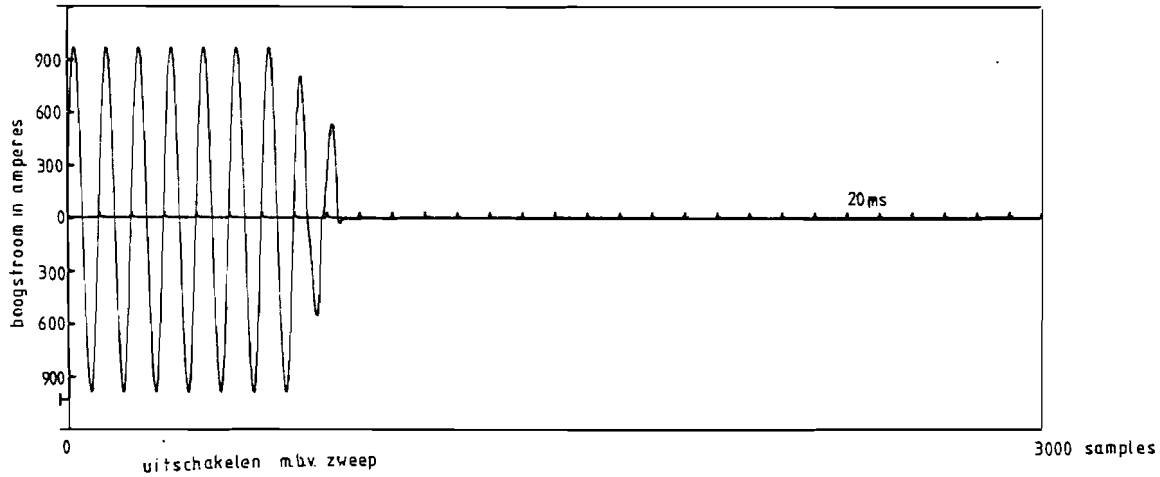
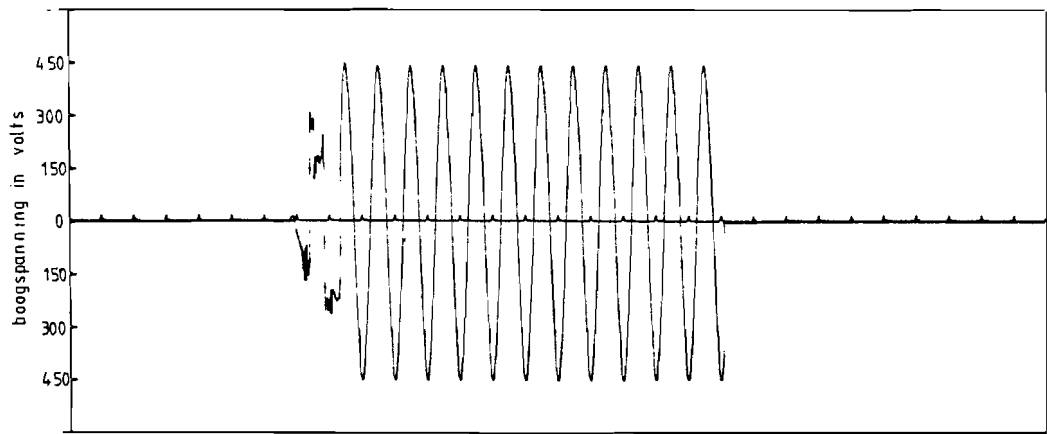
In de oscillogrammen 4.4 en 4.5 waarin boogstroom en boogspanning van een inschakeling m.b.v. een zweep zijn weergegeven zien we dat de boogduur minimaal is. Het overblijvend verschijnsel in de boogspanning kan worden toegeschreven aan het overelkaar schuiven van de hulpcontacten (denderen). We zien ook een inrush verschijnsel van de stroom. Als we de oscillogrammen 4.6 en 4.7 bekijken die ook van een inschakeling m.b.v. een zweep zijn dan zien we dat hier de boogduur 28 ms bedraagt. In dit geval is er wel een boogontlading ontstaan.

Het ontstaan van een boogontlading is bij het inschakelen sterk afhankelijk van de momentane waarde van de spanning vanwege de mogelijke voordoorslag.

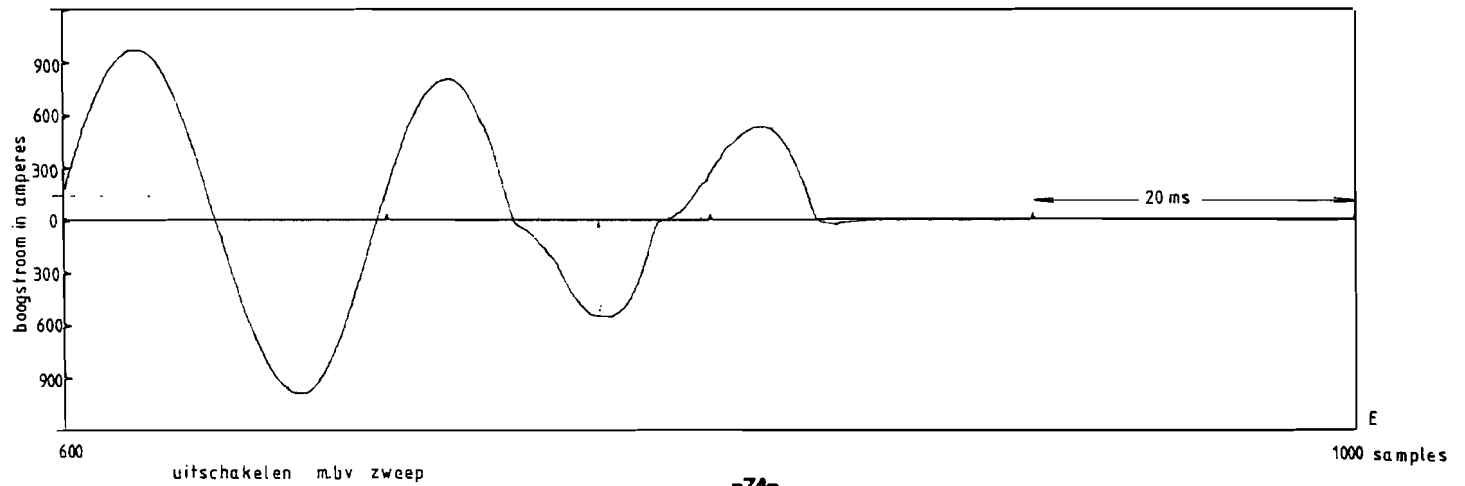
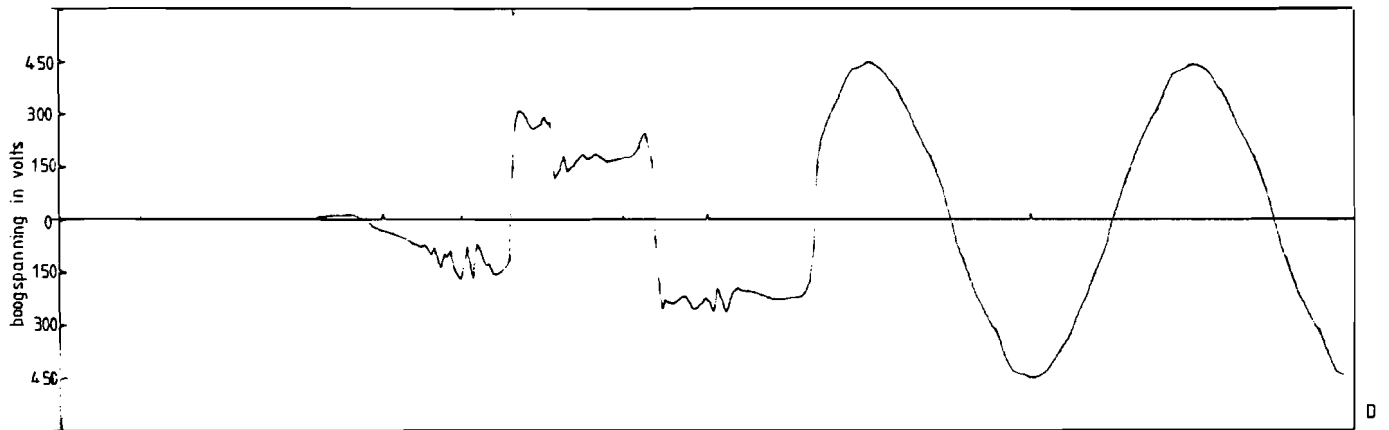
Er is met de zweep, waaraan een wolfram topje (zie foto 1) was gemaakt, 30 maal uitgeschakeld. De beschadigingen die veroorzaakt zijn kan men zien op foto 1. We constateren zeer lichte beschadigingen hetgeen betekend dat de zweep als uitschakel mechanisme zeker goed zal voldoen.

De gevolgen van 10 maal inschakelen ziet men op de foto's 2 en 3. We zien ernstige beschadigingen aan zowel zweep als aanloopblokje en bovendien bleef de zweep bij de tiende inschakeling op het blokje steken.

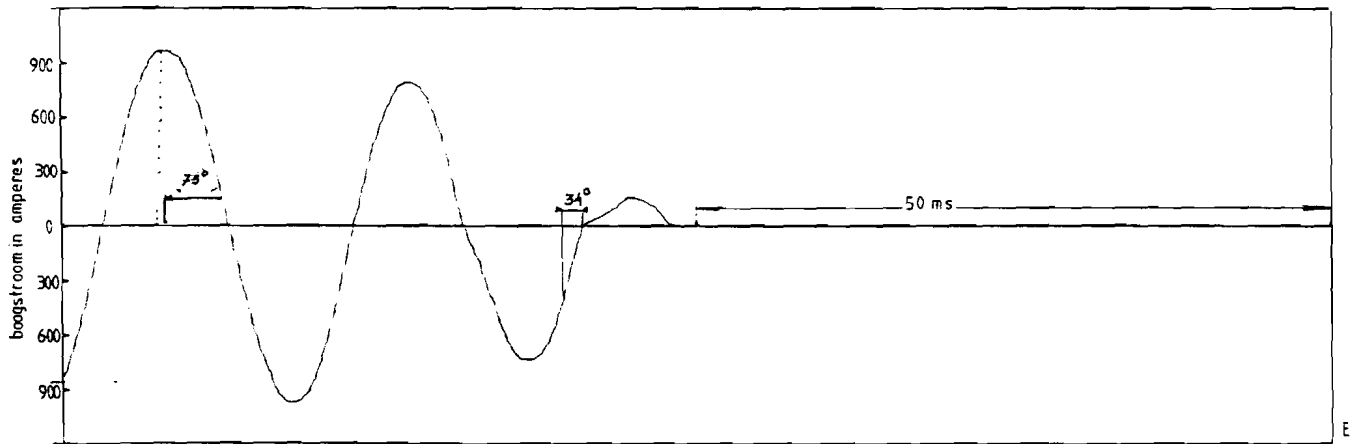
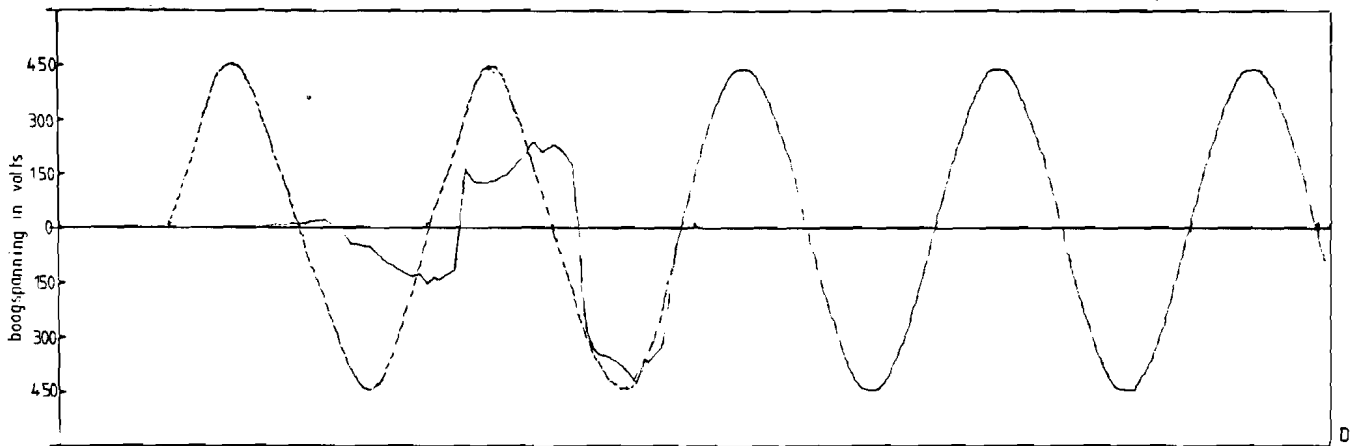
De zweep voldoet dus niet als inschakelmechanisme.



Oscillogram 4.1



Oscillogram 4.2

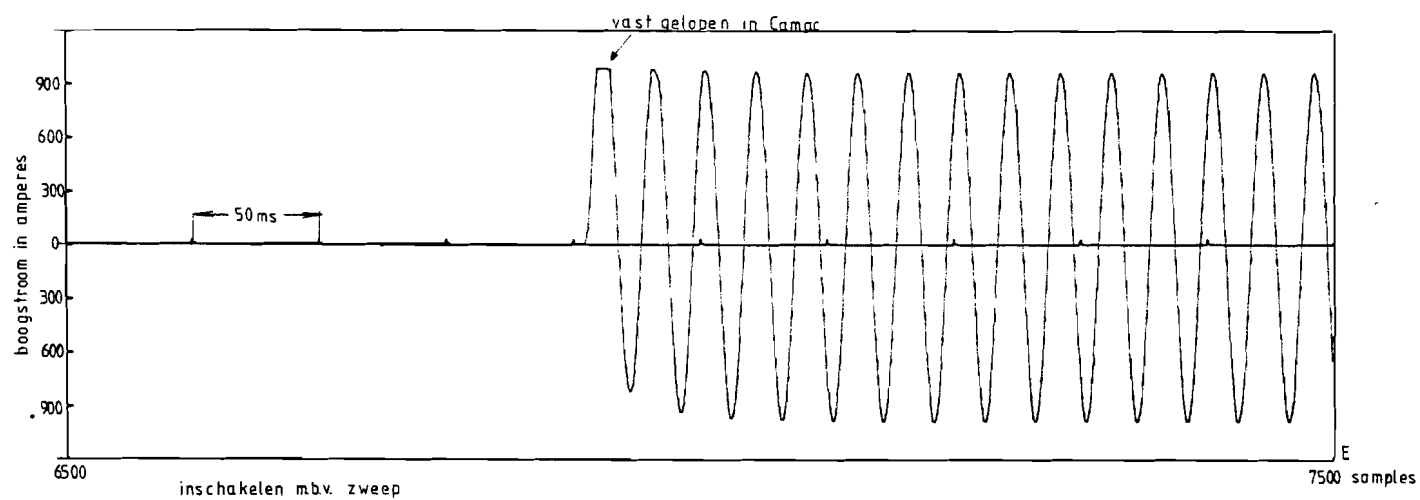
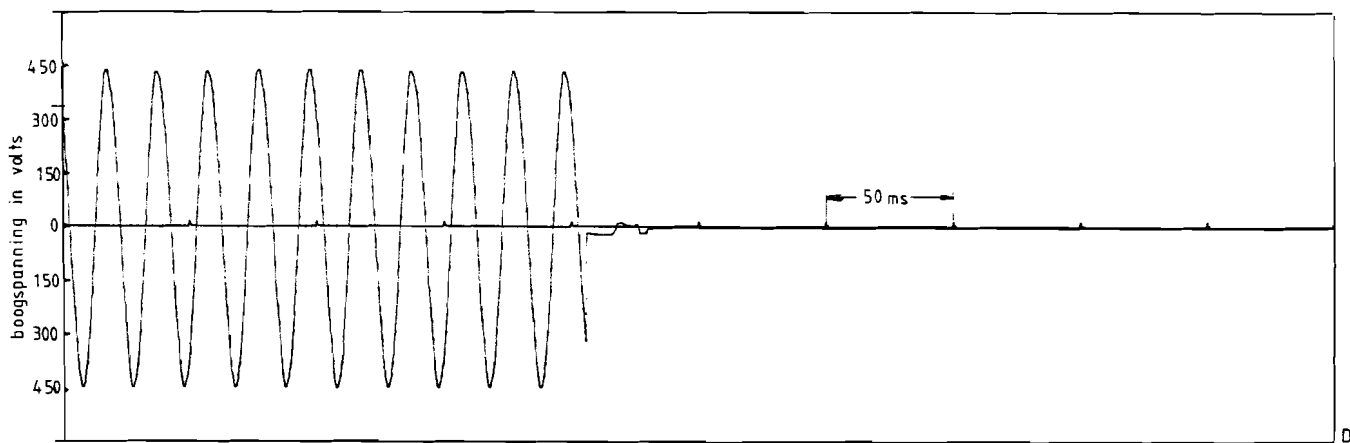


5600

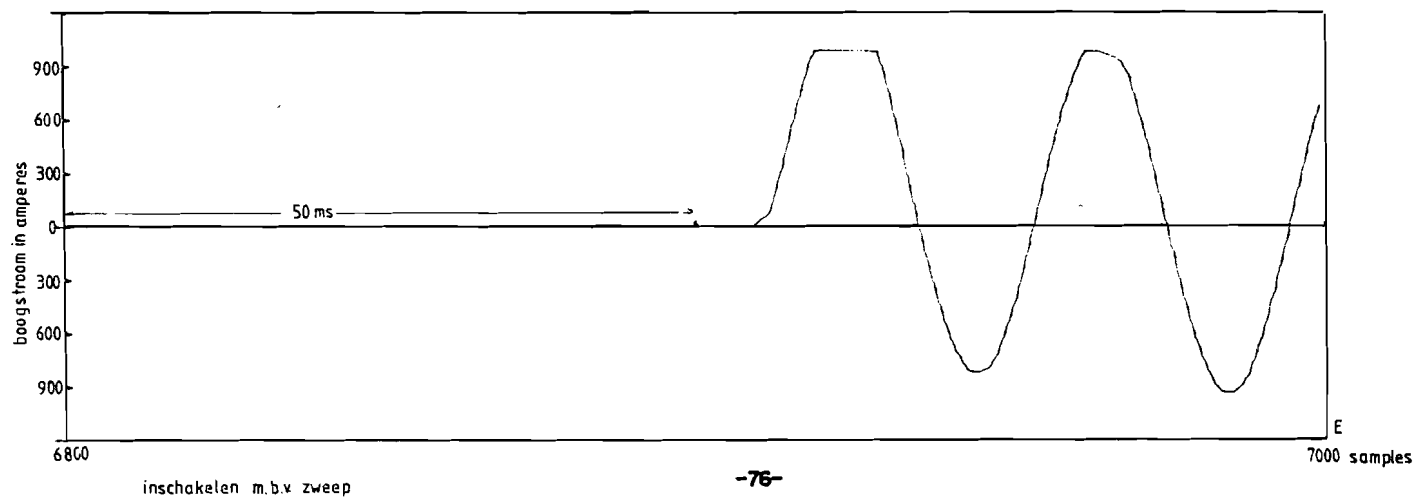
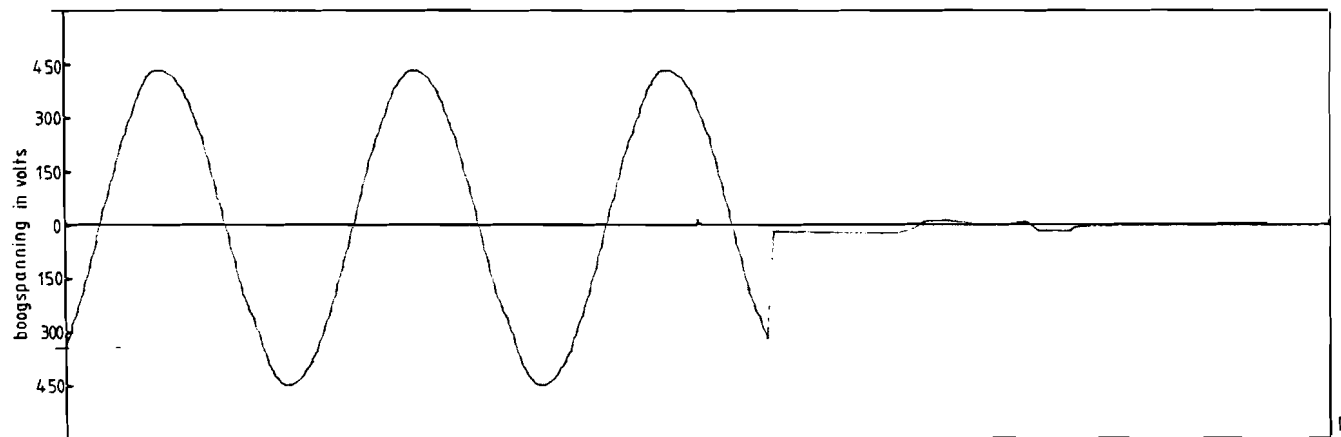
uitschakelen m.b.v. zweep

5800 samples

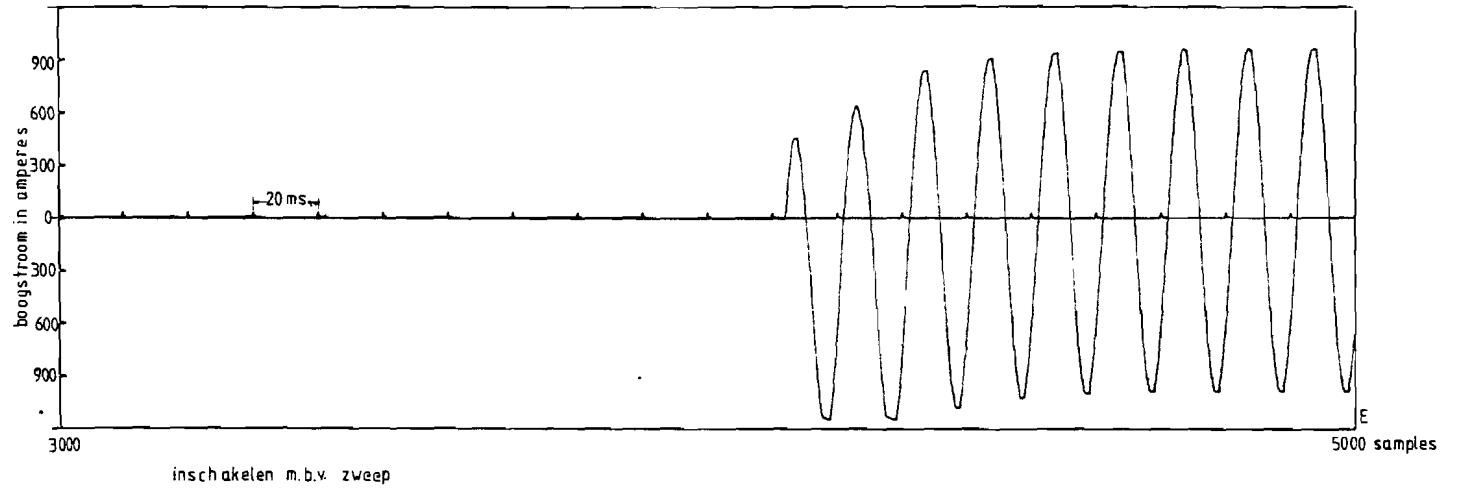
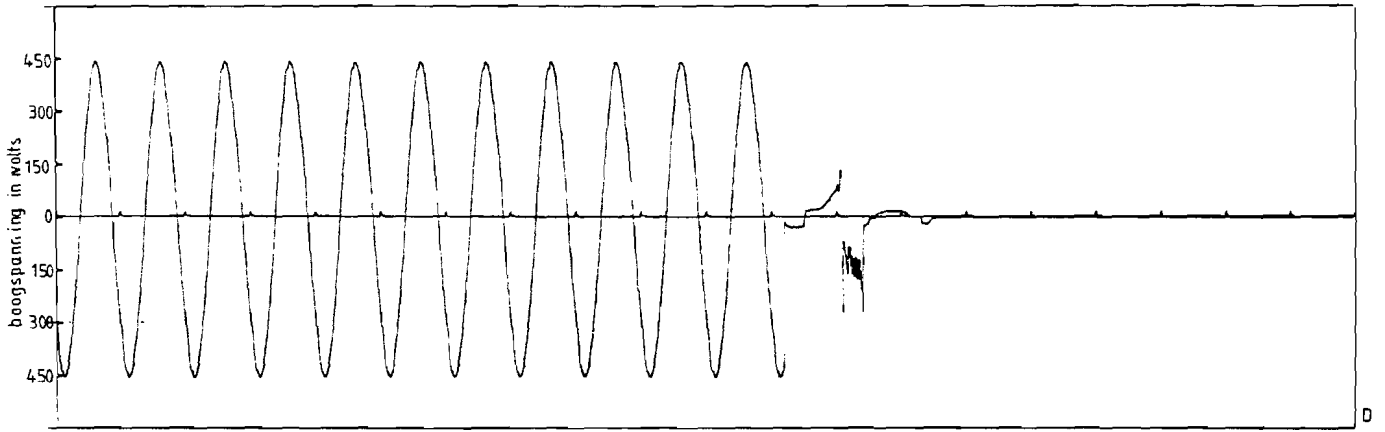
Oscillogram 43



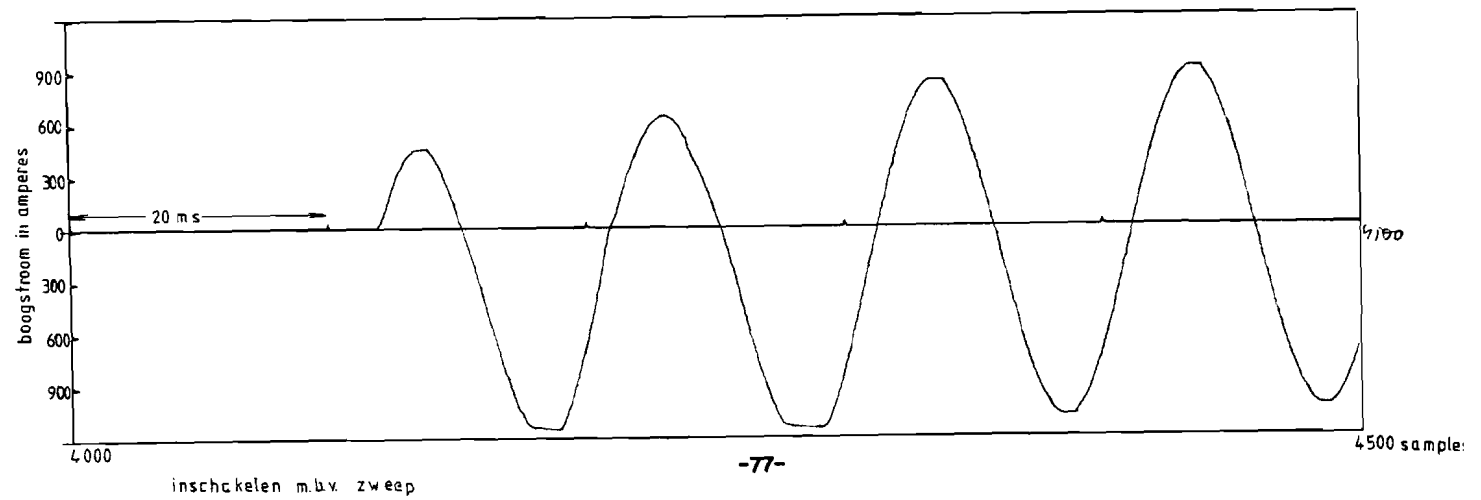
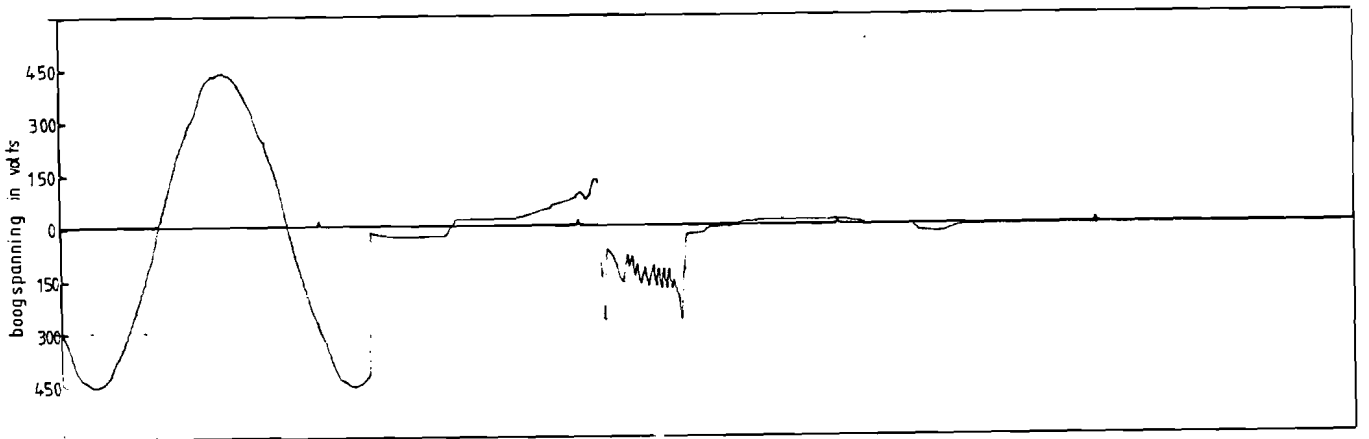
Oscillogram 4.4



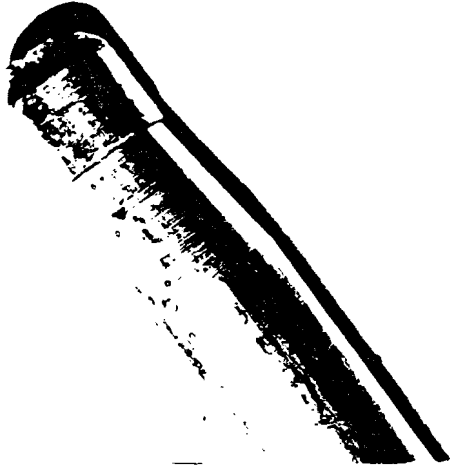
Oscillogram 4.5



Oscillogram 4.6



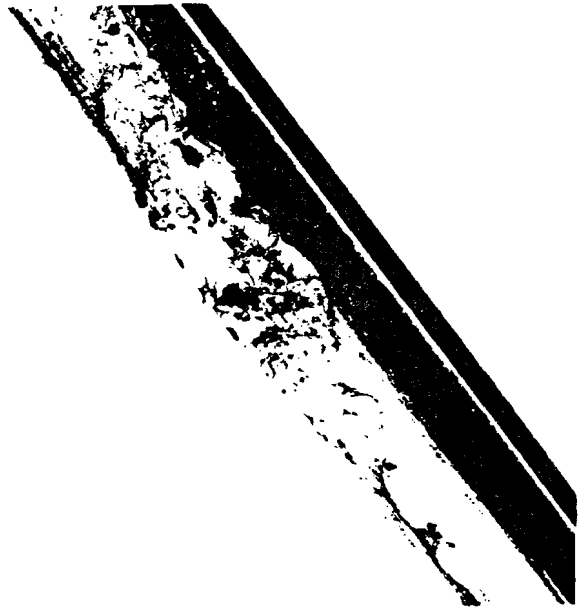
Oscillogram 4.7



1



2



3

Foto's "zweep"

4.5.2 Afbrandhoorns.

De tweede constructie die werd beproefd waren afbrandhoorns. De diameter van deze hoorns was 14 mm en het materiaal was staal.

Bij het uitschakelen is de werking als volgt:

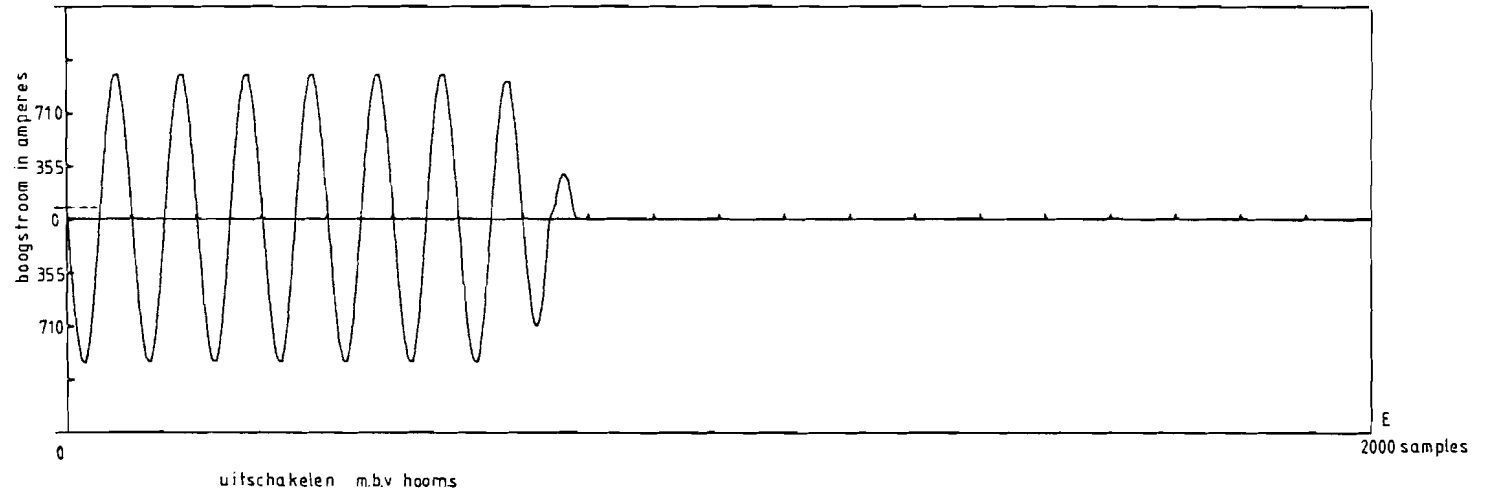
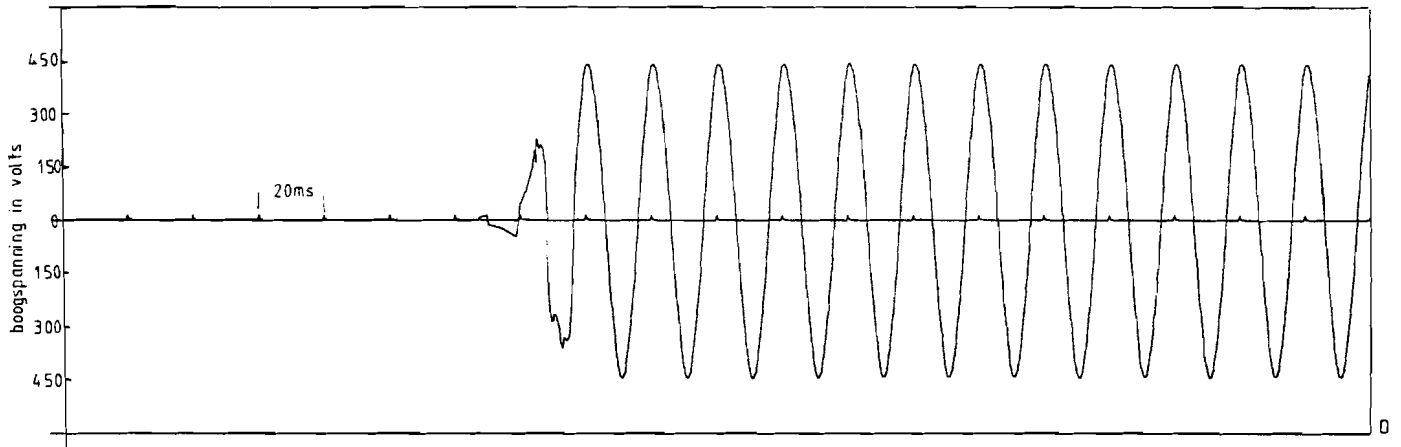
- tijdens het openen van de scheider zullen de hoorns contact maken, terwijl de hoofdcontacten nog gesloten zijn
- na het openen van de hoofdcontacten nemen de hoorns, die over elkaar schuiven, de stroomgeleiding over
- de stroomgeleiding zal ophouden als de hoorns een bepaalde stand hebben omdat de hoorns van elkaar af schuiven

Bij het inschakelen is de volgorde omgekeerd en zal op dezelfde plaats worden ingeschakeld als dat er uitgeschakeld werd.

Als we de oscillogrammen (4.8 en 4.9) van de eerste onderbreking bekijken dan zien we dat de boogduur 30 ms is en dat het faseverschil terugloopt van 75° tot 36° bij definitieve onderbreking.

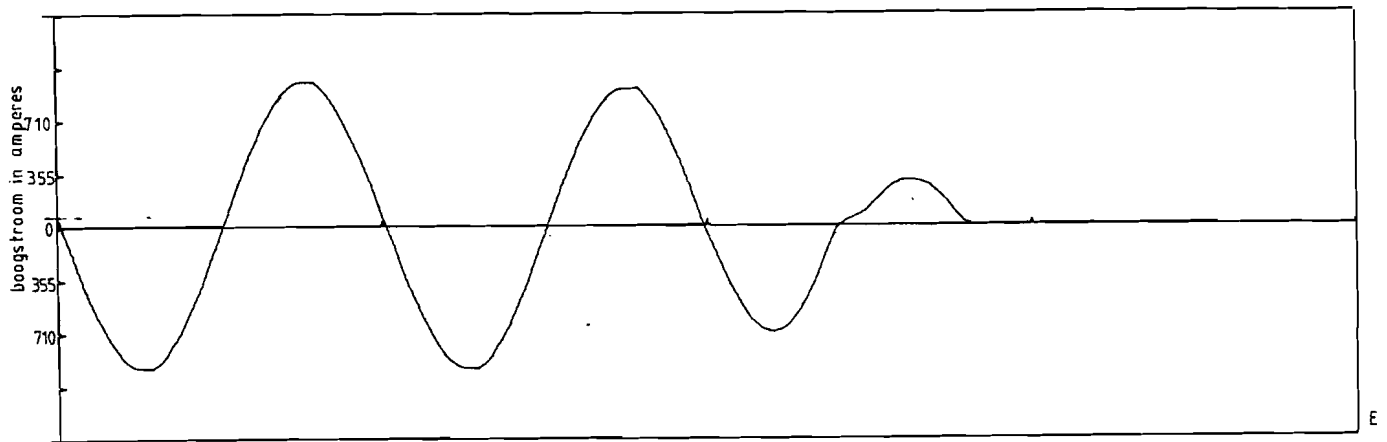
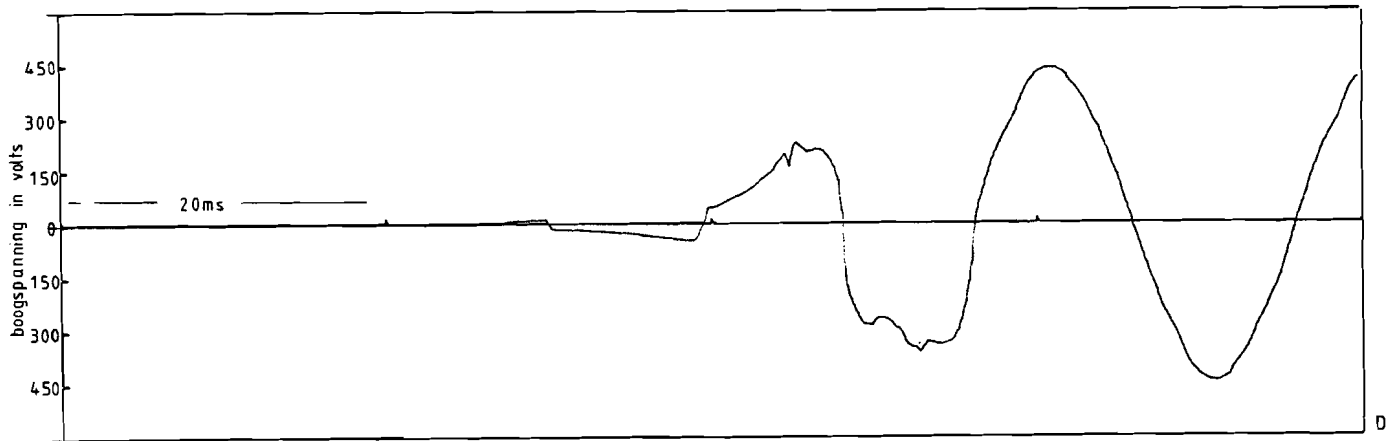
De oscillogrammen 4.10 en 4.11 geven de boogstroom en de boogspanning weer van een inschakeling m.b.v. hoorns. We zien dat de boogduur kort is ongeveer 3 ms en dat tengevolge van het inschakelen op of in de nabijheid van een spanningsnuldoorgang het inrush verschijnsel maximaal is.

De foto's 4 en 5 van de afbrandhoorns zijn na vier in- en uitschakelingen genomen. We zien dat op de plaats waar zowel in- als uitgeschakeld wordt er ernstige beschadigingen optreden en dat het oppervlak waarover wordt geschoven beschadigingen vertoont. Door deze beschadigingen wordt de kans op het vastlassen van de hoorns erg groot en bovendien is vooral de mechanische belasting van de scheider erg groot. Daarom zal deze constructie niet voldoen in de praktijk.



uitschakelen m.b.v hoorns

Oscillogram 4.8



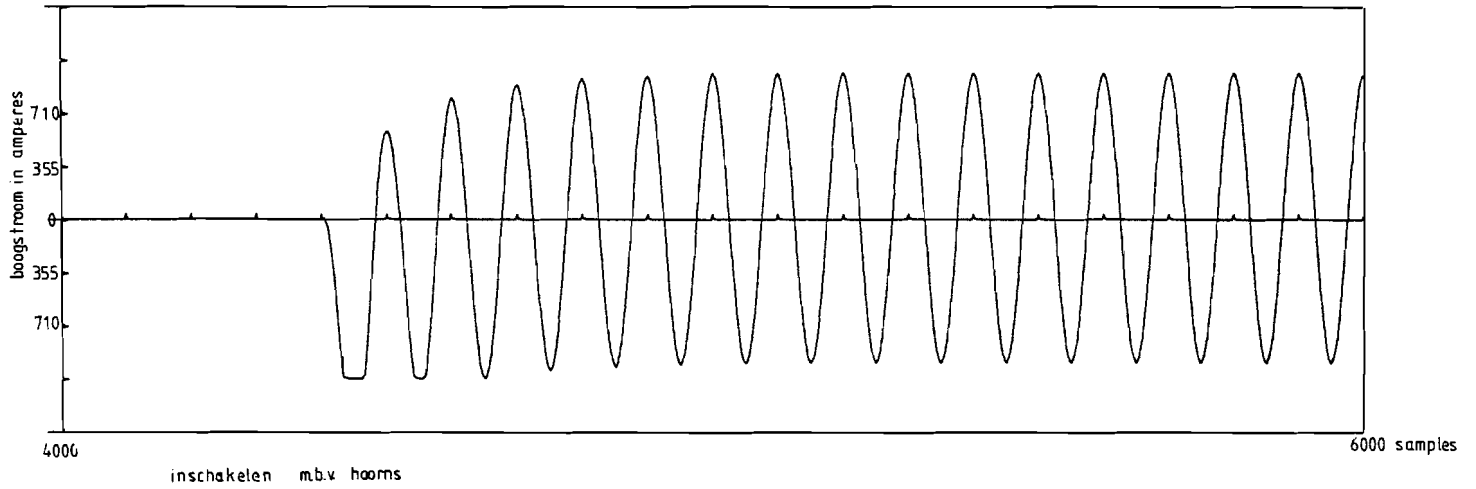
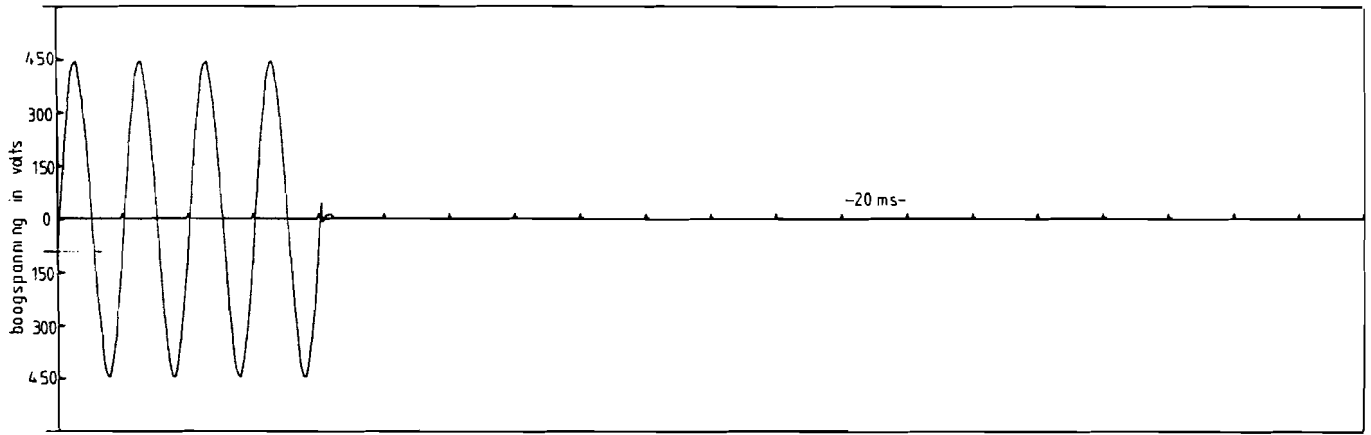
500

uitschakelen m.b.v hoorns

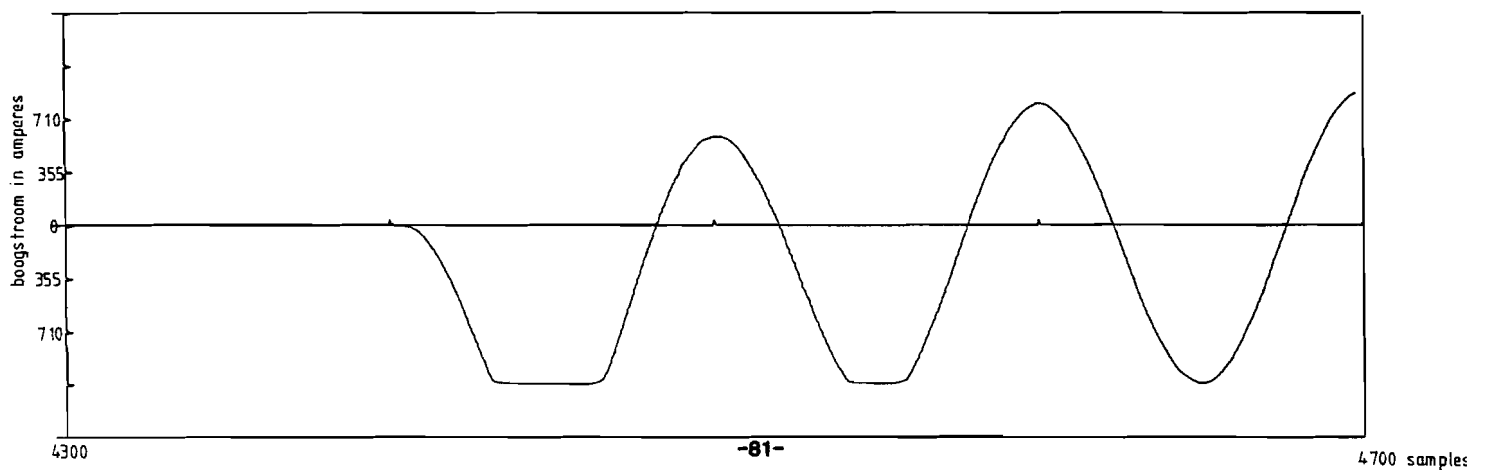
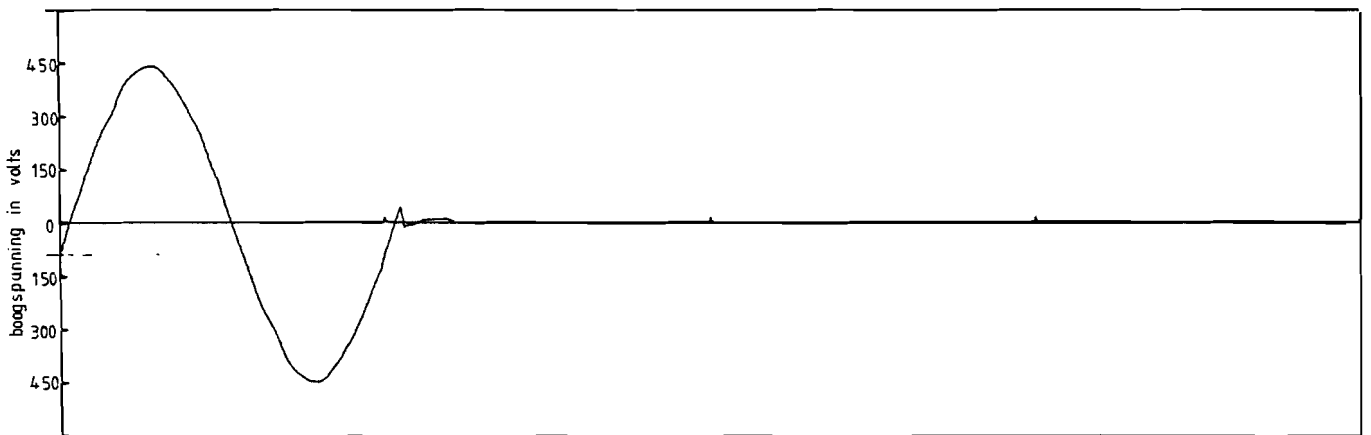
-80-

900 samples

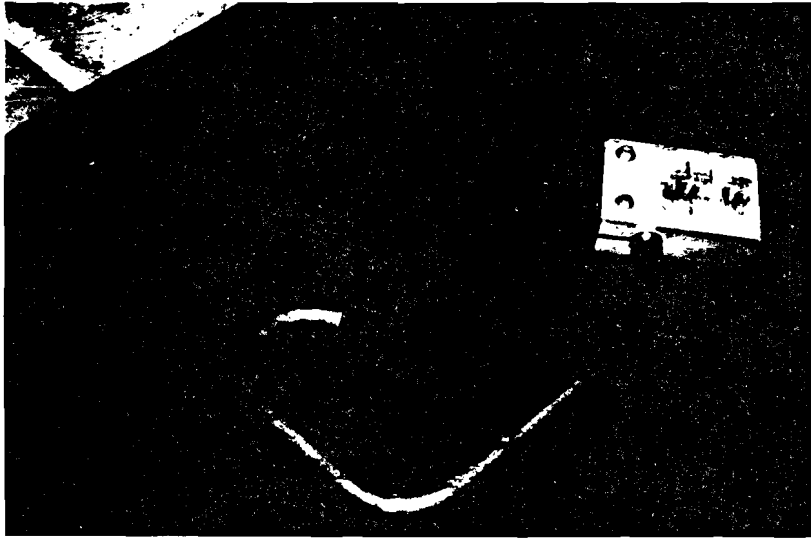
Oscillogram 4.9



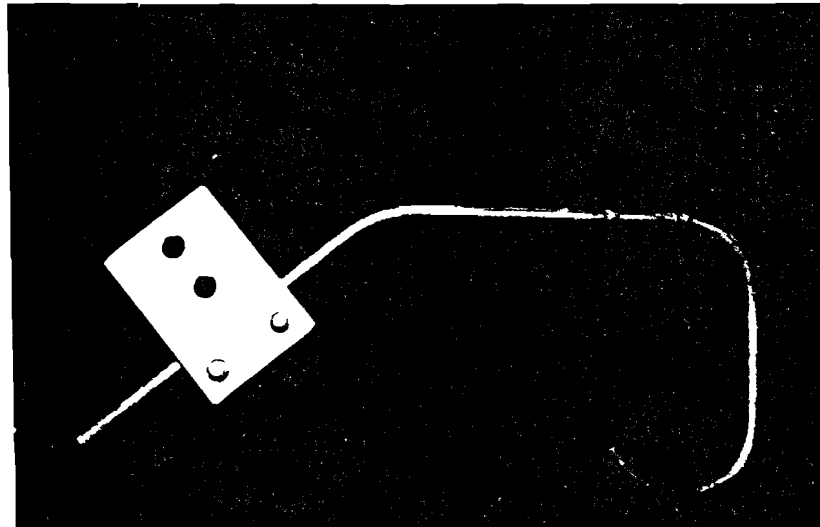
Oscillogram 4.10



Oscillogram 4.11



4



5

Foto's "horns"

4.5.3 Knikstaven

Mechanische eigenschappen van de knikstaven.

Direkt bij het inschakelen ontstaat er een kracht op de contacten, die deze tracht te openen. Op dit moment is de contactkracht juist nog zeer laag. Wordt deze door bijzondere maatregelen verhoogd, dan ontstaat al gauw de neiging tot "denderen", d.i. het terugbotsen van de stang die met enige kracht op het tegen-contact wordt geslagen.

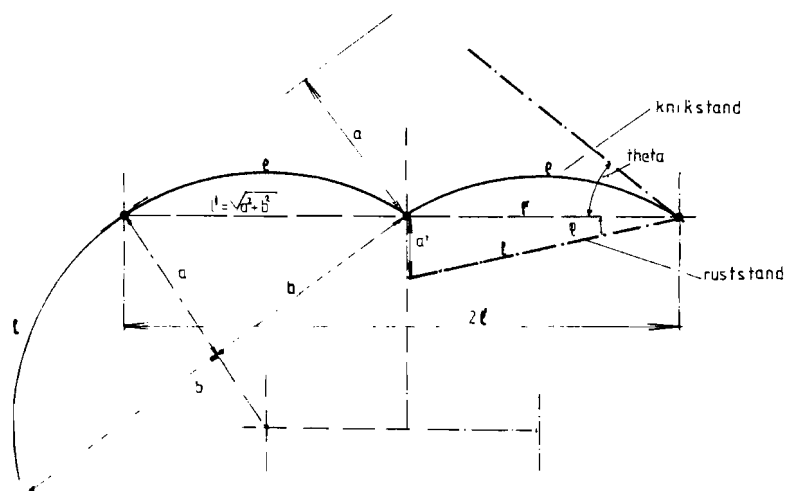
Daarom is gezocht naar een constructie die dit nadeel niet heeft. Gedacht werd aan een snel opgebouwde normaaldruk op de contacten, gedirigeerd door de hoofdbeweging van de scheider.

Een hoge, min of meer constante contactdruk kan worden opgebouwd door een knikkraft.

Een exacte berekening van de constructie is omvangrijk en zou zeker het doel van het onderzoek voorbij schieten. In onderstaande is daarom een globale berekening aangegeven.

Er wordt bij de berekening uitgegaan dat (zie figuur 4.5).

- a de gespannen buig-knikstaaf doorschiet als de contacten in de verbindinglijn van de twee draaipunten gekomen is. (De scheiderarm is dan inmiddels een hoek θ gedraaid).
- b de elastische lijn van de staaf op dat moment kan worden benaderd door een cirkelboog met totale lengte l ("zweeplengte").



figuur 4.5 Knikstaven

We zien dat dan een verband te leggen is uit de schijnbare verkorting van de staaf Δ
 $= \ell - \ell'$ en de gezochte constructie-afmetingen, krachten en spanningen ($2 \ell' =$
 afstand tussen de twee draaipunten).

De berekening verloopt als volgt:

Bekend is ℓ' , de halve afstand tussen de isolatoren

Kies $\Delta = \ell - \ell'$

De zweeplengte is dan

$$\ell = \Delta + \ell' \quad (4.13)$$

de hoek op het moment van inlopen is

$$\phi = \arccos(\ell'/\ell) \quad (4.14)$$

de afstand tot het geïdealiseerde knikpunt is dan

$$a' = \ell' \tan \phi \quad (4.15)$$

uit de benaderde vergelijking voor de cirkelboog

$$s^2 = (2b)^2 + (16/3) h^2$$

s = de cirkelboog
 $2b$ = de basis
 h = de hoogte

volgt voor de "halve boog" van de knikzweep

$$(2\ell')^2 = (2b)^2 + (16/3) a^2$$

waarbij a de doorbuiging is op het moment van lossen.

Hieruit ontstaat, met $\ell'^2 = a^2 + b^2$

$$a = \sqrt{3\Delta(2\ell' + \Delta)} \quad (4.16)$$

met

$$a = P_B^3 / 3E I \quad \text{en} \quad P_B = 3a E I / \ell^3 \quad (\text{vergelijking 4.1})$$

P_B is de normaalkracht die de uitwijking a geeft juist voor het lossen.

De scheiderarm is op het moment van lossen een hoek θ gedraaid:

$$\theta \approx \text{arc sin } a/\ell$$

Gedacht wordt aan een zweep, samengesteld uit 2 evenwijdige stangen, zodat de totale buigende kracht wordt

$$P_T = 2 P_B = 6a E I / \ell^3 \quad (4.17)$$

De hoogste druk/trek belasting wordt gevonden uit

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{P_B \ell d}{2 I} = \frac{3 a d E}{2 \ell^2} \quad (4.18)$$

W = het weerstandmoment

d = de staafdiameter

Wanneer geen extra massa voor de contacten wordt toegevoegd, gelden dezelfde formules voor frequentie en snelheid als bij de "zweep". Tabel 4.1 geldt bij benadering ook voor roestvrij staal, tabel 4.2 bij benadering ook voor fosforbrons. Wordt er echter wel noemenswaardige massa aan het einde van de stang toegevoegd, dan geldt bij benadering

$$w = \sqrt{\frac{C_t}{M_s}} \quad (4.19)$$

met $C_t =$ schijnbare veerconstante $= 2 P_B / a = 6 E I / \ell^3$
(faktor 2 vanwege 2 staven parallel)

$M_s =$ schijnbare massa $M_c + M_z / 4$

$M_c =$ massa van de contacten

$M_c =$ massa van de zweep $= 2 \rho A \ell$, dus

$M_z = 2 \ell d^2 \rho / 4$

Hiermee ontstaat

$$\omega \approx \sqrt{\frac{2P}{B}} \approx \sqrt{\frac{6EI}{\ell^3 (M_c + (1/8) \rho d^2 \ell)}} \quad (20)$$

met $M_c = 0$: ontstaat weer:

$$\omega \approx 0,88 \frac{d}{\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{zie vergelijking 4.7})$$

Opmerking: Het is noodzakelijk om de massa's van de beide zweepen enigszins verschillend te maken om te voorkomen dat de zweepen elkaar hinderen na het doorknikken.

Uit vergelijking (4.20) blijkt dat de toevoeging van extra massa M_c een betrekkelijk sterke invloed heeft op de frekwentie, vergeleken met M_z .

Met $\omega = 2\pi f = 1/T$ is uit (20) weer de frekwentie f en de kwart periodeduur $1/4 T$ te berekenen.

De temperatuurverhoging van de knikstaven wordt berekend uit:

$$\Delta T = \frac{I^2 R t}{C_p \rho A \ell}$$

met I = de stroom per staaf in A
 R = de weerstand per staaf in Ω
 t = de tijdsduur in s
 C_p = de soortelijke warmte in J/kg graad

ρ = de soortelijke massa in kg/m^3
 A = de doorsnede per staaf in m^2
 ρ_e = de soortelijke weerstand in Ωm

Voor ronde staven ontstaat, met $R = \rho_e \frac{l}{A}$

$$T = \frac{16 I_s^2 \rho_e t}{\pi^2 C \rho d^4} \quad (4.21)$$

(Let op: voor 2 parallele stangen moet voor I_s dus 375 A worden ingevuld)

Tenslotte is nog de spanningsval over de commutatie-schakelaar van belang, vanwege de eis, dat de hoofdcontacten geen enkel spoor van inbranden mogen vertonen na 100 schakelingen.

Deze bedraagt

$$U_c = \frac{8 I_s^2 \rho_e l'}{\pi d^2} \quad (4.22)$$

Deze spanning mag niet groter zijn dan enige volts.

De tabellen 4.3 en 4.4 geven een aantal numerieke resultaten voor ronde knikstaven ter lengte van 70 cm resp. van roestvrijstaal en van fosforbrons.

d (cm)	0,5			0,6		
Δ (cm)	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
l (cm)	70,5	71,0	71,5	70,5	71,0	71,5
φ (gr)	6,83	9,63	11,76	6,83	9,63	11,76
a' (cm)	8,37	11,88	14,57	8,37	11,88	14,57
a (cm)	14,52	20,49	25,23	14,52	20,49	25,23
theta (gr)	11,97	17,02	21,13	11,97	17,02	21,13
I (m ⁴)	3,07 10 ⁻¹¹	3,07 10 ⁻¹¹	3,07 10 ⁻¹¹	6,36 10 ⁻¹¹	6,36 10 ⁻¹¹	6,36 10 ⁻¹¹
P _B (N)	16,03	22,14	26,7	33,2	45,9	55,3
σ (N/m ²)	4,60 10 ⁸	6,4 10 ⁸	7,74 10 ⁸	5,52 10 ⁸	7,5 10 ⁸	9,3 10 ⁸
w (rad/s)	45,1	44,5	43,9	54,1	53,4	52,6
1/4 T (ms)	34,8	35,3	35,8	29,0	29,4	29,9
R (Ω)	26,9 10 ⁻³	27,1 10 ⁻³	27,3 10 ⁻³	18,7 10 ⁻³	18,8 10 ⁻³	19,0 10 ⁻³
ΔT (gr/s)	69,2	69,2	69,2	33,3	33,3	33,3
ΔU (V)	20,2	20,3	20,4	14,0	14,1	14,2

Tabel 4.3

I = 70 cm (knikstaven), stroom 750 A

Cirkelfrekwentie w en tijd T_{max} vanaf lossen tot aan de neutrale stand

Materiaal; roestvrijstaal ronde doorsnede

E = 21 10¹⁰ N/m² ; σ = 75 10⁻⁸ Ωm

m_s = 7,9 10³ kg/m³ ; C_p = 5 10² J/kg graad

d (cm) →	0,6			0,7		
Δ (cm)	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
l (cm)	70,5	71	71,5	70,5	71	71,5
φ (gr)	6,83	9,63	11,76	6,81	9,63	11,76
a' (cm)	8,37	11,8	14,57	8,37	11,88	14,57
a (cm)	14,52	20,49	25,23	14,52	20,49	25,23
theta (gr)	11,97	17,02	21,13	11,97	17,02	21,13
I (m ⁴)	6,36 10 ⁻¹¹	6,36 10 ⁻¹¹	6,36 10 ⁻¹¹	11,78 10 ⁻¹¹	11,78 10 ⁻¹¹	11,78 10 ⁻¹¹
P _B (N)	18,04	24,9	30,15	33,4	45,2	55,8
σ (N/m ²)	2,99 10 ⁸	4,17 10 ⁸	5,06 10 ⁸	3,49 10 ⁸	4,87 10 ⁸	5,91 10 ⁸
w (rad/s)	37,8	37,2	36,6	44,1	43,8	43,4
1/4 T (ms)	41,5	42,2	42,9	35,6	35,9	36,2
R (Ω)	3,74 10 ⁻³	3,76 10 ⁻³	3,78 10 ⁻³	2,7 10 ⁻³	2,77 10 ⁻³	2,79 10 ⁻³
ΔT (gr/s)	7,95	7,95	7,95	4,29	4,29	4,29
ΔU (V)	2,8	2,82	2,84	2,06	2,08	2,10

Tabel 4.4

l'=70 cm (knikstaven), stroom 750 A

Cirkelfrekwentie w en tijd T vanaf lossen tot aan de neutrale stand

Materiaal; fosforbrons. | ronde doorsnede

$$E = 11,4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$m_s = 8,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 15 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

$$C_p = 3,77 \cdot 10^2 \text{ J/kg graad}$$

Beproeving van een roestvrij stalen knikstaven.

De staven die getest werden hadden een diameter van 5 mm.

Bij het uitschakelen is de werking als volgt:

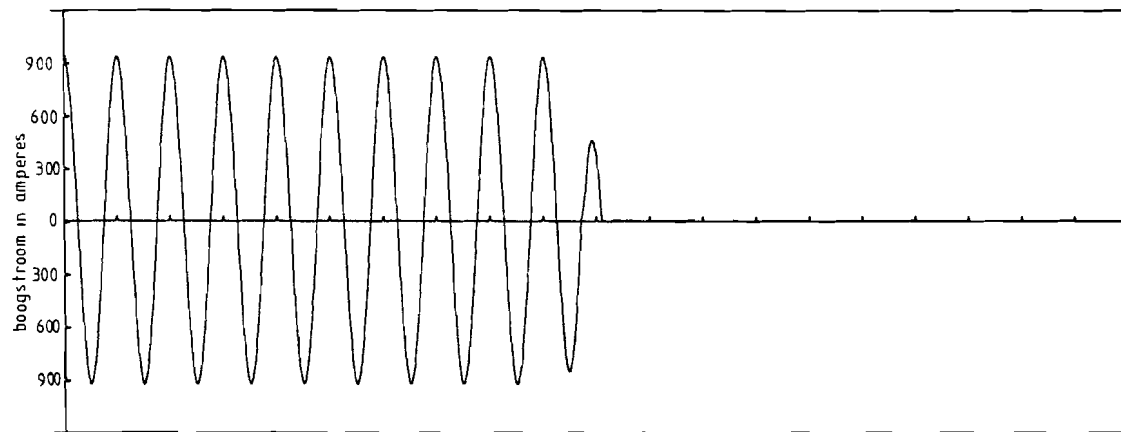
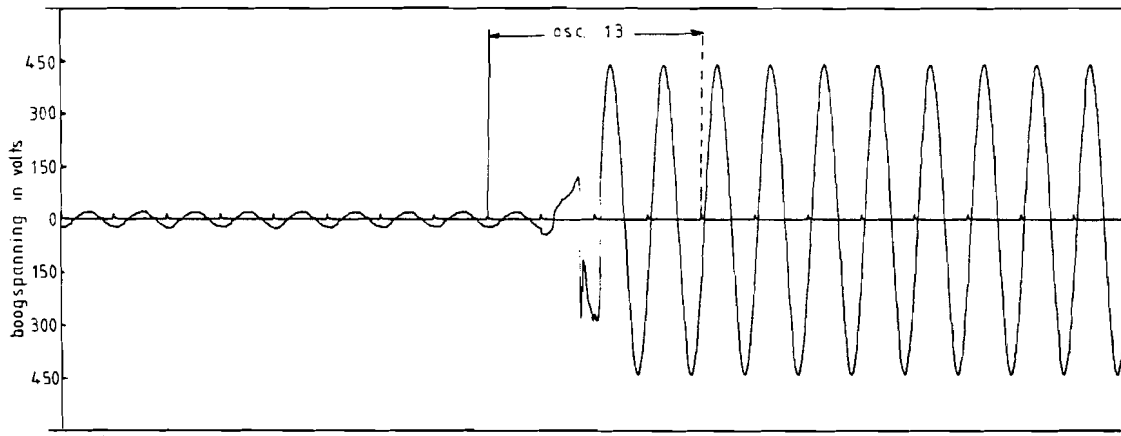
- tijdens het openen van de scheider zullen de knikstaven contact maken, terwijl de hoofdcontacten nog gesloten zijn.
- na het openen van de hoofdcontacten nemen de knikstaven die tegen elkaar drukken de stroomgeleiding over,
- de stroomgeleiding zal ophouden als de knikstaven een bepaalde stand bereiken omdat de staven dan van elkaar af schieten.

Bij het inschakelen is de volgorde omgekeerd en zullen de contacten elkaar op dezelfde plaats raken.

De oscillogrammen 4.12 en 4.13 geven de boogstroom en de boogspanning van een uitschakeling weer. We zien dat er een spanning van 18 V (eff) over de scheider staat als er alleen door de staven een stroom loopt. Deze waarde is te verwachten omdat roestvrij staal een hoge soortelijke weerstand bezit en komt overeen met hetgeen is berekend. De boogduur zelf is 55 ms. Verder zien we dat het karakter van de boogspanning hetzelfde is als we aantreffen bij de zweep. Dit komt omdat in allebei de gevallen er snel een opening wordt gemaakt.

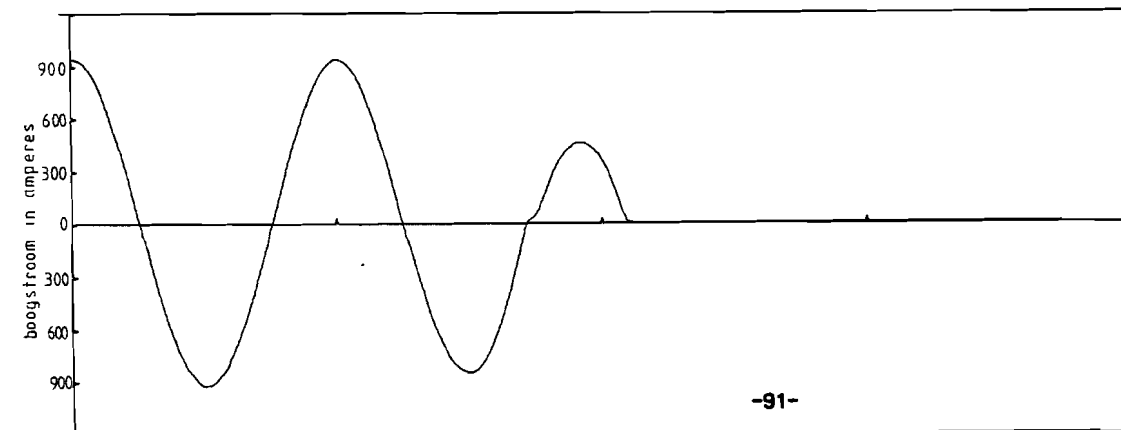
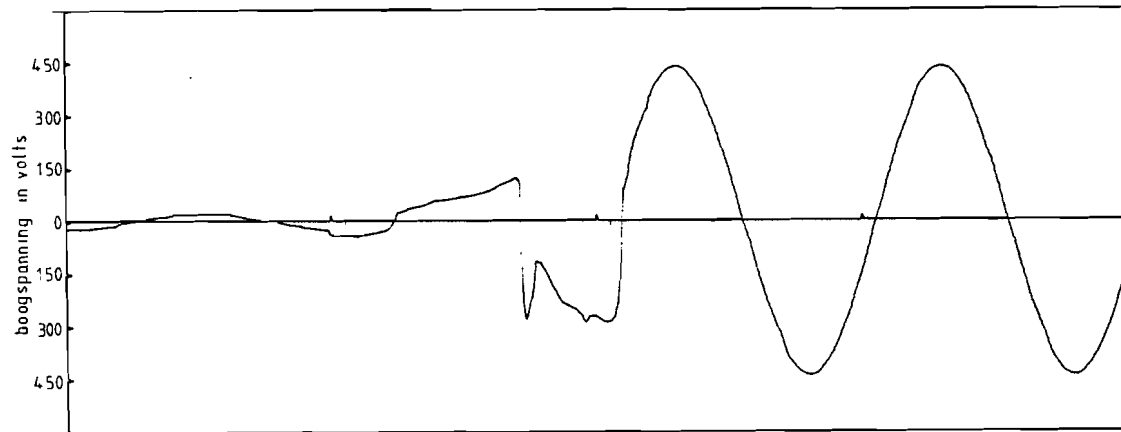
Het inschakelen wordt weergegeven in de oscillogrammen 4.14, 4.15 en 4.16. Ook hier zien we een niet te verwaarlozen spanning over de scheider. De boogduur van het uitschakelen zelf is gering en zal evenals bij de vorige constructies sterk afhankelijk zijn van de momentane waarde van de spanning.

De belangrijkste reden waarom deze constructie niet voldoet is de spanning van ongeveer 20 V over de scheiderarmen.



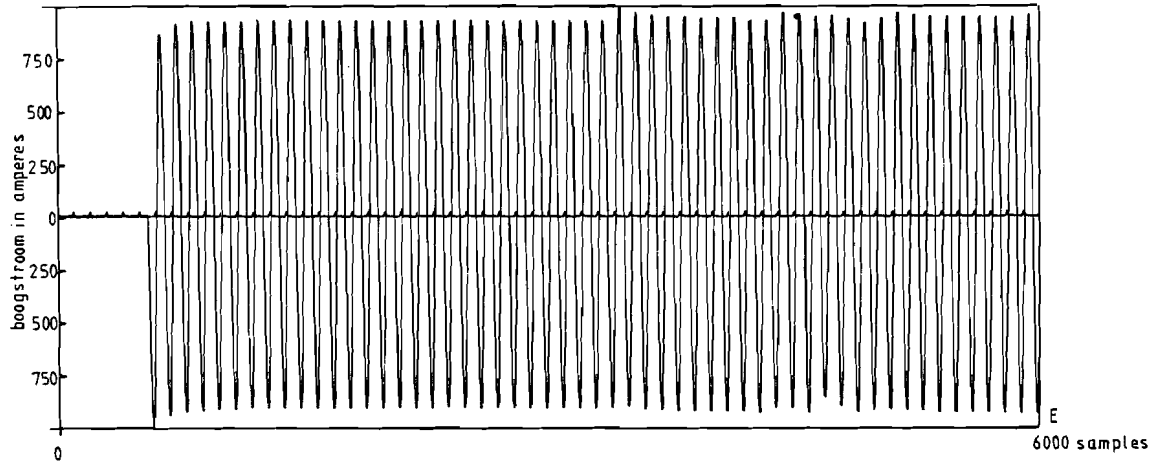
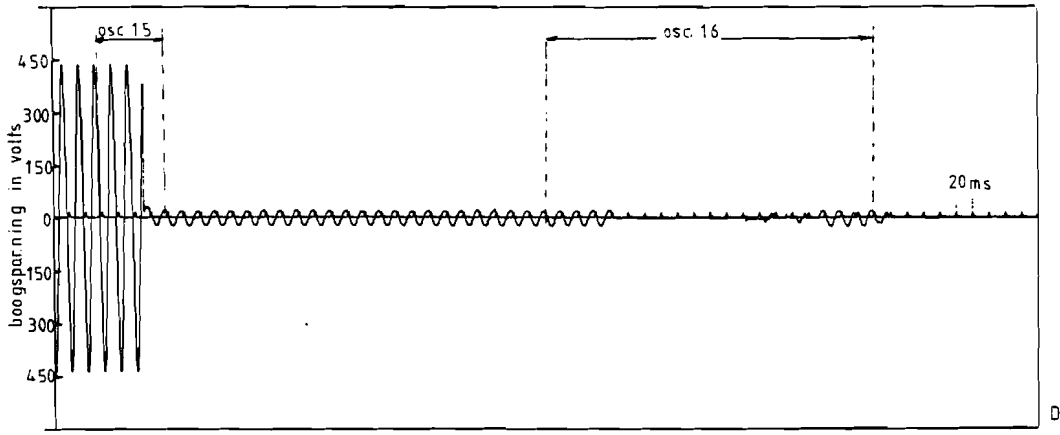
uitschakeling m.b.v. r.v.s. knikstaven \varnothing 5mm

Oscillogram 12



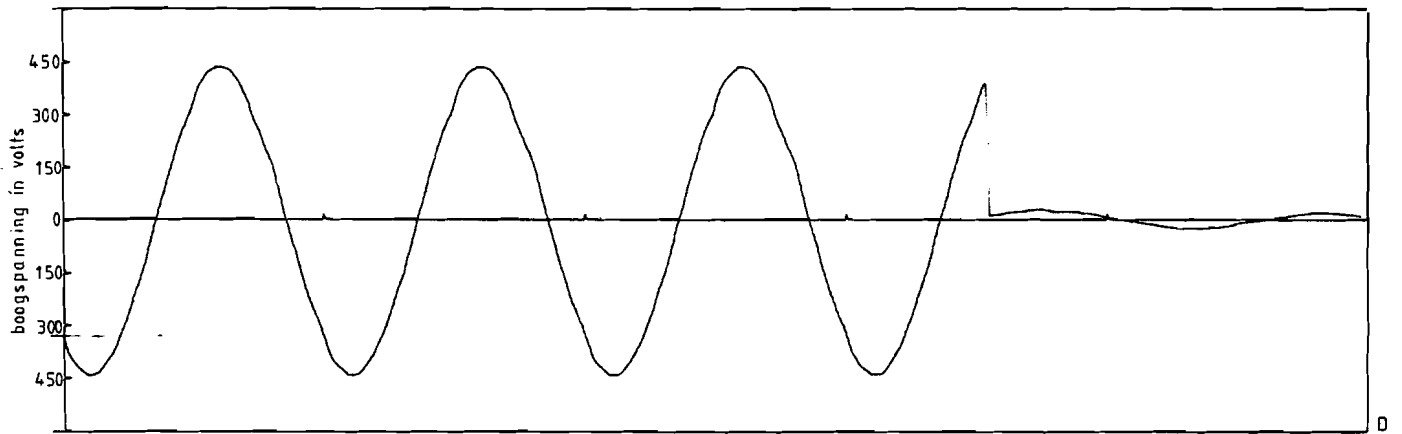
uitschakeling m.b.v. r.v.s. knikstaven \varnothing 5mm

Oscillogram 13



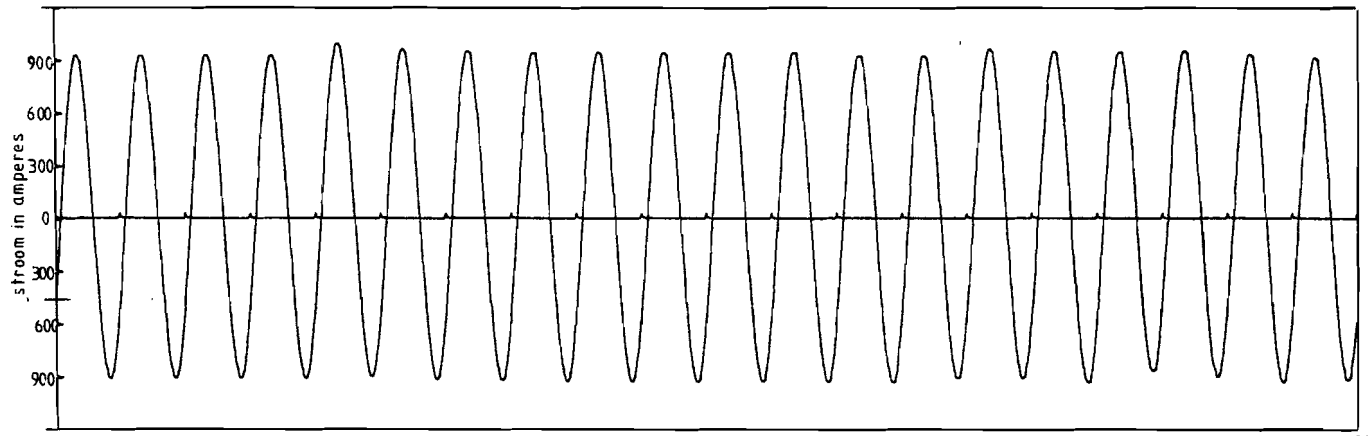
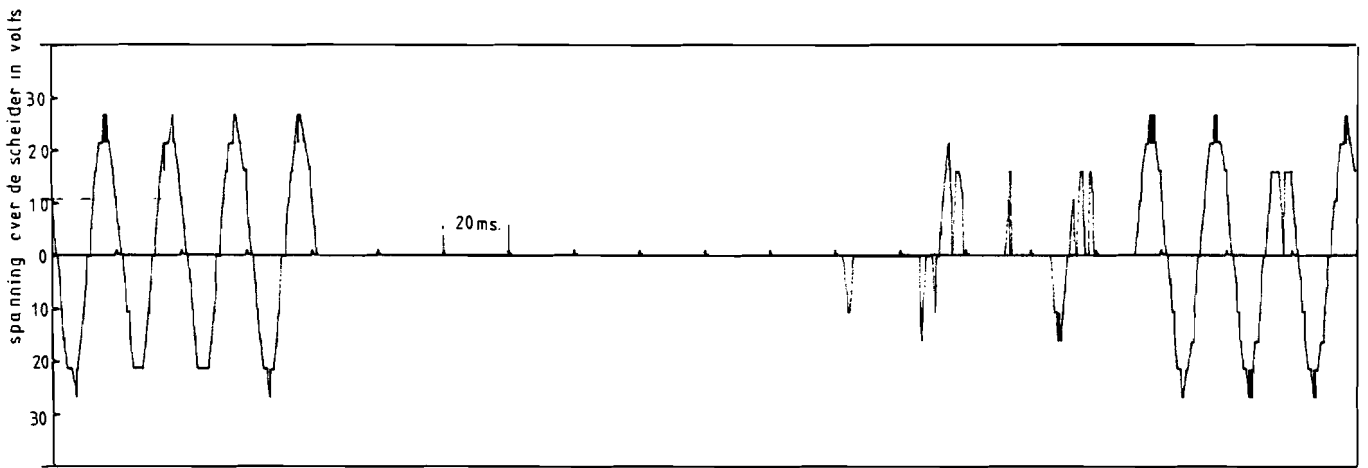
inschakeling m.b.v. r.v.s. knikstaven $\varnothing 5\text{mm}$

Oscillogram 14



inschakeling m.b.v. r.v.s. knikstaven $\varnothing 5\text{mm}$

Oscillogram 15



inschakeling m.b.v. r.v.s. knikstaven \varnothing 5 mm

Oscillogram 16

Beproeving van knikstaven van fosforbrons.

De vierde constructie is gelijk aan de derde constructie maar het materiaal van de staven is nu fosforbrons. Voor fosforbrons is gekozen omdat het een lage soortelijke weerstand heeft en omdat het uitstekende mechanische eigenschappen bezit.

Met deze constructie van fosforbrons is 120 maal uitgeschakeld en 100 maal ingeschakeld.

De foto's 5 tm. 10 geven de toestand van de koperen contacten weer na 50, 75 en 100 in- en uitschakelen.

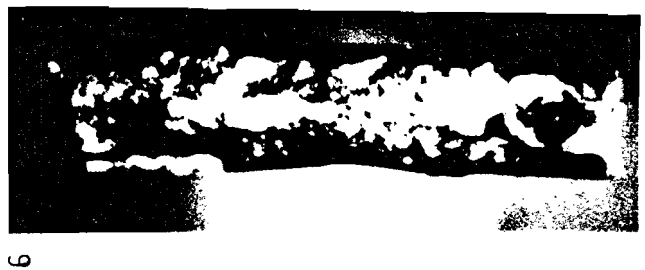
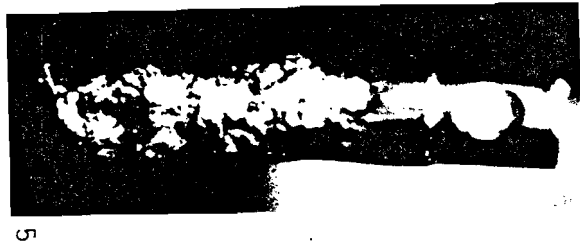
We zien dat de contacten na 100 maal in- en uitschakelen weliswaar beschadigd zijn, maar dat er nog altijd mogelijk is om ermee te schakelen.

De constructie voldoet dus aan de eerste eis van het eisenpakket.

Nadelen van constructies met knikstaven in deze vorm zijn:

- Instabiel karakter van de constructie bij inschakeling. Hiermee wordt het bewegen van de staven tijdens het inschakelen bedoeld.
- Gevoeligheid van de constructie voor corona en ijsafzetting.

Het eerste nadeel zou wellicht met eenvoudige maatregelen te verhelpen zijn. Het tweede nadeel echter zou omvangrijke kappen bovenop de scheider vergen.



De foto's 5 tm. 10 geven de toestand van de koperen contacten weer na 50, 75 en 100 in- en uitschakelen.

4.5.4 Nylon stripjes.

Deze laatste constructie is kan alleen inschakelen.

Bij het inschakelen is de werking als volgt

- tijdens het sluiten van de scheider zullen de hoofdcontacten in elkaar schuiven maar door de nylon stripjes zullen ze geen elektrisch contact maken
- het inlopende hoofdcontact zal voorgespannen worden
- juist voordat de scheider in zijn eindstand komt zal het inlopende contact van de nylon stripjes afschieten en zal er elektrisch contact ontstaan

Met deze constructie zijn 50 inschakelingen uitgevoerd. Uit opgenomen video-opname bleek dat er geen vonken optraden.

Na de 50 inschakelingen bleek ook dat er geen enkele beschadiging van de hoofdcontacten opgetreden was.

Door gebruik te maken van nylon stripjes kan men dus een inschakel-mechanisme maken dat uitstekend voldoet.

4.6 Conclusies.

Uit de oscillogrammen blijkt dat de boog bij het uitschakelen dooft t.g.v. twee verschijnselen die nauw met elkaar verbonden zijn.

- de boogspanning neemt toe in de tijd en is vrijwel gelijk aan de bedrijfsspanning bij defintieve doving
- door het in fase komen van stroom en spanning wordt het onderbreken makkelijker

Door het laatste verschijnsel wordt de kans op overspanningen vrijwel nihil. De boogduur ligt in de range van 40-80 ms.

Het verloop van boogstroom en boogspanning is erg afhankelijk van de momentane waarde van de spanning. Door deze momentane waarde wordt namelijk het inrush verschijnsel bepaald.

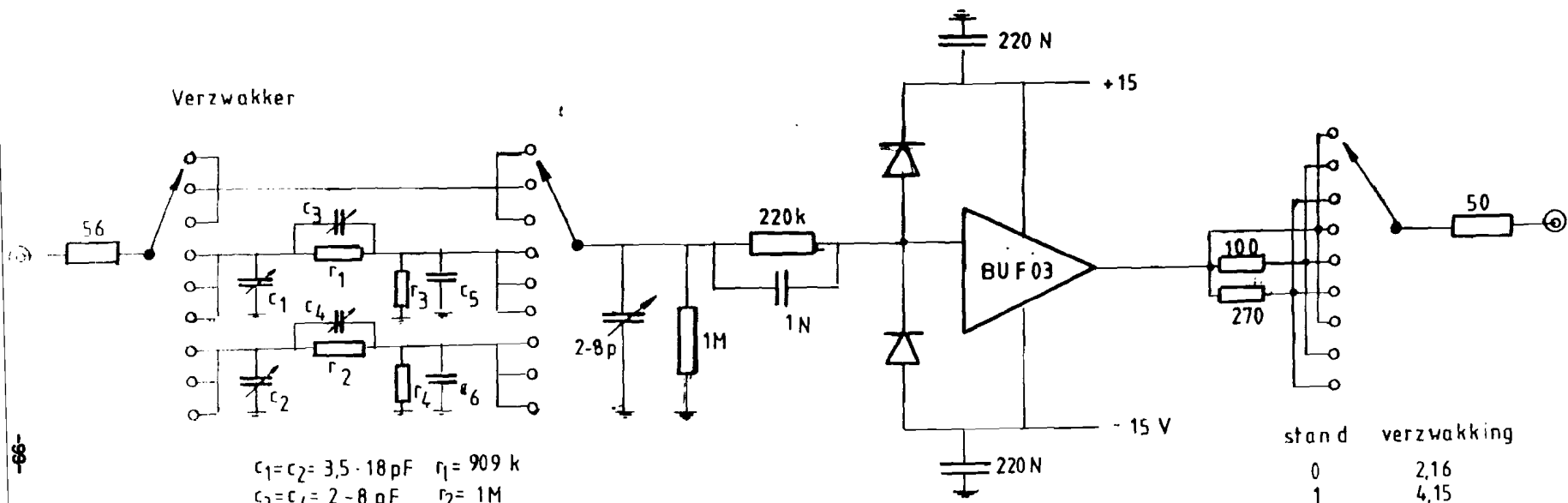
Wat betreft de toepasbaarheid van de diverse constructies kan men zeggen dat de constructie met de knikstaven van fosforbrons voldoet aan de eerste eis van het eisenpakket. Of het een constructie is die in de praktijk voldoet is de vraag omdat bleek dat vooral bij het inschakelen de constructie instabiel was en bovendien deze constructie omvangrijke corona en ijsafzetting afscherming zou vergen.

De beste oplossing werd gevonden in een combinatie van de zweep voor het uitschakelen en de nylon stripjes voor het inschakelen.

Literatuurlijst

- 1 Andrews F.E. et al.
INTERRUPTING ABILITY OF HORN GAP SWITCHES
AIEE Trans.,Vol. 69(1950), p. 1016-1027.
- 2 Powell A.H.
DIELECTRIC AND OTHER PROBLEMS IN THE DESIGN OF A NEW 330 kV
OUTDOOR AIR-SWITCH
AIEE Trans.,Vol. 73(1954), p. 31-36.
- 3 McElroy A.J. et al.
FIELD MEASUREMENTS OF SURGES WHEN SWITCHING IN 345 kV STATIONS
IEEE Trans. on Power Appar.&Syst.,Vol. 83(1964), p. 250-263
- 4 Fitzgerald J.P. et al.
345 kV SWITCHING SURGE TESTS EXPLORING DYNAMIC VOLTAGE AND
ARRESTER PERFORMANCE
IEEE Trans. on Power Appar.&Syst.,Vol. 84(1965), p. 426-434
- 5 Leuhring E.L., Fitzgerald J.P.
SWITCHING THE MANGNETIC CURRENT OF LARGE 345 kV
TRANSFORMERS WITH DOUBLE BREAK AIR SWITCHES
IEEE Trans. on Power Appar.&Syst.,Vol. 84(1965), p. 902-906
- 6 Committee Report.
RESULTS OF SURVEY ON INTERRUPTING ABILITY OF AIR BREAK SWITCHES
IEEE Trans. on Power Appar.&Syst.,Vol. 85(1966), p. 1008-1017.
- 7 Nurmo M.
ISOLATOR AS A SUBSTITUTE FOR A 110 kV TRANSFORMER BREAKER
Sakho Electricity in Finland, Vol. 39(1966), No 7-8 p. 213-217

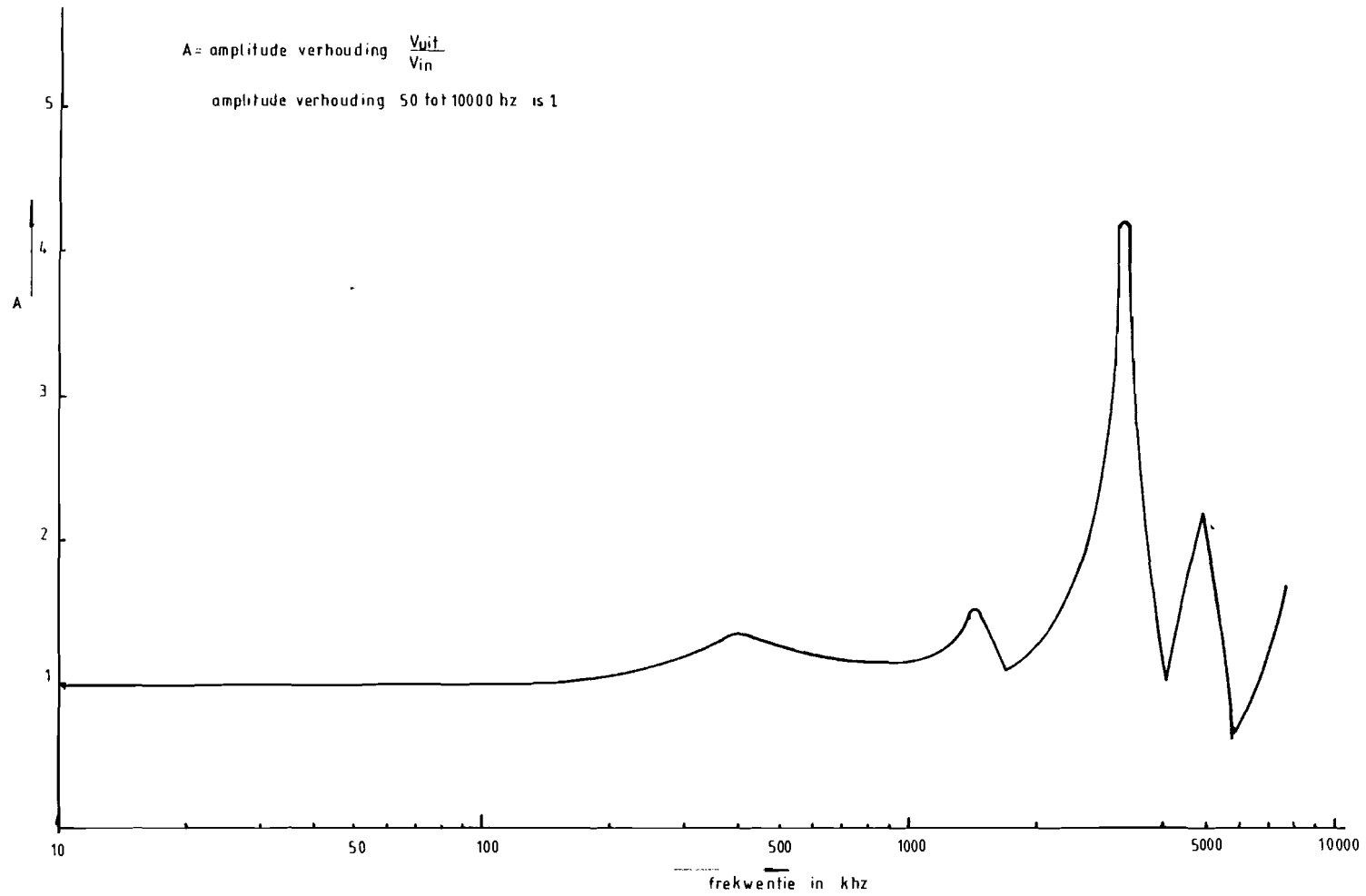
- 8 Tuomisto J.S., Ylostalo T.S.
BREAKING CAPACITY OF ISOLATORS AS A FUNCTION OF THEIR OPENING SPEED
Sakho Electricity in Finland, Vol. 40(1967) No 4 p. 110-113
- 9 International Electrical Commission I.E.C.
ALTERNATING CURRENT DISCONNECTORS (ISOLATORS) AND EARTHING
SWITCHES
Publication 129 (1975)
- 10 Aiztrauts E.V., Printsis-Rybakov A.K.
CLOSING AND TRIPPING AUTOTRANSFORMERS BY 330 kV ISOLATORS
Soviet Power Engineering (vert. Elektr. Stantsii. USSR),
No 6 (June 1974), Russische pagineering 63-64
- 11 Warrington A.R.
PROTECTIVE RELAYS
Chapman and Hall, London, third edition, 1977, p. 165
- 12 Ackerman P.
A STUDY OF TRANSMISSION LINE POWER ARCS
Enigneering Journal, Montreal Canada, vol 11, 1928, p. 309
- 13 Monseth, Robinson
RELAY SYSTEMS
McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., 1935, p. 47



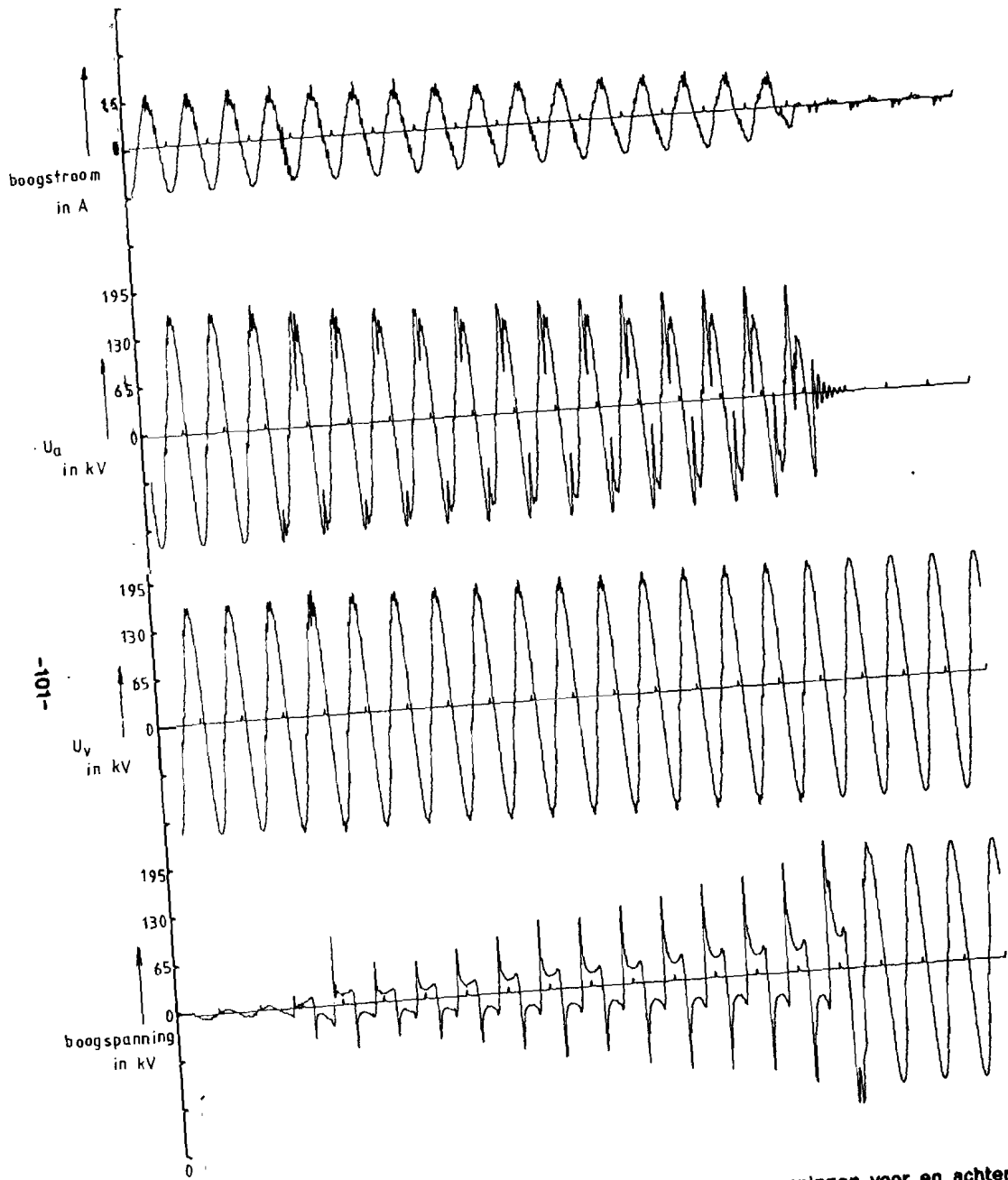
$c_1 = c_2 = 3,5 \cdot 18 \text{ pF}$ $r_1 = 909 \text{ k}$
 $c_3 = c_4 = 2 - 8 \text{ pF}$ $r_2 = 1 \text{ M}$
 $c_5 = 56 \text{ pF}$ $r_3 = 110 \text{ k}$
 $c_6 = 470 \text{ pF}$ $r_4 = 10,2 \text{ k}$

stand	verzwakking
0	2,16
1	4,15
2	7,54
3	21,1
4	41,6
5	75,7
6	204
7	385
8	661

Bijlage 3.1 Schema verzwakker

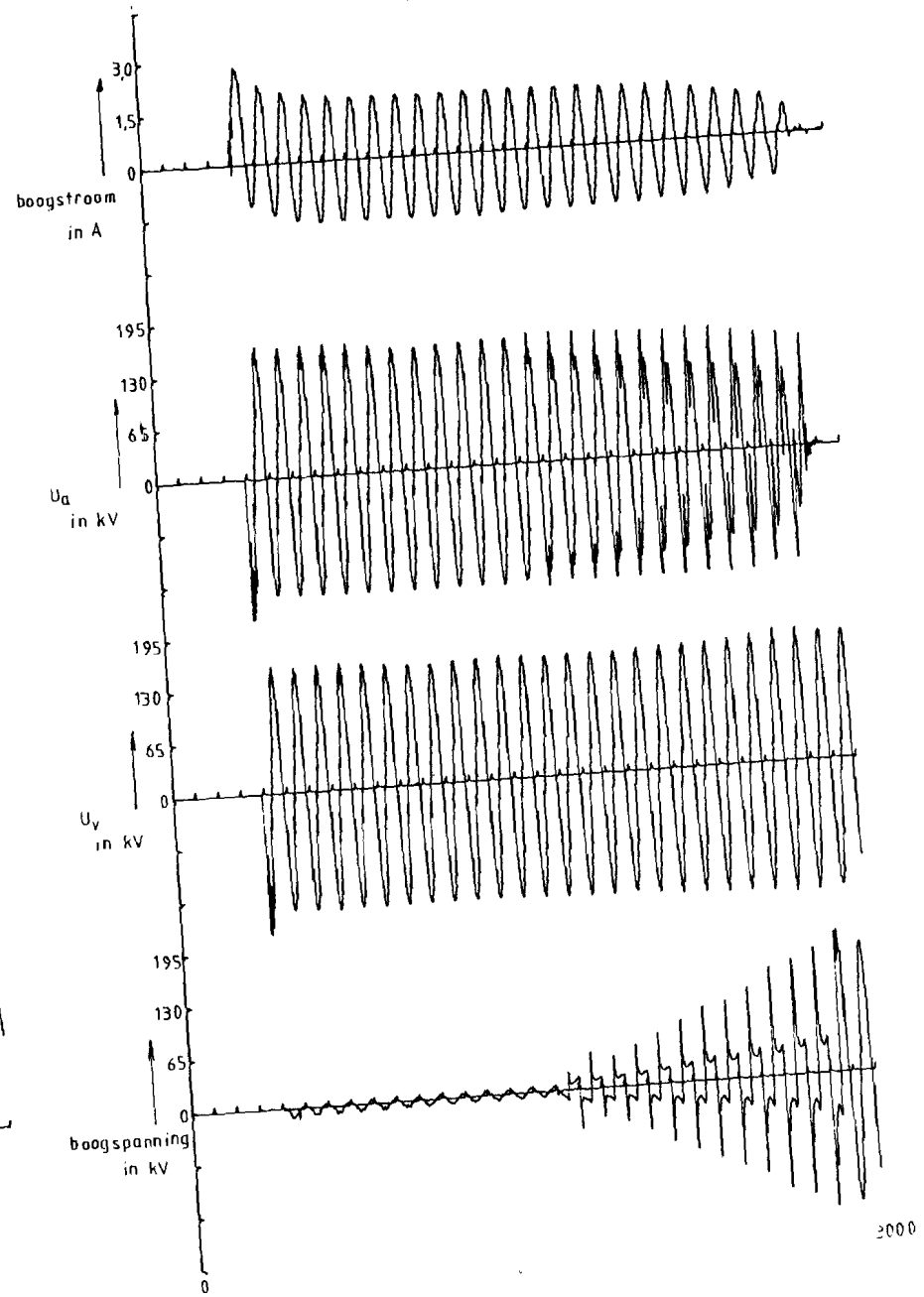


Bijlage 3.2 Frequentie karakteristiek van de capacitieve deeler met verzwakker.

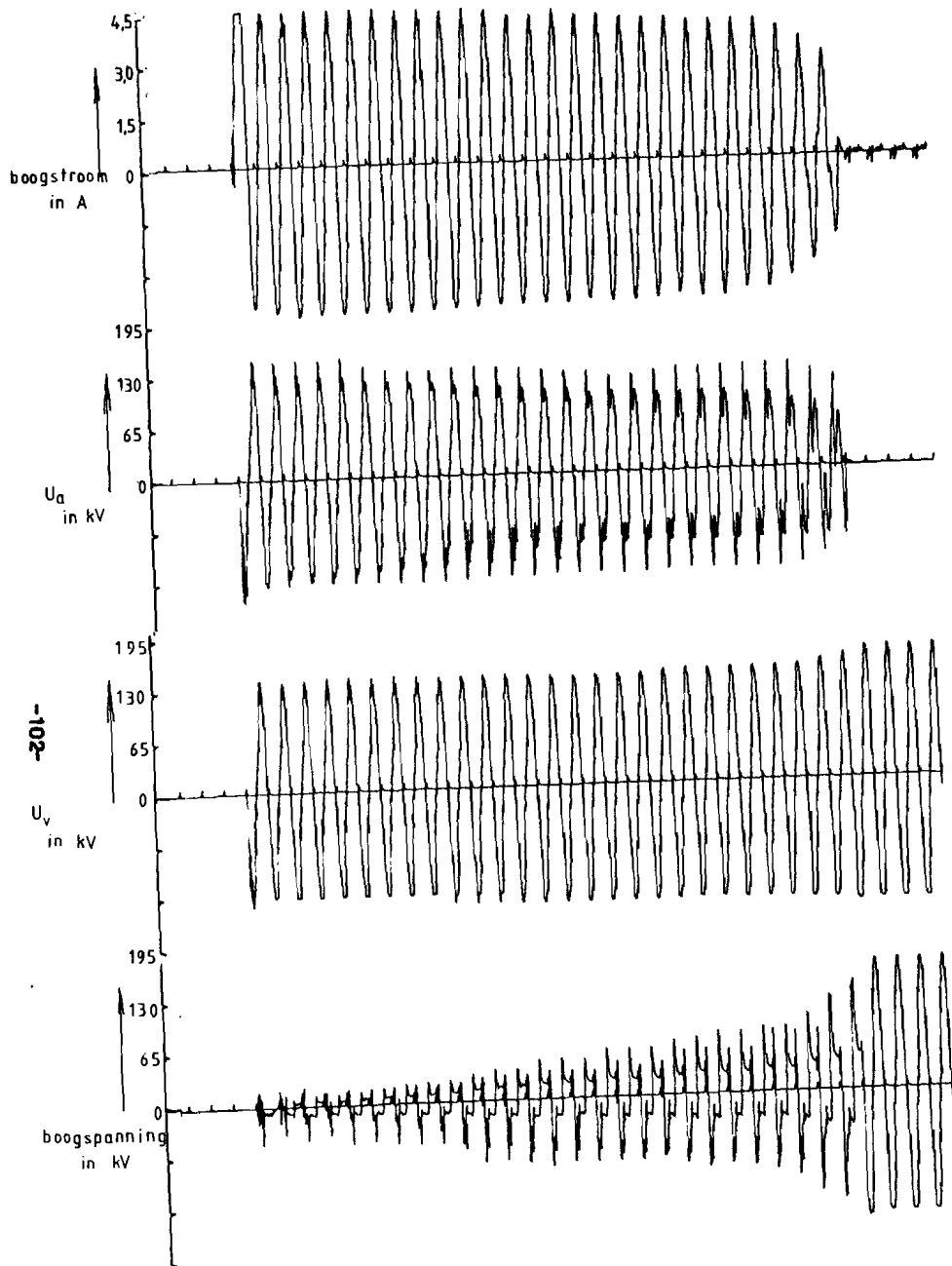


0,82 A

Bijlage 3.3 Boogstroom , boogspanning en de spanningen voor en achter de schelder.
(0,82 A en 1,10 A)

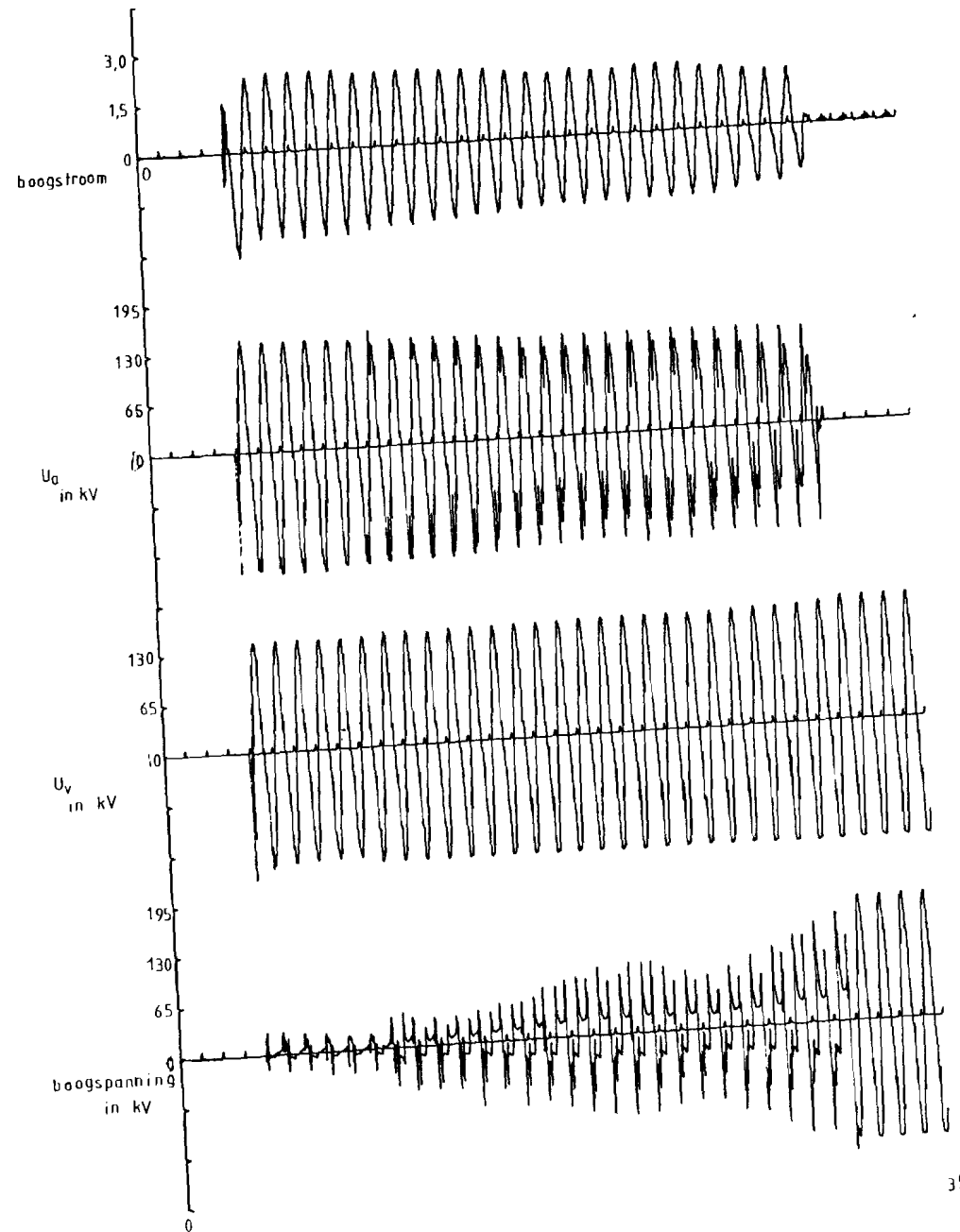


1,10 A

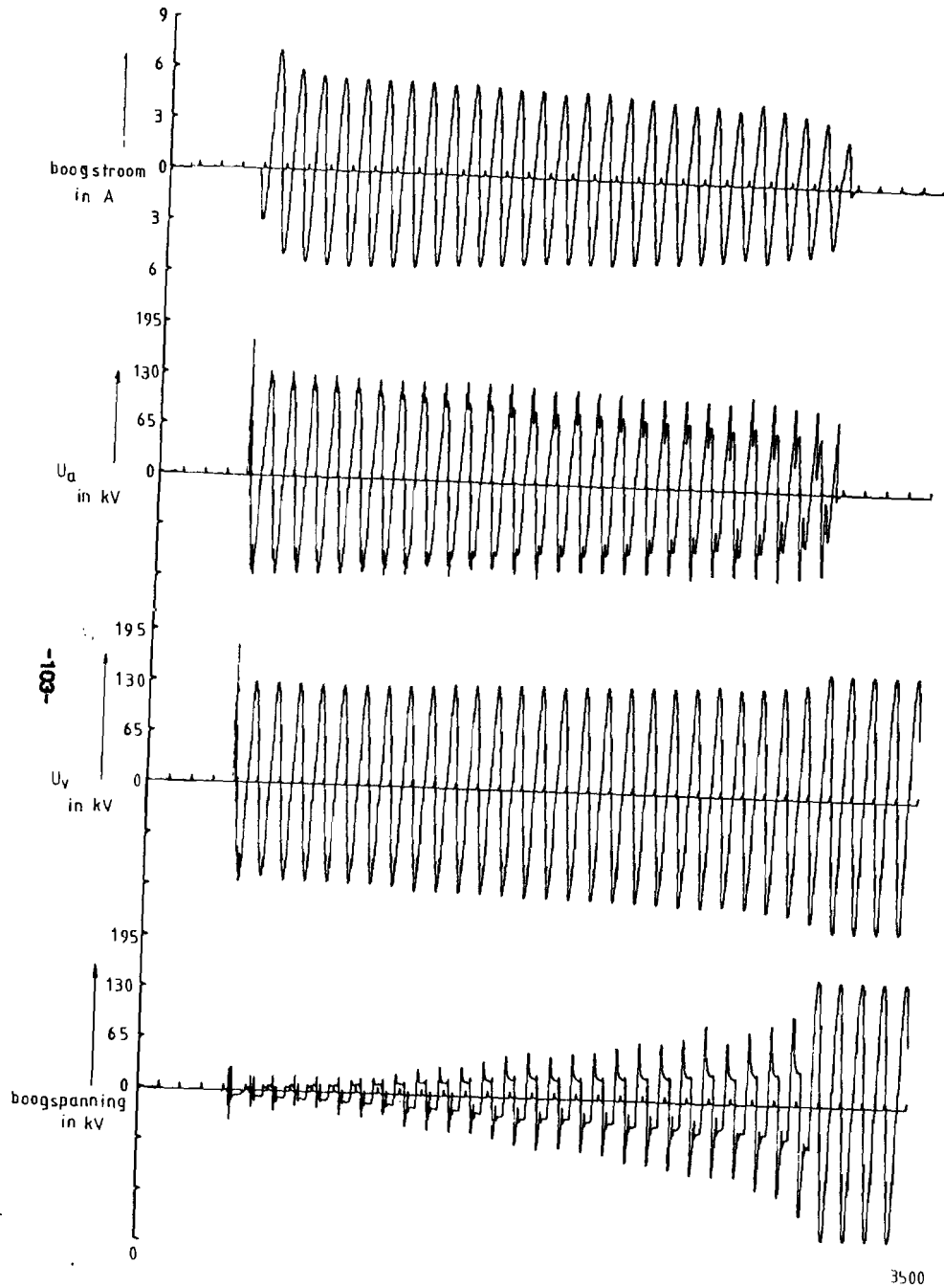


2,64 A

Bijlage 3.4 Boogstroom , boogspanning en de spanningen voor en achter de schelder.
(1,34 A en 2,40 A)

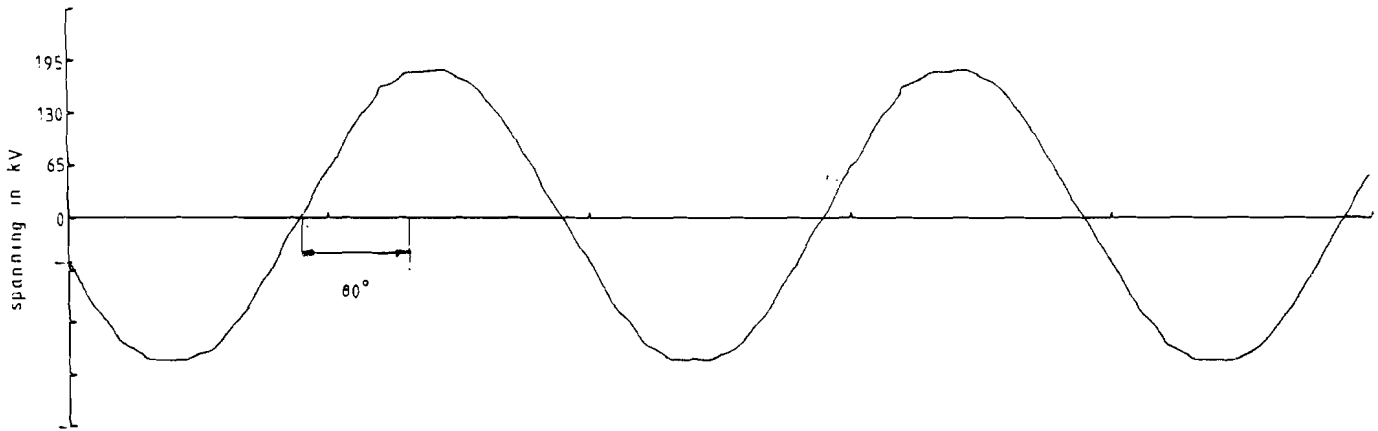
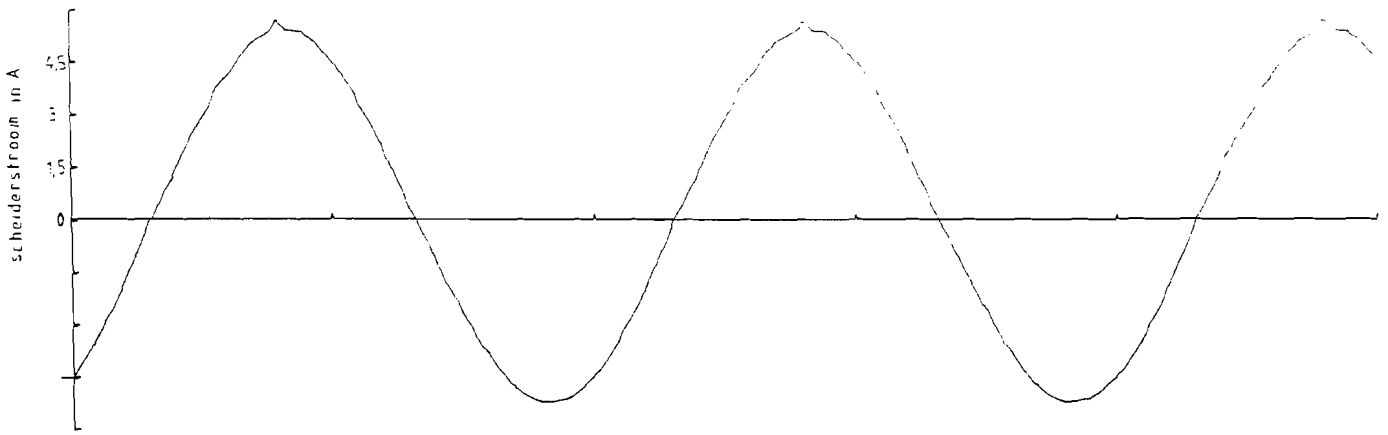


1,34A

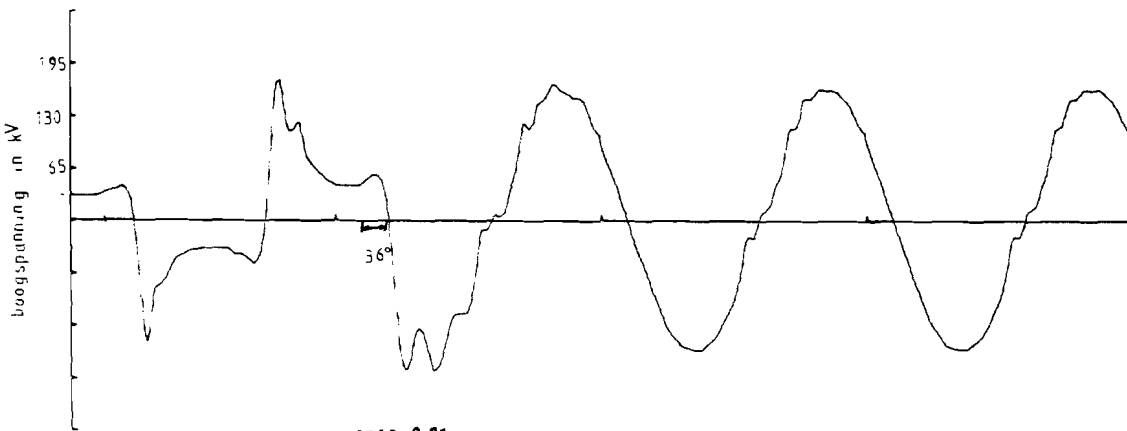
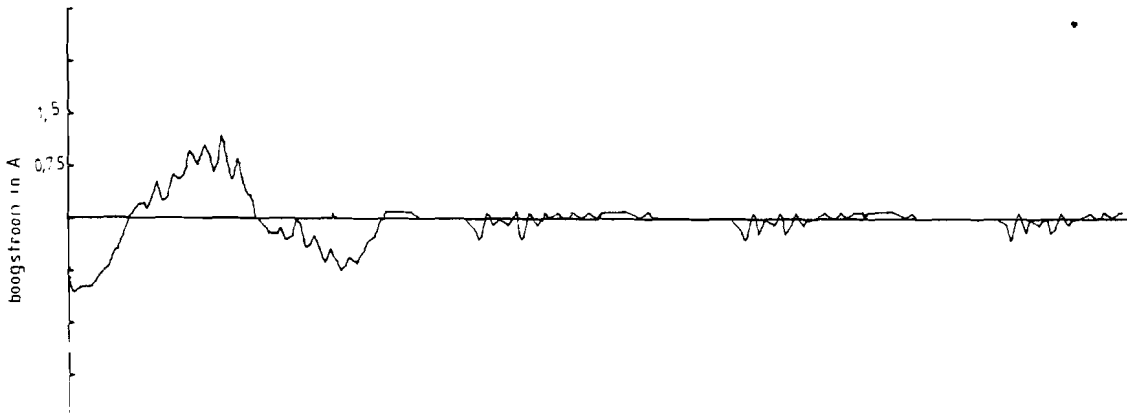


Bijlage 3.5 Boogstroom , boogspanning en de spanningen voor en achter de scheider.
(3,47 A)

3,47 A



Bijlage 3.6 Stroom en spanning van het circuit in gesloten toestand (boven).
 Boogstroom en boogspanning op het moment dat de boog definitief dooft (onder).



$\cos \varphi 0,81$

onderbreking 0,8 A