

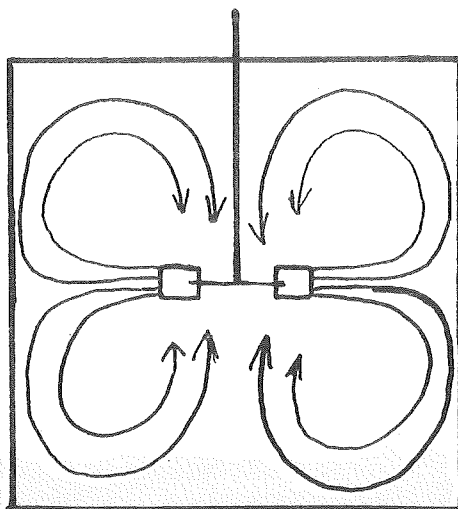
180

Archief

LABORATORIUM VOOR FYSISCH TECHNOLIE

AFSTUDEERVERSLAG N^o

MENGINC EN VERBLIJFTIJDSPREIDING IN EEN VAT MET EEN
TURBINEROERDER

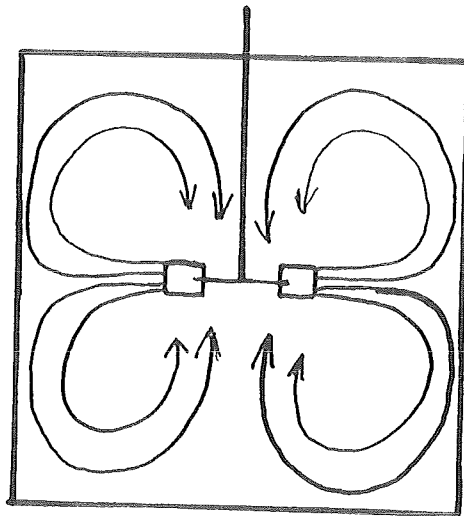


A.Th. ten Houten
Delft, januari 1965.

LABORATORIUM VOOR FYSISCH TECHNOLIE

AFSTUDEERVERSLAG N^o

MENGINC EN VERBLIJFTIJDSSPREIDING IN EEN VAT MET EEN
TURBINEROERDER



A.Th. ten Houten
Delft, januari 1965.

Inhoud.

	pag.
Samenvatting	2
I. Inleiding	3
II. De meetopstelling	7
III. De niet-doorstroomde menger	9
1. Uitwisseling tussen boven- en onderhelft van de menger	
a. Statistische methode	9
b. Meting met twee gescheiden geleidbaarheidscellen	10
2. Metingen met een plaatselijke cel	11
a. Het "oog".	11
b. Metingen achter een keerschot	12
c. Meting op de bodem in de hartlijn van het vat	13
d. Ontkleuringsreactie	13
IV. De doorstroomde menger	14
1. De invloed van de plaats van invoer op de dispersie	14
2. Responsie aan de uitgang op een puls aan de ingang	15
3. Kortsluiting tussen invoer- en uitvoer-opening	18
V. Conclusies	21
VI. Appendix	22
1. Beschrijving van de pulsresponsie aan de uitgang met twee e-machten	22
2. In hoeverre mogen we de uitspoellijn als e-macht beschouwen	23
3. De impulsen bij kortsluiting	25
VII. Notatie	27
VIII. Literatuur	28

Samenvatting.

Door middel van de pulsresponsietechniek werd in het turbulente gebied het dynamische gedrag van een vat met een turbine-roerder bestudeerd.

De uitwisseling tussen de boven- en onderhelft van het vat bleek in het niet-doorstroomde geval, onafhankelijk van het toerental, goed te zijn. Ook de uitwisseling tussen de circulerende stroom en het gebied van het circulatiecentrum bleek goed te zijn. "Stille" gebieden werden niet waargenomen, ook niet achter de keerschotten.

In het doorstroomde vaatje werd de responsie aan de uitgang bepaald op een puls aan de ingang. De uitspoellijn bleek na ongeveer vijf circulatietijden een aflopende kromme te zijn, waarvan de tijdconstante overeenstemde met de gemiddelde verblijftijd berekend als het quotiënt van het vatvolume en de doorvoerstroom. Voor tijden kleiner dan vijf circulatietijden was in vrijwel alle gevallen nog een circulatiepatroon te onderkennen, maar een goede beschrijving voor dit deel van de kromme werd niet gevonden.

Kortsluiting in het vat tussen in- en uitvoer werd gemeten door de looptijden van de responsiekrommen te bepalen. Het toerental van de roerder bleek van primair belang, omdat hierdoor de impuls van de circulatiestroom wordt bepaald, maar ook de richting van de invoerstroom is zeer belangrijk. De verhouding van de impuls van de circulatiestroom en die van de invoerstroom bepaalt of er kortsluiting optreedt. Bij het roerdertoerental, waarbij kortsluiting begon op te treden, bleek deze verhouding bij alle debieten constant te zijn. Door de invoer in het deksel vrijwel in het verlengde van de uitvoer te plaatsen, is de kans op kortsluiting veel groter dan bij invoeren van de voeding in de zijwand van het vat.

I. Inleiding.

Een vat met een turbinoerder wordt veel gebruikt als menger en als tankreactor. Het vat is meestal cilindervormig met de roerder in de as van het vat. Wanneer in het vat de vloeistofhoogte gelijk aan de vattendiameter wordt genomen en men plaatst de roerder halverwege tussen bodem en vloeistofniveau, dan ontstaat een zeer systematisch stromingspatroon in het vat (zie fig.1). De rechthoekige bladen aan de schijf van de turbinoerder "spuiten" de vloeistof tangentieel en radiaal weg. Door vier keerschotten bij de wand aan te brengen, wordt de tangentiële snelheidscomponent van de vloeistof onderdrukt en blijft als hoofdstroom die de roerder verlaat, een radiale stroom over. Deze radiale vloeistofsroom splitst zich aan de wand in twee deelstromen langs de wand, een opwaartse en een neerwaartse.

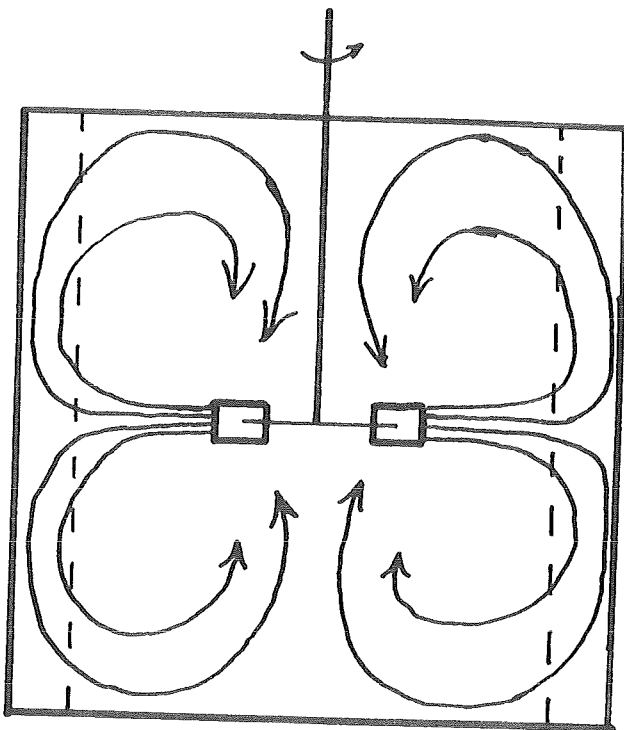


fig.1.
stromingspatroon in een
menger met een turbine-
roerder ("batch").

Aan de onder en bovenbegrenzing van de vloeistof buigen de stroomlijnen van de wand af naar de as van de roerder en vervolgens lopen zij langs de as weer naar de roerder. Er ontstaat dus een regelmatige circulatie in het vat. Het feit dat een circulatietijd t_c kon worden gemeten duidt op een systematiek, maar niet alle stroomlijnen zijn even lang en bovendien zijn de snelheden langs de stroomlijnen verschillend. De circulatietijd is gedefinieerd als het quotiënt van de gemiddelde circulatiesnelheid en de gemiddelde stroomlijn-lengte. De stroomlijnen die door de roerder lopen, komen er zeer goed "gemengd" weer uit. Door de grote snelheden, die in vergelijking met de circulatiesnelheid, in het gebied om de roerder heersen, is de verblijftijd in dit gebied zeer klein ten opzichte van de circulatietijd.

Holmes en Voncken (1,2) hebben voor een ladingsgewijs bedreven vat aangetoond, dat de circulatietijd t_c af hangt van het roerdertoerental n , de tankdiameter D , de turbinediameter d (gemeten over de bladeinden) en het Re-getal voor de roerder, $Re = \rho n d^2 / \eta$, waarin ρ de dichtheid en η de dynamische viscositeit van de vloeistof is. In dimensieloze vorm geven zij: $\tau \equiv n t_c (d/D)^2$ als functie van Re . Voor $Re \geq 2 \times 10^4$ is τ een constante en gelijk aan: $0,85 \pm 0,03$.

De grafiek van het opgenomen vermogen tegen Re loopt voor alle roerders, zowel met als zonder keerschotten, eveneens horizontaal voor $Re \geq 2 \times 10^4$. (3). De waarde $Re = 2 \times 10^4$ is daarom als minimum Re -getal voor turbulentie aangenomen.

Experimenteel kon de circulatietijd gemeten worden met de zoutpuls-techniek. Met een injectiespuit met een lange naald werden op het vlak van de roerder enige cc verzadigde KCl-oplossing (of zuur) gespoten. Met een concentrisch om de roerder geplaatste geleidbaarheidscel werd de verandering van de geleidbaarheid van het water gemeten en geregistreerd. Bij lage concentraties is de elektrische geleidbaarheid recht evenredig met de electrolyt-concentratie, zodat de geregistreeerde krommen het concentratieverloop na een zoutpuls als functie van de tijd voorstelden.

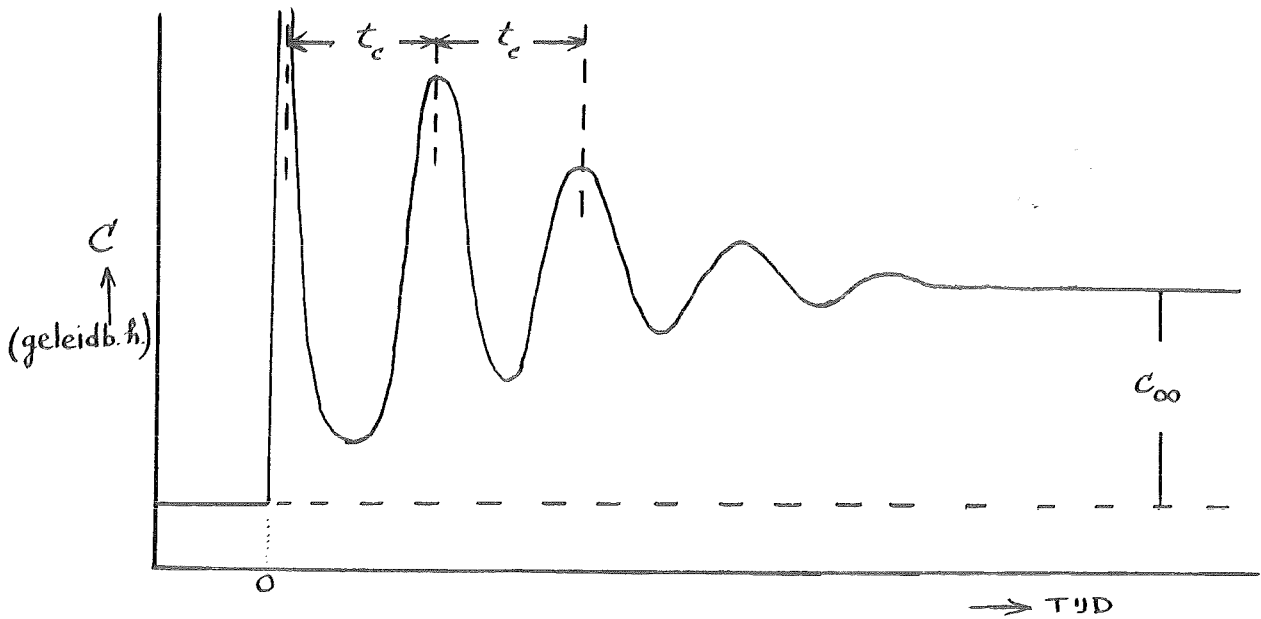


fig.2. Concentratieverloop na een zoutpuls in een "batch"-menger met een turbineroerder.

In fig.2 is een beeld gegeven van de responsie van een cel om de roerder op een zoutpuls bij de roederschijf. De slingering in de kromme, voordat de eindconcentratie c_{∞} wordt bereikt, ontstaat door de circulatiestroom in het vat. De maxima en minima nemen af, maar worden ook breder met de tijd. Dit wordt veroorzaakt door de dispersie van de zoutpuls gedurende de circulatie. Volgens Holmes en Voncken (2) is deze dispersie samengesteld te denken uit: 1^o. het verschil in lengte en snelheid langs de stroomlijnen, 2^o. de turbulente dispersie en 3^o. de moleculaire diffusie. De dispersie is onafhankelijk van het toerental mits $Re \gg 2 \times 10^4$. Door de "circulatiestroombuis" als een gerecirculeerde buisreactor op te vatten, kan de dispersie met een longitudinale dispersiecoëfficiënt D_1 worden beschreven. Op deze wijze is een wiskundige benadering van de experimentele kromme in het "batch"-geval mogelijk (zie 2):

$$\frac{c}{c_{\infty}} = \sqrt{\frac{Bo}{4\pi\theta_1}} \sum_{j=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{Bo}{4\theta_1} (j-\theta_1)^2 \right]$$

waarin: $\theta_1 = t/t_c$, $Bo = L\bar{v}_1/D_1$, L = lengte buis, \bar{v}_1 = gem. snelheid in buis, j = aantal keren dat de buisreactor doorlopen is bij het bepalen van c_{τ}

Het dimensieloze getal van Bodenstein Bo is een maat voor de verhouding van het stoftransport door meevoering en het stoftransport door dispersie.

Door het wiskundig model voor verschillende waarden van Bo op een digitale rekenmachine te laten uitrekenen konden Holmes en Voncken in een grafiek (fig. 3) het theoretische verband tussen c/c_{∞} en Bo bij verschillende waarden van θ_1 uitzetten. In deze grafiek kon uit de experimentele c/c_{∞} een waarde voor Bo worden afgelezen.

De snelheidsverdeling van de vloeistof in een vat met een turbineroerder in boven omschreven geometrie was reeds bekend uit de waarnemingen van Nagata e.a. (4).

In aansluiting op de resultaten van Holmes en Voncken voor het "batch"-geval heeft Rotte (5) metingen aan een doorstroomd vat gedaan. Hij handhaafde zoveel mogelijk de symmetrie van de "batch"-opstelling, door bij de as, op de roerder, in te voeren en in het midden van de bodemplaat uit te voeren. Met de geleidbaarheidscel om de roerder en in de uitgang werden pulsresponsies bepaald, waarbij de experimenteel gevonden uitspoellijn een tijdconstante had gelijk aan de helft van de berekende gemiddelde verblijftijd ($= V/\phi_v$). Later werd een fout in de elektrische schakeling gevonden, die deze factor 2 verklaarde, zodat inderdaad de uitspoellijn voor grotere tijden met de gemiddelde verblijftijd kan worden beschreven.

Als voortzetting van de metingen van Rotte lag het voor de hand de uitwisseling te meten tussen de mengerhelften, die door het vlak van de roerder worden gescheiden. Deze uitwisselingsstroom, een belangrijk gegeven, werd op twee manieren bepaald in een niet-doorstroomd vat. Verder werd met een plaatselijke cel op verschillende hoogten de responsie op een zoutpuls gemeten, om een idee te krijgen van de uitwisseling tussen het circulatiecentrum en de stroming er omheen.

In een doorstroomd vaatje werd tenslotte gemeten: de invloed van de plaats van invoer, de verblijftijdsspreiding en de kortsluiting.

In de vorm van een stipendium verleende het Delfts Hogeschoolfonds financiële steun gedurende een deel van dit onderzoek.

II. De meetopstelling.

Aan de hand van fig.4 kan de opstelling worden besproken. De toevoerstromen naar de menger werd, via een rotameter, aan een vat met een overloop onttrokken. Op twee plaatsen kon de voeding in de menger worden ingevoerd, in het deksel halverwege tussen de as en de wand, of in de zijwand op $\frac{1}{4}$ D vanaf het deksel; in beide gevallen werd midden tussen twee keerschotten ingevoerd, terwille van de symmetrie. De uitvoer was in het midden van de bodemplaat geplaatst met daarachter direct een overloop met een ontluchting om de druk in het vaatje te regelen. Om de menger zelf luchtvrij te maken was de deksel naar de as toe iets afgedraaid, zodat de onderkant van de deksel de vorm van een zeer platte kegel had, met een hoogte van 5 mm en een diameter gelijk aan de tankdiameter. Luchtbelletjes verzamelden zich bij de as waar zij via een ontluchtingspijpje het vat konden verlaten; een klein waterstroompje door het ontluchtingspijpje zorgde ervoor dat ook kleine luchtbelletjes werden weggezogen.

De zoutpuls kon op twee plaatsen worden gegeven: in de hartlijn van de invoerpijp, dicht bij de plaats van invoer en δ p de roerderschijf door een lange naald die door het deksel was gestoken. Het uiteinde van de naald in de invoerpijp was voorzien van een verdeelkapje, dat ervoor moest zorgen, dat de puls zo goed mogelijk over de voedingsstroom werd verdeeld. In het deksel waren nog twee gaten geboord, om de plaatselijke cel door te laten voor de responsiebepaling in het "oog"^{*} en achter het keerschot.

* Onder het "oog" wordt verstaan het gebied waar binnen zich het circulatiecentrum beweegt; zie verder II,2.

Voor het meten van de uitwisselingsstroom tussen boven en onderhelft van het vaatje waren twee gescheiden geleidbaarheidscellen A en B aangebracht. Elke cel was om de roerder geplaatst en bestond uit een grote zilveren ring aan de wand en een kleinere ring ongeveer 3 cm van de wand, om zo goed mogelijk de opwaartse en neerwaartse deelstromen, die aan de wand ontstaan, apart te kunnen meten. De geleidbaarheids-cel in de uitvoerbuis bestond uit drie zilveren draden, evenwijdig aan elkaar, in een vlak loodrecht op de stromingsrichting geplaatst. De buitenste draden werden geaard. Een geleidbaarheidsmeter gaf de geleidbaarheid van de aangesloten cel weer; de pulsresponsie van de verschillende cellen werd op een elektronische schrijver geregistreerd als deze op de meter was aangesloten. Het signaal uit de geleidbaarheidsmeter werd versterkt en voor de grondgeleidbaarheid gecompenseerd op de recorder overgebracht (versterkerschakeling: zie onderaan fig. 4). Het tijdstip van injectie ($t=0$) werd op de schrijver aangegeven door, gelijktijdig met het leegdrukken van de injectiespuit, een schakelaartje te bedienen dat de draden naar de recorder even kort sloot. Op de grafiek ontstond door deze kortsluiting een korte onderbreking.

Het door Rotte gebruikte vaatje had een diameter van 22,4 cm en was opgenomen in een met de in fig. 4 weergegeven opstelling vergelijkbare opstelling. De metingen van het effect van de plaats van invoer op de dispersie werden in dit vaatje gedaan met een cel om de roerder. Als verdere verschillen met de besproken opstelling kunnen worden genoemd:

1^o zijn vaatje was open van boven, waardoor bij sneller roeren lucht in de vloeistof werd gezogen;

2^o zijn vaatje was van ondoorzichtig PVC, waardoor visuele waarnemingen niet mogelijk waren;

3^o de tankinhoud was veel kleiner (9 in plaats van 20 L), waardoor de verblijftijden korter waren.

De afmetingen van mijn vat waren:

menger $H=D=29,2$ cm; roerder $d=\frac{1}{3}D=9,7$ cm (bladbreedte $\frac{1}{4}d$ en bladhoogte $\frac{1}{5}d$); 4 keerschotten van $1/10 D$; in- en uitvoerdiameter 2,1 cm; rotameterdebiet 0-450 ml/sec.

III. De niet doorstroomde menger.

III,1 De uitwisseling tussen boven- en onderhelft van de menger.

a. De statistische methode.

De uitwisseling tussen de twee mengershelften wordt bepaald door de kans p dat een vloeistofelementje van compartiment wisselt, wanneer het door de roerder komt. Visueel kon deze kans globaal worden bepaald door een klein polystyreen bolletje, van gelijke dichtheid als de vloeistof, als een zichtbaar volume-elementje te volgen. Het aantal opeenvolgende circulations dat het bolletje in een compartiment uitvoerde werd geteld. Afhankelijk van de uitwisselingskans is er dus een statistische verdeling van het aantal waarnemingen van 1, 2, 3, ..., enz. circulations te vinden, door een groot aantal waarnemingen te doen. De gevonden verdeling van 1000 waarnemingen werd vergeleken met de berekende verdelingen voor verschillende waarden van p . De berekening van de verdeling gaat als volgt: als het totaal aantal waarnemingen N is wordt het aantal waargenomen wisselingen na: één circulation $p.N$, twee circulations $p(1-p).N$, drie circulations $p(1-p)^2.N$, enz.

In fig. 5 zijn de berekende verdelingen gegeven voor $p=0,5$, $p=0,45$ en $p=0,4$ met de waargenomen verdeling. Uit deze figuur volgt, dat, bij $n=200$ t/min. waargenomen, de uitwisselingskans een waarde moet hebben die ligt tussen 0,4 en 0,45. Deze methode was niet toepasbaar bij hogere toerentallen dan $n=200$ t/min omdat men dan visueel het bolletje niet meer kon volgen als het door de roerder ging. Gedacht werd dat een geleidende "coating" van het bolletje een elektrische meetmethode mogelijk zou maken, maar dit lukte niet, evenmin als een capacitieve meting. De oude methode van een zoutpuls kon echter wel weer worden toegepast, nu met twee gescheiden cellen en twee geleidbaarheidsmeters.

b. Meting met twee gescheiden geleidbaarheidsellen.

In fig. 4 is reeds weergegeven hoe de twee gescheiden cellen A en B in het vaatje zijn geplaatst. De responsie van deze cellen A en B op een zoutpuls in het bovenste compartiment bij de roerder werd apart gemeten en op een tweepuntsschrijver opgenomen. De twee cellen hebben niet precies gelijke celconstanten, maar omdat de geregistreeerde c_{∞} -waarde voor beide cellen dezelfde moet zijn, kunnen de waarnemingen toch kwantitatief worden vergeleken. Het concentratieverloop was voor beide meetplaatsen kwalitatief hetzelfde (zie fig. 2), maar kwantitatief bleek de onderste cel iets lagere uitslagen te geven.

beschrijving van de figuur

Direct na de injectie van x grammoleculen zout (de eerste piek in de figuur) komt $(1-p)x$ grammol. zout langs cel A en px grammol. zout langs cel B. Na één circulatietijd komt de zoutpuls weer door de roerder en langs de cellen, waarbij de totale hoeveelheid zout opnieuw verdeeld wordt over de boven en onderhelft van de menger. De tweede piek in de grafiek van cel A stelt dan een concentratie voor $c_a = (1-p)^2 x + p^2 x$ en voor cel B geldt op de zelfde wijze $c_b = p(1-p)x + (1-p)px$. Voor verschillende toerentallen (20 waarnemingen per toerental) werd het quotient c_b/c_a bepaald voor de waarde van c_b en c_a die bij de tweede piek in de geleidbaarheidskurven werden opgemeten.

$$\frac{c_b}{c_a} = \frac{2(1-p)x}{(1-p)^2 x + p^2 x} = \frac{2p(1-p)}{(1-p)^2 + p^2}$$

Het oplossen van deze vierkantsvergelijking geeft twee waarden voor p , waarvan de waarde die dicht bij 0,5 ligt, de juiste zal zijn ($p = 0,4 \text{ à } 0,45$).

$$p = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha}{2\alpha + 2}}}{2} \quad \text{met } \alpha = \frac{c_b}{c_a}$$

De zo berekende waarden voor p zijn weergegeven in tabel 1. Het blijkt dat de reeds gevonden grens $0,4 < p < 0,45$ ook hier wordt teruggevonden. Deze grens is onafhankelijk van het toerental, zelfs als Re kleiner wordt dan 2×10^4 . Deze waarde van p wil zeggen, dat de uitwisseling tussen

boven- en onderhelft goed is, maar niet perfect ($p=0,5$) en dat kennelijk de uitwisseling niet afhankelijk is van het toerental.

TABEL 1: Uitwisselingskansen bij verschillende toerentallen.

n (t/min)	$Re = \frac{\rho n d^2}{\eta}$	$\alpha = \frac{c_b}{c_a}$	p
50	$8,30 \times 10^3$	0,914	0,40
100	$1,67 \times 10^4$	0,959	0,43
150	$2,50 \times 10^4$	0,949	0,42
200	$3,33 \times 10^4$	0,941	0,41
300	$5,0 \times 10^4$	0,974	0,45
400	$6,6 \times 10^4$	0,915	0,40
500	$8,3 \times 10^4$	0,974	0,45
600	10^5	0,926	0,40
700	$1,17 \times 10^5$	0,915	0,40

III,2. Metingen met een plaatselijke cel.

a. Het "oog".

Nagata e.a.(4) heeft snelheidsmetingen in een vat met een turbineroerder gedaan en naar aanleiding van zijn metingen een snelheidsverdeling voorgesteld, waarbij de vloeistof om een circulatiecentrum rondstroomt. Deze circulatiecentra zouden volgens Nagata op $1/5D$ boven en onder het vlak van de roerder liggen en $1/3D$ uit de hartlijn van het vat. Een dergelijk stilstaand circulatiecentrum is echter nooit waargenomen (b.v. aan luchtbelletjes), daarom lijkt een voorstelling met een gebied waarbinnen het circulatiecentrum beweegt veel meer waarheidsgetrouw. De uitwisseling tussen de vloeistof in dit gebied, het zogenaamde "circulatie oog", en de rondstromende vloeistof zou dan voor een groot deel worden veroorzaakt door de wisselingen van het circulatiecentrum in dit "oog".

Met een klein plaatselijk celletje werd geprobeerd deze uitwisseling te meten. De geleidbaarheidscel bestond nu uit

drie dunne platina draadjes van 3 mm lengte (de twee buitenste met aarde verbonden), die in een PVC staafje waren gemonteerd; dit staafje kon door de deksel van het vaatje op en neer worden geschoven. De opening in het deksel werd op $1/3D$ uit de hartlijn van het vat gemaakt.

Elke grafiek van de geleidbaarheid zal een zekere looptijd vertonen, omdat het steeds meer of minder tijd zal kosten, voordat het geïnjecteerde zout wordt "opgemerkt" op de meetplaats. Wanneer de cel zich in een gebied met weinig uitwisseling bevindt duurt het echter langer dan verwacht, voordat de geleidbaarheid toeneemt. In fig 6 is, voor drie toerentallen, het verloop van deze looptijd met de hoogte weergegeven voor de cel op $1/3D$ uit de as. De "jet" is in de looptijden ook duidelijk terug te vinden. Kennelijk zijn de snelheidsgradiënten tussen $h=2$ cm en $h=3$ cm zeer groot. Bij de twee hoogste toerentallen ($n=200$ en $n=160$ t/min) treedt bij $h=3\text{ à }4$ cm de langste looptijd op, maar bij $n=120$ t/min komt dit maximum pas bij $h=7$ cm. Als de cel inderdaad door het "oog" is gekomen kunnen we concluderen, dat de uitwisseling tussen "oog" en omgeving goed is, omdat bij elke hoogte veel kortere looptijden werden gemeten dan de circulatietijd. De lijn voor $n=120$ t/min loopt bij grote h (d.w.z. 13-15 cm) weer omhoog; dit moet worden toegeschreven aan een grotere grenslaag aan de wand van de deksel, die bij lagere toerentallen dikker wordt.

III,2,b. Metingen achter een keerschot.

Treden er stille ruimten op achter de keerschotten, wanneer de roerder draait? Deze vraag werd onderzocht door met de boven omschreven plaatselijke cel de looptijd achter een keerschot op te meten voor verschillende toerentallen en verschillende hoogten. Steeds werd een zeer regelmatig circulatiepatroon waargenomen aan een groot aantal pieken en dalen, terwijl op elke plaats de looptijd gemeten in eenheden t_c onafhankelijk van het toerental was. De waarnemingen zijn in tabel 2 verzameld. (pag. 13). Uit tabel 2 kunnen we concluderen dat, bij de lage toerentallen de radiale "jet" de wand achter een keerschot kan bereiken; de tangentiële stroming is dus niet sterk genoeg om dit te voorkomen.

TABEL 2: De looptijd als functie van de hoogte, achter een keerschot ($h=0$ is het vlak van de roerder).

n(t/min)	t_{loop} (sec)			t_{loop} (eenh. t_c)		
	200	160	120	200	160	120
$h(\text{cm})=0$	0,31	0,38	0,44	0,135	0,133	0,115
$h=5$	0,42	0,52	0,62	0,183	0,181	0,162
$h=10$	0,75	0,96	1,24	0,326	0,334	0,324
$h=14$	0,78	0,83	1,30	0,339	0,289	0,340

III,2,c. Meting op de bodem in de hartlijn van het vat.

Volledigheidshalve dient te worden vermeld de proef waarbij de geleidbaarheid ca 3 mm boven de bodem in het centrum (d.w.z. waar in het doorstroomde geval de uitvoer zit) werd gemeten. Het waargenomen stromingsbeeld was zeer regelmatig, met veel pieken en dalen. Waar de circulatielussen bij elkaar komen is dus ook geen stil gebied.

III,2,d. Ontkleuringsreactie.

Een geheel andere methode om na te gaan of er stille of dode gebieden in een menger zijn, is een ontcleuringsreactie die voldoende snel is. Een dergelijke reactie is de ontcleuring van zuur met base (met een indicator) of de ontcleuring van een jodium + stijfsel-oplossing met natriumthiosulfaat. Bij $n=200$ t/min was de blauwzwarte kleur van het jodium met stijfsel in 13 à 15 sec. verdwenen, wanneer met een injectiespuit iets meer dan de equivalente hoeveelheid thiosulfaat werd toegevoegd. Ook nu werd geen stil gebied achter de keerschotten waargenomen. Soms was een iets latere ontcleuring zichtbaar plaatselijk in de torus van het "oog", maar de plaats was niet reproduceerbaar. Deze waarneming kan twee dingen betekenen:

- 1^o. de uitwisseling tussen "oog" en omgeving is toch niet zo goed, òf
- 2^o. de latere ontkleuring is een gevolg van een ongelijke verdeling van de puls.

De injectienaald is namelijk niet in de as, maar vlak daarbij geplaatst en in de injectietijd komt bij lage toerentallen slechts een gedeelte van de roerder langs de naald, zodat hier een asymmetrische verdeling van de puls mogelijk is.

IV. De doorstroomde menger.

IV,1. De invloed van de plaats van invoer op de dispersie.

Rotte (5) heeft de dispersie in een doorstroomd vat gemeten met een cel om de roerder en de invoer bij de as op de roerder. Om een antwoord te krijgen op de vraag of het veel verschil zou maken als de voeding aan de bovenzijde werd ingevoerd, is de voeding in het vaatje van Rotte verplaatst naar 1 cm onder het vloeistofniveau.

Drie mogelijkheden werden onderzocht, wat de richting van invoer t.o.v. de circulatiestroom betreft. In fig.7 is een vierde deel van de menger weergegeven, waarin deze drie gevallen worden getoond.

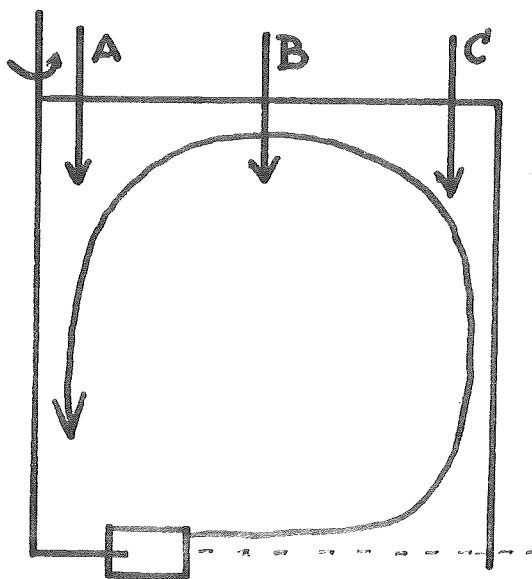


fig.7 Drie mogelijkheden van invoer aan de bovenzijde.

In geval A, de invoer langs de as met de stroom mee, werd een kleine verkorting van de circulatietijd waargenomen, zoals Rotte reeds vond voor de invoer op de roerder; in beide gevallen werd de invoerimpuls toegevoegd aan de circulatiestroom. De systematiek van de circulatie werd in dit geval het minst verstoord, dus de afwijking van het "batch"-geval ($Bo = 28$) zal klein zijn.

Zowel in geval B als in geval C zal de verstoring van het circulatiepatroon groter zijn, wat een grotere dispersie tot gevolg heeft, dus een lager Bodensteingetal. Het effect is toch niet erg groot, zoals uit tabel 3 blijkt, omdat de invoerstromen maar een klein stukje van de circulatiestroom beïnvloedt. (Elk Bo -getal werd als gemiddelde van 15 injecties gevonden).

TABEL 3: De dispersie als functie van de plaats van invoer.

d_{inv} mm	n t/min	ϕ_v ml/sec	$Bo = L\bar{v}/D_1$		
			A	B	C
12	300	158	27,3	22	23,8
12	300	78	30	27,8	26,6
12	500	158	28,8	28	25
7,5	500	190	-	24,4	-

IV,2. Responsie aan de uitgang op een puls aan de ingang.

De verblijftijdsspreiding werd gemeten door een cel in de uitgang te plaatsen en een zoutpuls in de invoerpijp te geven. De pulsresponsie van een ideale menger is de bekende aflopende e-macht, die op tijdstip $t=0$ begint (fig 8).

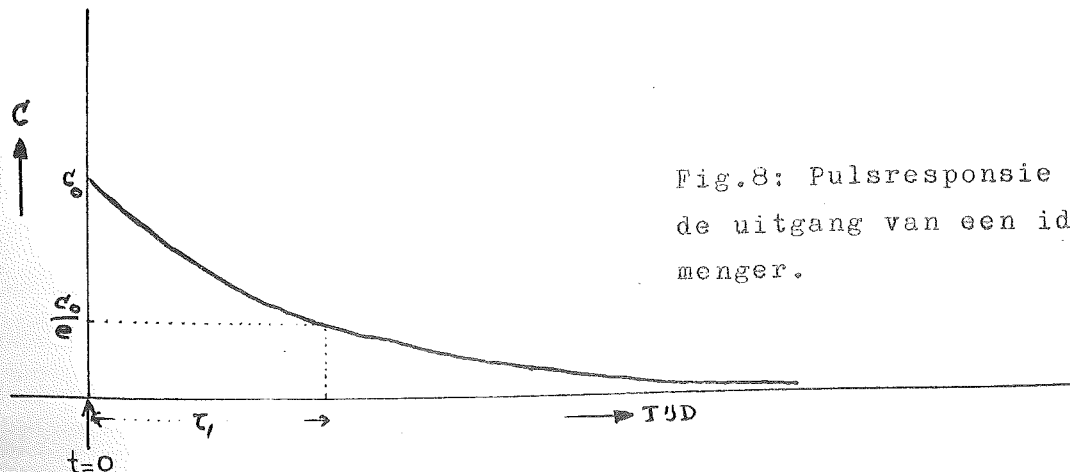


Fig.8: Pulsresponsie aan de uitgang van een ideale menger.

De tijdconstante van deze "uitspoellijn" wordt gegeven door de gemiddelde verblijftijd in de menger $\tau = V/\phi_v$. De experimentele responsies aan de uitgang weken in verschillende opzichten af van deze ideale uitspoellijn: 1^o. alle krommen hadden een looptijd, d.w.z. het kost altijd tijd om van de ingang naar de uitgang te komen; 2^o. de logaritmische uitspoellijn wordt pas na ongeveer 5x de circulatietijd bereikt en verder gevolgd; 3^o. de grafiek is voor $t < 5t_c$ niet reproduceerbaar; er leken twee typen krommen te ontstaan onder ogenschijnlijk identieke condities (met ook alle tussenvormen). Deze twee typen zijn in de figuren 9 en 10 weergegeven.

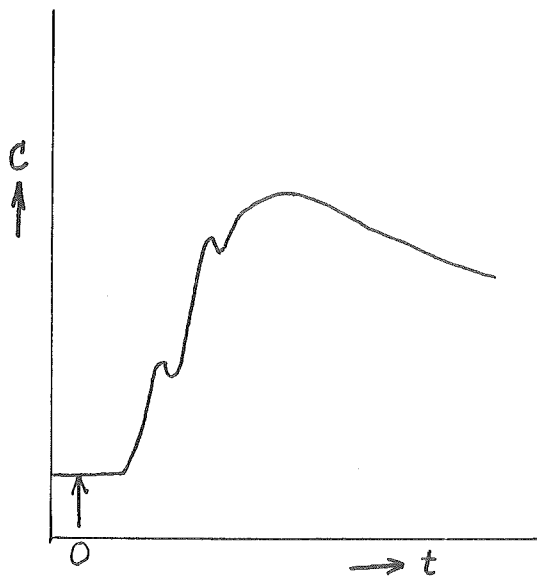


Fig. 9: uitgangsresponsie (eerste type)

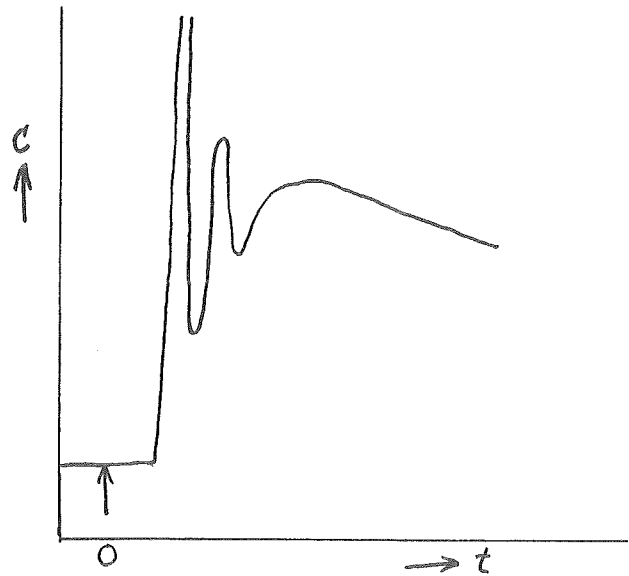


Fig. 10: uitgangsresponsie (tweede type)

Het optreden van een looptijd is niet verwonderlijk, omdat de veronderstelling dat ogenblikkelijk elke verandering, die bij de ingang in de menger binnenkomt, aan de uitgang merkbaar is, alleen in theorie is te verwezenlijken (perfecte menger). De tijdconstante van een experimentele uitspoellijn werd bepaald door de kromme, die na $5xt_c$ optreedt, naar $t=0$ te extrapoleren. Dan werd de beginconditie c_0 gevonden, nodig om met $c=c_0 e^{-t/\tau}$, de tijdconstante τ , te vinden; voor $t=\tau$, is $c=c_0/e = 0,368 c_0$.

De gevonden tijdconstanten bleken zeer goed ($\pm 5\%$) overeen te stemmen met de berekende waarde $\tau_1 = V/\phi_v$. Ook uit fig. 11, een experimentele uitspoellijn op logaritmisch papier, mogen we concluderen dat de exponentiële functie goed wordt benaderd. Rotte (5) heeft theoretisch aangetoond dat voor $t < 5t_c$ de responsie met een exponentiële functie is te beschrijven. Zoals uit de figuren 9 en 10 is te zien vertonen de krommen na de looptijd een geleidelijke stijging, tot na ten hoogste $5x$ de circulatietijd, maar veelal eerder, de kromme via een maximum overgaat in de exponentiële uitspoellijn. De plaats van dit maximum, op de tijdas, is sterk afhankelijk van het toerental van de roerder en weinig afhankelijk van het debiet (zie figuur 12).

Een verklaring van de verschillen van de responsiekrommen voor waarden van $t < 5t_c$ is niet gevonden; toevallige verschillen in de experimenteertechniek zijn wellicht de oorzaak: Is de zoutpuls goed verdeeld over de voeding? Komt de zoutinjectie steeds op dezelfde wijze in de circulatiestroming terecht? Het antwoord op deze vragen moet zeker ontkennend zijn. Wanneer de zoutpuls voor een groot deel in snelle stroomlijnen komt, met weinig dispersie, zal bij het bereiken van de uitgang de geleidbaarheid even, snel, sterk toenemen. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor de hoge pieken in fig. 10. Bij een goed verdeelde puls en veel dispersie kan het beeld van fig. 9 optreden, met maar heel kleine piekjes gedurende de stijging in het begin. Hiermee is in overeenstemming dat bij zeer hoge toerentallen ($n = 700 \text{ à } 800 \text{ t/min}$) de krommen van het type als fig. 9 overheersen, terwijl bij lage toerentallen juist het beeld van fig. 10 sterk vertegenwoordigd is.

Wanneer de geleidelijke stijging in het begin van de responsiekrommen ($t < 5t_c$) als grondvorm wordt beschouwd, met de pieken daarop gesuperponeerd, is een benadering van de responsie mogelijk. De grondvorm komt samen met de exponentiële uitspoellijn overeen met de responsie op twee ideale mengers in serie. Rotte (5) en Guttoff (6) hebben een vat met een turbine-roerder opgevat als twee gelijke mengers insserie, waartussen

uitwisseling plaats vindt; deze mengers kan men zich voorstellen als de boven- en onderhelft van het gehele mengvat. Dit lijkt mij in tegenspraak met het feit dat Thole voor de propeller-roerder, met een geleidebuis, ook een dergelijke kromme vond. In een vat met een propeller-roerder is het niet mogelijk de menger als twee mengers voor te stellen, omdat daarin maar één circulatiestroming optreedt, zoals in een halve turbine-menger.

In de appendix (VI,1) is aangegeven hoe uit de experimentele kromme een tweede tijdconstante kon worden berekend. Deze bleek veel kleiner dan $\tau_1 = V/\phi_v$ te zijn en wel van de orde t_c . Een fysische voorstelling zou kunnen zijn dat het gebied direct om de roerder als een apart klein mengertje met korte verblijftijd (τ_2) moet worden opgevat, met daarachter als grote menger (τ_1) de rest van het vat.

Op een geheel andere manier kan nog worden aangetoond dat de uitspoellijnen van de experimentele krommen weinig van een logaritmische functie zullen afwijken (zie appendix VI,2.).

IV,3. Kortsluiting tussen invoer en uitvoer-opening.

Bij lagere toerentallen en hogere debieten werd een relatieve verkorting van de looptijd gevonden t.o.v. de circulatietijd. Wanneer de invoer geen effect heeft op de circulatiestroming zal een volume-elementje door het vat stromen zoals in fig. 13 is weergegeven, langs de stroomlijnen naar de uitgang.

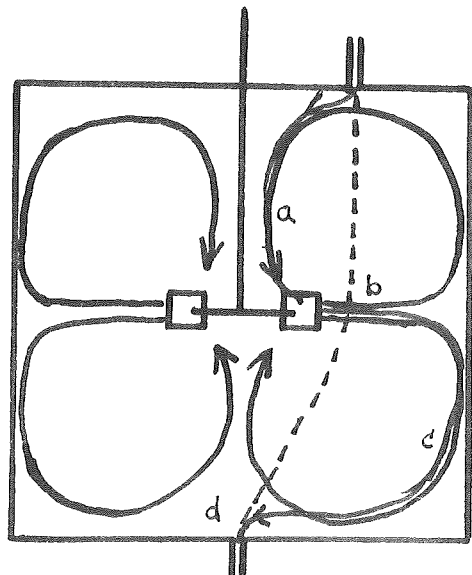


Fig.13: Een mogelijke kortsluitweg van de invoer naar de uitvoer (gestippeld).

De weg, die een volumeëlementje moet afleggen, kan in vier stukjes worden verdeeld, terwijl de totale tijd, nodig om deze weg af te leggen, ongeveer t_c sec. zal moeten zijn. Wanneer de invoerstroom wél een eigen impuls heeft, zal traject a (fig. 13) het eerst veranderen. Bij voldoende invoerimpuls kan de straal "doorbreken" en recht omlaag lopen tot op de jet van de roerder. Als de roerder langzaam draait kan zelfs deze jet te zwak zijn om te voorkomen dat in- en uitvoer geheel kortsluiten. Bij zeer lage toerentallen is deze kortsluiting visueel waargenomen door aluminiumpoeder in de invoerstroom mee te laten stromen.

Uit de metingen van de looptijd als functie van het debiet en het toerental (fig. 14) kan worden opgemaakt, dat bij hoge toerentallen de looptijd constant is en ongeveer gelijk aan $0,75t_c$; er is dan geen kortsluiting. Voor elk debiet wordt de looptijd bij afnemend toerental afhankelijk van het toerental. Het toerental waarbij dit gebeurt (n_{buig}) komt bij hogere debieten steeds hoger te liggen. In fig. 14 is dit te zien; hierin zijn ook de looptijden opgenomen, die werden gemeten met de invoerplaats in de zijwand. Kortsluiting treedt dan pas bij veel lagere toerentallen op (de diameters van de invoerpijpen waren in beide gevallen hetzelfde). Dezelfde waarnemingen als in fig. 14 in eenheden t_c zijn weergegeven, zijn in seconden uitgezet in fig. 15. Deze grafiek laat zien dat tussen $n=800$ en $n=400$ t/min de looptijd onafhankelijk van het debiet is; d.w.z. dat de circulatiestroom sterker is dan de invoerstroom. De afhankelijkheid van het toerental wordt bij toenemend debiet kleiner.

Het reeds genoemde "buigpunt", n_{buig} , werd voor elk debiet in fig. 14 zo goed mogelijk geschat en de impuls van de invoer werd vergeleken met de impuls van de circulatiestroom, berekend bij n_{buig} . Voor alle debieten werd de berekende waarde van de verhouding van deze twee impulsstromen $I = \phi_c' \bar{v}_r \rho / \phi_v \bar{v} \rho$ bij het buigpunt bepaald en vergeleken. Hierin is: ϕ_c' een gedeelte van de circulatiestroom (zie appendix VI, 3), \bar{v}_r is de radiale snelheid bij de invoerplaats (bepaald uit metingen van Nagata (4), $\bar{v} = \phi_v / \text{opp}_{\text{inv.}}$, de gemiddelde invoersnelheid.

Voor alle debieten bleek de waarde van I tussen 1 en 2 te liggen (zie tabel 4^a). De zeer grote onnauwkeurigheid van n_{buig} en de vele benaderingen in acht genomen, kunnen we concluderen dat bij een bepaalde verhouding van de circulatie-impuls en de invoerimpuls een kortsluitingscriterium ligt. Voor ontwerpdoeleinden heeft men geen kortsluiting indien men zorgt dat a) bij de invoerplaats in het deksel, $I > 2$ en b) voor de invoer in de zijwand $I > 0,5$. (tabel 4^b).

TABEL 4^a: De verhouding van-circulatie- en invoerimpuls I bij de invoerplaats in het deksel.

$I = \frac{\phi_{c,v} \cdot \rho}{\phi_{v} \cdot \rho}$ (bij n_{buig})	ϕ_v ml/sec	n_{buig} t/min
1,86	58,0	200
1,12	112,5	300
1,54	160,0	500
1,71	212,5	700
1,74	270,0	900
1,18	328,0	900

TABEL 4^b: Enige waarden van I bij invoer in de zijwand.

I	ϕ_v	n_{buig}
0,466	58,0	100
0,280	112,5	150
0,314	212,5	300
0,233	328,0	400

V. Conclusies.

Uit het voorgaande zijn voor het turbulente gebied ($Re \geq 2 \times 10^4$) de volgende conclusies te trekken voor een vat met een turbineerder:

- 1) De uitwisseling tussen de twee mengerkelven is in het vlak van de roerder goed, onafhankelijk van het toerental van de roerder, maar niet "perfect".
- 2) Er zijn geen echte "stille" of "dode" gebieden in het vat; de uitwisseling met het "oog" is goed, maar niet ideaal, zodat tussen "oog" en omgeving toch een iets grotere weerstand tegen stofoverdracht aanwezig moet zijn dan in de rest van het vat. De systematiek van het circulatie-model is in en om het "oog" grotendeels verdwenen.
- 3) De invoer verplaatsen van het gebied om de roerder naar de bovenzijde van het vat heeft weinig invloed op de dispersie; is de impulsstroom van de invoer dwars op of tegengesteld aan de circulatiestroom gericht, dan wordt de dispersie daarvoor iets vergroot en het Bodensteingetal dus iets kleiner.
- 4) De verblijftijdsspreidingskromme, aan de uitgang opgenomen, heeft een tijdconstante die goed overeenkomt met de berekende gemiddelde verblijftijd $V/\bar{\phi}_v$; de kromme heeft steeds een looptijd en de concentratie stijgt tamelijk geleidelijk, in ongeveer $5x t_c$, tot de uitspoellijn. Aan de uitgang is het circulatiepatroon ook merkbaar aan pieken, maar minder systematisch dan om de roerder.
- 5) Als criterium voor kortsluiting werd een relatieve verkorting van de looptijd t.o.v. de circulatietijd gevonden. Vooral bij grotere doorvoerstromen zijn grote circulatiestromen nodig om kortsluiting te voorkomen. Bij de eerste tekenen van kortsluiting werd een constante verhouding van de impulsen van de circulatie- en de invoerstroom gevonden. Hoe groot deze verhouding is hangt van de plaats, maar vooral van de richting, van invoer af.

VI,1 Appendix 1 : Beschrijving van de pulsresponsie aan de uitgang met twee e-machten.

Een 2^e orde proces is op te vatten als twee 1^e orde processen in serie, zegt van der Brinten (8). Hij geeft de stapresponsie van een 2^e orde systeem als:

$$y(t) = \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} (1 - e^{-t/\tau_1}) + \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} (1 - e^{-t/\tau_2})$$

of:
$$y(t) = 1 - \frac{\tau_1 e^{-t/\tau_1} - \tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_1 - \tau_2}$$

Mathematisch volgt uit de stapresponsie door differentiatie naar de tijd de pulsresponsie:

$$y'(t) = \frac{e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}}{\tau_1 - \tau_2}$$

Het maximum van deze kromme ligt bij een tijd t_{\max} , waarvoor geldt $y''(t) = 0$ of:

$$y''(t) = \frac{-1/\tau_1 e^{-t/\tau_1} + 1/\tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_1 - \tau_2} = 0 \text{ voor } t = t_{\max}$$

Door de experimenteel bepaalde τ_1 van de uitspoellijn in te vullen en eveneens t_{\max} , wordt via een "trial and error" berekening τ_2 gevonden. De uitspoellijn na het maximum mag met τ_1 beschreven worden als $\tau_1 \gg \tau_2$. Bijvoorbeeld:

- 20 waarnemingen bij $n=500$ t/min, $\phi_v=235$ ml/sec ($t_c=0,87$ sec), $\tau_1=68,9$ sec en $t_{\max}=4,49$ sec leverde $\tau_2=1,065$ sec $=1,16t_c$;
- 20 waarnemingen bij $n=800$ t/min, ($t_c=0,54$ sec), $\phi_v=237$ ml/sec, $\tau_1=68,4$ sec en $t_{\max}=3,0$ sec leverde $\tau_2=0,63$ sec $=1,15t_c$;
- Een serie waarnemingen bij $\phi_v=109$ ml/sec (5 waarnemingen bij elk toerental), $\tau_1=130,2$ sec leverde waarden voor τ_2 , die in tabel 5 zijn verzameld.

De spreiding in de waarden voor τ_2 is niet groot; als conclusie kan hieruit worden getrokken dat $\tau_2=1$ à $1,5$ t_c . Deze tweede tijdconstante bepaalt de plaats van het maximum en waarschijnlijk ook de helling van de aanloop naar de exponentiële uitspoellijn.

TABEL 5: Berekende waarden van τ_2 bij $\phi_v = 109$ ml/sec en $\tau_1 = 180,2$ sec

$n(t/min)$	$t_{max}(sec)$	$\tau_2(sec)$	$\tau_2(eenh.t_c)$
800	4,06	0,74	1,290
700	4,84	0,91	1,387
600	5,80	1,135	1,483
500	6,08	1,21	1,315
400	7,34	1,54	1,339
300	8,21	1,775	1,160
200	11,60	2,765	1,202
150	13,64	3,43	1,121
100	20,74	6,065	1,321
50	29,20	10,05	1,095

VI,2 Appendix 2: In hoeverre mogen we de uitspoellijn als een e-macht beschouwen?

Kramers en Westerterp (7) geven een limietbenadering voor de verblijftijdsfunctie $F(t)$ van een tankreactor. Per definitie is $F(t)$ de kans dat een volume-elementje, dat op tijdstip $t=0$ werd ingevoerd, op tijdstip t niet meer in het vat aanwezig is. Voor een perfecte menger is $F(t) = 1 - e^{-t/\tau_1}$. Als in een doorstroomde tank de doorvoerstroom ϕ_v veel kleiner is dan de circulatiestroom $\phi_c = V/t_c$, dan kan men met het circulatiemodel de volgende beschrijving van de verblijftijdsspreiding geven. Stel $k =$ de kans dat een volume-elementje na t_c sec uit het vat is verdwenen*, $k = \phi_v/\phi_c = t_c/\tau_1$.

Een volume-elementje dat op $t=0$ werd ingevoerd heeft een kans k om na $1t_c$ uit het vat te zijn en $1-k$ om erin te blijven $k(1-k)$, , , $2t_c$, , , , , , , , $(1-k)^2$, , , , , $k(1-k)^2$, , $3t_c$, , , , , , , , enz.

Dus de kans dat het volume-elementje binnen een tijd mt_c het vat verlaat is:

$$F(mt_c) = F(t) = 1 - (1-k)^m = 1 - (1-k)^{t/k\tau_1} = 1 - (1-k)^{t/k}$$

* Kramers en Westerterp noemen $k = p$, maar p was reeds benoemd.

Voor een ideale menger is $k=0$, of

$$F(t) = \lim_{k \rightarrow 0} 1 - (1-k)^{t/k\tau_1} = 1 - e^{-t/\tau_1} = 1 - e^{-\theta},$$

waarin $\theta = t/\tau_1$, de dimensieloos gemaakte verblijftijd.

Voor een niet-ideale menger is $k > 0$. Deze kans werd voor één serie waarnemingen berekend.

Bekend zijn: $n = 800$ t/min, $t_c = 0,54$ sec, $\tau_1 = 68,4$ sec, $\phi_v = 287$ ml/sec. Dus is $k = t_c/\tau_1 = 0,008$ en $1-k = 0,992$.

De ideale en de reële menger kunnen worden vergeleken als de reeks voor $k > 0$ wordt ontwikkeld:

$$\begin{aligned} (1-k)^{\theta/k} &= 1 - \frac{\theta}{k} k + \frac{1}{2} \frac{\theta}{k} \left(\frac{\theta}{k} - 1\right) k^2 - \frac{1}{6} \frac{\theta}{k} (\theta/k-1)(\theta/k-2) k^3 + \dots \\ &= 1 - \theta + \frac{1}{2} \theta^2 - \frac{1}{2} \theta k - \frac{1}{6} \theta^3 + \frac{1}{2} \theta^2 k - \frac{1}{3} \theta k^2 \\ &= 1 - \theta (1 + \frac{1}{2} k + \frac{1}{3} k^2 + \dots) + \frac{1}{2} \theta^2 (1 + k + \frac{10}{24} k^2 + \dots) \end{aligned}$$

Vullen we in voor $1 + \frac{1}{2} k + \frac{1}{3} k^2 + \dots = \frac{1}{1-k}$ en benaderen we de tweede reeks tussen haakjes met $\frac{1}{1-k}$, dan wordt:

$$\begin{aligned} (1-k)^{\theta/k} &= 1 - \frac{\theta}{k} \ln \frac{1}{1-k} + \frac{1}{2} \theta^2 \frac{1}{1-k} \dots \\ &= 1 - \frac{\theta}{k} \ln \frac{1}{1-k} + \frac{1}{1-k} \left(\frac{1}{2} \theta^2 \dots \right) \\ &= 1 - \frac{\theta}{k} \ln \frac{1}{1-k} + \frac{1}{1-k} (e^{-\theta} - 1 + \theta) \\ &= 1 - \frac{1}{1-k} + \theta \left(\frac{1}{1-k} - \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-k} \right) + \frac{1}{1-k} e^{-\theta} \\ &= \frac{1}{1-k} e^{-\theta} - \frac{k}{1-k} + \left(\frac{1}{1-k} - \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-k} \right) \theta \end{aligned}$$

De beide termen tussen de haakjes zijn reeksen:

$$\frac{1}{1-k} = 1 + k + k^2 + k^3 + \dots \text{ en } \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-k} = 1 + \frac{1}{2} k + \frac{1}{3} k^2 + \dots$$

dus het verschil van deze reeksen is $\frac{1}{2} k + \frac{2}{3} k^2 + \dots$

$$(1-k)^{\theta/k} = (1 + k + k^2 + \dots) e^{-\theta} - k(1 + k + k^2 + \dots) + \left(\frac{1}{2} k + \frac{2}{3} k^2 + \dots\right) \theta$$

Dan is:

$$(1-k)^{\theta/k} - e^{-\theta} = (k + k^2 + \dots) e^{-\theta} - (k + k^2 + \dots) + \left(\frac{1}{2} k + \frac{2}{3} k^2 + \dots\right) \theta$$

Stellen we de voorwaarde dat de twee krommen niet meer dan 1% mogen afwijken, dan moet: $(1-k)^{\theta/k} - e^{-\theta} \leq \left(\frac{1}{2} k + \frac{2}{3} k^2 + \dots\right) \theta \approx 10^{-2}$

$$\text{of } k\theta \leq 2 \times 10^{-2}, \quad \theta \leq \frac{2 \times 10^{-2}}{k} = \frac{2 \times 10^{-2}}{0,008} = 3.$$

Dus voor tijden korter dan 3x de gemiddelde verblijftijd mogen we de uitspoellijn als e-macht opvatten!

VI,3. Appendix 3: De impulsen bij kortsluiting.

De twee impulsstromen, circulatie- en invoer-impulsstroom, die bij het punt van invoer in het vat samenkomen, bepalen of er kortsluiting optreedt of niet. Deze twee impulsstromen staan bij de invoerplaats loodrecht op elkaar. In fig.16 is een en ander voor de invoerplaats in het deksel geschetst.

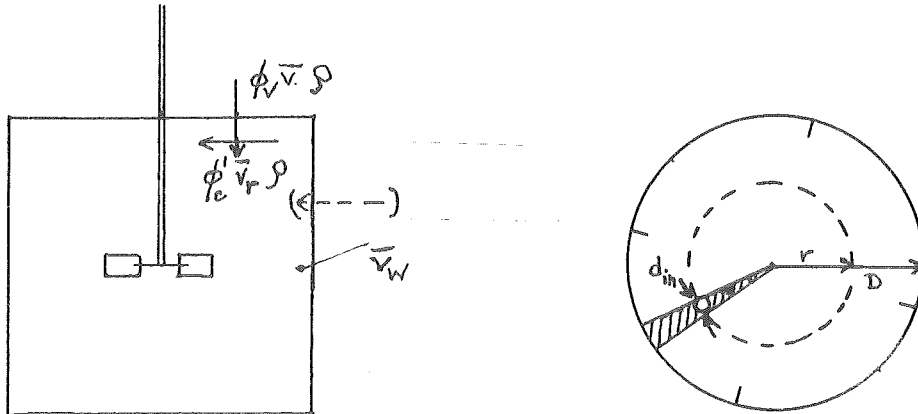


Fig. 16: De berekening van ϕ_c' .

Zelfde als in het vorige diagram: de diameter d is gesloten.

Voor de berekening van de circulatie-impuls is van de totale circulatiestroom slechts het gedeelte genomen dat op de plaats van invoer net zo breed is als de invoer zelf (boven-aanzicht in fig. 16).

De diameter van de invoerbuis is 21 mm, zodat met $r = \frac{1}{2}D$ volgt:

$$\phi_c' = \frac{2,1}{2} \frac{1}{r} \times \frac{1}{2} \phi_c = 0,0457 \times \frac{1}{2} \phi_c, \text{ met } \phi_c = V/t_c.$$

Om de circulatie-impuls bij de invoerplaats te kunnen berekenen, was het nodig de radiale snelheid \bar{v}_r ter plaatse te kennen. (de tangentiële snelheidscomponent is te verwaarlozen aan het deksel). Nagata heeft snelheden gemeten in een tank van $D=60$ cm met $d/D = \frac{1}{2}$. Voor mijn vat van 29,2 cm diameter is uit de gemeten snelheden van Nagata de gewenste \bar{v}_r te berekenen met de volgende aannamen: $nt_c (d/D)^2 = \text{constant}$ en een gelijke snelheidsverdeling in de twee vaten.

Noemen we $\bar{N} \bar{v}_r$ en $\bar{N} \bar{v}_w$ resp. de snelheid bij het deksel op $\frac{1}{2}D$ uit de as en de gemiddelde snelheid in de "jet" vlak aan de wand in de tank van Nagata, dan is:

$$\frac{\bar{N} \bar{v}_r}{\bar{N} \bar{v}_w} = \frac{\bar{v}_r}{\bar{v}_w} \quad (1)$$

Met $t_c = \frac{D}{nd \cdot d/D}$ of $t_c \approx D/\bar{v}_w$ (2) is \bar{v}_w in n uit te drukken; op analoge wijze ook \bar{v}_w .

Nagata mat met $n = 73$ t/min ($t_c = 2,85$ sec) voor $\bar{v}_r \approx 15$ cm/sec en voor $\bar{v}_w \approx 21$ cm/sec. Door de met formule (2) gevonden \bar{v}_w en de waarden voor \bar{v}_r en \bar{v}_w in te vullen en om te rekenen werd voor \bar{v}_r gevonden:

$$\bar{v}_r = 0,0467 \cdot n$$

Nu is \bar{v}_r voor alle toerentallen te berekenen, dus ook de circulatie-impuls $\phi_c \cdot \bar{v}_r \cdot \rho$.

De circulatie-impulsen, berekend bij de in fig. 14 bepaalde waarden van n_{buiig} konden op deze wijze worden vergeleken met de invoerimpuls door $I = \phi_c' \bar{v}_r \rho / \phi_v \bar{v} \rho$ uit te rekenen.

VII. Notatie.

		Eenheid
B_0	$= \frac{L\bar{v}}{D_1}$ = kengetal van Bodenstein	-
c	= concentratie	mol/m^3
c_a	= concentratie in de bovenste mengerhelft	mol/m^3
c_b	= concentratie in de onderste mengerhelft	mol/m^3
c_0	= beginconc. bij doorstroomde perfecte menger	mol/m^3
c_{∞}	= concentratie na oneindige tijd	mol/m^3
D	= diameter van het vat	cm
D_1	= dispersiecoëfficiënt	m^2/sec
d	= diameter van de roerder	cm
d_{inv}	= diameter van de invoer	cm
$F(t)$	= verblijftijdsspreidingsfunctie	-
H	= vathoogte	cm
h	= hoogte van de meetcel vanaf het vlak v.d. roerder	cm
I	= verhouding van circulatie- en invoer-impuls	-
k	$= t_c/\tau_1$ = de kans dat een volume-elementje het vat na één circulatie verlaat	-
L	= karakteristieke lengte van buisreactormodel	m
N	= totaal aantal waarnemingen	-
n	= roerdertoerental	1/min
n_{buig}	= toerental waarbij t_{loop} afhankelijk van n wordt	1/min
p	= uitwisselingskans tussen roerderhelften	-
Re	$= \frac{\rho n d^2}{\eta}$ = getal van Reynolds voor de roerder	-
t	= tijd	sec
t_c	= circulatietijd	sec
t_{max}	= tijd waarbij de uitspoellijn een max. heeft	sec
t_{loop}	= looptijd	sec
V	= vatvolume	m^3
\bar{v}	= gemiddelde snelheid in de invoerbuis	cm/sec
\bar{v}_r	= gemiddelde snelheid aan deksel bij invoer	cm/sec
\bar{v}_w	= gemiddelde snelheid aan wand in roerder"jet"	cm/sec
\bar{v}_l	= gemiddelde snelheid in modelbuisreactor'	cm/sec
α	$= c_b/c_a$	-
η	= viscositeit van de vloeistof in het vat	Nsec/m^2
θ	$= t/\tau_1$ = dimensieloze verblijftijd	-
θ_1	$= t/t_c$ = dimensieloze circulatietijd	-
ρ	= dichtheid van de vloeistof in het vat	kg/m^3

τ	= circulatietijdgroep	-
τ_1	= V/ϕ_v = gemiddelde verblijftijd (1 ^e tijdconst. uitspoellijn)	sec
τ_2	= 2 ^e tijdconstante uitspoellijn	sec
ϕ_c	= V/t_c = circulatiestroom	m ³ /sec
ϕ'_c	= gedeelte de circulatiestroom dat langs invoer stroomt	m ³ /sec
ϕ_v	= doorvoerstroom	m ³ /sec

VIII. Literatuur.

- 1). D.B.Holmes, R.M.Voncken, J.A.Dekker;
Chem. Eng. Sei. 19-201 (1964).
- 2). R.M.Voncken, D.B.Holmes, H.W. den Hartog;
Chem. Eng. Sei. 19-209 (1964).
- 3). J.H.Rushton, E.W.Costich, H.J.Everett;
Chem.Eng. Progr. 46-395,467 (1950).
- 4). S.Nagata, K.Yamamoto, K.Hashimoto, Y.Narusse;
Mem.Fac.Eng. Kyoto Univ. 21-260 (1959).
- 5). J.W.Rotte;
Afstudeerverslag Lab. voor Fys. Technol. Delft (1964).
- 6). E.B.Guttoff;
A.I.Ch.E.Journal 6-347 (1960).
- 7). H.Kramers, K.R.Westerterp;
Elements of Chemical reactor design and operation, p.67.
- 8). P.M.E.M.van der Grinten;
collegedictaat Procesregeling (1964), p.32.

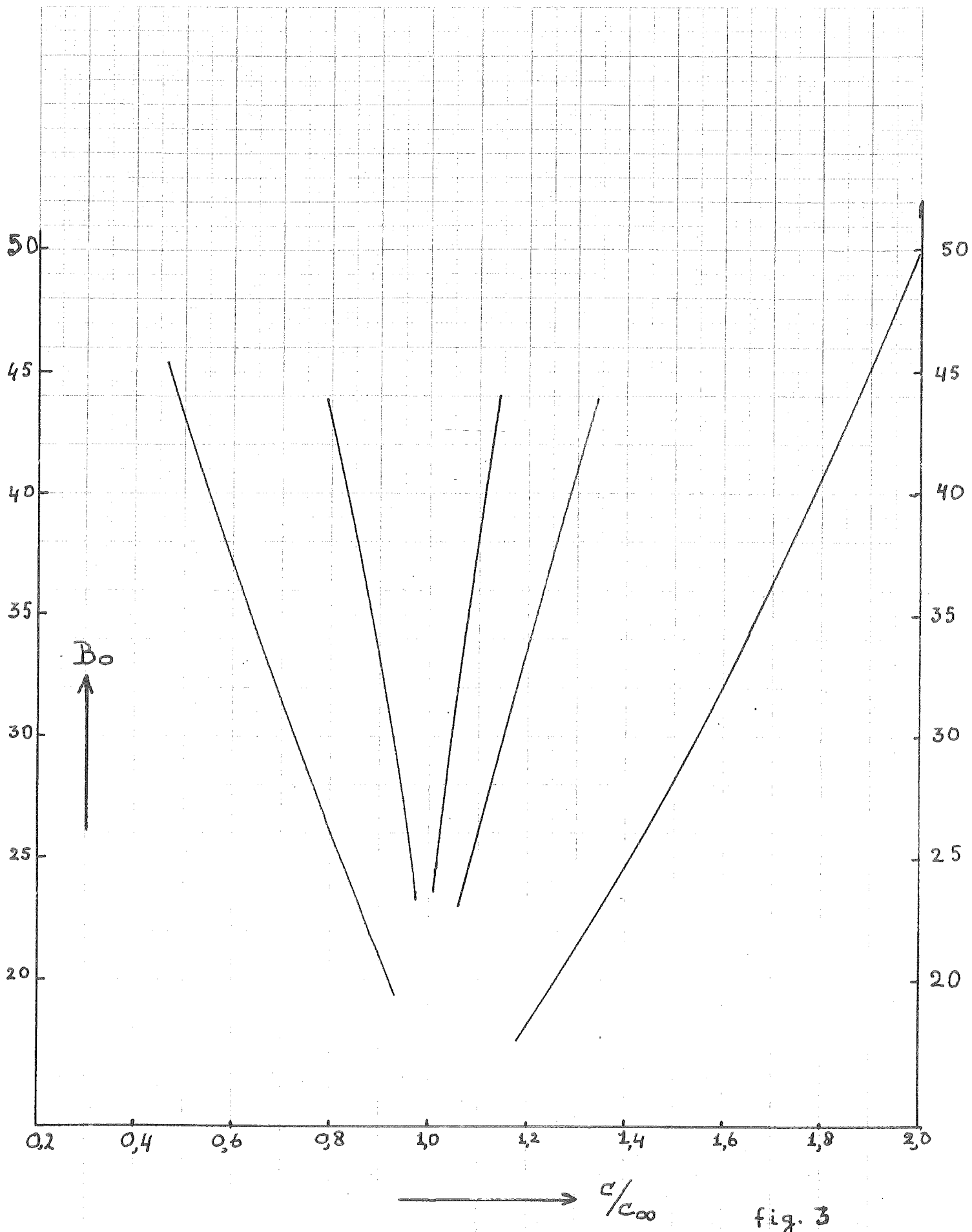


fig. 3

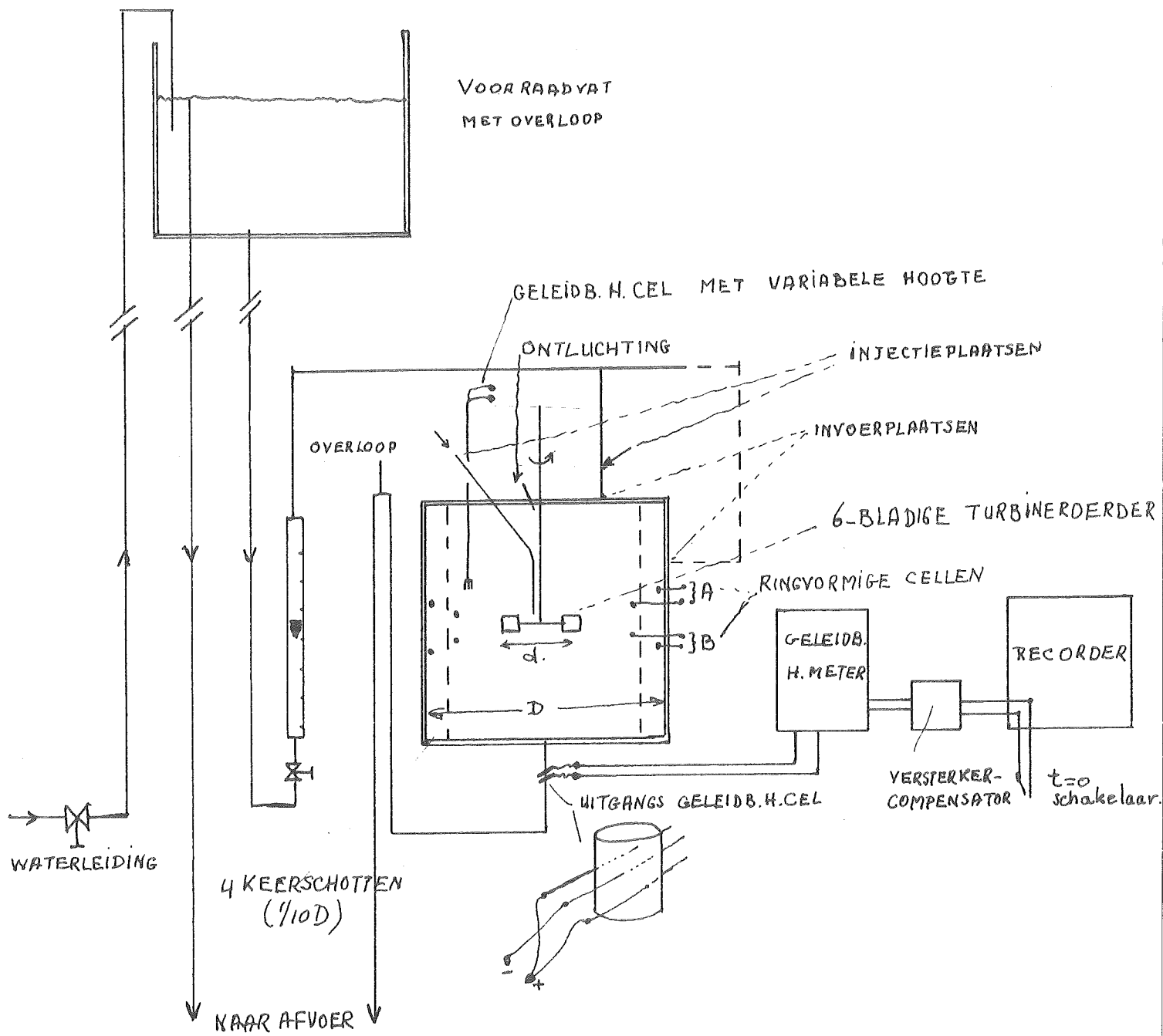
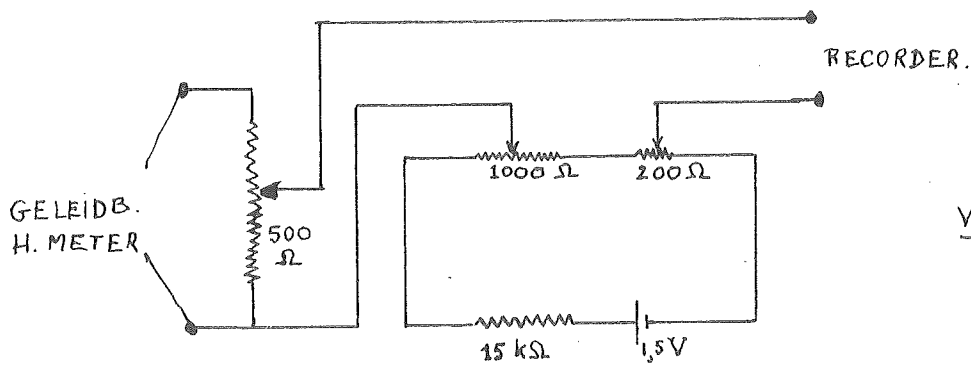


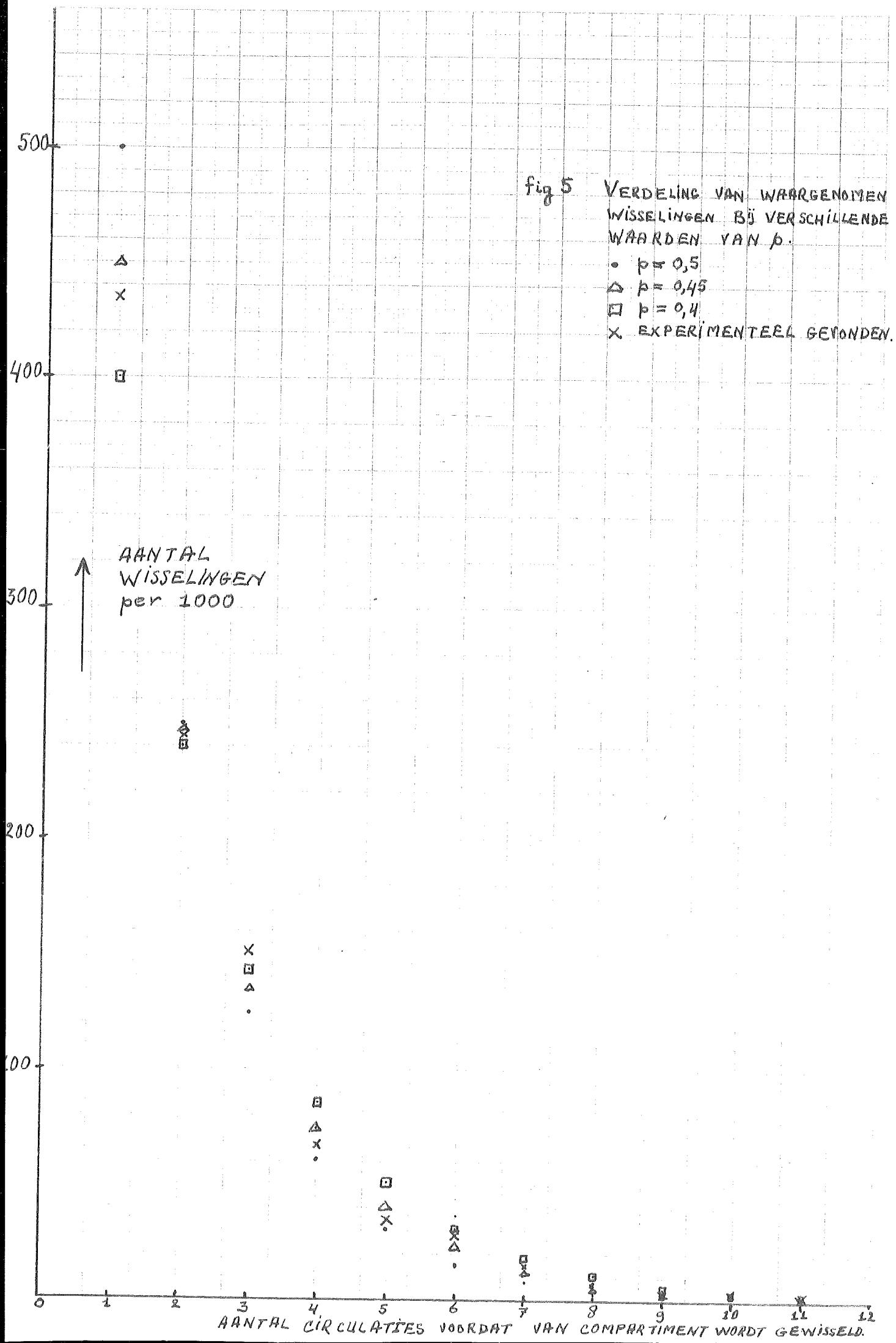
fig. 4. DE OPSTELLING.



VERSTERKER SCHAKELING

fig 5 VERDELING VAN WAARGENOMEN
 WISSELINGEN BIJ VERSCHILLENDE
 WAARDEN VAN ρ .

- $\rho = 0,5$
- Δ $\rho = 0,45$
- \square $\rho = 0,4$
- X EXPERIMENTEEL GEVONDEN.



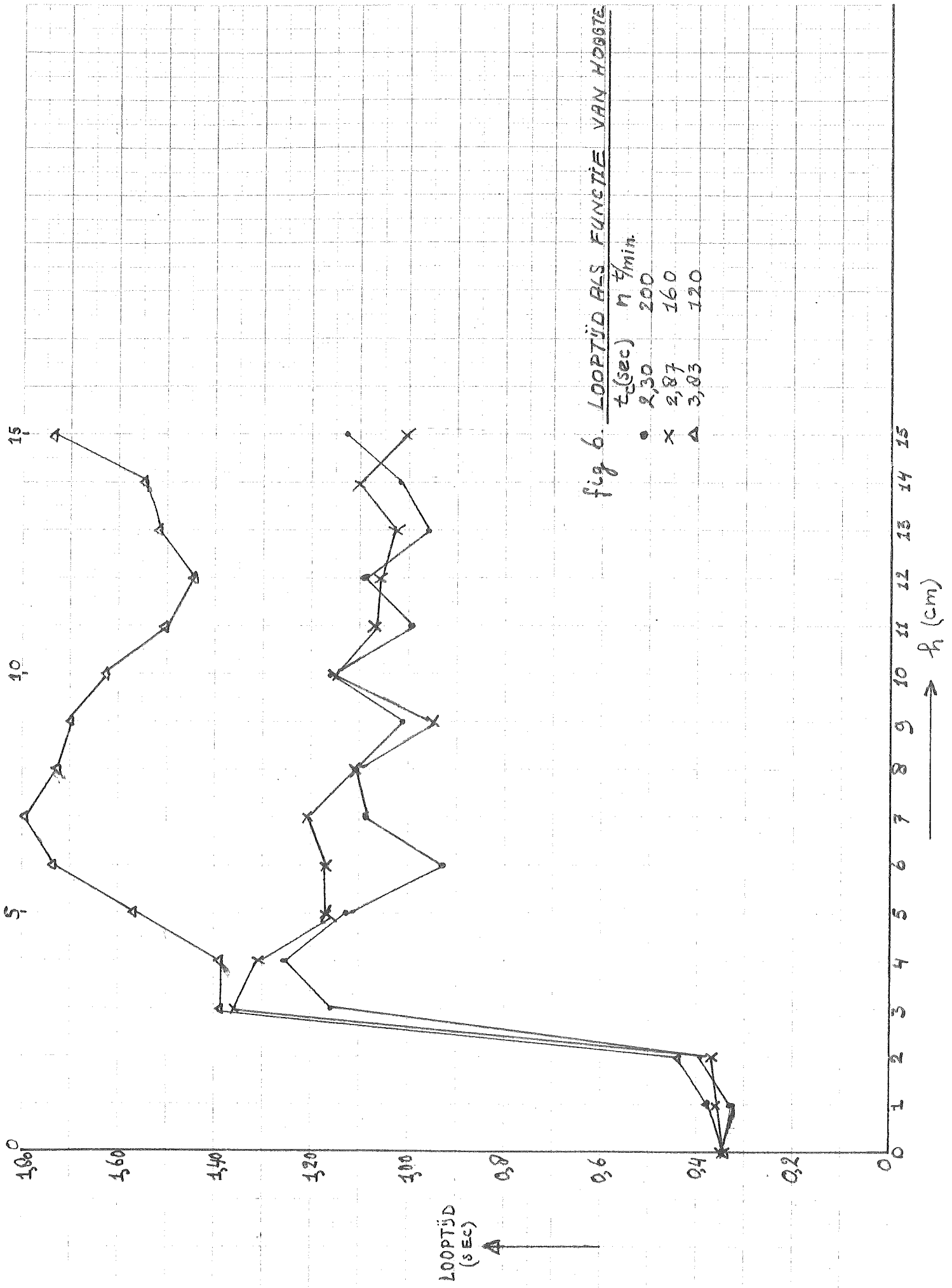
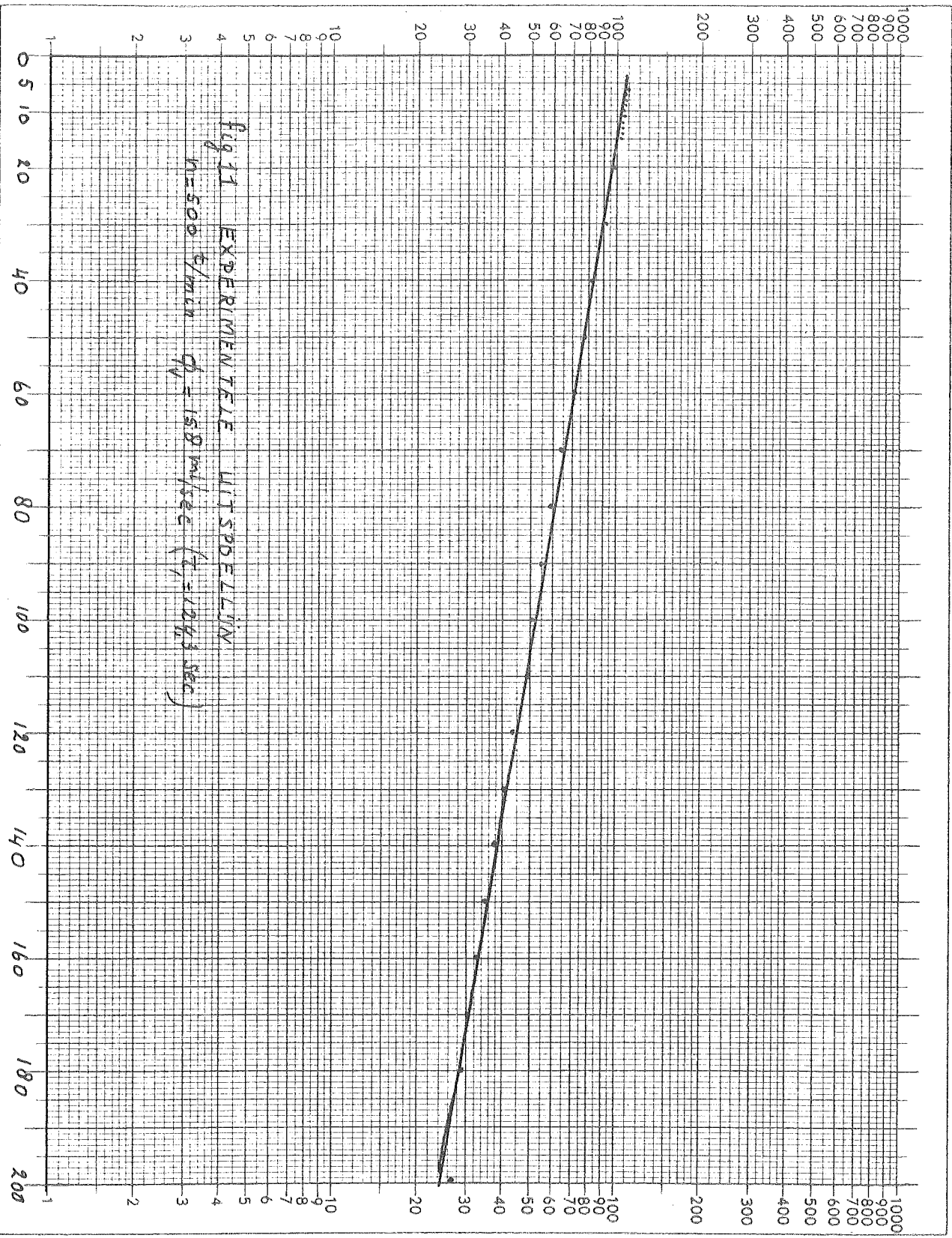


fig. 6. LOOPTIJD ALS FUNCTIE VAN HOOGTE

LOOPTIJD
(sec)

h (cm)



c →

→ t. (sec.)

Fig 12: PLAATS. MAX. IN VERBLIJFTIJDSPREIDINGS-
KROMME ALS. FUNCTIE VAN TOERENTAL.

ϕ_v ml/sec

109

158

210

•

x

□

