

MASTER

Het stochastisch gedrag van deeltjes op een enkele knik van zigzagziften met een knikhoek van 90 graden en 120 graden

van Ginneken, C.P.M.

Award date:
1978

[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

HET STOCHASTISCH GEDRAG VAN DEELTJES OP EEN ENKELE KNIK
VAN ZIGZAGZIFTERS MET EEN KNIKHOEK VAN 90° EN 120°

Afstudeerverslag van C.P.M. van Ginneken

Het onderzoek is uitgevoerd in de vakgroep der Fysische
Technologie onder begeleiding van
Hoogleraar : Prof. Ir. M. Tels
Coach : Ir. M.M.G. Senden

30 augustus 1978

T.H. EINDHOVEN

AFD. SCHEIKUNDIGE
TECHNOLOGIE

AFSTUDEERVERSLAG van:

C.P.M. van GINNEKEN

Blz.

Onderwerp: Het stochastisch gedrag van deeltjes op een enkele knik van
zig zag zifters met een knikhoek van 90° en 120°

Hoogleraar: Prof.ir.M.Tels

Laboratorium: Fysische Technologie

Datum: 30-8-1978

Samenvatting:

In het kader van het onderzoek naar de scheidingstechnieken die gebruikt worden in scheidingsprocessen voor de terugwinning van bruikbare componenten uit huishoudelijk afval wordt onderzoek verricht aan de zig zag zifter.

De zig zag zifter bestaat uit een meermaals geknikt kanaal met rechthoekige doorsnede, dat uit een aantal segmenten is opgebouwd die onder een bepaalde constante hoek op elkaar staan. Door het kanaal wordt lucht naar boven geleid, die op iedere knik de deeltjes naar valgedrag scheidt. Hierdoor ontstaan een stijg- en daalstrook van deeltjes tussen de knikken van de zifter. Het gevoede materiaal wordt gescheiden in een top- en een bodemfractie. De beweging van de deeltjes in de zifter wordt bepaald door deterministische krachten, zoals de zwaartekracht, de opwaartse kracht en de gemiddelde meesleepkracht, en door stochastische krachten. Deze stochastische krachten zijn onder meer het gevolg van interacties van het deeltje met de wand, wisselwerkingen tussen deeltjes onderling en het luchtsnelheidsgedrag in het ziftkanaal.

Door toedoen van deze stochastische krachten is de beweging van identieke deeltjes op een knik niet volledig bepaald. Er is onder gegeven procescondities slechts sprake van een waarschijnlijkheid, dat het deeltje met de luchtstroom wordt meegenomen. Deze waarschijnlijkheid wordt met een stijgkans beschreven.

Bij dit onderzoek is getracht een verklaring voor het stochastisch gedrag in de knik te vinden, in afhankelijkheid van de knikhoek; een hoek van 90° en 120° zijn gebruikt. Hiertoe zijn de bewegingen van stijg- en daaldeeltjes tijdens het ziftproces op de knik theoretisch en experimenteel geanalyseerd. Deze analyse is gedaan voor de modelfstof propoff wit papier (2×2 cm, 100 g/m^2) bij lage beladingen in de zifter. Het proces kan globaal in 3 fasen worden ingedeeld:

1. Het binnenkomen van de deeltjes in de knik

Voor een groot aantal deeltjes zijn de intreecondities experimenteel bepaald. Dit houdt in de grootte en richting van de intreesnelheid en de plaats waar het deeltje de knik binnenkomt. De variatie in deze beginvoorwaarden impliceert al een variatie in het ziftresultaat voor de identieke deeltjes.

2. Het eigenlijke classificatieproces

Uitgaande van een vereenvoudigde balans van de krachten, die op het deeltje werken, zijn baanberekeningen uitgevoerd. De onder 1 gevonden beginvoorwaarden zijn hierbij gebruikt. Teneinde de meesleepkracht van de luchtstroom te kennen is het nodig quantitative gegevens te hebben over het verloop van de lokale luchtsnelheid in de knik. Hiertoe is de luchtstroming in het ziftkanaal met behulp van met helium gevulde zeepbellen gevisualiseerd en is het luchtsnelheidsprofiel nauwkeurig bepaald met behulp van hotfilmanemometrie.

3. Het uittreden van de deeltjes uit de knik

Met name in de 90° zifter kan deze stap gepaard gaan met een contact aan de zifzwand. Dit kan een extra stochastisch element in de bewegingsafloop brengen, welke in dit onderzoek echter niet is bestudeerd.

Desondanks en ondanks het feit, dat het rotationeel gedrag van de deeltjes is verwerkt in een -als gemiddelde van een groot aantal experimentele waarden- proef-ondervindelijk bepaalde meesleepcoëfficiënt, blijkt dat de onder 2 uitgevoerde baanberekeningen, waarin de stochastiek van intreecondities is verwerkt, een redelijke beschrijving geven van de totale stochastiek en dus van de experimenteel vastgelegde stijchkansen.

In dit onderzoek is voorts nog de invloed van de breedte van de 120° zifter op het scheidingsgedrag ervan bestudeerd.

Het blijkt dat een kleinere breedte resulteert in een grotere scheidingscherpte. Zoals bij windziften steeds het geval is gaat deze grotere scheidingscherpte echter gepaard met een langere verblijftijd van het materiaal in de zifter.

INHOUDSOPGAVE

Hoofdstuk, paragraaf	pagina
Doel van het onderzoek	1
1. <u>Inleiding</u>	2
1.1. Het ziften	2
1.2. Het luchtsnelheidsprofiel	4
1.3. Stijgkans/daalkans	4
1.4. Probleemstelling	5
2. <u>Gebruikte apparatuur</u>	6
3. <u>Visualisatie luchtstromingsprofielen</u>	9
3.1. Inleiding	9
3.2. Cameraopstelling en fotografische gegevens	9
3.3. Belichting	10
3.4. Zeepbellentechniek	10
3.5. Draadjestechiek	11
3.6. Opnamengegevens	12
4. <u>Snelheidsmetingen</u>	13
4.1. Inleiding	13
4.2. De hotfilmanemometrie	14
4.3. IJking van de hotfilmanemometer	17
4.4. Verwerking van het anemometersignaal	17
4.5. Meetopstelling	18
4.6. Gebruikte apparatuur	19
5. <u>Resultaten snelheidsmetingen</u>	19
5.1. Inleiding	19
5.2. De 120° zifter	20
5.3. De 90° zifter	22
5.4. Algemene interpretatie van de anemometerresultaten	22
6. <u>Resultaten visualisatie luchtstromingsprofielen</u>	25
6.1. Zeepbelopnamen	25
6.1.1. Inleiding	25
6.1.2. Vergelijking lage en hoge snelheid 90° zifter	26
6.1.3. " " " " " 120° "	26
6.1.4. Vergelijking 90° - 120° zifter	26
6.2. Draadjestechiek	27
7. Vaststelling stromingsprofielen in zifterknik 6	27
7.1. Algemeen	27
7.2. De 90° zifter; profiel ten behoeve van de daaldeeltjes	28

7.3. De 90° zifter; profiel ten behoeve van de stijg- deeltjes	32
7.4. De 120° zifter, profiel voor daal- en stijgdeeltjes	36
8. <u>De bewegingsvergelijking</u>	40
8.1. Inleiding	40
8.2. Berekening van de meesleepcoëfficiënt C_D	41
8.2.1. Meesleepkracht; stroming rond een lichaam	41
8.2.2. Berekening C_D op grond van evenwichtszifting voor plaatjes	42
8.2.3. Berekening C_D uit de experimenteel bepaalde aanloopsnelheid van het deeltje	43
8.2.4. Berekening van de C_D voor stijgdeeltjes	44
8.2.4.1. De 90° zifter	44
8.2.4.2. De 120° zifter	45
8.2.5. Berekening van de C_D voor daaldeeltjes	46
8.2.5.1. De 90° zifter	46
8.2.5.2. De 120° zifter	46
8.3. Oplossing van de bewegingsvergelijking	47
9. <u>Bepaling van de begincondities voor de bewegings- vergelijking</u>	49
9.1. Algemeen	49
9.2. De 90° zifter	50
9.2.1. Daaldeeltjes	50
9.2.2. Stijgdeeltjes	51
9.3. De 120° zifter	53
9.3.1. Daaldeeltjes	53
9.3.2. Stijgdeeltjes	55
9.4. Vergelijking 90° - 120° zifter	57
9.5. Het 'target' in de 90° zifter	60
10. <u>Deterministische baanberekeningen</u>	61
10.1. Inleiding	61
10.2. Verificatie van het snelheidsprofiel	61
10.3. De 90° zifter, daaldeeltjes; v_f superficieel = 2.0 m/s	62
10.3.1. Baanberekeningen met het geknikte profiel; $C_D = 0.880$	62
10.3.2. Baanberekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.880$	63
10.3.3. Berekeningen met het geknikte profiel; $C_D =$ 0.75	64

10.4. De 90° zifter, stijgdeeltjes; v_f superficieel = 2.0 m/s	64
10.4.1. Berekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.598$	64
10.4.2. Berekeningen met het geknikte profiel; $C_D = 0.598$	65
10.4.3. Berekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.75$	65
10.5. De 120° zifter, daaldeeltjes; v_f superficieel = 1.56 m/s	65
10.5.1. $C_D = 1.04$	65
10.5.2. $C_D = 0.75$	66
10.6. De 120° zifter, stijgdeeltjes; v_f superficieel = 1.56 m/s; $C_D = 0.787$	66
10.7. Motivatie verdere rekenprogramma	67
10.8. De 90° zifter, daaldeeltjes; geknikt profiel; $C_D = 0.75$	69
10.8.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}(v_f = 2.0$ m/s)	69
10.8.2. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = \frac{1}{2}v_{p0}(v_f =$ 2.0 m/s)	70
10.8.3. v_f superficieel = 3.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}(v_f = 2.0$ m/s)	70
10.8.4. v_f superficieel = 3.0 m/s; $v_{p0} = 3/2 \cdot v_{p0}(v_f$ = 2.0 m/s)	70
10.9. De 90° zifter, stijgdeeltjes; ronde profiel; $C_D = 0.75$	71
10.9.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = \frac{1}{2}v_{p0}(v_f =$ 2.0 m/s)	71
10.9.2. v_f superficieel = 3.0 m/s; $v_{p0} = 3/2 \cdot v_{p0}(v_f$ = 2.0 m/s)	72
10.10. De 120° zifter, daaldeeltjes; $C_D = 1.04$	73
10.10.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}(v_f =$ 1.56 m/s)	73
10.10.2. v_f superficieel = 2.2 m/s; $v_{p0} = v_{p0}(v_f =$ 1.56 m/s)	73
10.11. De 120° zifter, stijgdeeltjes; $C_D = 0.787$	73
10.11.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = 1/1.56$ $v_{p0}(v_f = 1.56$ m/s)	73
10.11.2. v_f superficieel = 2,2 m/s; $v_{p0} = 2.2/1.56$ $v_{p0}(v_f = 1.56$ m/s)	74
10.12. Bespreking van de resultaten	75

11. <u>Invloed van de breedte van de 120° zifter op de scheidingscherpte en capaciteit</u>	77
11.1. Inleiding	77
11.2. Gebruikte apparatuur en modelstoffen	78
11.3. Scheidingscurve en verblijftijd bij $b = 5.2$ cm	79
11.4. " " " " $b = 15.1$ cm	80
11.5. Vastleggen stromingsprofiel m.b.v. zeepbellen	81
11.6. Discussie	82
Literatuurlijst	85
Symbolenlijst	86
Inhoudsopgave bijlagen	88

DOEL VAN HET ONDERZOEK

Het afstudeerwerk was een onderdeel van het onderzoek naar de invloed van zifftergeometrie en deeltjeseigenschappen op de scheiding in zigzagziften. De zigzagzifter is een meermaals geknikt kanaal, dat gevormd wordt door secties met een rechtehoekige doorsnede, welke onder een bepaalde hoek op elkaar geplaatst zijn.

In dit FT-onderzoek wordt naar een relatie gezocht tussen knikhoek, kanaalbreedte, voedingsplaats, totaal aantal knikken en de scheiding en capaciteit.

Op grond van deze relatie zou dan voor een bepaalde toepassing de beste zifftergeometrie gekozen kunnen worden.

Een stochastisch model (lit.2) geeft een voorspelling van het scheidingsgedrag van een meertrapszifter op basis van de deeltjesbeweging op één enkele knik.

Bij het onderzoek naar het deeltjesgedrag op één enkele knik is voor de 120 graden zifter (Savelsberg, lit.2) en de 90 graden zifter (Jacobs, lit. 1) gekeken naar de scheiding in zo'n knik in afhankelijkheid van de superficiële luchtsnelheid.

Dit 'single stage' gedrag voor modelstoffen bij lage beladingen wordt hierbij beschreven met stijchkansen voor stijgdeeltjes en daaldeeltjes: P_s en P_d als functie van de superficiële luchtsnelheid v_f . Een stijgdeeltje is een deeltje dat de knik aan de onderzijde binnenkomt, een daaldeeltje komt de knik aan de bovenzijde binnen.

Het doel van dit afstudeeronderzoek is, om een verklaring te vinden voor $P_s(v_f)$ en $P_d(v_f)$. Hiertoe wordt het stromingsprofiel van de lucht in één knik van de 90° en 120° zifter gemeten, om aan de hand daarvan deterministische baanberekeningen uit te voeren voor het modeldeeltje tijdens de daadwerkelijke zifting op één bepaalde knik. Hiervoor zijn ook de intreecondities van het deeltje op de knik nodig.

Op grond van deze berekeningen van één enkele overgang hopen we iets meer te kunnen zeggen over het ontstaan van de stijchkansen voor modelstoffen in één knik van de zifter.

Tenslotte zal nog gekeken worden naar de invloed van de breedte van het ziftkanaal op de overall scheidingscherpte en capaciteit van de 120° zifter.

1. INLEIDING

1.1. Het ziften

In het kader van het onderzoek naar de terugwinning van bruikbare componenten uit vast huishoudelijk afval neemt de studie van de zifttechniek een belangrijke plaats in.

Ziften is een scheidingstechniek die berust op het verschil in valgedrag van deeltjes in de ziftzone. In belangrijke mate karakteristiek voor dit valgedrag is de valsnelheid van deze deeltjes in stilstaande lucht.¹⁾ Er bestaan verschillende uitvoeringsvormen van het ziftproces, ik noem de centrifugaalziften en de zwaartekrachtziften. In dit laboratorium wordt (nog) uitsluitend gekeken naar de zwaartekrachtziften, en de laatste jaren met name naar het ziftproces in meertrapszifters van het zigzagtype.

Een zigzagzifter is een meermaals geknikt kanaal met rechthoekige doorsnede, waarvan de segmenten onder een bepaalde, steeds gelijke hoek staan.

Bij dit onderzoek is gekeken naar het eentrapsgedrag van deeltjes bij een knikhoek van 90° en 120° , maar daarnaast is ook een aanvang gemaakt met de studie van de 150° zifter.

In de zigzagzifter wordt lucht naar boven gezogen, en deze lucht zorgt op elke knik voor een scheiding van de deeltjes naar richting van de snelheid. Zie figuur 1, pagina 3.

In deze figuur geldt:



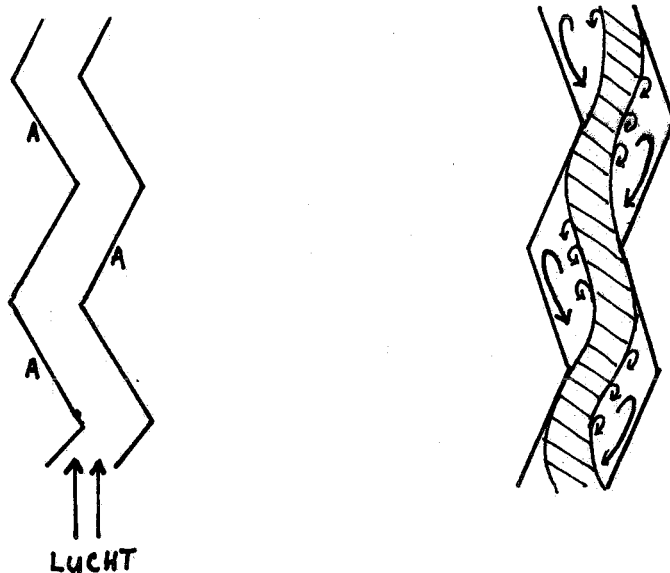
Doorlopend kanaal met hoge, naar boven gerichte luchtsnelheid.



Gebieden met lage luchtsnelheid; afhankelijk van zifter- en breedte van het kanaal treedt in deze gebieden recirculatiestroming op (naar beneden gerichte luchtsnelheid).

¹⁾ Valsnelheid: de stationaire snelheid die een vallend lichaam in een oneindig uitgestrekt stilstaand fluidum bereikt. Deze is afhankelijk van vorm, grootte en dichtheid van het lichaam, als ook van de dichtheid en de viscositeit van het fluidum.

Fig. 1 Schema van een zigzagzifter (links); het luchtsnelheidsprofiel(r)



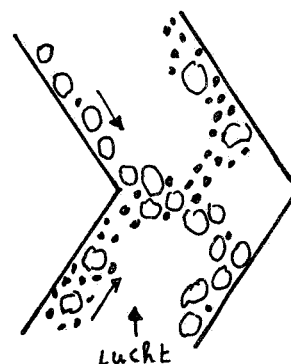
Door het snelheidsverschil tussen het gearceerde en het blanke deel van de zifter ontstaan er kleine wervels aan de grenzen van het snelle kanaal, die wanneer ze voldoende ruimte hebben (afhankelijk van de breedte en de zifthoek) aanleiding kunnen geven tot het ontstaan van een recirculatiestroming langs de 'liggende' wand (A) van de knik.

Door dit snelheidsprofiel wordt de scheiding op de knik bewerkstelligd: deeltjes die langs de wand naar beneden komen kunnen als ze op de knikpunt belanden of door het snelle kanaal schieten en langs de volgende liggende wand naar beneden glijden/rollen, of meegezogen worden door de lucht, afhankelijk van de grootte, de vorm, het gewicht en de intreesnelheid van het deeltje.

Evenzo kunnen deeltjes die in het snelle kanaal mee naar boven worden gezogen, of verder omhoog gaan, of terecht komen in een gebied met lage luchtsnelheid en naar beneden bewegen. Op deze manier ontstaan er twee stromen in de knik, een daalstroom (grofstroom) en een stijgstroom (fijnstroom). Zie fig.2.

Fig.2 Deeltjesstromen in een knik.

Op de knik vindt uitwisseling plaats van deeltjes tussen de grof- en de fijnstroom.



De beweging van de deeltjes wordt bepaald door deterministische krachten, d.w.z. krachten die alleen bepaald worden door variabelen, die geen stochastisch karakter hebben, en stochastische krachten, d.w.z. krachten die (mede) bepaald door één of meer stochastische variabelen.

Onder de deterministische krachten vallen de (gemiddelde) meesleepkracht, de zwaartekracht en de opwaartse kracht, terwijl tot de stochastische krachten o.a. de wisselwerkingen behoren tussen de deeltjes onderling, en tussen het deeltje en de ziftermwand. Andere grootheden van stochastische aard zijn de oriëntatie van het deeltje in de luchtstroom en de turbulentie van de luchtstroming.

1.2. Het luchtsnelheidsprofiel

In het afstudeeronderzoek is gekeken naar het gedrag van de lucht op en rond de knikken in de zifter, en de invloed hiervan op de deeltjesbeweging. Om een soort snelheidshoogtekaart te krijgen voor een knik werd voor een groot aantal punten in zo'n knik de grootte en richting van de locale snelheid van de lucht opgemeten met behulp van een hot-filmanemometer.

Voor het verkrijgen van een beter inzicht werd bovendien getracht het stromingsprofiel zichtbaar te maken en fotografisch en op video vast te leggen.

Dit zichtbaar maken van de stroming geschiedde door in de zifter vrij zwevende zeepbelletjes in te brengen, deze van opzij te belichten (tegen een donkere achtergrond) en te fotograferen.

Met behulp van beide technieken, de anemometrie en de visualisatie, werd het profiel bepaald van de luchtsnelheid, en dit werd weer gebruikt om deterministische baanberekeningen in de knik uit te voeren.

1.3. Stijgkans/daalkans

Zoals gesteld in §1.1. heeft een deeltje dat een knik nadert de mogelijkheid om òf te stijgen, òf met de dalstroom naar beneden gevoerd te worden. Er is een model opgesteld (lit.2) waarin dit stijgen of dalen wordt gevat in een kans.

Het model heeft geen tijdbasis, en de eenheidsstap in het proces is de overgang van een deeltje naar een van de dichtstbijgelegen knikken.

De kans om te stijgen wordt in dit model gedefinieerd als zijnde

de overgangswaarschijnlijkheid voor het deeltje naar de direct erboven gelegen knik. Evenzo is de kans om te dalen de overgangswaarschijnlijkheid voor het deeltje naar de direct eronder gelegen knik.

Bovendien speelt in het model de voorgeschiedenis van het deeltje nog een rol: er wordt onderscheid gemaakt tussen de stijgkans (daalkans) van een deeltje dat via de stijgstroom de knik is binnengekomen (stijgdeeltje), en de stijgkans (daalkans) van het deeltje dat via de dalstroom de knik is binnengekomen (daaldeeltje).

De stijgkans van een stijgdeeltje noemen we P_s , de daalkans van het stijgdeeltje is gelijk aan $1-P_s$. Impliciete aanname: geen opeenhoping van materiaal in de zifterknik.

Evenzo kennen we aan het daaldeeltje de kans P_d toe om naar de bovenliggende knik te stijgen, de daalkans van het daaldeeltje is $1-P_d$. Zie onderstaand diagram.



Door de traagheid van het deeltje geldt in het algemeen dat $P_s \neq P_d$.

1.4. Probleemstelling

In het verleden is het single-stage gedrag van modelstoffen uitgedrukt in P_s en P_d als functie van de superficiële luchtsnelheid v_f .

Nu willen we een verklaring vinden voor $P_s(v_f)$ en $P_d(v_f)$, en dit dan door deterministische baanberekeningen van het deeltje tijdens de daadwerkelijke zifting op één knik.

Hiervoor is het noodzakelijk dat we het luchtsnelheidsprofiel in de knik van de zifter kennen, en een groot deel van het onderzoek was daarom gericht op het meten en visualiseren van het snelheidsprofiel in een knik van de 90° en 120° zigzagzifter.

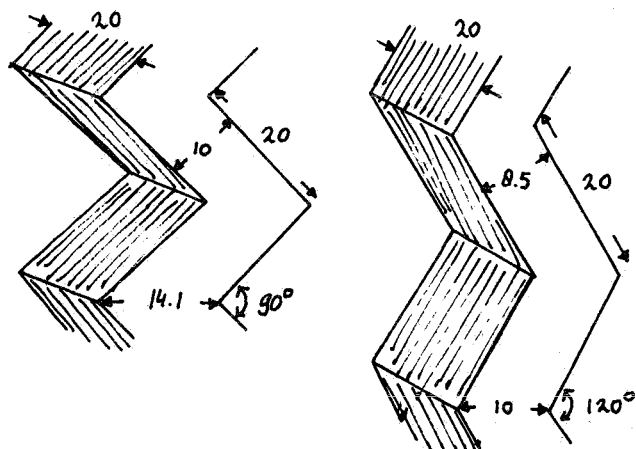
Bovendien werden de intreecondities van de deeltjes in de knik gemeten.

2. GEBRUIKTE APPARATUUR

De twee zifters (90 en 120 graden) zijn volgens hetzelfde principe geheel analoog gebouwd.

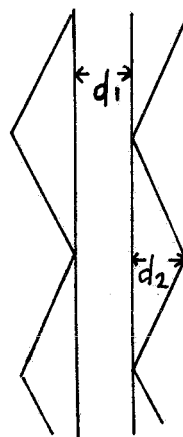
De geknikte zijden (van metaal) zijn ingeklemd tussen een glazen voor- en achterplaat. In figuur 3 is van beide zifters een segment getekend, met de afmetingen in cm.

Fig. 3 Segmenten van de 90 en 120° zigzagzifter.



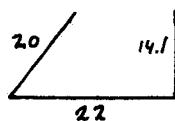
Deze afmetingen houden in dat de vrije doorgang (definitie: fig. 4) nul procent bedraagt.

Fig. 4 Vrije doorgang = $d_1 / (d_1 + d_2)$

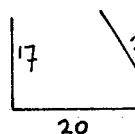
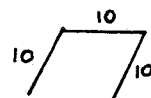


Voor de onderste knik van de 90° en de onderste en bovenste knik van de 120° zifter gelden afwijkende afmetingen (figuur 5).

Fig. 5 90° onder (maten in cm)



120° boven en onder



Voor de 120° zifter is voor het algemene geval (vrije doorgang $\neq 0$) in figuur 6 (pagina 8) een schets gegeven van de zifteropstelling inclusief randapparatuur.

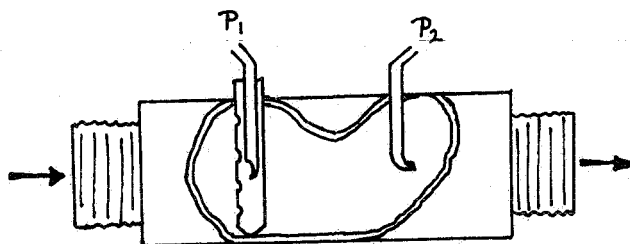
Deze randapparatuur bestaat uit:

- a. cycloon, voor het afscheiden van de topfractie
- b. roterende voedingssluis
- c. opvangtrommels voor bodem- en topfractie
- d. annubar
- e. blower (niet getekend)

Ad b. De roterende voedingssluis is een zware as met 4 rubberflappen die in een metalen huls ronddraait. Het toerental bedraagt 60 omwentelingen per minuut.

Ad d. De annubar, geplaatst tussen cycloon en blower, is een verschildrukopnemer. Voor gegeven pijpdiameter en bekende stromingscondities is het debiet van het fluidum dat door de pijp stroomt bepalend voor het drukverschil $\Delta P = P_1 - P_2$ over de twee annubarelementen (fig. 7). De annubar is geijkt.

Fig. 7 De annubar



De aan- en afvoerpipj moeten voldoende lang zijn om voor een stationair snelheidsprofiel in de annubarbuis te zorgen.

Eigenlijk is de annubar een gemodificeerde Pitotbuis, waar je door de plaats van de gaten in het linker element direct een goed gemiddelde van de snelheid over de diameter krijgt.

Het drukverschil gegeven door de annubar wordt omgezet in een electrisch signaal m.b.v. een inductieve verschildrukopnemer en een meetversterker.

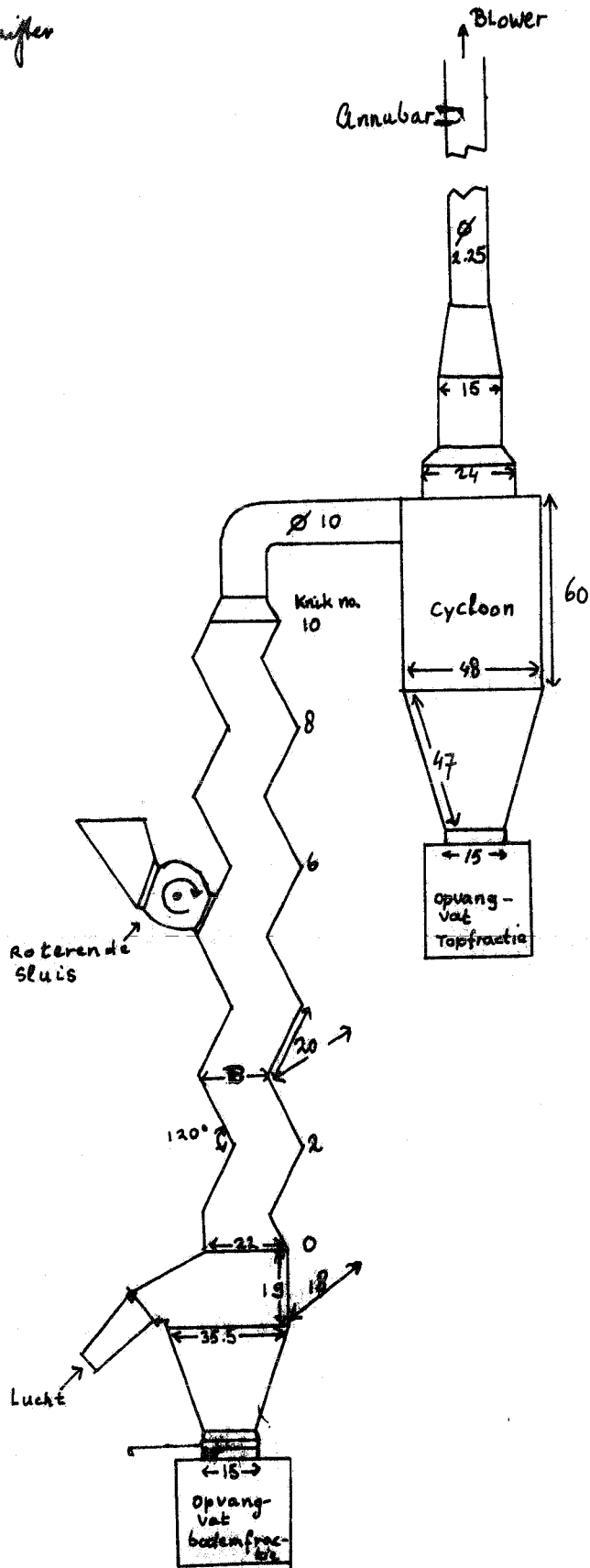
Gegevens van de annubar + randapperaatuur :

Annubar 90°zifter: model 713-316-ss

diameter pijp: 5.25 cm

serie nr. 90578

Fig 6. De 120° zigzagzifter



DE 90° ZIFTER;
ANDERE CYCLOON,
ZELFDE KNIK -
NUMMERING 0 T/M 10

120° - ZIGZAGZIFTER
[maten in cm]

B, de breedte is variabel instelbaar.
Bij nul % vrije doorgang : B = 10 cm

Annubar 120° zifter: model 713-316-ss
diameter pijp : 5.25 cm
serie nr. : 102276

Inductieve verschildrukopnemers: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
type PD1

Inventarisnummer 90°: TF 3218
120°: TF 3217

Meetversterker: HBM Messverstärker type TVE 01 A
HBM Grundeinheit NE 6

Door ijking wordt een relatie verkregen tussen het luchtdebiet en het drukverschil P:

De 90° zifter: $Q_f = 5.71334 \times 10^{-3} \Delta P^{0.535410}$ (1 atm. en 21 °C) (lit.1)

De 120° zifter: $Q_f = 5.760 \times 10^{-3} \Delta P^{0.53131}$ " (lit.2)

Hierin wordt Q_f uitgedrukt in m^3/s en ΔP in mm H₂O.

3. VISUALISATIE LUCHTSTROMINGSPROFIELEN

3.1. Inleiding

Als ondersteuning voor de anemometerresultaten en als hulpmiddel bij het verklaren van het gedrag van een deeltje in de luchtstroom, is getracht de stroming van de lucht in de zigzagzifter zichtbaar te maken en fotografisch vast te leggen.

Hiervoor werden twee verschillende technieken gebruikt, de 'zeepbeltechniek' en de 'draadjestechiek'. De eerste techniek diende om een algemeen beeld te geven van de stroming in een knik, de laatste is vooral toegepast omdat uit de zeepbelfoto's niet altijd blijkt welke richtingen de stromingen hebben, terwijl dit ook niet uit de anemometingen is te halen. Een verschil van 180° in de richting van de stroming geeft immers een zelfde anemometer-sigitaal.

3.2. Cameraopstelling en fotografische gegevens

De opstelling van de camera -dit geldt voor de foto- en de videocamera- is schematisch weergegeven in figuur 8 (bijlagen).

Gegevens fotograferen:

Camera: Nikon F kleinbeeldcamera

Objectieven: Nikon 50 en 85 mm

Film: Agfapan 400 Professional (400 ASA / 27 DIN)

Filmontwikkelaar: Agfa Atomal

Filmfixeer: Agfa Agefix

Spoelmiddel: water

Sluiter tijden en diafragma: zie § 3.6.

Gegevens afdrukken:

Papier: Agfa Brovira BH 312 (hard PE'papier)

Ontwikkelaar: Neutol

Fixeer: Agfa Agefix

Spoelmiddel: water

Gegevens video-opnamen:

Camera: Sony videocamera DXC 2000A

Objectieven: 16 en 25 mm

Recorder: Sony videorecorder EV-310 CE

Monitor: Conrac CVB 23/CCIR

Banden: Sony videorecordingtape V-11 60A

3.3. Belichting

Er is gebruik gemaakt van de donker-veldbelichting, wat inhoudt dat de achtergrond volledig donker wordt gehouden, en de te fotograferen objecten vanaf opzij belicht worden.

Een schema van de hier toegepaste belichting wordt verder verduidelijkt in de figuren 9 en 10 (bijlagen). De mogelijkheden waren beperkt door de bouw van de zifter; slechts via een aantal voedingsgaten kon licht naar binnen gebracht worden.

Men ziet dat door op deze wijze te belichten bijbenadering een lichtvlak ontstaat. Bij benadering, want door factoren als de eindige breedte van de lichtspalten, buiging en divergentie van de lichtbundel, en ongewenste reflecties (met name door de glazen voorplaat), wordt over een grotere diepte belicht.

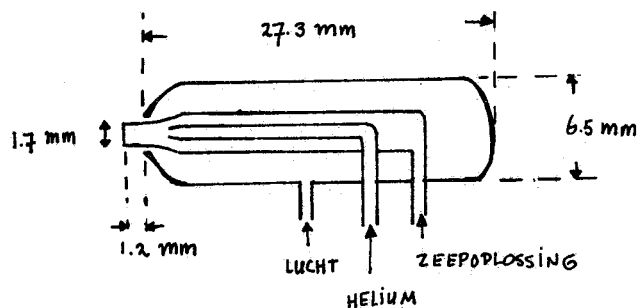
De belichting geschiedde door een tweetal halogeen lampen van ieder 1000 Watt die met perslucht gekoeld werden, om te voorkomen dat door inhomogene verwarming van de zifter het stromingsprofiel beïnvloed zou worden. De positie van de lampen en de wijze van koelen is in figuur 11 (bijlagen) aangegeven.

Bij deze lichtsterkte van 2x1000 Watt konden bij gebruik van snelle films (27 DIN) goede opnamen gemaakt worden.

3.4. Zeepbellentechniek

Voor de vorming van de met helium gevulde zeepbellen werd gebruik gemaakt van een apparaat, de zeepbellengenerator, waarvan het belangrijkste onderdeel, de kop, in figuur 12 geschetst is.

Fig. 12 Kop van de
bellengenerator



Deze kop, die tijdens de experimenten via een van de lager gelegen voedingsgaten in de zifter bevestigd werd, bestaat in feite uit drie concentrische stukjes pijp. Van binnen naar buiten gaand treffen we de helium-, de zeepoplossing- en de luchttoevoer aan; de zeepoplossing wordt getransporteerd door de druk van het heliumcircuit.

M.b.v. de helium worden van de zeepoplossing belletjes gevormd, die door de lucht worden afgeblazen.

Het gaat erom, om vrij zwevende bellen te vormen, liefst met een redelijk groot en constant debiet. De bellen mogen bovendien niet te klein zijn, in verband met de hoeveelheid licht die ze moeten reflecteren om fotograferen mogelijk te maken.

Het soortelijk gewicht en de grootte van de bellen kunnen gevarieerd worden door met de debieten van de lucht- en zeepoplossing te spelen:

-zeepoplossing: het verlagen van het debiet betekent in het algemeen een verlaging van het soortelijk gewicht van de bellen.

-luchttoevoer: toename van de luchttoevoer resulteert in het sneller loslaten van de bellen, maar doet de diameter van de bellen afnemen.

Bellengenerator: Sage Action Inc. Bubble Generator

Model 3 with low speed head (bellen van 1.6 - 6.4 mm)

Zeepoplossing: S.A.I. 1035 Solution

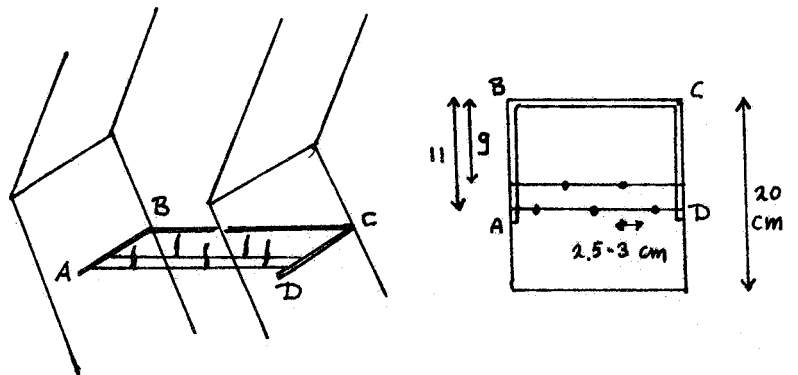
Bellendiameter: 2 - 4 mm

Resultaten zeepbellentechniek: zie § 6.1.

3.5. Draadjestechniek

Voor de bevestiging van de draadjes in de zifter: zie figuur 13.

Fig. 13 Bevestiging draadjes



De U-vorm is van staaldraad, waartussen twee ijzergaren draadjes zijn gespannen. Daaraan zijn stukjes witte wol bevestigd.

Ophanging draadjes: diameter 0.1 mm

Wollen draadjes: diameter: 2 - 2.5 mm

vrije lengte: 2.5 - 3 cm

gewicht: 3 mg/cm

afstand tussen de draadjes (op zelfde draad):

2.5 - 3.5 cm

Resultaten van de draadjestechiek: zie § 6.2.

3.6. Opmenggegevens

Bij de 90° zifter zijn opnamen gemaakt voor de superficiële luchtsnelheden $v_f = 1.645$ en $v_f = 3.20$ m/s, bij de 120° zifter voor de luchtsnelheden $v_f = 1.99$ m/s en $v_f = 3.67$ m/s.

Bij de zeepbelfotografie varieerden de sluitertijden van 1/16 tot 6 seconden, het diafragma van 1.8 of 2.0 (geheel open) tot 5.8. Voor de draadjesopnamen werd de sluitertijd gevarieerd van 1/125 tot 1 seconde, bij niet geheel geopende diafragmastanden.

Wat de video-opnamen betreft, een videobeeld is opgebouwd uit 625 lijnen. Voor het volgende beeld wordt in 1/50 seconde de helft van deze lijnen vervangen door die van het nieuwe beeld, waarbij telkens één lijn overgeslagen wordt. In de volgende 1/50 seconde worden de andere lijnen vervangen, zodat het totale beeld in 1/25 seconde vervangen wordt.

Het diafragma van de videocamera was bij de opnamen steeds geheel geopend.

4. SNELHEIDSMETINGEN

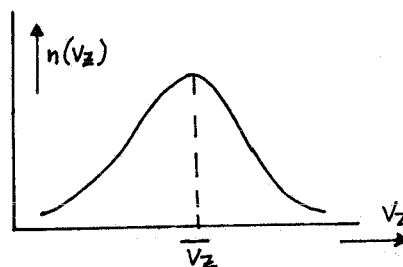
4.1. Inleiding

De deeltjesbeweging in de zifter wordt in belangrijke mate bepaald door de grootte en richting van de (tijdsgemiddelde) lokale luchtsnelheden langs de baan die het deeltje beschrijft.

We kunnen deze lokale snelheid opgebouwd denken uit een in de tijd gemiddelde snelheid en de fluctuatie van de snelheid in de tijd t.o.v. het gemiddelde.

De gemeten verdelingsfunctie van het fluctuerend snelheidssignaal in een bepaalde richting z verloopt zoals dat in figuur 14 is aangegeven.

Fig. 14 Verdelingsfunctie van de lokale snelheid



Hierin is $n(v_z) \cdot dv_z =$ de fractie van het totaal aantal snelheidssignalen tussen v_z en $v_z + dv_z$

Het gemiddelde, \bar{v}_z , wordt dan:
$$\bar{v}_z = \frac{\int_0^{\infty} v_z \cdot n(v_z) \cdot dv_z}{\int_0^{\infty} n(v_z) \cdot dv_z}$$

De fluctuatie van de snelheid t.o.v. het gemiddelde $v_z' = |v_z - \bar{v}_z|$ kan worden gekarakteriseerd door de spreiding rond het gemiddelde: spreiding = $\sqrt{(\overline{v_z'})^2}$, de Root of the Mean Square, of RMS van de fluctuatie.

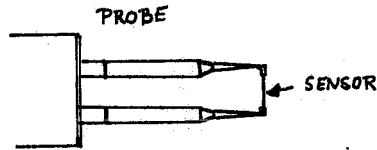
Met behulp van een hot-filmanemometer zal voor een netwerk van punten in een zifterknik de verdelingsfunctie van de lokale snelheid opgemeten worden, waarna hieruit de gemiddelde lokale snelheid berekend wordt.

Als men op een voldoende aantal plaatsen in de knik de gemiddelde lokale snelheid kent, heeft men a.h.w. een snelheidshoogtekaart waaruit, voor het stationaire geval, een stromingsprofiel gehaald kan worden. Hierbij is de hulp van de zeepbeltechniek onontbeerlijk. Dit profiel zal gebruikt worden om de bewegingsvergelijking van een deeltje in de zifterknik uit te rekenen, voor zover alleen deterministische krachten in rekening gebracht worden.

4.2 Hotfilmanemometrie

De hotfilmanemometer is in wezen een zeer kleine sensor, een elektrisch verhit draadje, waarmee de snelheid van een fluidum, in dit geval lucht, gemeten kan worden. De hotfilmsensor bestaat uit een keramische kern met daaromheen een dun platina laagje. Hierover zit een alumina coating als bescherming. Zie figuur 15.

Fig. 15 De sensor



De diameter van het draadje bedraagt 0.002 inch, de lengte 0.04 inch.

De anemometer wordt in ons geval gebruikt als constante-temperatuur-anemometer. In het kort komt de werking hierop neer:

De hotfilmanemometer hangt in de luchtstroom. Hierdoor koelt de draad af en verandert de elektrische weerstand ervan, en bij constante stroom, de spanning die over de sensor staat. De sensor is in een brug van Wheatstone opgenomen, waarin nog precies zo'n draadje is ingebouwd. Door de weerstandsverandering van de sensor gaat de brug uit zijn evenwicht. Om weer in de zelfde evenwichtsstand te geraken, is er een bepaalde spanning nodig, waardoor de temperatuur van de sensor weer op zijn oude waarde komt.

De spanning die nodig is om de sensor weer op temperatuur te brengen, of eigenlijk: om hem op constante temperatuur te houden, wordt geregistreerd.

Het voordeel van het werken met een constante temperatuur is, dat het temperatuurveld rondom de sensor nagenoeg constant blijft, zodat zeer snelle frequentieresponsie mogelijk is.

De spanning die nodig is om de sensor op constante temperatuur te houden is afhankelijk van de afkoeling van de draad, en dus van de aanstroomsnelheid van de lucht.

De warmteafgifte per tijdseenheid wordt gegeven door:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_s - T_o) \quad \text{J/s} \quad (\text{vgl. 4.1})$$

α : warmteoverdrachtscoëfficiënt ($\text{J/m}^2, ^\circ\text{C}$)

A : warmteoverdragend oppervlak (m^2)

T_s : temperatuur van de sensor ($^\circ\text{C}$)

T_o : temperatuur van de omgeving ($^\circ\text{C}$)

Voor het geval van gedwongen convectie geldt (lit.3) voor een dwarsaangestroomde cilinder:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = C + D \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \quad \text{voor } 1 < Re < 1500 \quad (\text{vgl. 4.2})$$

Re_{sensor} ligt in de orde 3 - 5. Overigens, de sensor wordt toch geijkt.

d : diameter sensor (m)

λ : warmtegeleidingscoëfficiënt van de sensor (J/m, °C)

Re : getal van Reynolds = $\frac{\rho \cdot v_f \cdot d}{\mu}$ = $B \cdot v_f^n$ (bij constante temperatuur)

v_f : luchtsnelheid

Pr : getal van Prandtl ≈ 0.7

B, C en D zijn bij constante temperatuur constanten.

Hiermee kan α geschreven worden als: $\alpha = F + G \cdot v_f^{0.5}$ (vgl. 4.3)

De hoeveelheid afgegeven warmte wordt, bij constante $(T_s - T_o)$:

$$Q = H + K \cdot v_f^{0.5} \quad \text{J/s} \quad (\text{vgl. 4.4})$$

In de stationaire toestand moet er evenveel warmte worden aangevoerd als wordt afgestaan. De hoeveelheid warmte die wordt aangevoerd wordt gegeven door de vergelijking:

$$Q = L \cdot E^2 \quad (\text{vgl. 4.5})$$

Hierin is E de spanning in Volts, $L = 1/R$, waar R = ohmse weerstand van de hotfilm.

Gelijkstelling van vgl. 4.4 en 4.5 geeft:

$$E^2 = M + N \cdot v_f^{0.5} \quad (\text{vgl. 4.6})$$

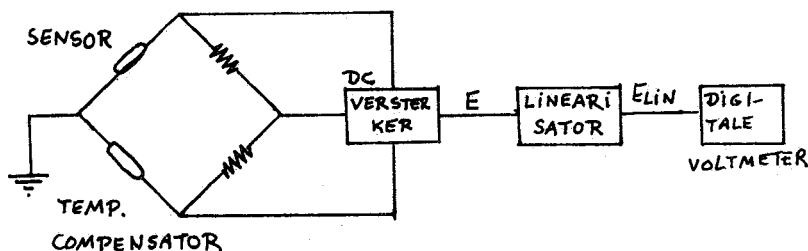
M.a.w., als je de spanning E kent, kun je met deze relatie de aanstroomsnelheid van de lucht berekenen.

N.B. Bovenstaand verhaal geldt voor een probe die door lucht met een vlak snelheidsprofiel wordt aangestroomd. Verdere verwaarlozingen zijn: warmteverliezen langs de supports

randeffecten t.g.v. supports op α_{locaal}

Iedere verandering in de temperatuur van de lucht (T_o) wordt opgevangen via een temperatuurscompensatieregeling; sensor en temperatuurcompensator zijn beide opgenomen in een brug van Wheatstone (figuur 16).

Fig. 16 Anemometer-schakeling

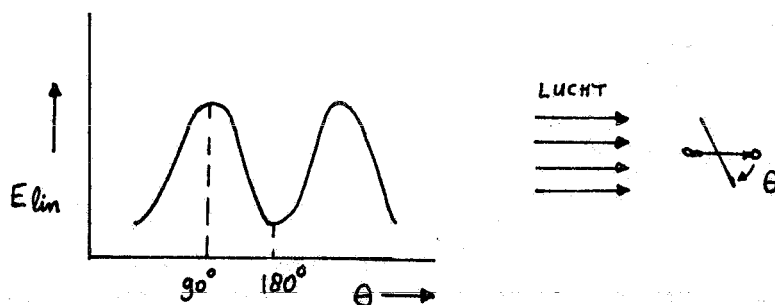


In de anemometerschakeling is een DC-versterker opgenomen (uitgangsspanning E) en een linearisator (uitgangsspanning E_{lin}). De linearisator lineariseert de relatie $E=f(v_f)$ volgens vgl. 4.6. Span en zero zijn instelbaar.

Het signaal van de linearisator wordt afgelezen op een digitale voltmeter. Door ijking wordt het verband tussen E_{lin} en de luchtsnelheid bepaald.

Vergelijking 4.6 geeft het verband tussen E en de luchtsnelheid bij dwarsaanstroming van een vlak snelheidsprofiel op de sensor. Als de sensor geroteerd wordt krijgen we een sinusvormig verloop van de spanning met de hoek θ waarover de sensor gedraaid wordt (figuur 17).

Fig. 17 E_{lin} vs. θ



De grootste afkoeling vindt plaats, en dus de maximale spanning wordt geleverd, wanneer de sensor loodrecht op de hoofdstromingsrichting staat: dwarsaanstroming. Is er slechts stroming in één richting (zoals bij de ijking: zie bijlagen) dan is er een verband tussen de werkelijke luchtsnelheid en de effectieve afloelings-snelheid langs de sensor: $v^2 = u^2 \cdot (\sin^2 \theta + k^2 \cdot \cos^2 \theta)$ (lit.4)

u : werkelijke snelheid

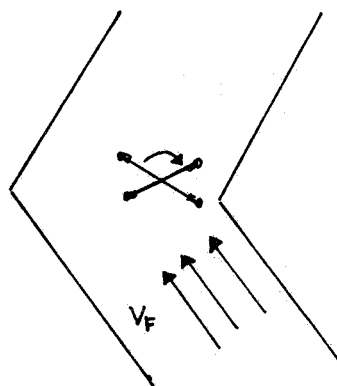
v : effectieve afkoelingsnelheid (zoals berekend met vgl. 4.6)

k : afkoelingsfactor evenwijdig aan de sensor

Wordt de anemometer gebruikt in een stromingsveld, waarbij de afkoelingsnelheid mede bepaald wordt door snelheidscomponenten die niet loodrecht op de sensor staan, dan mag men niet zonder meer de ijcurve gebruiken om de luchtsnelheid loodrecht op de sensor te berekenen uit de spanning.

Overigens wordt bij het gebruik van een hotfilmanemometer-single-probe ervan uitgegaan dat we een tweedimensionaal stromingsprofiel hebben in het vlak van tekening (figuur 18),

Fig. 18 Tweedimensionaal
stromingsprofiel
in vlak van tekening



, waarbij in dit vlak de hoofdstromingsrichting van de lucht bepaald wordt door rotatie van de probe in dit vlak. Een maximale uitslag betekent: de hoofdstromingsrichting van de lucht is loodrecht op de probe in het vlak van tekening.

Als de v_f -component die evenwijdig is aan de probe te verwaarlozen is, dan is de waarde van deze snelheid = snelheid eendimensionale probe-ijking. In het snelle kanaal is dit inderdaad het geval.

Daarbuiten is interpretatie zeer moeilijk, omdat daar de v_f -component evenwijdig aan de probe niet te verwaarlozen is.

Aangenomen is bovendien dat de hoek van aanstroming niet varieert in de lengterichting van de probe. Dit is redelijk gezien de lengte van 1 mm.

4.3. IJking van de hotfilmanemometer

Voor de ijking wordt verwezen naar de bijlagen.

4.4. Verwerking van het anemometersignaal

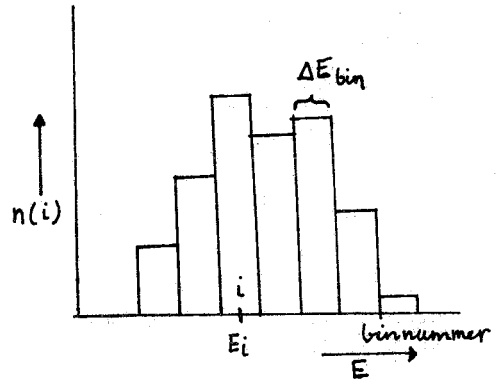
In de zigzagzifter geplaatst levert de anemometer een snel fluctuerend signaal. De verdelingsfunctie van het gelineariseerde signaal kan door een zgn. Probability Analyser worden verwerkt. Deze Analyser monstert op gezette tijden het anemometersignaal E_{lin} . De waarden van de spanningen worden vervolgens gerangschikt naar grootte in het geheugen opgeslagen, waarna deze verdeling naar een ponsband wordt uitgevoerd. D.m.v. een computerprogramma wordt uit de aldus geregistreeerde verdelingsfunctie de gemiddelde spanning en de spreiding berekend. Via de ijcurve, die het lineaire verband geeft tussen de gemiddelde spanning en gemiddelde luchtsnelheid, kan tegelijkertijd de gemiddelde snelheid en de spreiding berekend worden.

De Analyser bevat N (=100) kanalen (bin's), die ieder een gelijk spanningsinterval ΔE_{bin} hebben: $\Delta E_{bin} = \Delta E_{tot} / N$.

Het totale spanningsbereik ΔE_{tot} van de Analyser wordt ingesteld

op basis van de maximale anemometerspanning die gemonsterd wordt. De signalen (E_{lin}) worden naar grootte over de bin's verdeeld. Het aantal signalen dat in een bin i is verzameld wordt uitgevoerd als een spanning: de functiespanning $n(i)$. De verdelingsfunctie ziet er dan als volgt uit (figuur 19):

Fig. 19 Verdelingsfunctie van de anemometerspanning E_{lin}



$n(i)$: maat voor het aantal spanningsignalen in bin i :

$$(E_i - 0.5 \Delta E_{bin}) < E_{lin} < (E_i + 0.5 \Delta E_{bin})$$

Doordat de gelineariseerde anemometerspanning E_{lin} lineair verloopt met de lichtsnelheid v_f , kan uit de spanningsas direct de snelheidsas berekend worden. De gemiddelde snelheid wordt hierdoor:

$$\bar{v}_f = \frac{\sum_{i=0}^{99} v_i \cdot n(i) \cdot \Delta v_i}{\sum_{i=0}^{99} n(i) \cdot \Delta v_i}$$

Omdat de binbreedte constant is, kan dit geschreven worden als:

$$\bar{v}_f = \frac{\sum_{i=0}^{99} v_i \cdot n(i)}{\sum_{i=0}^{99} n(i)}$$

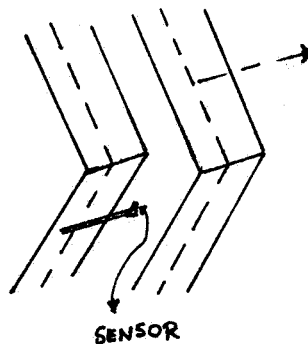
Voor een meer gedetailleerde uitleg van de werking van de Analyser wordt verwezen naar lit. 5.

4.5. Meetopstelling

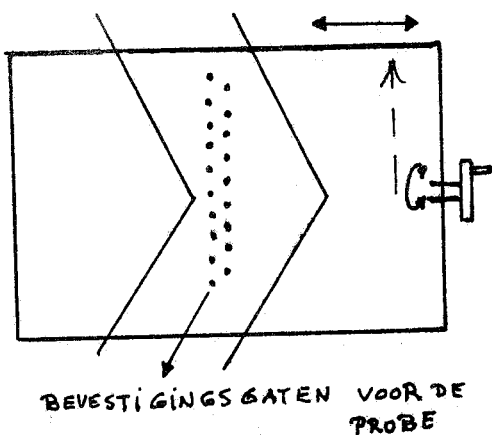
Fig. 20 Plaatsing van de probe in de zifter

Meetpaneel (schema)

(zie pagina 19)



vlak waarin de sensor geroteerd wordt (evenwijd voorplaat)
De insteekdiepte is ong. 7 cm.



De afstand tussen de middelpunten van twee gaten in één rij bedraagt 2 cm; de ene rij is 1 cm in verticale richting verschoven t.o.v. de andere, zodat we in totaal in 19 stappen van 1 cm de hoogte kunnen variëren. Het meetpaneel kan in horizontale richting verschoven worden, zodat een continue verdeling van punten over de breedte van de zifter tot de mogelijk-

heden behoort. De hoekinstelling en registratie van de probe gebeurt met behulp van een microschoefinstelling.

4.6. Gebruikte apparatuur

Monitor en Powersupply, model T.S.I.-1051-2

Constant Temperature Linearised Anemometer, T.S.I.-1054-B

Digitale voltmeter: Philips PM-2441

Sensoren: TSI -1210 (B-588 en C-225)

T-compensators: TSI-1310 (B-935 en B-937) + TSI-1323

Honeywell SAI-42 A Correlation and Probability Analyser

Oscilloscoop: Philips PM 3232

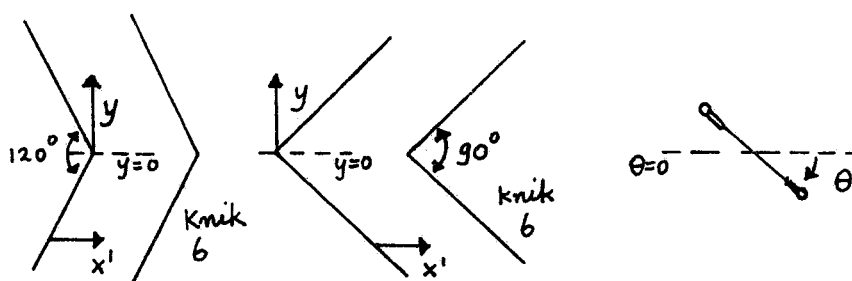
Ponsapparaat: Tape punch Facit 4070

5. RESULTATEN SNELHEIDSMETINGEN

5.1. Inleiding

Op elke hoogte (y) boven de knikpunt, die gevarieerd werd in stappen van 2 cm, werd voor een aantal punten, verdeeld over de hele breedte van de zifter, de plaatselijke snelheidsverdeling opgenomen. Dit geschiedde door op iedere positie de probe te draaien van 0 tot 180 graden in stappen van 15 graden. Zie verder figuur 21

Fig. 21 Definitie x' , y en θ



x' : horizontale afstand tot de linkerwand in cm.

Elke stap in de rotatie van de probe kreeg een experimentnummer (expno). M.b.v. een computerprogramma werd voor elke expno de gemiddelde snelheid v_{gem} bepaald; vervolgens werd deze v_{gem} uitgezet tegen de hoek waarover de probe gedraaid was (θ).

Uit deze grafieken werd de hoek θ_{max} gehaald, waarbij de v_{gem} het grootst is, én de waarde van dit maximum, $v_{gem,max}$.

Deze θ_{max} en $v_{gem,max}$ werden uitgezet als tweedimensionale vector, zodat men in één oogopslag de grootte en de richting van de luchtsnelheid kan bekijken. Als hoofdstromingsrichting geldt dan de hoek $\theta_{max} + 90^\circ$, de grootte van de vector wordt gegeven door $v_{gem,max}$. Bovendien werd de $v_{gem,min}$ bepaald, en de RMS van de fluctuatie van de snelheid t.o.v. het gemiddelde, voor θ_{max} .

M.b.v. deze grootheden kunnen we de volgende twee coëfficiënten definiëren:

1. de richtingsgevoeligheidscoëfficiënt $RG = \frac{v_{gem,max} - v_{gem,min}}{v_{gem,max}}$

2. de turbulentievariantiecoëfficiënt $TV = \frac{RMS\ v'}{v_{gem,max}}$

Deze twee grootheden zullen gebruikt worden bij het vaststellen van de grenzen van het snelle kanaal in de zifters.

5.2. De 120° zifter

Voor de 120° zifter zijn alleen aanvullende metingen verricht, die een voortzetting vormen van het werk van Jacobs (lit.1) De metingen zijn uitgevoerd op en rond knik 6. De superficiële luchtsnelheid hierbij was $v_f = 1.99$ m/s, betrokken op het horizontale knikkoppervlak.

Van de metingen van Jacobs (aangeduid met J) zijn geen expno of grafieknr. in tabel 5 (bijlagen) opgenomen.

M.b.v. deze tabel is het snelheidsvector plaatje voor de 120° zifter getekend, bij een superficiële luchtsnelheid van 1.99 m/s.

Zie figuur 22 op pagina 21.

Een streep representeert de locale gemiddelde snelheid. De lengte van de streep is evenredig met de scalaire waarde van de locale luchtsnelheidsvector en de oriëntatie van de streep representeert de richting van de normaal op de probe, waarbij een maximale afkoeling van de probe optreedt. 1 cm komt overeen met een snelheid van 2 m/s. Er zijn geen pijlpunten aan de vectoren getekend; de anemometer kan immers geen onderscheid maken tussen een bepaalde richting A en de richting $A + 180^\circ$.

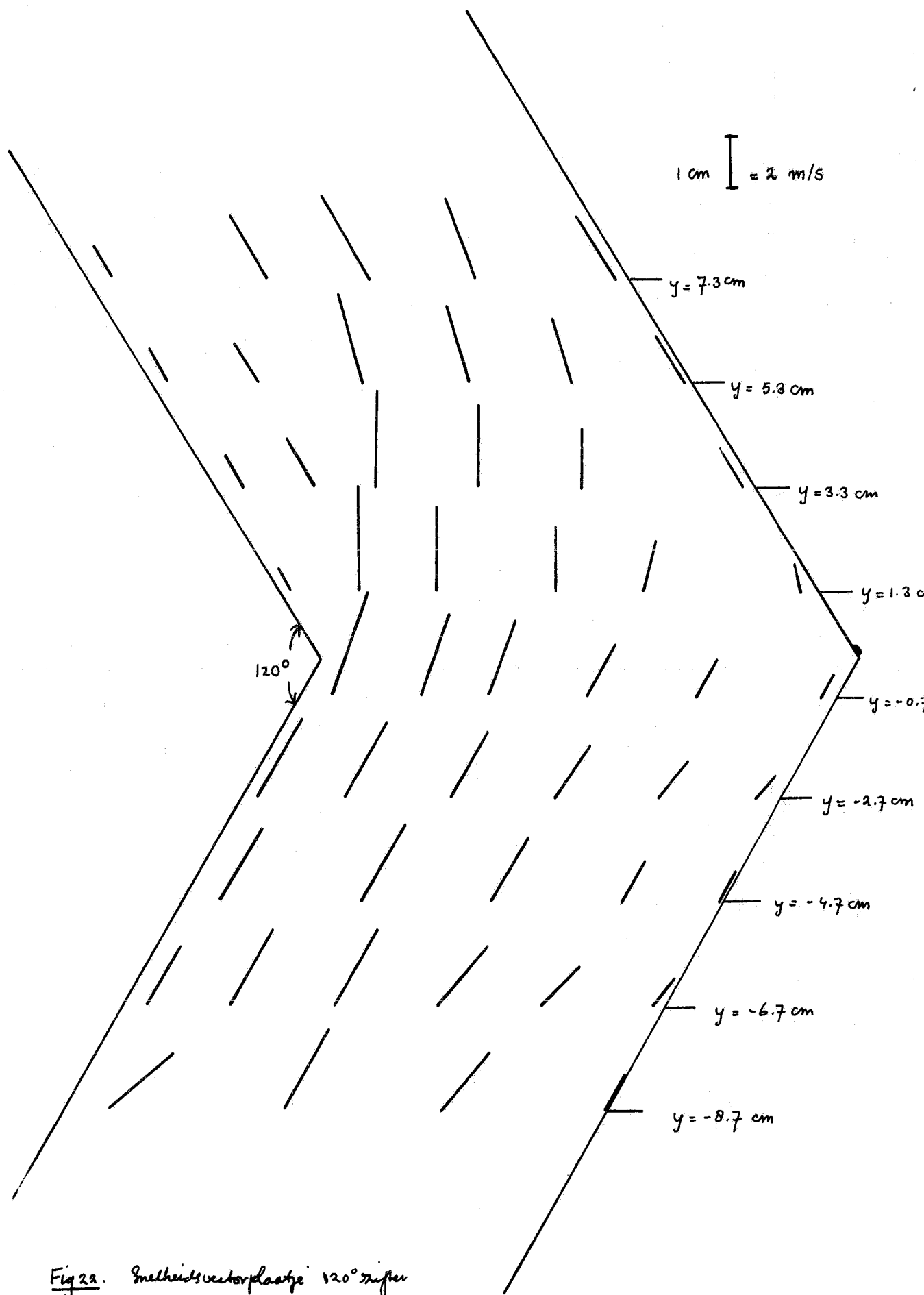


Fig 2a. Snelheidsvectorplaatsje 120° zijfer
 V_F superficiaal = 1.99 m/s

5.3. De 90° zifter

De snelheidsmetingen zijn verricht op en rond knik 6, bij een superficiële luchtsnelheid (betrokken op het horizontale knikoppervlak) $v_f = 1.645$ m/s (tabel 6: zie bijlagen).

Er is bovendien voor één hoogte ($y=0$) een serie snelheidsmetingen uitgevoerd bij een veel hogere luchtsnelheid, ter controle van de in § 10.1 gemaakte aanname van uniformiteit van het snelheidsprofiel. Deze metingen zijn gedaan voor $v_f = 3.17$ m/s en zijn terug te vinden in tabel 7 (bijlagen).

In figuur 23 is met de waarden voor $v_{gem,max}$ en de richting uit tabel 6 het snelheidsvectorplaatje getekend voor de 90° zifter bij $v_f = 1.645$ m/s. Ook hierin komt 1 cm overeen met een snelheid van 2 m/s. (pagina 23)

In figuur 24 (pagina 24) is figuur 23 verkleind weergegeven, zodat de gehele knik erop kan. De schaal is 7:10, zodat in deze figuur 1cm overeenkomt met 2.86 m/s.

In beide figuren is bovendien aangegeven of ter plaatse al dan geen terugstroming plaatsvindt (pijlpunten). Deze informatie is gehaald uit de 'draadjes'opnamen, zie §6.2.

Voor de meetpunten die in de figuren 23 en 24 zijn weergegeven met een ster van pijlen is geen duidelijke richting vastgesteld.

We zien in deze figuren dat er gebieden in de knik zijn waar duidelijke terugstroming aanwezig is; dit in tegenstelling tot de 120° zifter, waar op grond van video-opnamen geconcludeerd mag worden, dat er nauwelijks sprake is van terugstroming.

5.4. Algemene interpretatie van de anemometerresultaten

Uit de tabellen 5 en 6 blijkt dat er gebieden in de zifterknikken bestaan, waar de richtingsgevoeligheidscoëfficiënt groot is en de turbulentievariantiecoëfficiënt laag, het zogenaamde snelle kanaal waarover in de inleiding reeds werd gesproken. In hoofdstuk 7, waar het snelheidsprofiel van de lucht aan de hand van de zeepbelopnamen en de anemometerresultaten gedefinieerd wordt, zal hierop verder worden ingegaan.

Opmerkelijk is voorts dat bij de 90° zifter op plaatsen langs de liggende wand van de knik en in de 'dode' hoeken van de zifterknik een grote verschuiving van θ_{max} is opgetreden t.o.v. het snelle kanaal.

Als we bijvoorbeeld kijken naar grafiek 19 ($y = 4$ cm) zien we dat bij een variatie van x' over 4 cm θ_{max} 90° is verschoven. Evenzo in de

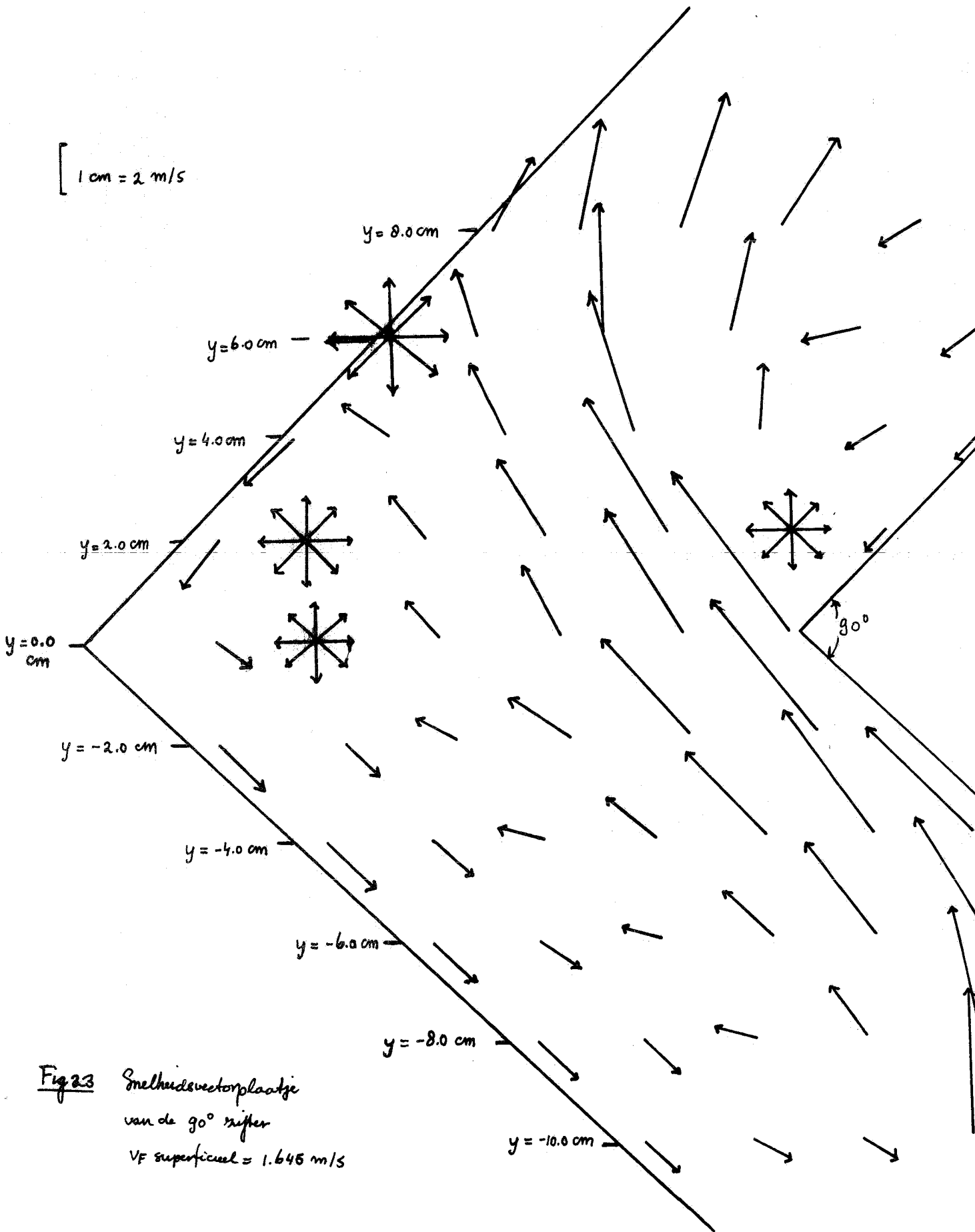


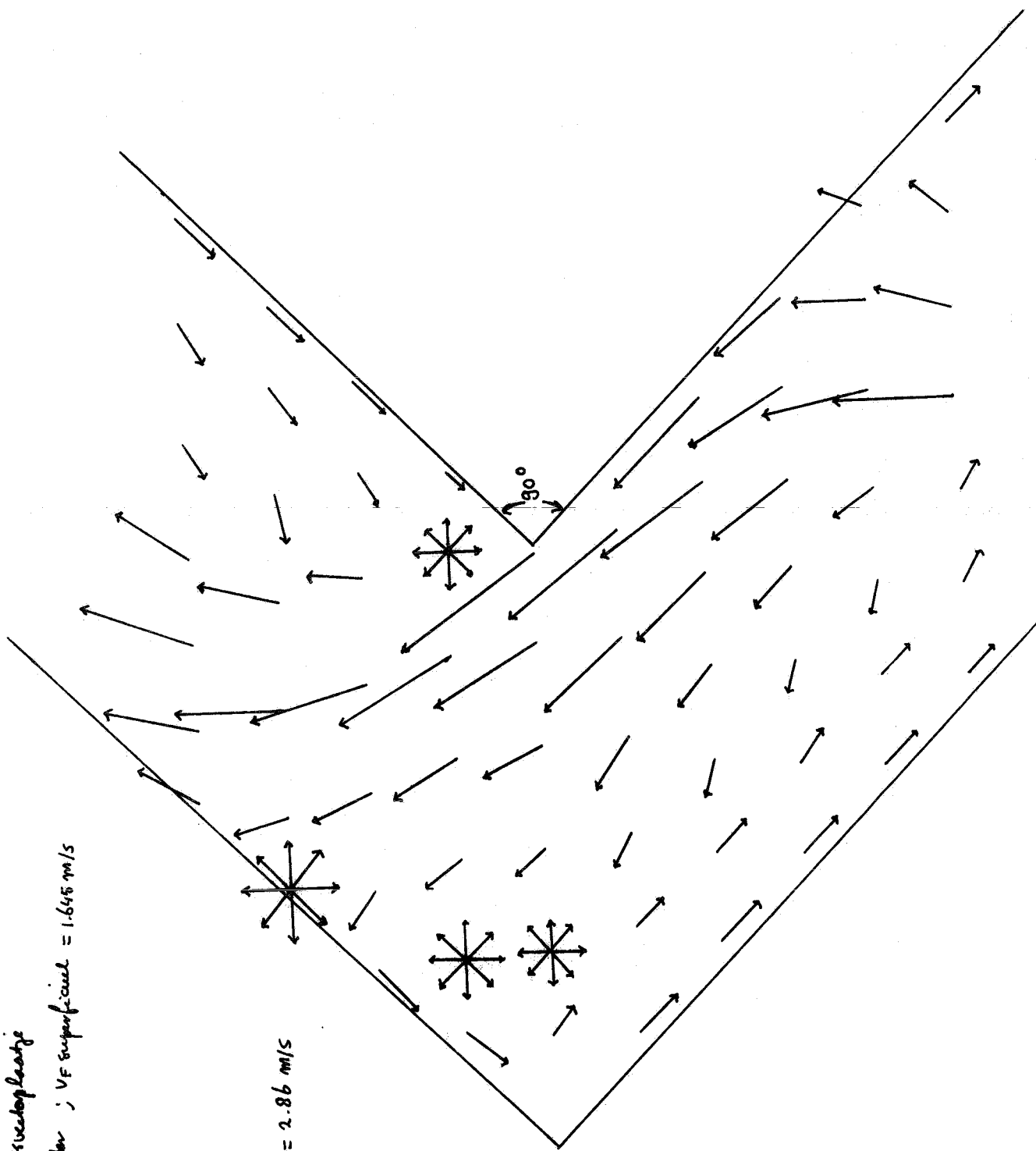
Fig 23 Snelheidsvectorplaatje van de 90° rifter
 V_F superficiaal = 1.645 m/s

7:10

Fig 24 Smaltheidsvectorleaste

90° riffer ; VF superfaciel = 1.645 m/s

[1 cm = 2.86 m/s



grafieken 21 en 22 ($y = 2$ cm), waarin ook bij variatie van x' over een aantal cm θ_{\max} (meer dan) 90° verschuift. Dit zou kunnen duiden op recirculatiestroming. M.b.v. de draadjestechiek (§ 6.2) is deze recirculatiestroming inderdaad vastgesteld.

Bij de 120° is een dergelijk verloop van θ_{\max} niet waargenomen.

6. RESULTATEN VISUALISATIE LUCHTSTROMINGSPROFIELEN

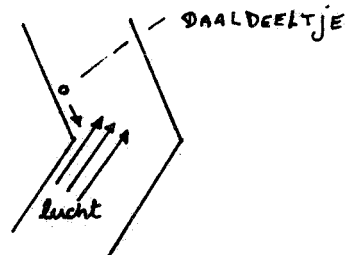
6.1. Zeepbelopnamen

6.1.1. Inleiding

Als we de foto's bekijken van de zeepbelopnamen in de 90° en 120° zifter (zie bijlagen, pagina's B1 en B2), vallen er al een aantal dingen zo te constateren:

- a. Duidelijk te onderkennen is het bestaan van een kanaal waarin de snelheid hoog en goed gericht is, het snelle kanaal. (Vergelijk ook de anemometerresultaten, fig. 22 - 24)
- b. Dit snelle kanaal legt op diverse plaatsen aan aan de wand en gebiedjes in waarin de snelheid veel kleiner en minder duidelijk gericht is.
- c. Kijken we naar de denkbeeldige dalstroom dan zien we het volgende (figuur 25):

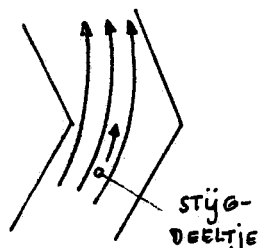
Fig. 25 Interactie dalstroom-
snelle kanaal



De deeltjes in de dalstroom komen op een knik (bijna) loodrecht het snelle kanaal binnen; er is hier, zeker in het geval van de 90° zifter, sprake van dwarszifting.

- d. Gezien de kromming van het snelle kanaal lijkt het waarschijnlijk dat een stijgendeelje onderworpen is aan centrifugale krachten (figuur 26).

Fig. 26 Stijgendeelje in
snelle kanaal



6.1.2. Vergelijking lage_en hoge_snelheid 90° zifter

Zie foto's op pagina B1, bijlagen.

Onder elkaar zien we hier opnamen van zeepbellen bij een superficiële luchtsnelheid van 1.645 respectievelijk 3.20 m/s.

Noch in breedte of kromming van het snelle kanaal, noch in het punt van aanleg op de tegenoverliggende wand, of anderszins, lijkt er enig verschil waarneembaar. Hieruit kan wellicht geconcludeerd worden dat een gelijkvormigheid in het snelheidsprofiel bestaat.

(Wel is uit de opnamen te halen dat in het geval van de hogere luchtsnelheid het debiet van de zeepbellen kennelijk een stuk lager was.)

6.1.3. Vergelijking lage_en hoge_snelheid 120° zifter

Zie foto's op pagina B2, bijlagen.

Ook in dit geval is uit de opnamen geen wezenlijk verschil te halen in het stromingsprofiel bij de superficiële luchtsnelheden 1.99 en 3.67 m/s.

6.1.4. Vergelijking 90° = 120° zifter

Vergelijken we de foto's van de 90° en de 120° zifter (pag. B1 en B2) met elkaar, dan zien we enkele belangrijke verschillen:

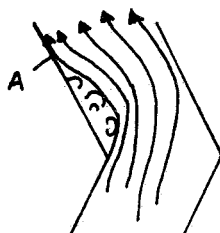
a. Het snelle kanaal.

Zoals we ook bij de anemometerresultaten (fig. 22 - 24) al hebben gezien, is het snelle kanaal in de 90° zifter slechts ongeveer één derde van de totale zifterbreedte, terwijl dit bij de 120° zifter veel breder is.

b. Tussenwervels, terugstroming.

Bij nadere beschouwing lijkt het snelle kanaal aan de binnenbocht begrensd te worden door een gebied waarin kleine wervels optreden. Het gebied van deze tussenwervels ligt in de 120° zifter zo dicht bij de wand, dat hierdoor de terugstroming langs de liggende wand van de zifterknik belemmerd wordt. Het lijkt of bijna het punt van aanleg van de stroming (figuur 27) bereikt wordt, zodat niet of nauwelijks terugstroming valt waar te nemen in ieder geval wordt het 'dode' gebied er erg smal.

Fig. 27 Punt van aanleg, A.



Dit in tegenstelling tot de 90° zifter, waar een gebied met duidelijke terugstroming aanwezig is, gescheiden van het snelle kanaal door een dunne strook waarin kleine tussenwervels optreden. Vergelijk ook figuur 24.

6.2. Draadjestechiek

Bij de 90° zifter zijn van de draadjes opnamen gemaakt (zie foto's op pagina B4, bijlagen), die gebruikt werden om ondubbelzinnig de richting vast te leggen in het plaatje waarin de anemometerresultaten als vectoren zijn uitgezet (fig. 24).

Bij de 120° zifter is deze methode niet zo geslaagd, wat waarschijnlijk te wijten is aan de veel kleinere locale lichtsnelheden. De stugheid van het gebruikte materiaal was waarschijnlijk te groot om de draadjes de gelegenheid te geven zich volledig naar het stromingsprofiel te richten.

Als we nogmaals de foto's van de 90° zifter (draadjesopnamen) onder de loep nemen, zien we dat in het snelle kanaal de draadjes duidelijk gericht zijn (evenals in het gebied van terugstroming), terwijl aan de grenzen van het kanaal de draadjes a.h.w. staan te 'klapperen'. Dit laatste vindt zijn oorzaak in het optreden van snelle wisselingen van de richting van de snelheid daar ter plaatse; dit is immers het gebied van de tussenwervels.

7. VASTSTELLING STROMINGSPROFIELEN IN ZIFTERKNIK 6

7.1. Algemeen

Het vaststellen van het snelle kanaal is gebeurd aan de hand van de volgende criteria:

1. Foto's van de zeepbellen
2. Richting van de snelheid
3. Richtingsgevoeligheid en turbulentievariantiecoëfficiënt

Ad 1. Duidelijk is in de foto's een kanaal te onderscheiden waarin de zeepbellen snel doorschieten naar de bovenliggende knik. Zie ook hoofdstuk 6.

Ad 2. Richting van de snelheid: deze moet naar boven gericht zijn. Dit schakelt direct de recirculatiestroming uit.

Ad 3. In het snelle kanaal zal de richtingsgevoeligheid groot moeten zijn en de turbulentie variantie klein, d.w.z., relatief t.o.v. de rest van de zifter.

Wat dit laatste betreft: in de 90° is er ook grote richtingsgevoe-

ligheid in het gebied waar recirculatiestroming heerst. Maar door criterium 2. vallen deze meetpunten meteen af.

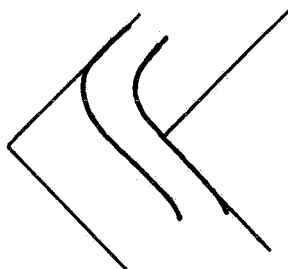
Een ander interessant punt is het verschil in verloop van de RG en TV in het snelle kanaal. Zoals al eerder gezegd is, is het stromingsbeeld in de 120° zifter veel rustiger dan in de 90° zifter, en dit uit zich ook in de RG en TV. Zoals we in de volgende paragrafen zullen zien, ligt de de RG in het snelle kanaal voor de 120° zifter tussen de 0.5 en 0.6, en de TV tussen de 0.15 en 0.35, terwijl in de 90° zifter deze beide grootheden veel sterker variëren, de RG ligt tussen de 0.3 en 0.7, de TV tussen de 0.15 en 0,5 in het snelle kanaal.

Eerder zagen we al dat de grootte van de luchtsnelheid in het snelle kanaal bij de 90° zifter ook een groot verloop kent (fig.24), zodat de conclusie gerechtvaardigd lijkt, dat het luchtstromingsprofiel in de 90° zifter veel gedifferentieerder is dan in de 120° zifter.

7.2. De 90° zifter; profiel ten behoeve van de daaldeeltjes

In eerste instantie werd uitgegaan van de zeepbelfoto's (pag. B1). Al snel is daaruit globaal een snel kanaal te halen (figuur 28).

Fig. 28 Globale vaststelling
snelle kanaal



Vervolgens werd gekeken naar het snelheidsvectorplaatje van de anemometerresultaten en naar de richtingsgevoeligheids- en turbulentievariantiecoëfficiënt.

Dit resulteerde uiteindelijk in het volgende profiel voor de luchtstroming (figuur 29, pagina 29), een meermaals geknikt kanaal met in elk gebied een dominante stromingsrichting.

In figuur 29 is ook het coördinatenstelsel aangegeven, zoals dat bij de deterministische baanberekeningen (hoofdstuk 10) verder is aangehouden.

In figuur 30 (pag. 30) is het gekozen profiel gesuperponeerd op het snelheidsvectorplaatje. Het lijkt inderdaad dat de punten met een grote $v_{gem,max}$ binnen het gekozen profiel komen te liggen. Wat de RG en TV betreft: arbitrair worden de volgende grenzen aan-

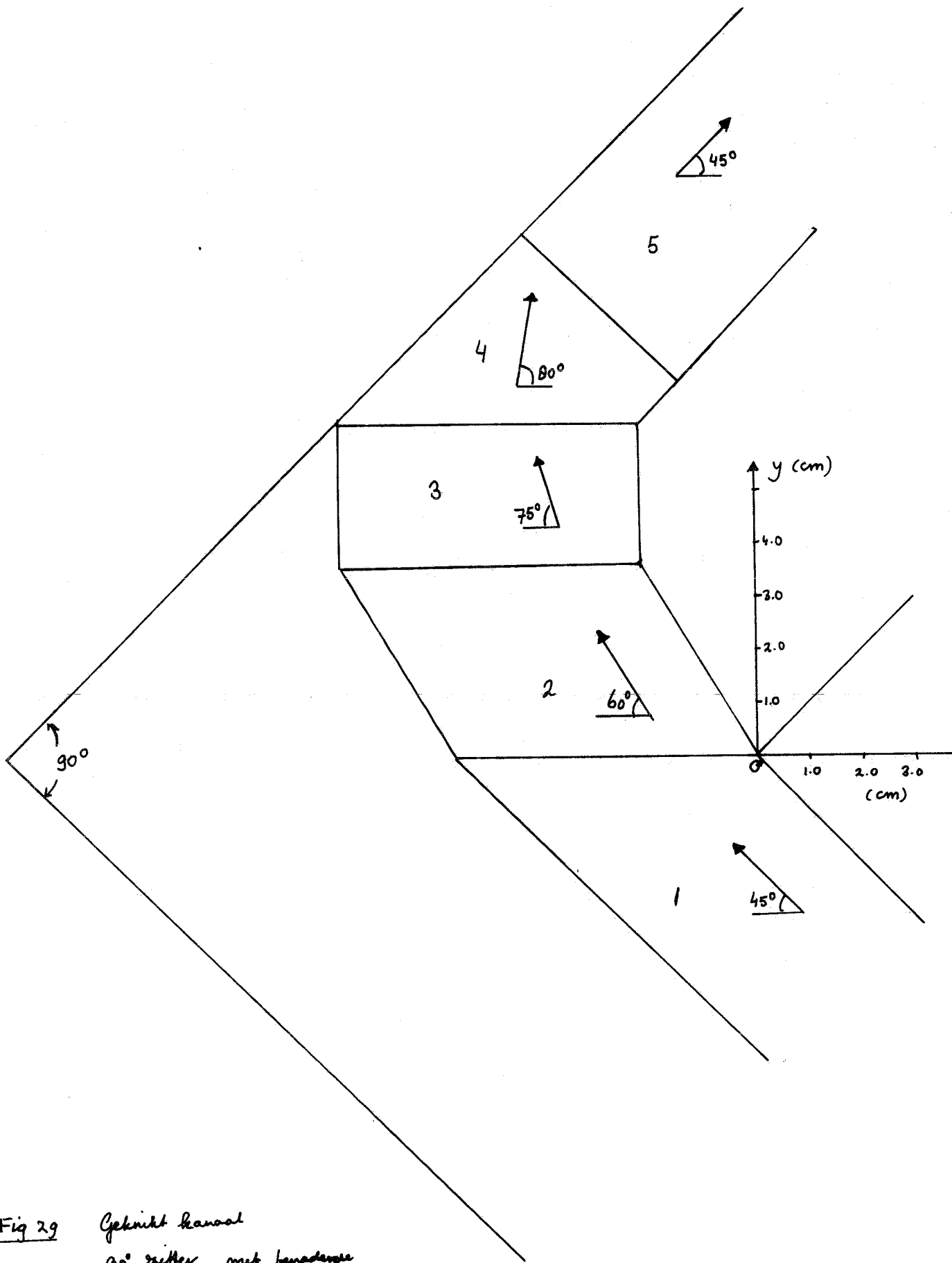


Fig 29 Geknickt kanaal
90° knijper, met benaderende
hoek van de snelheid

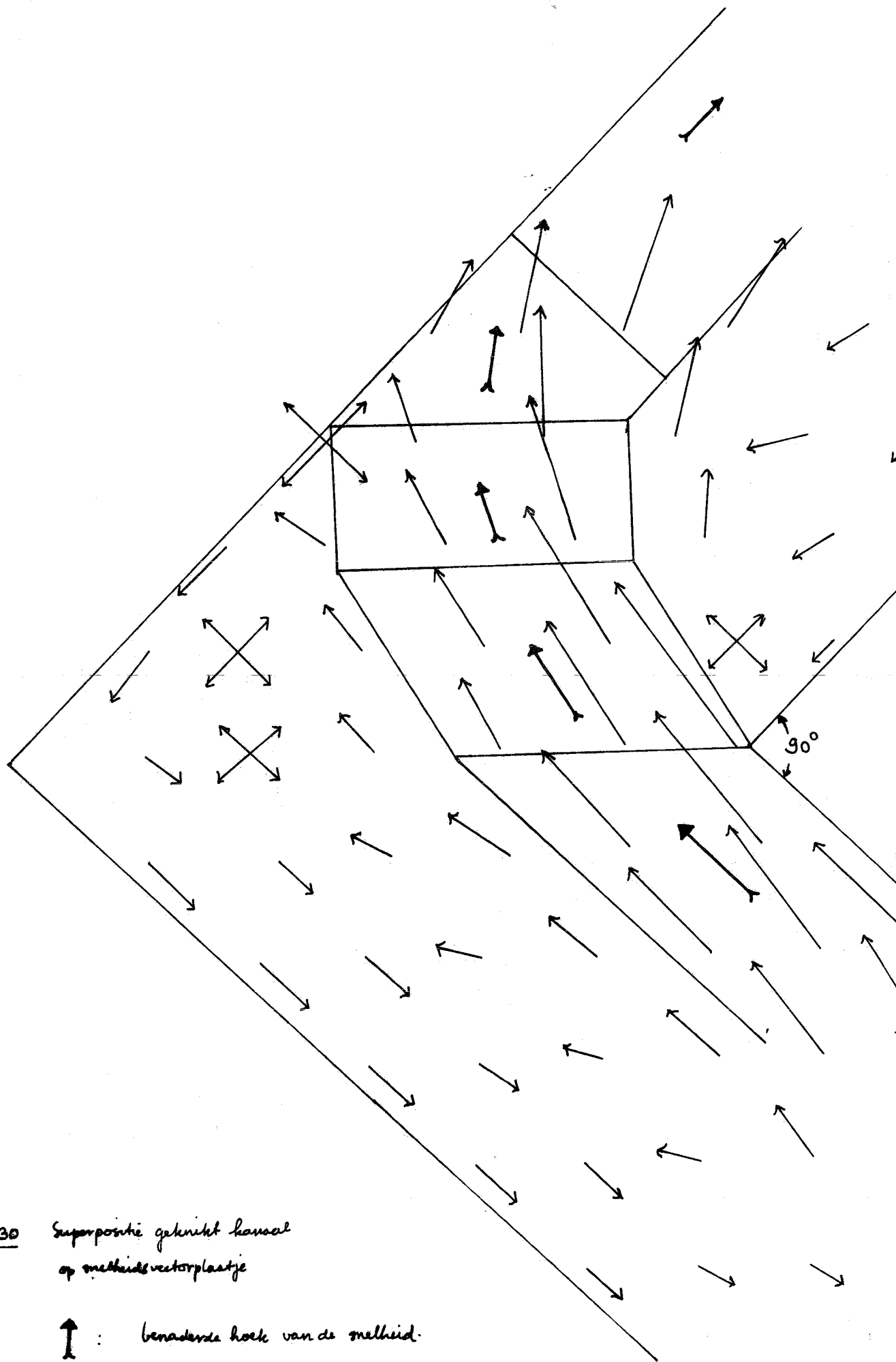


Fig 30 Superpositie geknikt kansen
op melheidsvectorplaatje

↑ : benaderende hoek van de melheid.

gegeven voor afbakening van het snelle kanaal:

$RG > 0.3$

$TV < 0.5$

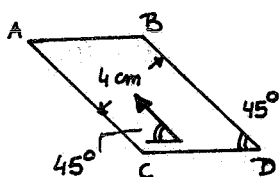
Deze waarden volgen min of meer uit het gevisualiseerde snelle kanaal. In figuur 31 (bijlagen) is aangegeven welke meetpunten daaraan voldoen. Ook aan dit criterium voldoet het gekozen profiel goed.

De wiskundige formulering van het gekozen profiel:

(Voor berekening van de grootte van de snelheid in de afzonderlijke gebieden wordt verwezen naar de bijlagen; de superficiële luchtsnelheid bedraagt 1.645 m/s)

Nog een opmerking: de wortels in de vergelijkingen ($\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ en $\sqrt{6}$) zijn o.a. het gevolg van de hoeken waaronder de lijnen elkaar snijden. (Zo is de $\tan 120^\circ = -\sqrt{3}$)

Gebied 1



Het wordt begrensd door (x en y in cm)

AB: $y=0$

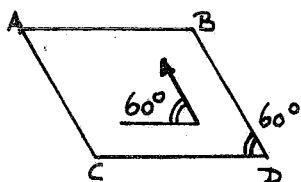
CD: $y=-5$

AC: $y=-x-4\sqrt{2}$

BD: $y=-x$

$v_f = 5.42$ m/s, evenwijdig aan de wand

Gebied 2



AB: $y=3/2\sqrt{6}$

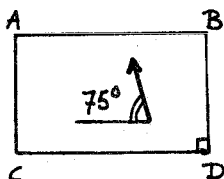
CD: $y=0$

BD: $y=-\sqrt{3}.x$

AC: $y=-\sqrt{3}.x-4\sqrt{6}$

$v_f = 1.12 \cdot (y/\sqrt{3} + x) + 8.2$ m/s, onder een hoek van 60° met de horizontaal

Gebied 3



AB: $y=9/2\sqrt{2}$

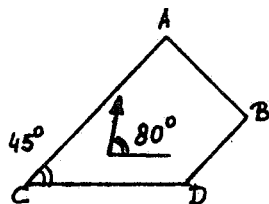
CD: $y=3/2\sqrt{6}$

BD: $x=-3/2\sqrt{2}$

AC: $x=-11/2\sqrt{2}$

$v_f = 1.0 \cdot x + 8.95$ m/s, onder een hoek van 75° met de horizontaal

Gebied 4



AB: $y=-x+4\sqrt{2}$

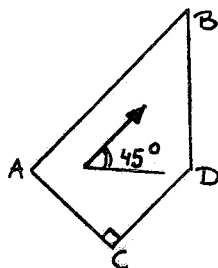
CD: $y=9/2\sqrt{2}$

BD: $y=x+6\sqrt{2}$

AC: $y=x+10\sqrt{2}$

$v_f = 4.24$ m/s, onder een hoek van 80° met de horizontaal

Gebied 5



$$AB: \dot{y} = x + 10\sqrt{2}$$

$$CD: y = x + 6\sqrt{2}$$

$$BD: x = 0$$

$$AC: y = -x + 4\sqrt{2}$$

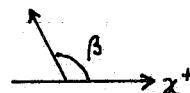
$v_f = 5.42$ m/s, evenwijdig aan de wand

Samenvattend: tabel 8.

Tabel 8 Snelheidsprofiel bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.645$ m/s

Gebied	v_f (m/s) in dit gebied	$\beta^1)$	$v_{fx} = v_f \cdot \cos\beta$ (m/s)	$v_{fy} = v_f \cdot \sin\beta$ (m/s)
1	5.42	135°	- 3.833	3.833
2	$1.12 \pi (y/\sqrt{3} + x) + 8.2$	120°	- $0.5 \pi v_f$	$0.866 \pi v_f$
3	$1.0 \pi x + 8.95$	105°	- $0.259 \pi v_f$	$0.966 \pi v_f$
4	4.24	80°	0.736	4.176
5	5.42	45°	3.833	3.833

1) $\beta =$ hoek die v_f maakt met de positieve x-as:



Buiten het snelle kanaal, waar de anemometerresultaten minder betrouwbaar zijn (zie hoofdstuk 4) vanwege de grote turbulentie, is de locale snelheid gelijk aan nul gesteld. Dit heeft verder weinig consequenties, omdat de baanberekeningen toch gebaseerd zijn op het snelle kanaal.

7.3. De 90° zifter; profiel ten behoeve van stijgdeeltjes

Gezien de veronderstelling dat de centrifugale kracht in belangrijke mate bijdraagt in het gedrag van een stijgdeeltje in de zifterknik, werd afgestapt van het tot nu toe gebezigde meermaals geknikte kanaal, en werd gekozen voor een kanaal dat naast rechte stukken ook gebieden met eindige kromtestraal kent.

Op grond van het snelheidsvectorplaatje (fig. 24) en de richtingsgevoeligheid- en turbulentievariantiecoëfficiënt kwamen we tot het volgende resultaat: figuur 32, pagina 33. In deze figuur is ook het coördinatenstelsel aangegeven. In figuur 33, pagina 34, is het gekozen profiel gesuperponeerd op het snelheidsvectorplaatje. Voor de RG en TV zijn weer de volgende grenzen aangehouden:

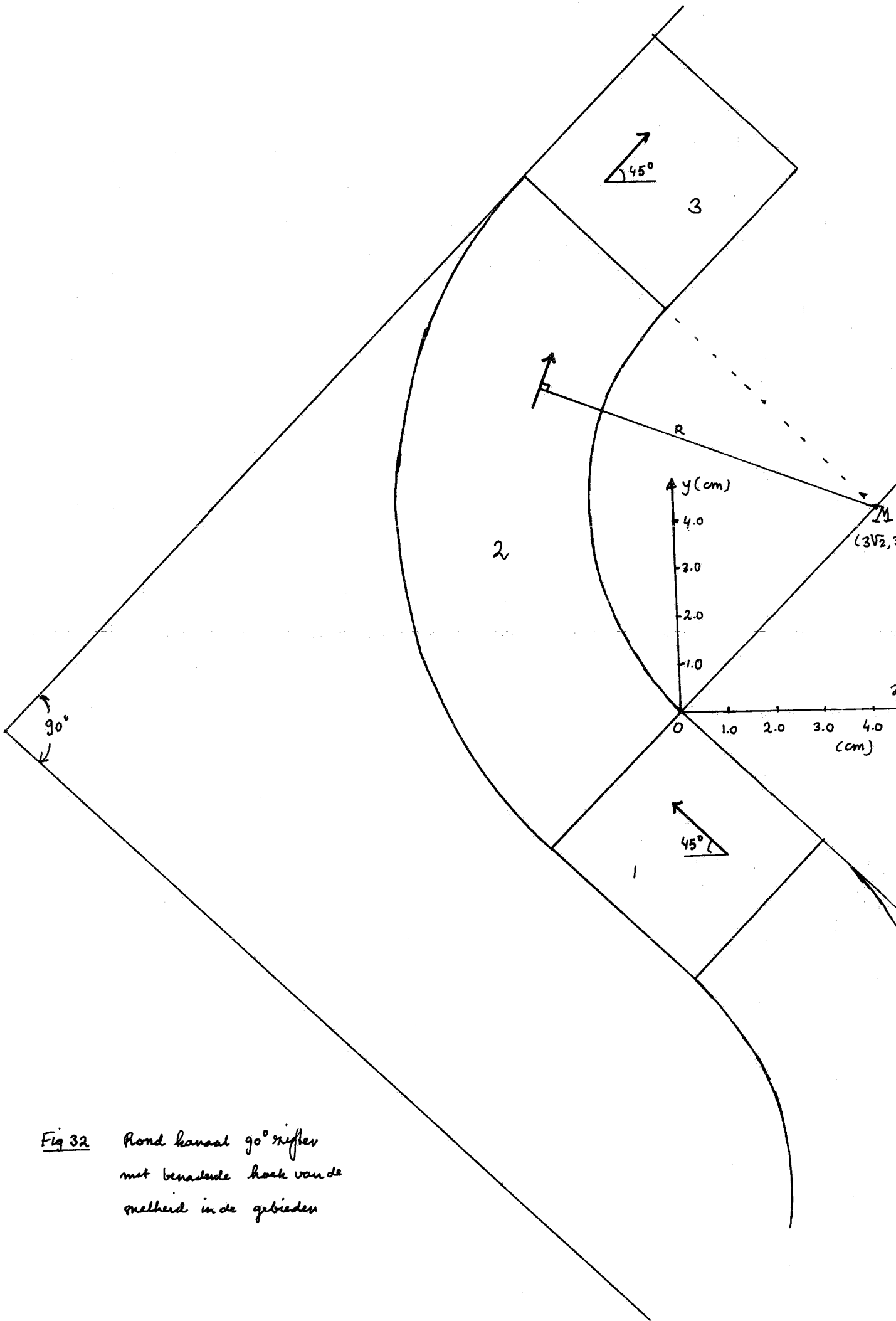


Fig 32 Rond kanaal 90° reflex met benastende hoek van de melheid in de gebieden

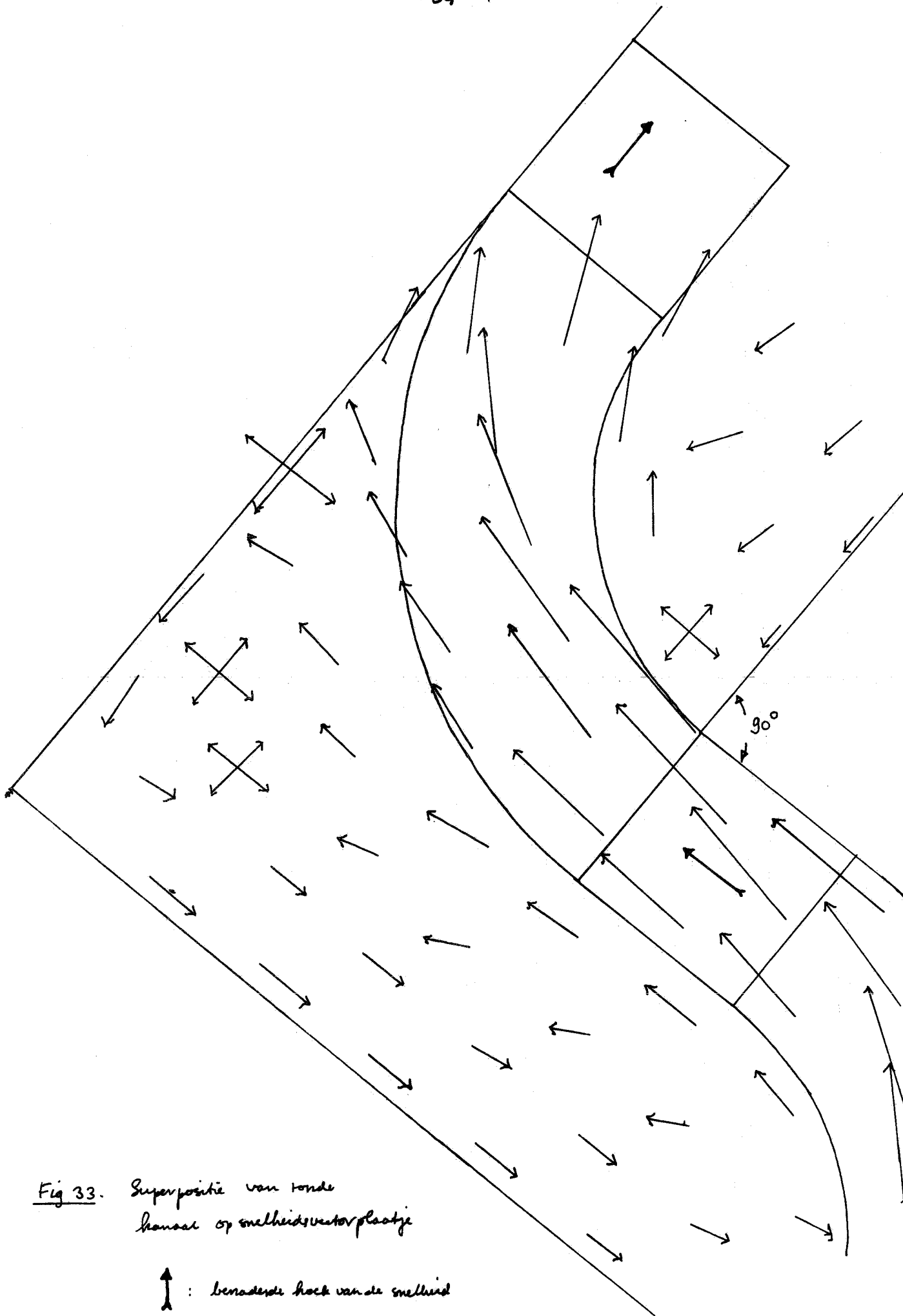


Fig 33. Superpositie van ronde
hooft op snelheidsvectorplaatje

↑ : benaderde hoek van de snelheid

RG > 0.3 en TV < 0.5

In figuur 34 (bijlagen) is aangegeven welke meetpunten hieraan voldoen.

Wiskundige formulering:

De grenzen van de verschillende gebieden van het snelle kanaal zijn vastgesteld met in achtneming van het coördinatenstelsel zoals dat in fig. 32 is gedefinieerd.

Voor de berekening van de grootte van de snelheid bij een superfiële luchtsnelheid $v_f = 1.645$ m/s, en de gemiddelde afwijking van het aangenomen profiel en de anemometerresultaten, wordt verwezen naar de bijlagen.

Gebied 1 wordt begrensd door (x en y in cm): $y = x$

$$y = x - 4\sqrt{2}$$

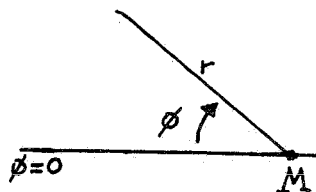
$$y = -x$$

$$y = -x - 4\sqrt{2}$$

$v_f = -0.97 * (x + y) / \sqrt{2} + 7.74$ m/s, evenwijdig aan de ziffterwand.

Gebied 2. In dit gebied wordt om voor zich sprekende redenen gebruik gemaakt van poolcoördinaten. Het middelpunt M van dit stelsel ligt op de lijn $y = x$ (de ziffterwand), en wel in het punt $(x, y) = (3\sqrt{2}, 3\sqrt{2})$. Zoals in fig. 32 te zien is ligt dit deel van het snelle kanaal in tussen de lijnen $R = 6$ en $R = 10$ cm, terwijl ϕ , de hoek tussen R en de horizontaal door M (figuur 35), varieert van -45° tot 45° .

Fig. 35 Definitie ϕ



Dit betekent dat dit gebied begrensd wordt door de lijnen $y = x$ en $y = -x + 6\sqrt{2}$. Omdat tot nog toe alles in x- en y-coördinaten is besproken, volgen hier voor de volledigheid nog R en ϕ als functie van x en y:

$$R = \sqrt{x^2 - 6\sqrt{2} * (x + y) + y^2 + 36} \quad \text{en} \quad \phi = \arctan \left(-\frac{y - 3\sqrt{2}}{x - 3\sqrt{2}} \right)$$

Wat de snelheid in dit gebied betreft, werden de volgende benaderingen gemaakt:

1. De snelheid staat loodrecht op de straal R, m.a.w., er is geen radiale component van de luchtsnelheid in dit gebied.
2. Uit de anemometerresultaten volgde een lineair verband tussen v_f en de straal R: $v_f = v_f(R)$.
3. Bovendien kan een ϕ -afhankelijkheid van de snelheid in rekening worden gebracht:

Dit resulteerde in:

- $45^\circ \leq \phi < 30^\circ$: $v_f = -1.0 * (R-6) + 8.0$ m/s
- $30^\circ \leq \phi < 30^\circ$: $v_f = -1.07 * (R-6) + 7.42$ m/s
- $30^\circ \leq \phi < 45^\circ$: $v_f = -1.0 * (R-6) + 7.0$ m/s

Voor gebied 3 werd geen snelheidsprofiel gedefinieerd, omdat hier de deeltjes niet komen (zie hoofdstuk 10).

Ook hier geldt: buiten het snelle kanaal is de locale luchtsnelheid gelijk aan nul.

Overigens zal uit de baanberekeningen blijken dat er niet of nauwelijks verschil is in de berekende banen bij gebruik van de twee verschillende gekozen profielen; vergelijkende berekeningen met het geknikte en het ronde profiel gaven dezelfde uitkomsten te zien. Dit is ook de reden dat voor de 120° zifter volstaan werd met één profiel, dat zowel voor de daaldeeltjes als de stijgdeeltjes gebruikt zal worden.

7.4. De 120° zifter ; profiel voor daal- en stijgdeeltjes

Ook hier is weer in eerste instantie uitgegaan van de foto's (pag. B2, bijlagen).

Vervolgens werd weer gekeken naar het snelheidsvectorplaatje (fig. 22) en de richtingsgevoeligheid- en turbulentievariantiecoëfficiënt.

Uiteindelijk resulteerde dit in het profiel zoals dat in figuur 36 (pagina 37) is weergegeven. In dit profiel is naast het echte snelle kanaal, de gebieden 1, 2 en 4 nog een gebied afgebakend, waarin nog duidelijk sprake is van een opwaartse luchtsnelheid, gebied 3.

In deze figuur is ook het coördinatenstelsel getekend zoals dat voor de baanberekeningen voor de 120° zifter is gebruikt.

De positieve y-richting: in het verlengde van het onderste been van de knik, naar boven.

De positieve x-richting: loodrecht op de y-richting, naar rechts.

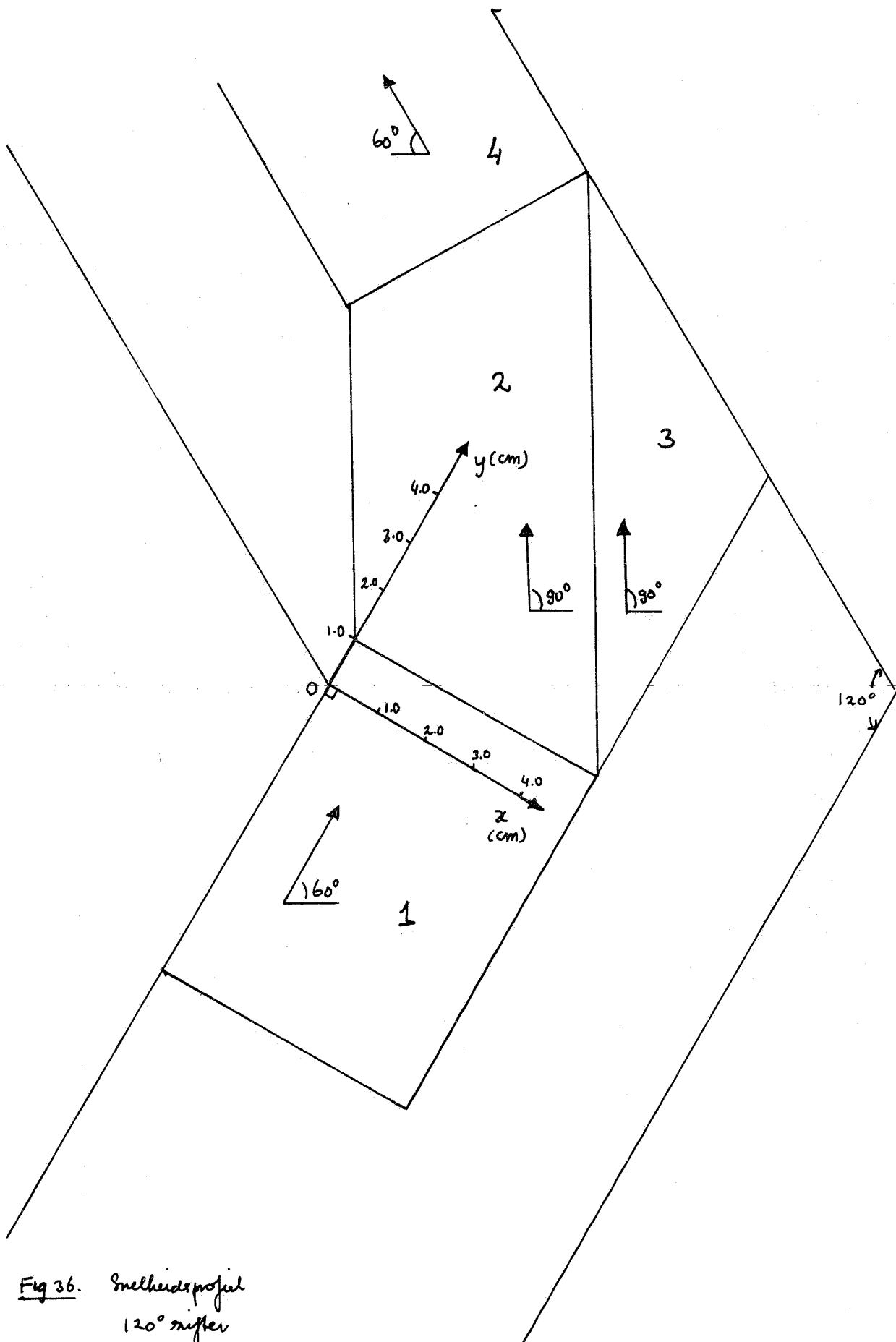


Fig 36. Smelheidsprofil
120° nifter

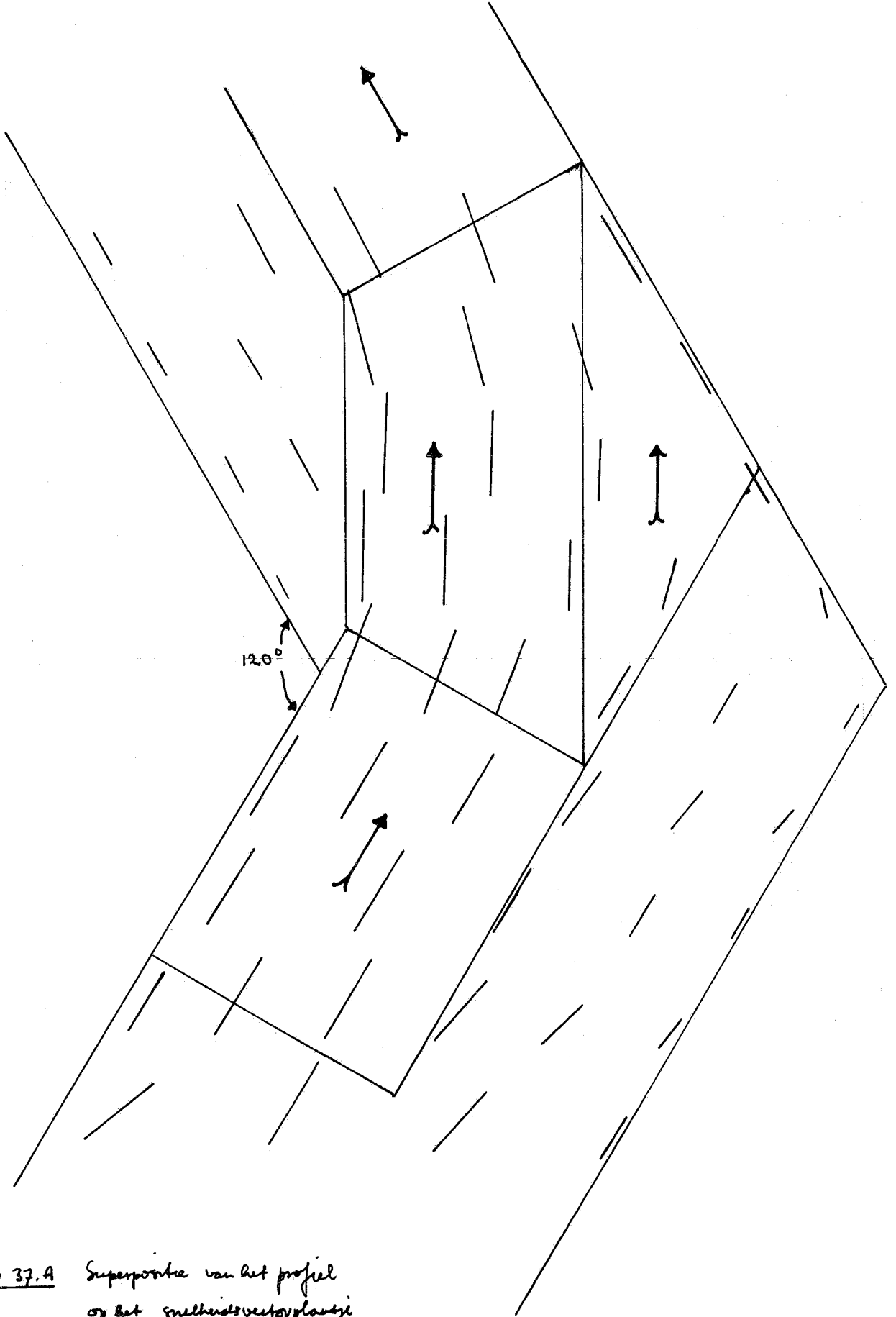


Fig 37.A Superpositie van het profiel op het snelheidsvectorplaatje

↑ : benaderde hoek van de snelheid

In figuur 37A (pagina 38) is het gekozen profiel gesuperponeerd op het snelheidsvectorplaatje.

Binnen elk gebied is een vlak stromingsprofiel aangenomen, de richting hiervan is met een pijl aangegeven.

Voor de richtingsgevoeligheid- en de turbulentievariantiecoëfficiënt werden de volgende grenzen aangelegd:

$$RG \geq 0.45 \quad \text{en} \quad TV \leq 0.35$$

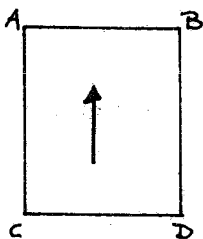
Voor de gebieden 1,2 en 4 zijn de grenzen nog scherper gesteld:

$$RG \geq 0.50 \quad \text{en} \quad TV \leq 0.30$$

In figuur 37B (bijlagen) is aangegeven welke meetpunten aan deze grenzen voldoen.

De grenzen van de 4 gebieden (x en y in cm) en de snelheid hierin bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.99 \text{ m/s}$ (voor de berekening van de grootte van de snelheid: zie bijlagen) zijn als volgt:

Gebied 1



$$AB: y = 1$$

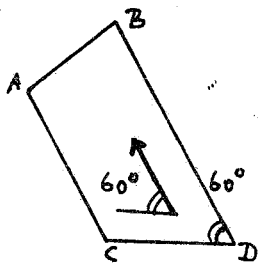
$$CD: y = -6$$

$$AC: x = 0$$

$$BD: x = 5$$

$$v_f = 3.15 \text{ m/s, evenwijdig aan de ziffterwand}$$

Gebied 2



$$AB: y = \sqrt{3}.x + 28 - 10\sqrt{3}$$

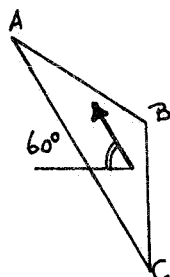
$$CD: y = 1$$

$$AC: y = -\sqrt{3}.x + 1$$

$$BD: y = -\sqrt{3}.(x - 5) + 1$$

$$v_f = 3.13 \text{ m/s, verticaal, dit is onder een hoek van } 60^\circ \text{ met de negatieve x-as.}$$

Gebied 3



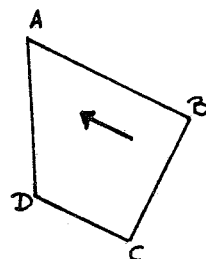
$$AB: y = -1/3\sqrt{3}.x + 10$$

$$CB: x = 5$$

$$AC: y = -\sqrt{3}.(x - 5) + 1$$

$$v_f = 2.0 \text{ m/s, verticaal}$$

Gebied 4



$$AB: y = -1/3\sqrt{3}.x + 10$$

$$CD: y = -1/3\sqrt{3}.x + 10 - 10/3\sqrt{3}$$

$$AD: x = -6$$

$$BC: y = \sqrt{3}.x + 28 - 10\sqrt{3}$$

$$v_f = 3.15 \text{ m/s, evenwijdig aan de wand}$$

In de andere gebieden van de zifterknik wordt bij de baanberekeningen een luchtsnelheid gelijk aan nul aangenomen.

Samenvattend: tabel 9.

Tabel 9 Snelheidsprofiel van de lucht in de 120° zifter bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.99$ m/s.

Gebied	v_f in dit gebied (m/s)	β , hoek die v_f maakt met de positieve x-as	$v_{fx} = v_f \cdot \cos\beta$ (m/s)	$v_{fy} = v_f \cdot \sin\beta$ (m/s)
1	3.15	90°	0.0	3.15
2	3.13	120°	- 1.565	2.71
3	2.00	120°	- 1.00	1.73
4	3.15	150°	- 2.73	1.575

8. DE BEWEGINGSVERGELIJKING

8.1. Inleiding

Voor de deterministische beweging van een deeltje in de zifter kan een differentiaalvergelijking worden afgeleid.

Hier gaan we van de volgende veronderstellingen uit:

- de deeltjes zijn onvervormbaar
- alleen translatie wordt in de beschouwing meegenomen; de deeltjes roteren niet.
- de meesleepkracht wordt gegeven door:

$$\bar{F}_m = C_D \cdot A_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot |\bar{u}| \cdot \bar{u}$$

met $\bar{u} = \bar{v}_f - \bar{v}_p$; \bar{v}_f = snelheid fluidum

\bar{v}_p = snelheid deeltje

C_D = meesleepcoëfficiënt

A_1 = oppervlak doorsnee stroming

ρ_f = dichtheid fluidum

\bar{u} = relatieve snelheid van het deeltje t.o.v. het fluidum

- de enige veldkracht is de zwaartekracht

$$\bar{F}_z = \rho_p \cdot V \cdot \bar{g} \quad \rho_p = \text{dichtheid deeltje}$$

V = volume deeltje

\bar{g} = versnelling van de zwaartekracht

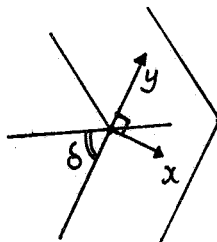
- in de krachtenbalans speelt de drukgradiënt in het fluidum, welke ook aanwezig zou zijn bij afwezigheid van het deeltje (bijv. t.g.v. de versnelling van het fluidum), geen rol.

Met deze veronderstellingen, en met de volgende uitdrukking voor de opwaartse kracht: $\bar{F}_{op} = -V \cdot \rho_f \cdot \bar{g}$, kan nu de algemene bewegingsvergelijking worden opgesteld; als de krachten in evenwicht zijn moet gelden: $\bar{F}_t = \bar{F}_m + \bar{F}_z + \bar{F}_{op}$, ofwel:

$$m \cdot \frac{d\bar{v}}{dt} = C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot |\bar{u}| \cdot \bar{u} + \rho_p \cdot V \cdot \bar{g} - V \cdot \rho_f \cdot \bar{g} \quad ; \quad m = \rho_p \cdot V : \text{ massa deeltje}$$

Als bovendien wordt aangenomen dat we te maken hebben met een tweedimensionaal systeem, kan deze vectordifferentiaalvergelijking ontbonden worden langs de assen van een x-y-coördinatenstelsel. Mostert (lit. 5) koos hetvolgende stelsel (figuur 38):

Fig. 38 Coördinatenstelsel



De bewegingsvergelijking voor het deeltje in de x- en de y-richting wordt dan uiteindelijk:

$$m \cdot \frac{\partial v_{px}}{\partial t} = C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_{fx} - v_{px}) \cdot \rho_f \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} + V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cos \delta$$

$$m \cdot \frac{\partial v_{py}}{\partial t} = C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_{fy} - v_{py}) \cdot \rho_f \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} - V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \sin \delta$$

Hierin is C_D : functie van Reynolds, vorm van het deeltje en de voorgeschiedenis.

Voor bollen in een stilstaand medium zijn theoretische relaties bekend in de literatuur, maar deze zijn verder niet gebruikt bij het oplossen van de bewegingsvergelijking.

8.2. Berekening van de meesleepcoëfficiënt C_D

8.2.1. Meesleepkracht; stroming rond een lichaam

Formele definitie: de meesleepkracht F_D die een lichaam in de stroming ondervindt, is in principe de integratie van de druk- en wrijvingskrachten die we als oplossing van de Navier-Stokes-vergelijking vinden, over het oppervlak van het lichaam. (lit. 7) Deze F_D kan bijv. als volgt dimensieloos gemaakt worden:

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L^2} = C_D(Sr, Fr, Re), \text{ de meesleepcoëfficiënt.}$$

Voor stationaire, incompressibele stroming wordt dit:

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L^2} = C_D(\text{Fr}, \text{Re})$$

Hierin is: $\text{Fr} = \frac{v^2}{g \cdot L}$, getal van Froude v : fluidumsnelheid
 L : karakteristieke lengte van het lichaam
 g : versnelling van de zwaartekracht
 $\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta}$, getal van Reynolds ρ : dichtheid fluidum
 η : dynamische viscositeit van het fluidum

We zullen echter niet uitgaan van deze formele definitie, maar op andere wijze trachten een uitdrukking te vinden voor C_D . Reden is, dat de formele definitie je niet helpt, aangezien de informatie over de stress-tensor ontbreekt.

8.2.2. Berekening C_D op grond van evenwichtszifting voor plaatjes

We gaan uit van de differentiaalvergelijking, opgesteld voor de deterministische krachten die op het deeltje werken.

$$V \cdot \rho_p \cdot \frac{d\bar{v}}{dt} = V \cdot \bar{g} \cdot (\rho_p - \rho_f) + C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot |\bar{v}_f - \bar{v}_p| \cdot (\bar{v}_f - \bar{v}_p)$$

C_D wordt nu berekend uit een hypothetisch krachtenevenwicht voor het deeltje bij de luchtsnelheid v_{50} , dit is de superficiële luchtsnelheid waarbij het deeltje gelijke kans heeft om te dalen of te stijgen.

In dat geval geldt $v_p \ll v_{50}$, zodat voor de relatieve snelheid u van het deeltje t.o.v. de lucht geschreven kan worden:

$$u = v_{50} - v_p \approx v_{50}$$

Voor de relatie voor C_D vinden we dan ($\frac{dv_p}{dt} = 0$):

$$C_D = \frac{g \cdot V \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot A_{\perp} \cdot v_{50}^2}$$

Voorts fixeren we de oriëntatie van het plaatje in de luchtstroming, en wel zo dat het plaatje altijd loodrecht op de stroming staat (dwarsaanstroming van het plaatje). De A_{\perp} , d.w.z. het grootste deeltjesoppervlak loodrecht op de stromingsrichting, blijft door de fixatie van de oriëntatie ten alle tijde gelijk aan $A = L \cdot L$ (L : de zijde van het vierkante plaatje). Hiermee, en met het volume $V = L \cdot L \cdot d$ (d : dikte van het plaatje) wordt de vergelijking voor C_D :

$$C_D = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d}{\frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_{50}^2}$$

De bezwaren tegen deze berekeningsmethode zijn:

1. De meesleefcoëfficiënt wordt gebaseerd op de superficiële luchtsnelheid, terwijl het in het geval van stijgdeeltjes het logischer lijkt de C_D te baseren op de veel hogere snelheid in het snelle kanaal.
2. Het is zeer de vraag of er in de zigzagzifter überhaupt sprake is van evenwichtszifting.

8.2.3. Berekening C_D uit de experimenteel bepaalde aanloopsnelheid van het deeltje

Voor de C_D tijdens het ziftproces nemen we de gemiddelde C_D in het aanloopstuk. Dit doen we m.b.v. Lapple-Shepperd.

Uitgangspunt is weer de differentiaalvergelijking:

$$V \cdot \rho_p \cdot \frac{dv_p}{dt} = -g \cdot V \cdot (\rho_p - \rho_f) + C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot w^2$$

v_p : snelheid van het deeltje

w : relatieve snelheid van de lucht t.o.v. het deeltje

v_f : naar boven gerichte luchtsnelheid

zodat $w = v_f - v_p$

In principe is de afleiding gedaan voor een rechte stijgzifter, waarin v_f constant is, zodat $\frac{dv_p}{dt} = \frac{d(v_f - w)}{dt} = -\frac{dw}{dt}$, en de vergelijking geschreven kan worden als:

$$-V \cdot \rho_p \cdot \frac{dw}{dt} = -g \cdot V \cdot (\rho_p - \rho_f) + C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot w^2$$

In het Newtonse gebied ($C_D = \text{constant}$) kan dan worden afgeleid: (zie lit. 8)

$$S = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \left[\frac{(w_m + w_0) \cdot \exp(2\gamma \cdot w_m \cdot t) + (w_m - w_0)}{2w_m} \right] - w_m \cdot t \quad (\text{vgl. 8.1})$$

$$\text{Met } \gamma = \frac{\rho_f \cdot C_D \cdot A_{\perp}}{2V \cdot \rho_p} \quad \text{en } w_m = \left[\frac{2V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f \cdot C_D \cdot A_{\perp}} \right]^{0.5}$$

Aanname: de beweging is één dimensionaal, zodat in het geval van berekeningen van C_D voor stijgdeeltjes in de zigzagzifter van de versnelling van de zwaartekracht, g , alleen de ontbondene evenwijdig aan de zifterwand in beschouwing moet worden genomen.

S : relatieve verplaatsing van de lucht in tijdspanne t : $S = v_f \cdot t - z$, waarin z de afgelegde weg van het deeltje in tijdspanne t is.

w_m : constante relatieve snelheid op $t = \infty$

w_0 : aanvankelijke relatieve snelheid van de lucht

We zien dat $\gamma = f_1(C_D \cdot A_{\perp})$ en $w_m = f_2(C_D \cdot A_{\perp})$

zodat $S = S(C_D, A_1, t, w_0)$

Uit de bepaling van de intreecondities (zie hoofdstuk 9) kennen we: z , de weg die het deeltje heeft afgelegd in het aanloopstuk tot de knik.

t , de tijd die het deeltje hiervoor nodig had.

Bovendien kennen we v_f en w_0 ($=v_f - v_{p0}$, v_{p0} wordt nul gesteld), zodat S , t en w_0 bekend zijn, en het produkt $C_D \cdot A_1$ berekend kan worden.

8.2.4. Berekening van C_D voor stijgdeeltjes¹⁾

8.2.4.1. De 90° zifter

Hoewel het weinig zinvol lijkt om bij stijgdeeltjes de methode gebaseerd op evenwichtszifting te gebruiken (denk aan de hoge snelheid in het snelle kanaal), is voor de 90° zifter toch een enkele baanberekening uitgevoerd met een C_D die met deze methode wordt verkregen:

$$C_D = \frac{\varepsilon \cdot V \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot A_1 \cdot v_{50}^2}$$

Invullen van de diverse grootheden geeft (lit. 1): $C_D = 0.598$

De andere methode (§8.2.3.):

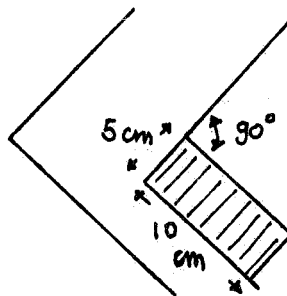
Uit de bepaling van de intreecondities (hoofdstuk 9) volgt:

$z = 0.1$ m

$t = 0.05714$ sec., bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 2$ m/s

De luchtsnelheid v_f die bij de berekening van C_D gebruikt zal worden, wordt gebaseerd op de anemometerpunten die liggen in het aanloopstuk tot de knik. d.w.z. in dat gedeelte van het snelle kanaal, waarin het overgrote deel van de stijgdeeltjes de knik nadert. Dit gedeelte is in figuur 39 geschetst.

Fig. 39 Aanloopstuk tot de knik



1) De bepaling van de intreecondities, de C_D -berekeningen en de deterministische baanberekeningen zijn alle uitgevoerd voor de modelstof propoff wit papier, 2*2 cm, dikte 0.0121 cm, 100 g/m²

Het gemiddelde van de anemometerresultaten die in dit gebied liggen geeft: $v_f = 4.16$ m/s, bij een superficiële luchtsnelheid van 1.65 m/s.

Voor een superficiële luchtsnelheid van 2 m/s, waarbij de bepaling van de intreecondities is uitgevoerd, geeft dit (onder aanname dat $v_f / v_{f \text{ superficiëel}}$ constant is): $v_f = 5.0$ m/s.

De beginsnelheid van de deeltjes wordt gelijk aan nul gesteld ($v_{p0} = 0$), zodat $w_0 = v_f - v_{p0} = 5.0$ m/s.

Nu S , t en w_0 bekend zijn kan $C_D \cdot A_{\perp}$ berekend worden m.b.v. vgl. 8.1.

$$V = 2 \times 2 \times 0.0121 \times 10^{-6} = 4.84 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\rho_p = 829 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_f = 1.30 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \times \cos 45^\circ = 6.94 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Nsec/m}^2$$

Dit geeft: $S = v_f \cdot t - z = 0.1861 \text{ m}$

$$w_m = 2.068 \times 10^{-2} \times (C_D \cdot A_{\perp})^{-0.5}$$

$$= 1.620 \times 10^4 \times (C_D \cdot A_{\perp})$$

Dit alles ingevuld in vgl. 8.1 geeft door numerieke berekeningen:

$$C_D \cdot A_{\perp} = 3.015 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Met dit produkt zijn de baanberekeningen uitgevoerd, maar omdat het gebruikelijk is om van de meesleepcoëfficiënt zelf van een lichaam te spreken, is deze C_D alsnog losgekoppeld, en wel door net als bij de vorige methode dwarsaanstroming te veronderstellen; we krijgen dan: $C_D = 3.015 \times 10^{-4} / A = 3.015 \times 10^{-4} / 4 \times 10^{-4}$, ofwel $C_D = 0.75$

8.2.4.2. De 120° zifter

Voor de 120° zifter is alleen de tweede methode (§8.2.3) toegepast.

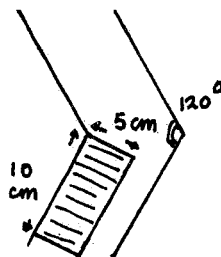
$$Y_{120^\circ} = Y_{90^\circ} = 1.620 \times 10^4 \times (C_D \cdot A_{\perp})$$

In w_m is alleen de versnelling van de zwaartekracht veranderd:

$$g = 9.81 \times \cos 30^\circ = 8.50 \text{ m/s}^2, \text{ zodat } w_m = 2.289 \times 10^{-2} \times (C_D \cdot A_{\perp})^{-0.5}.$$

De v_f is weer gebaseerd op het aanloopstuk tot de knik (fig. 40).

Fig. 40 Aanloopstuk tot de knik



Het gemiddelde van de anemometerresultaten die in dit gebied liggen bedraagt: $v_f = 3.29$ m/s.

Dit is bij een superficiële luchtsnelheid van 1.99 m/s. De bepaling van de intreecondities is uitgevoerd bij een superficiële luchtsnelheid van 1.56 m/s. Dit geeft, onder aanname van gelijkvormigheid van het snelheidsprofiel, voor v_f bij v_f superficieel de waarde: $v_f = 2.6$ m/s.

Uit de bepaling van de intreecondities (zie hoofdstuk 9) volgde: $z = 0.1$ m

$t = 0.1276$ sec., bij een superficiële luchtsnelheid van 1.56 m/s.

Dit geeft: $S = 0.231$ m.

Invullen van de diverse grootheden in vgl. 8.1 levert op:

$C_D \cdot A_1 = 3.149 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. De C_D (voor dwarsaanstroming) wordt dan:
 $C_D = 0.787$

Ter vergelijking is ook nog eens voor de rechte stijgzifter de meesleepcoëfficiënt voor propoff wit, gebaseerd op evenwichtszifting, berekend: $C_D = 0.750$

Dit resultaat komt goed overeen met de C_D -waarden die voor de 90° en 120° zifter gevonden zijn met de andere methode (0.75 en 0.787).

Blijkbaar is het deeltjestransport naar de knik van stijgdeeltjes vergelijkbaar met het transport in een rechte stijgzifter.

8.2.5. Berekening van de C_D voor daaldeeltjes

Ook voor de daaldeeltjes is de meesleepcoëfficiënt alleen bepaald voor de modelstof propoff wit, 2×2 cm, dikte 0.0121 cm, 100 g/m^2 .

8.2.5.1. De 90° zifter

C_D -berekening op basis van evenwichtszifting geeft (lit. 1):

$C_D = 0.880$

Als we de deeltjesbeweging in de zifter van daaldeeltjes en stijgdeeltjes, dan valt op dat de daaldeeltjes, mede doordat ze min of meer gericht langs de wand het snelle kanaal binnentreden, hierin een oriëntatie hebben die gunstiger is dan die van de stijgdeeltjes. Gunstiger wil zeggen, dat ze gemiddeld een grotere oppervlakte loodrecht op de stroming hebben dan de stijgdeeltjes. Als benedengrens van de C_D voor daaldeeltjes wordt daarom de meesleepcoëfficiënt van de stijgdeeltjes genomen, in dit geval $C_D = 0.75$

8.2.5.2. De 120° zifter

Het overgrote deel van de daaldeeltjes komt gericht langs de wand het snelle kanaal binnen, dus onder een hoek van 60° met de lucht-

snelheid daar. In het Reynoldsgebied waarin we werken ($Re > 1000$) is de C_D voor dwarsaanstroming van een vlakke plaat: $C_D = 1.2$ (lit. 7), zodat $C_D \cdot A_{\perp} = 1.2 \cdot A_{\perp}$.

Het dwarsoppervlak loodrecht op de stroming wordt, door de preferente beginoriëntatie van de meeste daaldeeltjes in het snelle kanaal, gegeven door $A_{\perp} = A \cdot \cos 30^{\circ} = 0.866 \cdot A$, zodat $(C_D \cdot A_{\perp}) = 1.2 \cdot 0.866 \cdot A = 1.04 A$.

De meesleepcoëfficiënt wordt dan: $C_D = 1.04$. Deze waarde wordt als bovengrens aangehouden. Als benedengrens voor de C_D is ook hier $C_D = 0.75$ aangenomen (C_D voor stijgdeeltjes).

In tabel 10 zijn de verschillende C_D 's bijeengezet.

Tabel 10 C_D -waarden voor propoff wit	zifter	daaldeeltjes	stijgdeeltjes
	90°	0.75	0.598
		0.880	0.75
	120°	0.75	0.787
		1.04	

8.3. Oplossing van de bewegingsvergelijking

Voor de oplossing van een stelsel differentiaalvergelijkingen van de vorm:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = f_1(x, y) \\ \frac{\partial y}{\partial t} = f_2(x, y) \end{cases}$$

bestaan standaardprocedures. Gekozen werd voor de zogenaamde Runge-Kutta-methode (RK).

Het schema van de oplossing ziet er dan uit zoals dat in figuur 41 op pagina 48 is weergegeven.

Beschouwen we nogmaals de bewegingsvergelijking in x en y:

$$m \frac{\partial v_{px}}{\partial t} = C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \rho_f \cdot (v_{fx} - v_{px}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} + V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) c$$

$$m \frac{\partial v_{py}}{\partial t} = C_D \cdot A_{\perp} \cdot \frac{1}{2} \rho_f \cdot (v_{fy} - v_{py}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} - V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) s$$

Met $m = V \cdot \rho_p$, en delen door m, wordt dit:

$$\frac{\partial v_{px}}{\partial t} = C_D \cdot \frac{A_{\perp}}{V} \cdot \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \cdot (v_{fx} - v_{px}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} + g \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} c$$

$$\frac{\partial v_{py}}{\partial t} = C_D \cdot \frac{A_{\perp}}{V} \cdot \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \cdot (v_{fy} - v_{py}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} - g \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} s$$

Voor een kortere schrijfwijze voeren we in:

$$A = C_D \cdot \frac{A_1}{V} \cdot \frac{1}{2} \rho_f ; B1 = g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot \frac{\cos \delta}{\rho_p} ; B2 = -g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot \frac{\sin \delta}{\rho_p}$$

De vergelijkingen worden dan:

$$\frac{\partial v_{px}}{\partial t} = A \cdot (v_{fx} - v_{px}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} + B1 \quad (\text{vgl. 8.2})$$

$$\frac{\partial v_{py}}{\partial t} = A \cdot (v_{fy} - v_{py}) \cdot \sqrt{(v_{fx} - v_{px})^2 + (v_{fy} - v_{py})^2} + B2 \quad (\text{vgl. 8.3})$$

Deze beide vergelijkingen werden in het computerprogramma ingebouwd om baanberekeningen uit te voeren.

Fig. 41 Oplossinschema

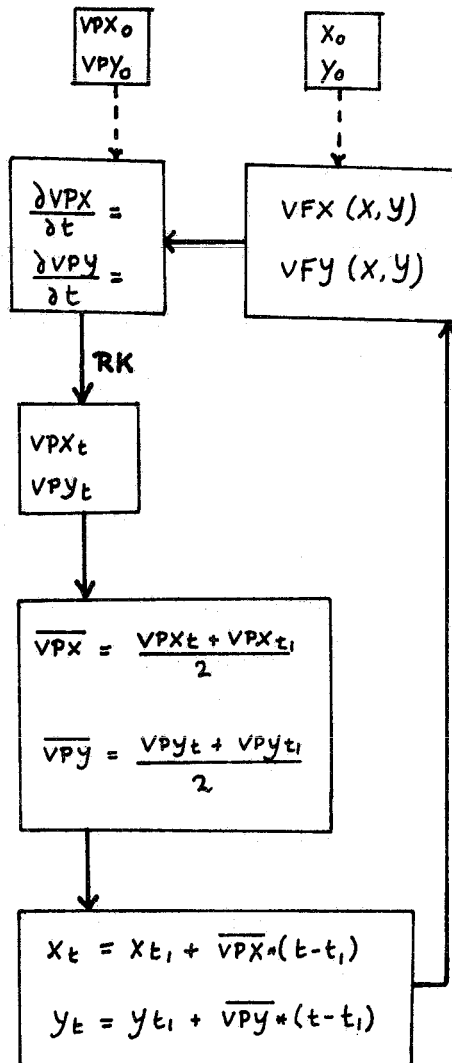
Beginvoorwaarden
(eenmalig)

Bewegings-
vergelijking

Snelheid ten
tijde t

Gemiddelde snel-
heid in tijdspan-
ne (t - t₁)

Positie op tijd-
stip t



Snelheids-
profiel

De berekening van de constanten A, B1 en B2:

A: Voor plaatjes geldt: $\frac{A_1}{V} = \frac{1}{d}$, zodat $A = \frac{C_D \cdot \rho_f}{2d \cdot \rho_p}$ (vgl. 8.4)

B1 en B2: a. 120° zifter.

$$\delta = 60^\circ \quad (\delta \text{ zie fig. 38}), \text{ zodat } B1 = 0.5 * g * \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}$$

$$B2 = -0.866 * g * \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}$$

b. 90° zifter

Voor de 90° zifter is het coördinatenstelsel iets anders gekozen. In plaats van de y-as langs het onderste been van de knik te leggen, is de y-as verticaal gekozen, de x-as horizontaal (zie fig. 29 en 32).

Dit houdt voor de bewegingsvergelijking verder niet zoveel in, alleen de constanten B1 en B2 worden iets anders.

Zou volgens het coördinatenstelsel uit fig. 38 B1 respectievelijk B2 voor de 90° zifter luiden:

$$B1 = 0.707 * g * \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \quad B2 = -0.707 * g * \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}, \text{ volgens}$$

het gekozen stelsel is alleen sprake van opwaartse en zwaartekracht in de y-richting, zodat:

$$B1 = 0 ; B2 = -g \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}$$

9. BEPALING VAN DE BEGINCONDITIES VOOR DE BEWEGINGSVERGELIJKING

9.1. Algemeen

Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking voor de deeltjesbeweging in de zifterknik (hoofdstuk 8) zijn een aantal begincondities nodig. Voor het oplossen van de bewegingsvergelijking, uitgaande van een bepaalde positie van het deeltje in de zifterknik, is de snelheid van het deeltje op die positieⁿ noodzakelijk gegeven.

Deze snelheid werd gehaald uit video-opnamen van de deeltjesbeweging in de knik van de 90° en de 120° zifter. De werkwijze was als volgt:

1. In de eerste plaats werd de videoband op normale snelheid gedraaid om een algemene indruk te krijgen van de beweging, en om te zien of er enig verband is tussen de positie van het deeltje in de knik en zijn bewegingsrichting.
2. Voor het meten van de snelheid waarmee daaldeeltjes het snelle

kanaal binnentreden, of waarmee stijgdeeltjes een bepaald traject in het snelle kanaal afleggen, werd de videoband vertraagd afgespeeld, zodat de beelden te tellen waren. Gekeken werd nu:

- a. In hoeveel stappen (halve beelden) het deeltje de afstand aflegde.
- b. Hoe groot de afgelegde weg was.
- c. Op welke hoogte het daalde^eltje het snelle kanaal binnentrad, of op welke breedte het stijgdeeltje zich in het kanaal bewoog.
- d. Wat de richting van de snelheid van het deeltje was bij het intreden van de knik.
- e. Of het deeltje de knik boven of onder verliet.

Omdat de tijd van één stap (dit is de tijd waarin het halve beeld wordt vervangen) bekend is, nl. $1/50$ sec., kan uit a. en b. de snelheid berekend worden.

Bovendien kan uit c. en e. de P_g en P_d bepaald worden, mits voldoende deeltjes gevolgd worden.

De bepaling van de begincondities is uitgevoerd voor de modelstof propoff wit (2×2 cm, 100 g/m^2).

N.B. Het feit dat de intreecondities bepaald worden, houdt op zich al een keuze in. Immers, de mogelijkheden om een kansrelatie te beschrijven met een deterministisch model, zijn in dit geval:

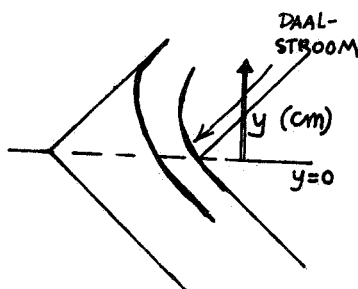
1. introductie stochastiek in de intreecondities.
2. introductie stochastiek in de baanparameters ($C_D, v_f(t)$).

Gekozen is voor 1. Het zal blijken dat deze intreecondities van groot belang zijn.

9.2. De 90° zifter

9.2.1. Daaldeeltjes

Fig. 42 Definities

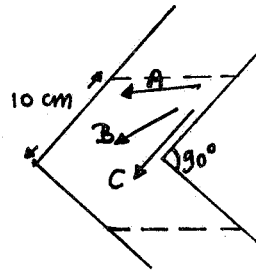


y: hoogte boven de knik waar de daaldeeltjes het snelle kanaal binnentreden, in cm.

v_{p0} : snelheid waarmee de deeltjes het kanaal binnentreden (cm/s).
 $n(v_{p0})$: aantal deeltjes met snelheid v_{p0} .

Het totaal aantal daaldeeltjes waarvan de beweging geanalyseerd is, bedraagt 150, bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 2.0$ m/s. Het bleek voorts, dat er een verband bestaat tussen de positie waar het deeltje het snelle kanaal binnentreedt, en de richting van de snelheid waarmee dit gebeurt (figuur 43).

Fig. 43 Richting van het binnentredende daaldeeltje



Richting C, evenwijdig aan de ziffterwand: deeltjes die het snelle kanaal binnentreden op een hoogte $0 < y \leq 2$ cm.

Richting A, horizontaal: deeltjes die het kanaal binnentreden op hoogte $3.5 < y \leq 7$ cm.

Richting B, midden tussen A en C: deeltjes die het kanaal binnentreden op hoogte $2 < y \leq 3.5$ cm.

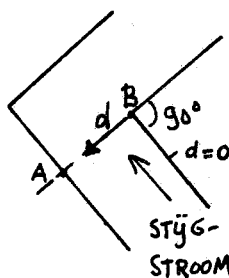
De resultaten van de analyse zijn terug te vinden in de tabellen 11 t/m 15 (bijlagen) en in figuur 44 (pagina 52).

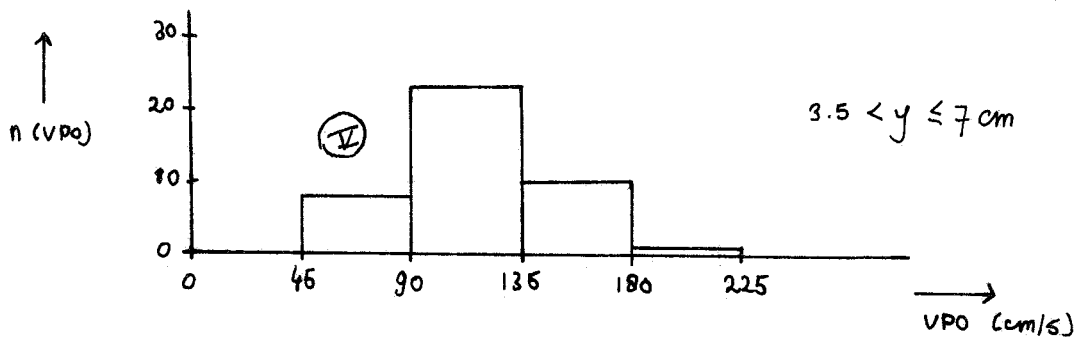
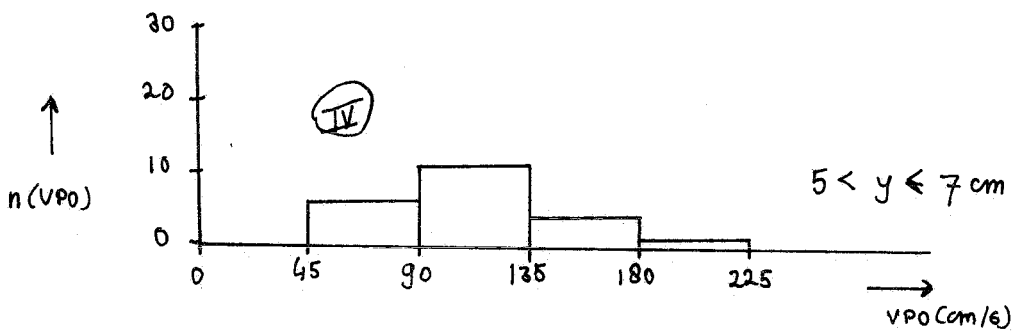
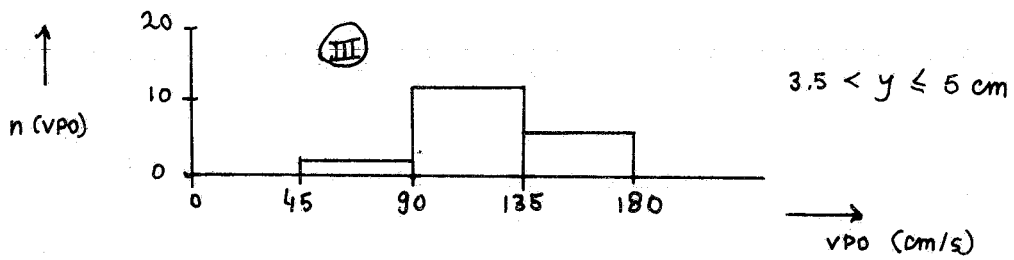
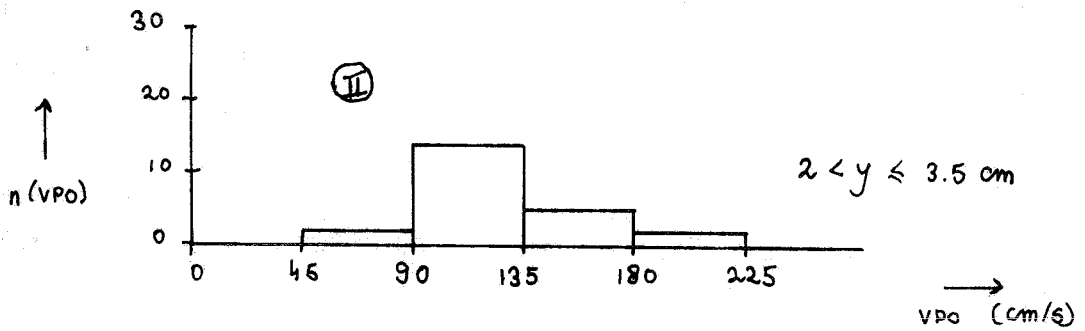
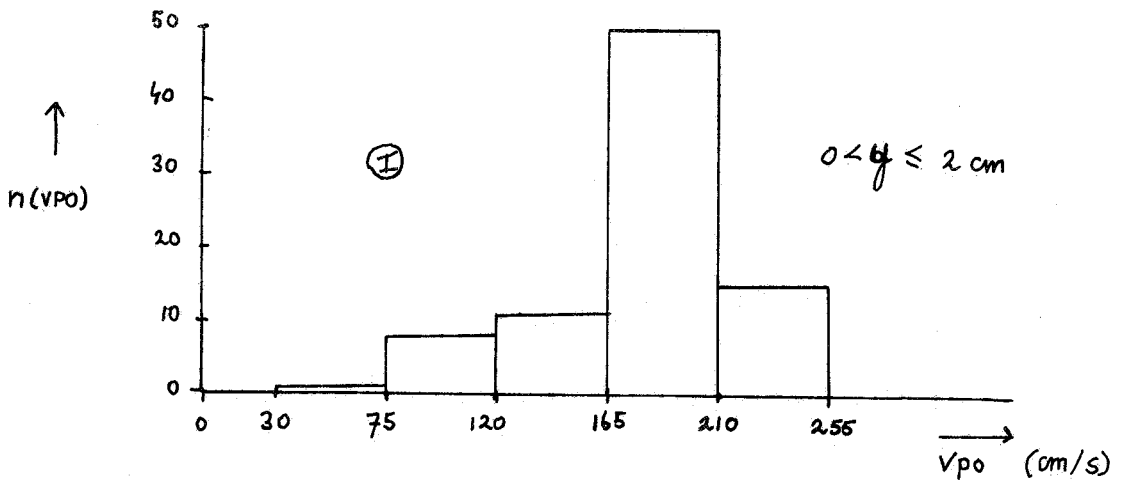
In deze figuur geldt:

- Ⓘ : fractie $0 < y \leq 2$, richting C, aantal: 85, $1 - P_d = 0.29$
- Ⓜ : fractie $2 < y \leq 3.5$, richting B, aantal: 23, $1 - P_d = 0.09$
- Ⓝ : " $3.5 < y \leq 5$, " A, " 20,
- Ⓓ : " $5 < y \leq 7$, " A, " 22,
- Ⓔ : " $3.5 < y \leq 7$ " A, " 42, $1 - P_d = 0.07$ Ⓔ = Ⓝ + Ⓓ

9.2.2. Stijgdeeltjes

Fig. 45 Definities





d : afstand tot de ziffterwand (cm)

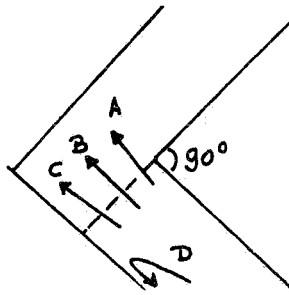
v_{p0} : snelheid waarmee het stijgdeeltje de lijn AB passeert (cm/s)

$n(v_{p0})$: aantal deeltjes met snelheid v_{p0}

Intreepositie: positie op de lijn AB

Ook bij de stijgdeeltjes is er een verband tussen de intreepositie en de richting van de snelheid (figuur 46).

Fig 46 Richting van
het stijgdeeltje



Richting A: $0 < d \leq 2$ cm: onder een hoek van 15° met de ziffterwand.

Richting B: $2 < d \leq 4$ cm: evenwijdig aan de ziffterwand.

Richting C: $4 < d \leq 7$ cm: onder een hoek van -15° met de ziffterwand.

Er was een kleine fractie die de lijn AB niet eens haalden en al eerder de knik weer aan de onderzijde verlieten (D). Van deze fractie ($d > 7$ cm) is geen snelheidsverdeling opgenomen; de stijgcans van deze fractie is uiteraard gelijk aan nul.

Ook hier betreft de analyse weer propoff wit, 2×2 cm, het totaal aantal stijgdeeltjes bedroeg 247, de superficiële luchtsnelheid $v_f = 2.0$ m/s, $1 - P_s = 0.67$.

De resultaten staan vermeld in de tabellen 16 t/m 18 (bijlagen), en in figuur 47 op pagina 54. Bij deze figuur geldt:

I: fractie $0 < d \leq 2$ cm, richting A, aantal: 114, $1 - P_s = 0.48$

II: " $2 < d \leq 4$ cm, " B, " : 57, $1 - P_s = 0.70$

III: " $4 < d \leq 7$ cm, " C, " : 48, $1 - P_s = 0.90$

De 4^e fractie, $d > 7$ cm, richting D, telde 28 deeltjes, $1 - P_s = 1.00$

9.3. De 120° ziffter

Modelstof propoff wit, 2×2 cm, superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.56$ m/s.

9.3.1. Daaldeeltjes

Evenals bij de 90° ziffter is er ook hier weer een verband tussen de intreepositie van de daaldeeltjes en de richting van hun snelheid (figuur 48).

Fig 47

Fig. 47

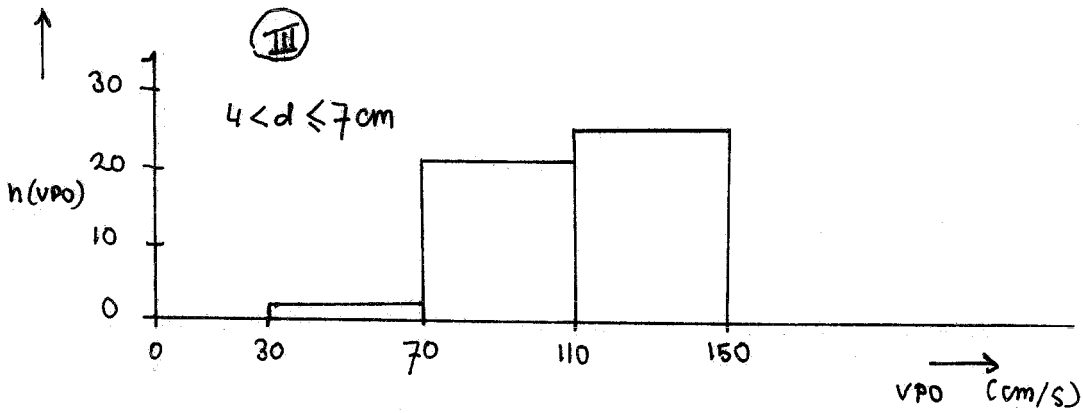
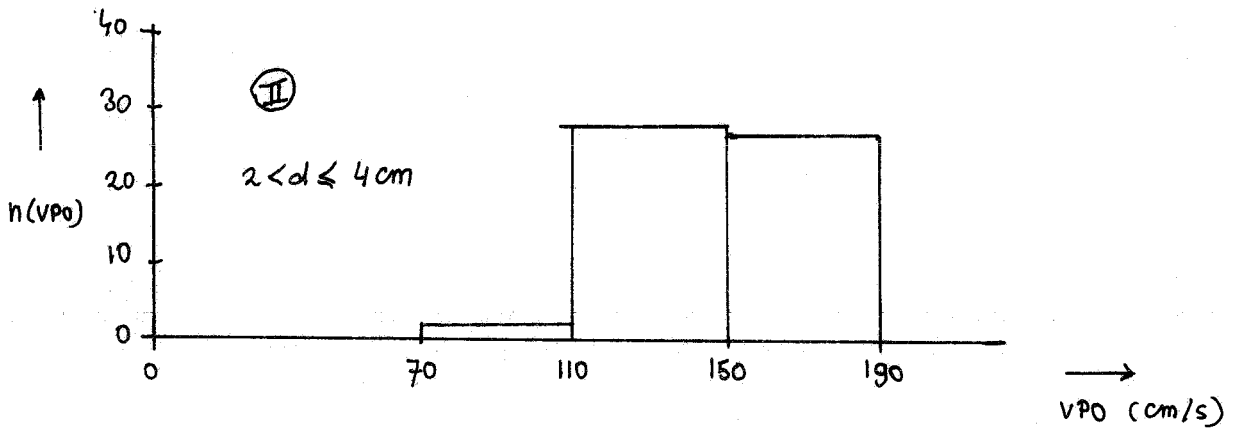
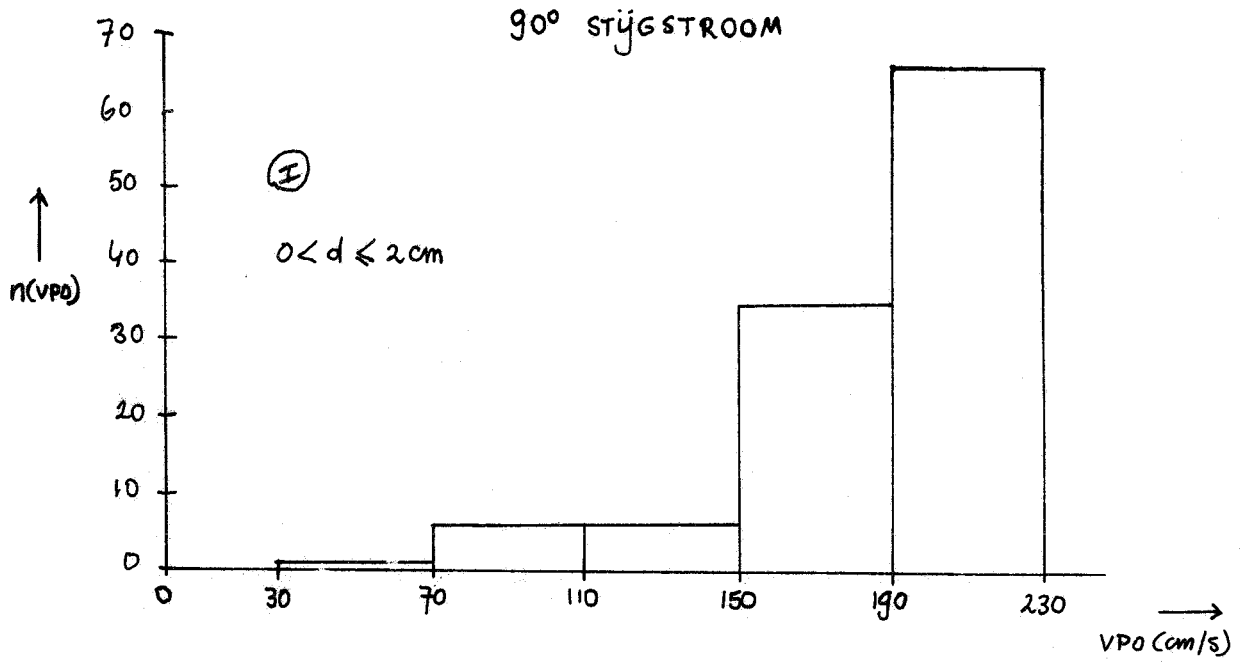
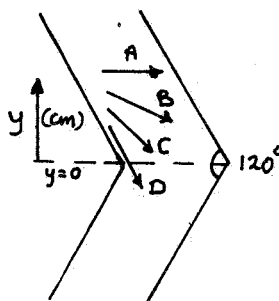


Fig. 48 Richting daaldeeltjes



Richting A: fractie die het snelle kanaal binnentreedt op hoogte $y > 5$ cm; horizontaal

Richting B: $3 < y \leq 5$ cm; onder een hoek van 30° met de horizontaal.

Richting C: $1 < y \leq 3$ cm; onder een hoek van $40-45^\circ$ met de horizontaal

Richting D: $0 < y \leq 1$ cm; langs de wand gericht (hoek van 60° met de horizontaal).

Het totaal aantal daaldeeltjes dat werd bekeken bedroeg 171, de $P_d = 0.60$. Zie de tabellen 19 t/m 22 (bijlagen) en figuur 49 op pagina 56. Bij deze figuur geldt:

Ⓘ: fractie $0 < y \leq 1$ cm, richting D, aantal: 131, $P_d = 0.50$

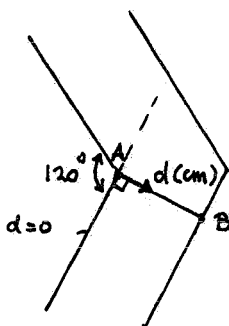
Ⓜ: " $1 < y \leq 3$ cm, " C, " 21, $P_d = 0.86$

Niet in deze figuur staan:

Fractie $3 < y \leq 5$ cm, richting B, aantal: 7, $P_d = 1.00$, $\overline{v_{p0}} = 65$ cm/s
 " $y > 5$ cm, " A, " 12, $P_d = 1.00$, $\overline{v_{p0}} = 46.5$ cm/s

9.3.2. Stijgdeeltjes

Fig. 50 Definities



d : afstand tot de ziffterwand (cm)

v_{p0} : snelheid waarmee de stijgdeeltjes de lijn AB passeren (cm/s).

$n(v_{p0})$: aantal deeltjes met snelheid v_{p0} .

Intreepositie: positie op de lijn AB

Verband intreepositie en de richting van de snelheid: figuur 51.

Fig 4g

120° DAALSTROOM

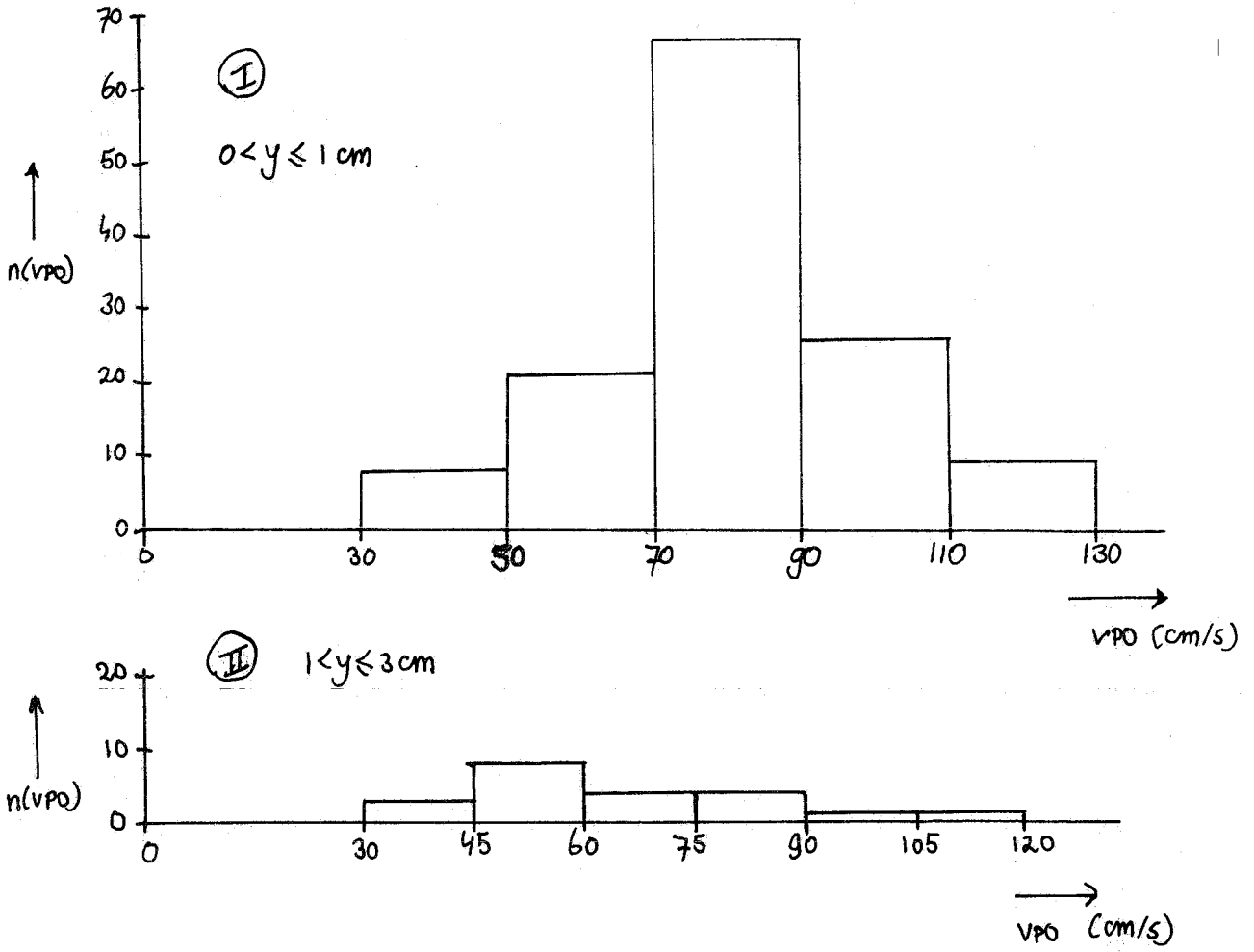
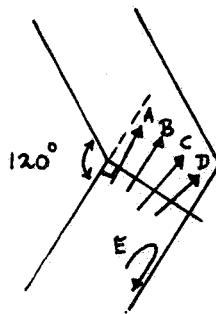


Fig. 51 Richting stijgdeeltjes



Richting A: de fractie $0 < d \leq 2$ cm; onder een hoek van 70° met de horizontaal.

Richting B: de fractie $2 < d \leq 4$ cm; onder een hoek van $60-65^\circ$ met de horizontaal.

Richting C: de fractie $4 < d \leq 6$ cm; onder een hoek van 55° met de horizontaal.

Richting D: de fractie $d > 6$ cm; onder een hoek van $45-50^\circ$ met de horizontaal.

Er was bovendien nog een fractie die de lijn AB (fig. 50) niet eens haalden en al eerder de knik weer aan de onderzijde verlieten (E in fig. 51).

Het totaal aantal stijgdeeltjes dat werd bekeken bedroeg 170, de $P_s = 0.35$. De resultaten staan in de tabellen 23 t/m 26 (bijlagen) en in figuur 52 op pagina 58. Bij deze figuur geldt:

- I: fractie $0 < d \leq 2$ cm, richting A, aantal: 35, $P_s = 0.91$
- II: " $2 < d \leq 4$ cm, " B, " 33, $P_s = 0.52$
- III: " $4 < d \leq 6$ cm, " C, " 35, $P_s = 0.23$
- IV: " $d > 6$ cm, " D, " 33, $P_s = 0.09$

De fractie die de lijn AB niet haalde, telde 34 deeltjes; $P_s = 0.0$

9.4. Vergelijking 90° - 120° zifter

Als we de snelheden vergelijken waarmee de daaldeeltjes het snelle kanaal binnentreden, valt het grote verschil op in intreesnelheid in de 90° en de 120° zifter.

Voor de fractie daaldeeltjes die a.h.w. langs de wand het kanaal binnentreden, geldt:

90° zifter, fractie $0 < y \leq 2$ cm: v_{p0} gemiddeld = 179.5 cm/s, bij een superficiële luchtsnelheid van 2.0 m/s.

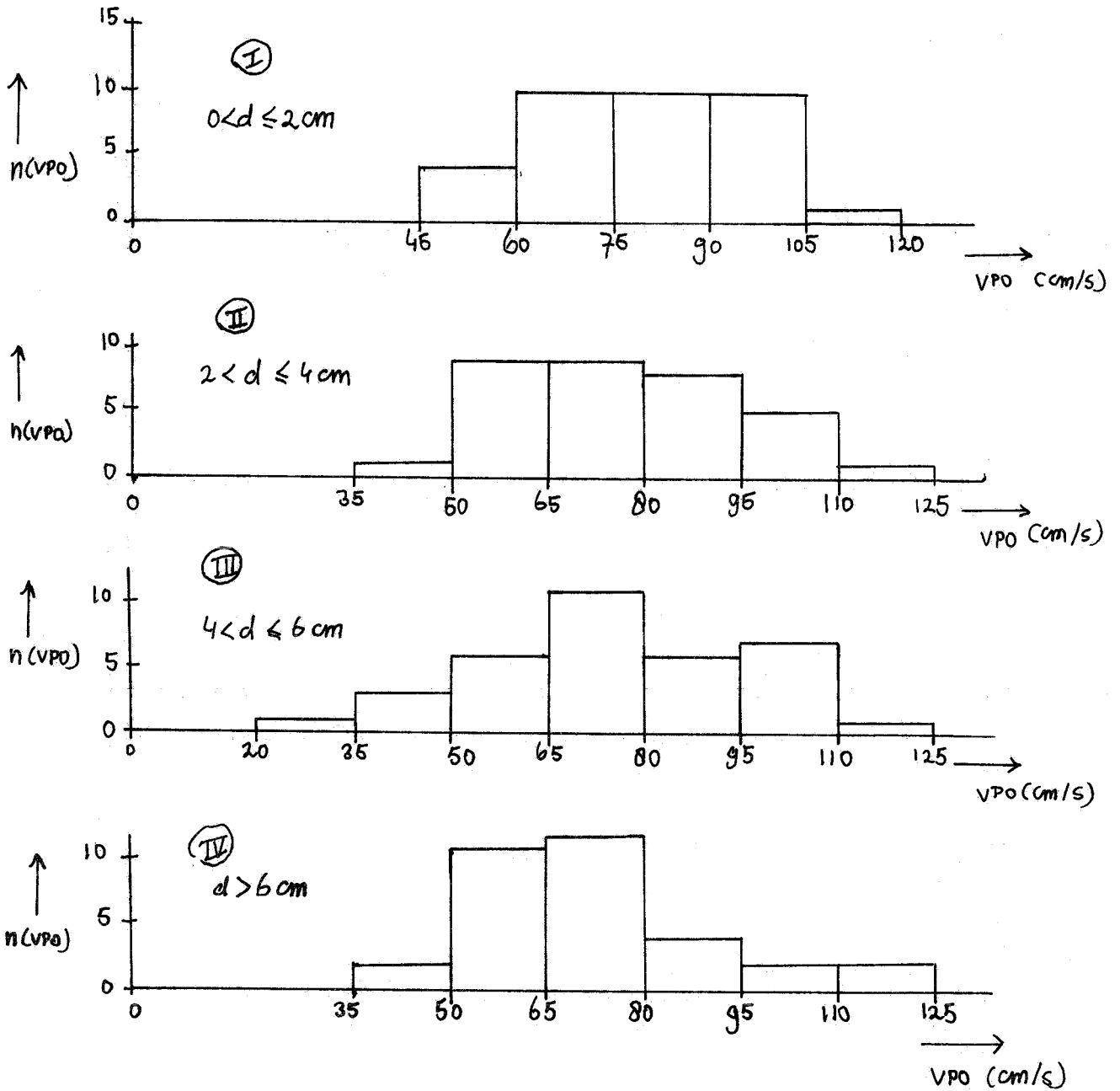
120° zifter, fractie $0 < y \leq 1$ cm: v_{p0} gemiddeld = 81.1 cm/s, bij een superficiële luchtsnelheid van 1.56 m/s

Hoewel de superficiële luchtsnelheid slechts een factor 1.3 verschilt, is de gemiddelde intreesnelheid van de daaldeeltjes in de 90° zifter ruim een factor 2.2 maal zo groot als in de 120° zifter

Fig 52

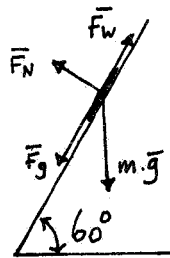
120° STÜßSTROOM

Fig



De vraag rijst, of in het geval van de 120° zifter de deeltjes misschien daadwerkelijk langs de wand naar beneden glijden, en bij de 90° zifter min of meer gedragen worden door de recirculatiestroming. Om hierachter te komen voeren we een ruwe berekening uit; de krachtenbalans is geschetst in figuur 53.

Fig. 53 Krachtenbalans glijdend deeltje



\overline{F}_N : de normaalkracht
 \overline{F}_w : de wrijvingskracht
 \overline{F}_g : de ontbondene van de zwaartekracht langs de zifterwand
 $m \cdot \overline{g}$: de zwaartekracht

Bij verwaarlozing van de meesleepkracht, m.a.w. in het geval van maximaal haalbare glijsnelheid, kan de glijsnelheid als volgt berekend worden:

$$m \cdot a = F_g - F_w = m \cdot g \cdot \sin 60^\circ - f \cdot F_N = m \cdot g \cdot \sin 60^\circ - f \cdot m \cdot g \cdot \cos 60^\circ$$

$$f = \tan \alpha_{\text{afglij}} = 0.618 \text{ voor propoff wit } 2 \times 2 \text{ cm (lit. 9)}$$

$$a = g \cdot \sin 60^\circ - 0.618 \cdot g \cdot \cos 60^\circ$$

$$a = 5.46 \text{ m/s}^2$$

Voor de eenparige versnelde beweging geldt:

$$v = v_0 + a \cdot t \quad v: \text{ snelheid op tijdstip } t$$

$$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad v_0: \text{ beginsnelheid} \quad s: \text{ verplaatsing}$$

De gemeten tijd over een verplaatsing van 10 cm (tot de knikpunt) bedroeg gemiddeld: $t = 0.1234 \text{ sec.}$, zodat:

$$0.1 = v_0 \cdot 0.1234 + \frac{1}{2} \cdot 5.46 \cdot (0.1234)^2$$

$$v_0 = 0.473 \text{ m/s}$$

$$\text{De maximale glijsnelheid wordt dan: } v_{\text{max}} = 0.473 + 5.46 \cdot 0.1234 =$$

$$1.147 \text{ m/s. Voor } v_{p0} \text{ moet dus gelden: } v_{p0} \leq 114.7 \text{ cm/s.}$$

De gemeten gemeten v_{p0} bedraagt 81.1 cm/s , de maximale $v_{p0} = 120 \text{ cm/s}$.

M.a.w., de gemiddelde v_{p0} voor daaldeeltjes die langs de wand het snelle kanaal binnenkomen (fractie $0 < y \leq 1 \text{ cm}$) in de 120° zifter ligt in dezelfde orde van grootte als de snelheid die de deeltjes zouden bezitten op grond van de aanname dat de deeltjes inderdaad langs de wand glijden.

Bij de 90° zifter hebben de daaldeeltjes die langs de wand komen ($0 < y \leq 2 \text{ cm}$) een gemiddelde snelheid die in dezelfde grootte-orde

ligt ($v_{p0} = 179.5$ cm/s) als de heersende recirculatiestroming van de lucht, ruim 2 m/s bij een superficiële luchtsnelheid van 2.0 m/s. Het grote verschil tussen de gemiddelde snelheden van daaldeeltjes in de 90° en de 120° zifter kan daarom wellicht teruggevoerd worden op twee gegevens:

1. In tegenstelling tot de daaldeeltjes in de 90° zifter, lijken de daaldeeltjes in de 120° zifter te glijden langs de wand. (geheel zeker is dit niet)
2. In de 120° zifter ontbreekt de recirculatiestroming die in de 90° zifter mogelijk voor de daaldeeltjes een versnellend effect heeft.

N.B. Punt 2. (de recirculatiestroming) is ook debet aan het feit dat bij de 90° zifter veel meer deeltjes eerder van de wand getild worden en dus veel hoger het snelle kanaal binnenkomen. Bij de 120° zifter komt 77% van de daaldeeltjes langs de wand het snelle kanaal binnen, bij de 90° zifter komt 57% binnen op een hoogte tussen 0 en 2 cm van de wand, de rest hoger.

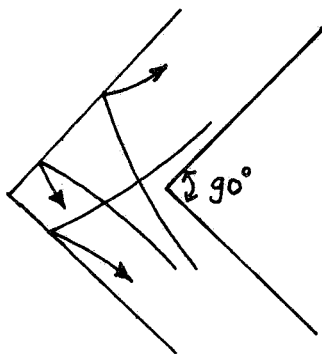
Het verschil in intreesnelheid tussen de stijgdeeltjes in de 90° en de 120° zifter valt te verklaren uit de veel hogere luchtsnelheid in het snelle kanaal van de 90° zifter.

9.5. Het 'target' in de 90° zifter

Bij het bekijken van de videobeelden van de deeltjesbewegingen in de 90° en 120° zifter is nog een uiterst nuttig gegeven gehaald, en wel met betrekking tot het beslissingscriterium t.a.v. stijgen of dalen van deeltjes in de 90° zifter.

Het blijkt dat alle deeltjes in de 90° , zowel stijg- als daaldeeltjes, bij gangbare superficiële luchtsnelheden (1-3 m/s voor propoff wit), bij overgang van de ene naar de andere knik tegen de zifterwand botsen (figuur 54).

Fig. 54 Het botsen van de deeltjes in de 90° zifter



Bovendien blijkt vrij nauwkeurig uit de plaats van botsing te voor-

spellen of een deeltje de knik aan de bovenzijde of aan de onderzijde gaat verlaten.

Er blijkt slechts een vrij smal 'target' te zijn waarin beslissingsonzekerheid optreedt. Dit target is aangegeven in het snelheidsvectorplaatje, zie figuur 55 (bijlagen).

Uit de bestudering van de deeltjesbeweging blijkt dat deeltjes die boven dit target tegen de wand botsen de knik aan de bovenzijde verlaten, terwijl deeltjes die beneden het target tegen de wand botsen onherroepelijk naar de onderliggende knik bewegen.

Alleen van deeltjes die het target raken valt niet te voorspellen of zij de knik boven of beneden verlaten.

In de 120° zifter is het daarentegen zo, dat lang niet alle deeltjes tegen de wand botsen bij overgang van de ene naar de andere knik, terwijl ook het bestaan van een min of meer begrensd target niet uit de video-opnamen viel op te maken.

10. Deterministische BAANBEREKENINGEN

10.1. Inleiding

M.b.v. video-opnamen van deeltjesbewegingen zijn de begincondities bepaald die nodig zijn voor de deterministische baanberekeningen. Zie vorig hoofdstuk. De superficiële luchtsnelheid waarbij deze analyses zijn gedaan, is echter niet de zelfde als de luchtsnelheid waarbij de snelheidsmetingen zijn verricht. Om toch berekeningen te kunnen uitvoeren moet worden uitgegaan van uniformiteit van het snelheidsprofiel. Op grond van video-opnamen en foto's van zeepbellen lijkt dit zeker gerechtvaardigd (zie hoofdstuk 6), maar ter verificatie werd eerst nog een serie snelheidsmetingen verricht bij een belangrijk hogere superficiële luchtsnelheid voor de 90° zifter. Dit omdat op grond van het veel gedifferentieerder stromingsprofiel in de 90° zifter hier het eerst moeilijkheden verwacht zouden mogen worden.

10.2. Verificatie van het snelheidsprofiel

De luchtsnelheidsmetingen werden uitgevoerd voor slechts één hoogte in de knik, en wel de meest kritische: ter hoogte van de knik zelf ($y=0$).

In tabel 27 (pag. 62) staan naast elkaar de resultaten van de metingen (v_f superficieel = 3.17 m/s : zie tabel 7 in de bijlagen), grootte en richting van de gemiddelde locale snelheid in $(x',0)$, én de snelheden die op grond van uniformiteit van het snelheids-

profiel volgen uit de eerdere meetresultaten (bij v_f superficieel = 1.645 m/s).

Tabel 27

x' (cm)	v_{gemeten} $v_{\text{gem,max}}$ (m/s)	θ_{max}	v_{berekend} (m/s) ($^\circ$)	
2.4	3.15	155 $^\circ$	3.55	155 $^\circ$
4.7	3.05	120 $^\circ$	3.05	geen
7.0	3.75	130 $^\circ$	3.75	130 $^\circ$
9.3	5.7	145 $^\circ$	5.85	145 $^\circ$
11.6	9.6	150 $^\circ$	10.4	150 $^\circ$
13.7	12.8 ¹⁾	145 $^\circ$	14.7	145 $^\circ$

1) Deze waarde is niet geheel betrouwbaar vanwege overflow van de Analyser; in werkelijkheid kan hij alleen hoger - en dus gunstiger - liggen.

Op grond van deze resultaten, gemiddeld nog geen 6% afwijking, wat gezien de onnauwkeurigheid die toch nog in de metingen sluipt (vooral in de positie van de probe) niet veel is, beschouwen we de aanname van uniformiteit van het snelheidsprofiel gerechtvaardigd.

10.3 De 90 $^\circ$ zifter, daaldeeltjes; v_f superficieel = 2.0 m/s

10.3.1. Baanberekeningen met het geknikte profiel; $C_D = 0.880$

De begincondities zijn gehaald uit de analyses, zie § 9.2.1. Van de fractie die op een hoogte $0 < y \leq 2$ cm het snelle kanaal binnentreedt zijn berekeningen uitgevoerd voor de middelwaarden van het snelheidshologram (fig. 44): zie ook tabel 11 (bijlagen). De intreepositie ($0 < y \leq 2$ cm) werd gefixeerd op $y = 1$ cm. Van de andere fracties is alleen een berekening uitgevoerd voor de deeltjes met de grootste intreesnelheid die is waargenomen. De complete set van beginvoorwaarden waarvoor deterministische baanberekeningen zijn verricht staan vermeld in tabel 28. Vanzelfsprekend is de richting van de intreesnelheid aangehouden die bij de analyse bepaald is.

<u>Tabel 28</u>	Intreeposi- tie (cm)	Fig. nr. (bijlagen)	Intreesnel- heid v_{p0} (cm/s)	Baannr.	Aantal de tjes in de baan
			52.5	1	1
	y= 1.0 cm	56	97.5	2	8
			142.5	3	11
			187.5	4	50
			232.5	5	15
	y= 2.75	57	225.0	3	2
	y= 4.25	57	225.0	2	0
	y= 6.0	57	225.0	1	1

Verreweg het interessantst is de eerste fractie ($y= 1.0$ cm), omdat het hier het merendeel van de daaldeeltjes betreft, en bovendien de daalkans nog redelijk groot is ($1-P_d = 0.29$), terwijl van de andere fracties bijna alle deeltjes omhoog gaan bij deze lichtsnelheid. In § 9.5 is gesproken van een target dat als beslissingscriterium t.a.v. stijgen of dalen gebruikt kan worden. Vandaar dat bij de baanberekeningen voor de 90° zifter telkens dit target in de figuren is ingetekend.

Op grond van het targetcriterium zouden de deeltjes in baan 1 en 2 allemaal omhoog gaan, de deeltjes in baan 5 allemaal omlaag, terwijl van de deeltjes in de banen 3 en 4 het onzeker is naar welke kant zij zullen gaan bewegen.

M.a.w.: 9 deeltjes verlaten de knik aan de bovenzijde
 15 " " " " " " " " onderzijde

Van 61 deeltjes is het niet te voorspellen¹⁾

Om aan de gemeten daalkans $1-P_d$ van deze fractie te voldoen, zouden van deze 61 deeltjes er 10 naar beneden moeten bewegen, en de rest omhoog.

10.3.2. Berekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.880$

Voor de fractie $y= 1.0$ cm (intreesnelheden zie tabel 28) zijn de baanberekeningen uitgevoerd: figuur 58 (bijlagen).

1) In alle eerlijkheid dienen we ons te realiseren dat slechts een gedeelte van de stochastiek door ons via de beginvoorwaarden is geïntroduceerd. De targetstochastiek missen we. Dit is een zeer moeilijke materie: hierin zit o.a. de hoek van botsing, de momentane waarde van de lichtsnelheid enz. enz.

Toepassing van het targetcriterium geeft het zelfde resultaat als bij het geknikte profiel. In figuur 59 (bijlagen) is het gebied waarin de banen lopen voor beide stromingsprofielen ingetekend. Het blijkt dat de positie van het gebied voor beide profielen het zelfde is (de middelste baan komt bij beide profielen precies in het target), alleen is in het geval van het ronde profiel het gebied iets breder.

Aangezien de berekeningen toch meer indicatief zijn dan een exacte bepaling van stijg/daalkansen, wordt besloten om in het vervolg voor de daaldeeltjes alleen nog het geknikte profiel te gebruiken.

10.3.3. Berekeningen met het geknikte profiel; $C_D = 0.75$

Wederom zijn voor de zelfde set begincondities de berekeningen uitgevoerd, zie figuur 60 (bijlagen).

Het targetcriterium geeft hier andere resultaten.

Doordat het gehele gebied waarin de banen lopen iets lager komt te liggen, komt nu alleen de bovenste baan boven het target te liggen, en de onderste er beneden. De drie middelste banen komen terecht in het target, zodat:

1 deeltje omhoog

15 deeltjes omlaag

69 deeltjes ?

Het lijkt dat een zo geringe verandering in C_D ($0.880 \rightarrow 0.75$) weinig invloed heeft op de ligging van de banen.

10.4. De 90° zifter, stijgdeeltjes; $v_{\text{superficieel}} = 2.0$ m/s

10.4.1. Berekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.598$

Van de fractie $0 < d \leq 2$ cm zijn berekeningen uitgevoerd voor de hoogste en de laagste v_{p0} , voor $d = 1$ cm.

Evenzo voor de fractie $2 < d \leq 4$ cm, en wel voor de positie $d = 2$ cm.

Het had geen zin om voor andere fracties baanberekeningen uit te voeren, omdat deze toch ver beneden het target uit zouden komen.

Bovendien is voor $d = 4$ cm geen snelheidsprofiel meer gedefinieerd.

De set begincondities wordt dan (zie ook tab. 16 en 17, bijlagen):

$d = 1$ cm, $v_{p0} = 50$ en $v_{p0} = 210$ cm/s

$d = 2$ cm, $v_{p0} = 30$ en $v_{p0} = 190$ cm/s

De resultaten zijn uitgezet in figuur 61, bijlagen.

Het blijkt dat de intreesnelheid nauwelijks enige invloed heeft, terwijl de intreepositie een allesoverheersende rol speelt.

De gemeten daalkans $1 - P_s$ van de stijgdeeltjes (van het totaal

aantal stijgdeeltjes, 247, dus ook die waarvoor hier geen baanberekeningen zijn uitgevoerd) bedraagt 0.67 (zie § 9.2.2.).

Volgens het targetcriterium zou een groot gedeelte van de fractie $0 < d \leq 2$ cm naar boven bewegen, een kleiner gedeelte zou beslissingsonzekerheid kennen. Deze fractie telt 114 deeltjes.

De fractie $2 < d \leq 4$ cm zou, indien gefixeerd op $d = 2$ cm, terecht komen in het target. Deze fractie telt 57 deeltjes.

Als van deze fractie de intreepositie gefixeerd wordt op het midden van de intreestroom ($d = 3$ cm), komen de banen beneden het target terecht. (Vergelijk figuur 61, baan 5, $v_{p0} = 190$ cm/s)

Alle overige deeltjes, 76, bewegen naar beneden.

Om aan de gemeten $1 - P_g = 0.67$ te voldoen, moeten 166 deeltjes naar beneden bewegen, en 81 naar boven.

De fractie^s met intreepositie $d > 2$ cm bewegen naar beneden, d.w.z. $76 + 57 = 133$ deeltjes. Van de fractie $0 < d \leq 2$ cm zouden derhalve nog eens 33 deeltjes naar beneden moeten bewegen.

Dit lijkt alleszins redelijk.

10.4.2. Berekeningen met het geknikte profiel; $C_D = 0.598$

Voor de zelfde begincondities als in § 10.4.1. zijn berekeningen uitgevoerd, zie figuur 62 (bijlagen).

Er blijkt nauwelijks verschil met de banen berekend met het ronde profiel. Ook hier komt de fractie $d = 1$ cm deels in het target terecht, terwijl de fractie $d = 3$ cm en de andere fracties beneden het target terecht komen.

Voortaan zal voor stijgdeeltjes volstaan worden met berekeningen met het ronde stromingsprofiel.

10.4.3. Berekeningen met het ronde profiel; $C_D = 0.75$

Deze geringe verandering in C_D blijkt geen verschil uit te maken, zie figuur 63 (bijlagen).

10.5. De 120° zifter, daaldeeltjes; $v_{\text{superficieel}} = 1.56$ m/s

10.5.1. $C_D = 1.04$

Hier zijn berekeningen gedaan voor de fractie $0 < y \leq 1$ cm, met $v_{p0} = 40$ cm/s (midden van de eerste staaf uit het hologram), $v_{p0} = 80$ cm/s (midden van de middelste staaf) en $v_{p0} = 120$ cm/s (midden van de laatste staaf). Zie figuur 49, de snelheidsverdeling voor daaldeeltjes in de 120° zifter.

Van de andere fracties ($y > 1$ cm) gaat (zie § 9.3.1.) bijna alles omhoog; vandaar dat hiervoor geen baanberekeningen zijn uitgevoerd.

De intreepositie van de fractie $0 < y \leq 1$ cm is voor de berekeningen gefixeerd op $y = 0.5$ cm, de gemeten stijgkans van deze fractie

$$P_d = 0.50$$

De set begincondities wordt dan : zie tabel 29.

<u>Tabel 29</u>	<u>Intreepo-</u>	<u>fig.nr.</u>	<u>v_{p0}</u>	<u>baannr.</u>	<u>aantal deeltjes in</u>
	<u>sitie</u>		<u>cm/s</u>		<u>deze baan (tabel 19)</u>
			40	1	8
			60	-	21
	$y = 0.5$ cm	64	80	2	67
			100	-	26
			120	3	9

De deeltjes in baan 1 zullen naar de bovenliggende knik gaan, de deeltjes in baan 3 naar de benedenliggende; er is geen kracht die hen naar boven kan doen bewegen.

Van de deeltjes in baan 2 kan niet gezegd worden aan welke zijde zij de knik zullen verlaten.

De gemeten stijgkans $P_d = 0.50$. Als we aannemen dat $8 + 21 = 29$ deeltjes naar boven bewegen, $26 + 9 = 35$ deeltjes naar beneden, dan zouden van de 67 deeltjes in baan 2 er 36 naar boven moeten en 31 naar beneden.

10.5.2. $C_D = 0.75$

Begincondities: zie tabel 29.

De banen zijn uitgezet in figuur 65 (bijlagen).

Er is een groot verschil met de banen die berekend zijn met een C_D van 1.04. In figuur 66 (bijlagen) is het gebied waarin de banen liggen nog eens vooe beide C_D -waarden getekend, en duidelijk is de verschuiving naar beneden voor $C_D = 0.75$ t.o.v. $C_D = 1.04$.

Het lijkt of in het geval van $C_D = 0.75$ minder deeltjes omhoog gaan dan op grond van de gemeten $P_d = 0.50$ verwacht mag worden.

10.6. De 120° zifter, stijgdeeltjes; $C_D = 0.787$

Set van begincondities (zie tabellen 23 t/m 25) : tabel 29^A

Tabel 29^A zie pagina 67

Tabel 29^A

Intreepositie	Fig. nr.	v_{p0} (cm/s)	baannr.
d = 1 cm	67	52,5 (benedengrens)	1
(fractie $0 < d \leq 2$ cm)		112,5 (bovengrens)	2
d = 3 cm	67	42,5 (benedengrens)	3
(fractie $2 < d \leq 4$ cm)		117,5 (bovengrens)	4
d = 4.5 cm	67	27,5 (benedengrens)	6
(fractie $4 < d \leq 6$ cm)		117,5 (bovengrens)	5

Voor de andere fracties, waarvan (bijna) alle deeltjes de knik weer beneden verlaten (zie § 9.3.2.), zijn geen baanberekeningen uitgevoerd.

De deeltjes met banen in de linkse twee gearceerde gebieden in fig. 67 verlaten de knik aan de bovenzijde, dit zijn er $35 + 33 = 68$, alle overige verlaten de knik aan de onderzijde ($35 + 33 + 34 = 102$), zodat P_s berekend = 0.40 . Dit komt goed overeen met de gemeten stijgekans van de stijgdeeltjes bij deze luchtsnelheid, $P_s = 0.35$.

10.7. Motivatie van het verdere rekenprogramma

Op het punt aanbeland, dat met behulp van de deterministische baanberekeningen bij de condities, vermeld in tabel 30, goede beschrijvingen kunnen worden gegeven van het kansgedrag van de modelstof propoff wit (2x2 cm) in de zifterknik, rees de vraag wat nu verder gedaan moest worden.

<u>Tabel 30</u>	Zifter	v_f superficieel	C_D daaldeeltjes	C_D stijgdeeltjes
	90°	2.0 m/s	0.75	0.75
	120°	1.56 m/s	1.04	0.787

Logische voortzettingen waren ondermeer:

1. Bepaling begincondities en baanberekeningen voor propoff wit bij andere luchtsnelheden.
2. Bepaling begincondities en baanberekeningen voor een andere modelstof.

Los hiervan stond nog op het programma:

3. Het scheidingsgedrag van de zifter bij andere breedtes.

Op grond van de nog beschikbare tijd, en de prioriteiten die je wilt aanleggen in je programma, moest een keuze worden gemaakt. De programmapunten 1. en 2. zijn zeer tijdrovend, met name de bepaling van de begincondities.

Uitvoering van één van deze punten zou, gezien de nog beschikbare tijd, zonder meer betekenen dat punt 3. niet meer kon worden uitgevoerd. En dit terwijl het zeer interessant is te weten welke invloed verandering van de breedte van de zifter heeft op de scheidingscherpte en de verblijftijd van het materiaal in de zifter.

Vandaar dat tot een compromis werd besloten:

a. Voor propoff wit worden baanberekeningen gedaan bij ~~xxx~~ andere superficiële luchtsnelheden, zonder voorafgaande bepaling van de begincondities.

b. De scheidingscherpte van de 120° zifter bij andere breedtes wordt bepaald.

Wat punt a. betreft, het laten vallen van de bepaling van de in-treecondities betekent dat we uitgaande van de reeds gemaakte analyses zullen moeten komen tot begincondities voor de baanberekeningen bij andere luchtsnelheden. We doen de volgende aannames:

1. De snelheidsverdeling van de deeltjes blijft ook bij andere luchtsnelheden gelijkvormig, d.w.z.: de verdeling van de deeltjes over de breedte van het kanaal blijft de zelfde, en tevens de vorm van de snelheidsverdelingshologrammen.

2. De 120° zifter:

a. Daaldeeltjes.

Aangezien de daaldeeltjes in de 120° zifter grotendeels langs de wand lijken te glijden, en er van recirculatiestroming geen sprake is, lijkt het aannemelijk om ervan uit te gaan dat de snelheden van de daaldeeltjes nauwelijks beïnvloed zullen worden door veranderingen in de superficiële luchtsnelheid.

We stellen daarom: v_{p0} = onafhankelijk van v_f superficieel.

b. Stijgdeeltjes.

Als we ervanuitgaan dat het ^{deeltje} direct zijn stationaire snelheid bereikt, dan wordt v_p bepaald door de verschilvector $|v_f - w|$ (w : stationaire valsnelheid). Hierbij verwaarlozen we de acceleratie die evenredig is met $a \propto F_D \propto C_D \cdot v_f^2$, dus met het kwadraat van de luchtsnelheid. De werkelijkheid zweeft er tussen in.

Dit leidde tot de keuze: $v_{p0} \propto v_f$, ofwel:

$$\frac{v_{p0}(v_f=x)}{x} = \frac{v_{p0}(v_f=1.56)}{1.56}$$

3. De 90° zifter:

a. Daaldeeltjes.

De daaldeeltjes in de 90° zifter glijden niet langs de wand, en bovendien is er een recirculatiestroming langs de wand.

Deze recirculatiestroming houdt gelijke tred met de superfi-

Dit houdt in dat bij een hogere luchtsnelheid ook de snelheid van de recirculatie groter wordt, en de daaldeeltjes een sterkere 'wind in de rug' ondervinden. Maar omdat we niet weten, hoe groot het effect van die wind in de rug is, worden twee extreme situaties bekeken:

v_{p0} = onafhankelijk v_f superficiëel

$$\frac{v_{p0}(v_f = x)}{x} = \frac{v_{p0}(v_f = 2.0 \text{ m/s})}{2.0}$$

b. Stijgdeeltjes.

Hierbij gaan we evenals bij de 120° zifter ervan uit dat de snelheid van de stijgdeeltjes gelijke tred houdt met de superficiële luchtsnelheid: $\frac{v_{p0}(v_f = x)}{x} = \frac{v_{p0}(v_f = 2.0 \text{ m/s})}{2.0}$

$$x \qquad \qquad \qquad 2.0$$

10.8. De 90° zifter, daaldeeltjes; geknikt profiel; $C_D = 0.75$

10.8.1. v_f superficiëel = 1.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}(v_f = 2.0 \text{ m/s})$

De begincondities waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd staan in tabel 31.

Tabel 31 Intreepositie Fig.nr. v_{p0} (cm/s) baannr. aantal deeltjes in die baan

		52.5	1	1
$y = 1.0 \text{ cm}$		97.5	2	8
(fractie	68	142.5	3	11
$0 < y < 2 \text{ cm}$)		187.5	4	50
		232.5	5	15

Toepassing van het targetcriterium betekent dat alleen van baan 1 (1 deeltje) het onzeker is of het naar boven of naar beneden zal bewegen. Alle overige deeltjes (de banen 2 t/m 5, 84 deeltjes) bewegen naar beneden.

De bij deze superficiële luchtsnelheid behorende daalkans bedraagt: $1 - P_d = 0.75$ voor $v_f = 1.0 \text{ m/s}$ (lit.1, grafiek 7)

Uiteraard betreft het hier nog altijd de modelstof propoff wit. Deze $1 - P_d = 0.75$ is de gemiddelde daalkans voor alle daaldeeltjes, dus hierin moeten ook de fracties met intreepositie $y > 2 \text{ cm}$ betrokken worden. Deze fracties tellen in totaal 65 deeltjes. Dit betekent dat van deze deeltjes, die alle (veel) hoger het snelle kanaal binnentreden, er 37 naar boven moeten bewegen, om aan de gemeten daalkans $1 - P_d = 0.75$ te voldoen.

10.8.2. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = \frac{1}{2}v_{p0}$ ($v_f = 2.0$ m/s)

Begincondities: zie tabel 32.

Tabel 32	Intreepositie	Fig,nr.	v_{p0} (cm/s)	baannr.	aantal deeltjes in de baan
			26.3	1	1
	$y = 1.0$ cm		48.8	2	8
	(fractie	69	71.3	3	11
	$0 < y \leq 2$ cm)		93.8	4	50
			116.3	5	15

Volgens het targetcriterium:

Deeltjes in de banen 4 en 5 bewegen naar beneden (65 deeltjes). Deeltjes in de banen 1 t/m 3 kunnen omhoog of omlaag bewegen (20 deeltjes).

Het aantal deeltjes in hoger inkomende banen bedraagt 65.

Om aan de gemeten daalkans $1 - P_d = 0.75$ te voldoen zouden van de deeltjes in de banen 1 t/m 3 , plus de deeltjes die hoger inkomen, dus in totaal $20 + 65 = 85$ deeltjes, er 38 naar beneden moeten bewegen.

10.8.3. v_f superficieel = 3.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}$ ($v_f = 2.0$ m/s)

Begincondities: zie tabel 31, pagina 69. Banen: figuur 70.

Toepassing targetcriterium:

De deeltjes in de banen 1 en 2 verlaten de knik aan de bovenzijde, van de 76 deeltjes in de andere banen (3 t/m 5) is het onzeker wat ze zullen doen.

We mogen op grond van het beeld van deze banen genoegelijk aannemen dat de 65 deeltjes van de hoger inkomende fracties alle naar boven bewegen.

De gemeten daalkans voor daaldeeltjes bij de superficiële luchtsnelheid $v_f = 3.0$ m/s bedraagt $1 - P_d = 0.08$ (lit. 1, grafiek 7).

Die waarde betekent, dat van de 76 onzekere deeltjes er 12 naar beneden moeten en dus 64 naar boven. Dit lijkt alleszins redelijk, gezien ook het feit dat de banen duidelijk in de bovenste regionen van het target terecht komen.

10.8.4. v_f superficieel = 3.0 m/s; $v_{p0} = \frac{3}{2}v_{p0}$ ($v_f = 2.0$ m/s)

Begincondities: zie tabel 33.

Tabel 33 Intreepositie Fig.nr. v_{p0} (cm/s) baannr. aantal deeltjes

Intreepositie	Fig.nr.	v_{p0} (cm/s)	baannr.	aantal deeltjes
		78.8	1	1
y = 1.0 cm		146.2	2	8
(fractie	71	213.8	3	11
0 < y ≤ 2 cm)		281.3	4	50
		348.7	5	15

Targetcriterium:

Het deeltje in baan 1 gaat omhoog, de 15 deeltjes in baan 5 naar beneden, de overige deeltjes (69) kunnen zowel omhoog als omlaag, De gemeten daalkans bedraagt $1 - P_d = 0.08$, wat betekent dat van het totaal aantal daaldeeltjes (150) er 12 naar beneden moeten .

De 15 deeltjes in baan 5 bewegen in elk geval al naar beneden, maar ook van de banen 2 t/m 4 zal zeker een groot deel naar beneden bewegen. Om nog niet te spreken over de 65 deeltjes van de hoger inkomende fracties, waarvan wellicht ook nog een gedeelte naar beneden zou bewegen.

Op grond hiervan lijkt het, dat het evenredig opschroeven van de intreesnelheden van de daaldeeltjes met de superficiële luchtsnelheid niet zulke goede resultaten geeft.

10.9. De 90° zifter, stijgdeeltjes; $C_D = 0.75$

10.9.1. $v_{f_superficiel} = 1.0$ m/s; $v_{p0} = \frac{1}{2} \cdot v_{p0}$ ($v_f = 2.0$ m/s)

Evenals in het geval van $v_{f_superficiel} = 2.0$ m/s zijn hier alleen voor de extreme snelheden baanberekeningen uitgevoerd, zie tabel 34.

Tabel 34 Fractie/ intree- positie Fig.nr. v_{p0} (cm/s) baannr. aantal deeltjes in de fractie

Fractie/ intree- positie	Fig.nr.	v_{p0} (cm/s)	baannr.	aantal deeltjes in de fractie
0 < d ≤ 2 cm	72	25	2	114
d = 1.0 cm		105	1	
2 < d ≤ 4 cm	72	15	4	57
d = 2.0 cm		95	3	
2 < d ≤ 4 cm	72	15	6	57
d = 3.0 cm		95	5	

Targetcriterium:

De 114 deeltjes van de fractie 0 < d ≤ 2 cm komen terecht in het target, alle andere deeltjes (133) verlaten de knik aan de onderzijde.

De gemeten daalkans voor stijgdeeltjes bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.0$ m/s $1-P_s = 0.90$ (lit.1, grafiek 6). Dit houdt in dat 25 deeltjes de knik aan de bovenzijde moeten verlaten d.w.z., 25 van de 114 'onzekere' deeltjes.

10.9.2. $v_{f\text{superficiëel}} = 3.0$ m/s; $v_{p0} = 3/2 \cdot v_{p0} (v_f = 2.0$ m/s)

Begincondities: zie tabel 35.

<u>Tabel 35</u> Fractie/intree- positie	Fig. nr.	v_{p0} (cm/s)	baannr.	aantal deeltjes in de fractie
$0 < d \leq 2$ cm	73	75	2	114
d = 1.0 cm		315	1	
$2 < d \leq 4$ cm	73	45	3	57
d = 2.0 cm		285	4	
$2 < d \leq 4$ cm	73	45	5	57
d = 3.0 cm		285	6	

Targetcriterium:

Alle deeltjes van de fractie $0 < d \leq 2$ cm verlaten de knik aan de bovenzijde.

Als we kijken naar de fractie $2 < d \leq 4$ cm, zien we nogmaals de belangrijke rol die de intreepositie in het geval van stijgdeeltjes speelt: leggen we de intreepositie centraal (d = 3.0 cm) dan komt de bundel beneden het target terecht, leggen we hem op de uiterste grens (d = 2 cm) dan komt de bundel juist in het target. Deze fractie telt 57 deeltjes.

De 76 deeltjes van de andere fracties (intreepositie $d > 4$ cm) verlaten de knik aan de benedenzijde.

De gemeten ~~xk~~ daalkans voor stijgdeeltjes voor $v_{f\text{superficiëel}} 1-P_s = 0.51$ (lit. 1, grafiek 6), wat betekent dat 136 deeltjes de knik aan de onderzijde verlaten, en 121 deeltjes aan de bovenkant, Als we, zoals dat ook voor de fractie $0 < d \leq 2$ cm gedaan is, de intreepositie van de fractie $2 < d \leq 4$ cm centraal leggen (banen 5 en 6), komen de banen van deze fractie beneden het target te liggen, en verlaten de 57 deeltjes van deze fractie de knik aan de onderzijde.

In dat geval verlaten 114 deeltjes de knik aan de bovenzijde, en $57 + 76 = 133$ deeltjes aan de onderkant. Dit betekent een $1-P_s = 0.54$, welke waarde aardig klopt met de gemeten $1-P_s = 0.51$.

10.10. De 120° zifter, daaldeeltjes; $C_D = 1.04$

10.10.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = v_{p0}$ ($v_f = 1.56$ m/s)

Er zijn alleen berekeningen uitgevoerd voor de fractie die het snelle kanaal binnentreedt op een hoogte $0 < y < 1$ cm (131 van de in totaal 171 daaldeeltjes). Zie tabel 36.

<u>Tabel 36</u>	<u>Intreepositie</u>	<u>Fig.nr.</u>	<u>v_{p0} (cm/s)</u>	<u>baannr.</u>
	$y = 0.5$ cm	74	40	1
			80	2
			120	3

Al deze deeltjes zullen de knik aan de onderzijde verlaten. De gemeten daalkans voor daaldeeltjes $1 - P_d = 0.88$ (lit.1, grafiek 36). Dat wil zeggen dat van de 40 deeltjes die hoger het snelle kanaal binnentreden er een 25tal de knik aan de bovenzijde moeten verlaten. De deeltjes die op een hoogte $y > 3$ cm het snelle kanaal binnenkomen, en die een lage intreesnelheid hebben, zullen dit wel doen. Het betreft hier 19 deeltjes (zie § 9.3,1.), zodat ook in dit geval de baanberekeningen weer een goed beeld geven van het kansgedrag in de zifterknik.

10.10.2. v_f superficieel = 2.2 m/s; $v_{p0} = v_{p0}$ ($v_f = 1.56$ m/s)

Begincondities: zie tabel 36. Banen : figuur 75.

Alle deeltjes van deze fractie ($0 < y < 1$ cm) bewegen naar boven, en de deeltjes van de andere fracties, die nog hoger het snelle kanaal binnenkomen, zullen dit ongetwijfeld ook doen.

Dit betekent een daalkans $1 - P_d$, berekend = 0.0. De gemeten daalkans bij deze superficiële luchtsnelheid van 2.2 m/s bedraagt 0.04 (lit.1, grafiek 36).

10.11. De 120° zifter, stijgendeeltjes; $C_D = 0.787$

10.11.1. v_f superficieel = 1.0 m/s; $v_{p0} = 1/1.56 v_{p0}$ ($v_f = 1.56$ m/s)

Ook hier zijn alleen voor de extreme intreesnelheden de baanberekeningen uitgevoerd. Zie tabel 37.

<u>Tabel 37</u>	<u>Fractie/intree-positie</u>	<u>Fig.nr.</u>	<u>v_{p0} (cm/s)</u>	<u>baannr.</u>	<u>aantal deeltjes in de fractie</u>
	$0 < d < 2$ cm	76	33.7	1	35
	$d = 1.0$ cm		72.1	2	

(vervolg tabel 37)	(v _{p0})	(baannr.)	(aantal deeltjes)
2 < d ≤ 4 cm d = 3.0 cm	fig.nr. 76 27.2 75.3	4 3	33
4 < d ≤ 6 cm d = 4.5 cm	76 17.6	5	35

Van de andere fracties zijn geen banen berekend.

Het blijkt dat alleen van de fractie 0 < d ≤ 2 cm een gedeelte de knik aan de bovenzijde verlaat, en wel de deeltjes met een zodanig lage snelheid dat ze niet dóór het snelle kanaal schieten, zoals de deeltjes in baan 2 bijvoorbeeld doen.

Alle overige deeltjes (135) verlaten de knik aan de onderzijde. De gemeten daalkans voor stijgdeeltjes bij een superficiële luchtsnelheid $v_f = 1.0$ m/s $1 - P_s = 0.94$ (lit. 1, grafiek 35).

Dit zou betekenen dat een tiental deeltjes van de fractie met een intreepositie 0 < d ≤ 2 cm (in totaal 35 deeltjes) een voldoende lage snelheid moeten hebben om in het snelle kanaal meegenomen te worden naar de bovenliggende knik.

10.11.2. v_f superficieel = 2.2 m/s; $v_{p0} = 2.2 / 1.56 v_{p0} (v_f = 1.56 \text{ m/s})$
 Begincondities: zie tabel 38.

Tabel 38 Fractie/intreepo- sitie	Fig.nr.	v _{p0} (cm/s)	baannr.	aantal deeltje in de fractie
0 < d ≤ 2 cm d = 1.0 cm	77	74.0 158.7	1 2	35
2 < d ≤ 4 cm d = 3.0 cm	77	59.9 165.7	3 4	33
4 < d ≤ 6 cm d = 4.5 cm	77	38.8 165.7	5 6	35

De 103 deeltjes van deze fracties verlaten de knik aan de bovenzijde. De gemeten daalkans bedraagt $1 - P_s = 0.29$ (lit. 1, grafiek 35) voor de superficiële luchtsnelheid $v_f = 2.2$ m/s. Om aan deze kans te voldoen zouden van de andere fracties (d > 6 cm) ook nog eens 18 deeltjes omhoog moeten gaan. Met het hier gebruikte luchtstromingsprofiel waarin de luchtsnelheid buiten het snelle kanaal (d > 5 cm) gelijk aan nul is gesteld, is dit geen haalbare kaart.

10.12. Bespreking van de resultaten

De baaberekeningen blijken een goede (indicatieve) beschrijving te geven van het kansengedrag van de modelstof propoff wit (2*2 cm) in de 90° en 120° zifter voor de omstandigheden die vermeld staan in tabel 39.

Tabel 39

zifter	soort deeltje	C _D -waarde	v _f super-ficieel	intreesnelheid	paragraaf
90°	daal-deeltje	0.75	1.0 m/s	onafhankelijk	§ 10.8.1.
			2.0 m/s	van de super-ficiële v _f	§ 10.3.3.
			3.0 m/s	ficiële v _f	§ 10.8.3.
	stijg-deeltje	0.75	1.0 m/s	evenredig	§ 10.9.1.
			2.0 m/s	met de super-ficiële v _f	§ 10.4.3.
			3.0 m/s	ficiële v _f	§ 10.9.2.
120°	daal-deeltje	1.04	1.0 m/s	onafhankelijk	§ 10.10.1.
			1.56 m/s	van de super-ficiële v _f	§ 10.5.1.
			2.2 m/s	ficiële v _f	§ 10.10.2.
	stijg-deeltje	0.787	1.0 m/s	evenredig	§ 10.11.1.
			1.56 m/s	met de super-ficiële v _f	§ 10.6.
			2.2 m/s ¹⁾	ficiële v _f	§ 10.11.2.

1) Iets minder goede beschrijving.

Uit de berekeningen kunnen nog een aantal conclusies getrokken worden:

- Voor de daal/stijgkans van daaldeeltjes is naast de plaats van intree in het snelle kanaal een zeer belangrijke factor de snelheid waarmee de deeltjes het snelle kanaal binnenkomen, zowel bij de 90° als de 120° zifter.
- Bij de stijgdeeltjes geldt voor beide zifters dat de positie van het deeltje in het snelle kanaal een allesoverheersende rol speelt bij de beslissing of het deeltje de knik aan de boven- of aan de onderzijde zal verlaten. De grootte van de intreesnelheid speelt hierbij nauwelijks een rol.
- Wat de aannamen betreft die bij de berekeningen gemaakt zijn:
 - a. daaldeeltjes: $v_{p0} = \text{constant}$ geeft een betere beschrijving van het kansengedrag dan $v_{p0} \propto v_f$, waarvoor in het geval

van de 90° zifter ook berekeningen zijn gedaan.

b. stijgdeeltjes: $v_{p0} \sim v_f$ superficieel geeft een goede (indicatieve) beschrijving van het gedrag van de stijgdeeltjes in de zifterknik.

- Over de verdeling van het aantal deeltjes over de breedte van de zifter valt het volgende te zeggen: ¹⁾

a. daaldeeltjes: zowel bij de 90° als de 120° zifter komt het overgrote deel het snelle kanaal binnen op kleine hoogte boven de zifterknikpunt. Bij de 90° zifter 57 % op een hoogte tussen 0 en 2 cm, bij de 120° zifter 77 % tussen 0 en 1 cm.

b. stijgdeeltjes: in de 90° zifter passeert 69 % van de stijgdeeltjes de punt van de knik op een afstand van 0- 4 cm van de zifterwand. Bij de 120° zifter is het aantal stijgdeeltjes meer geleidelijk verdeeld over de breedte van de zifter:

21 % passeert de punt van de knik op een afstand van 0- 2 cm van de wand.

19 % op een afstand van 2 tot 4 cm.

21 % op een afstand van 4 tot 6 cm, de rest,

39 % op een afstand >6 cm van de wand.

Dat wil zeggen dat het overgrote deel van de stijgdeeltjes in de 90° zifter op een afstand van 0 tot 4 cm van de wand de knikpunt passeert (69 %), in de 120° zifter op een afstand van 0 tot 6 cm (61 %), en dit terwijl de breedte van de 90° zifter groter is dan van de 120° zifter.

Als we de zeepbelopnamen (pag. B1 en B2, bijlagen) en de snelheidsvectorplaatjes (fig. 22, 23 en 24) nog eens voor ogen halen, is dit natuurlijk niet zo verwonderlijk: in de 90° zifter is het snelle kanaal duidelijk smaller dan in de 120° zifter, zodat de stijgdeeltjes in de 90° zifter via een relatief klein gedeelte van de totale zifterbreedte de knikpunt moeten passeren

1) De verdeling van het aantal deeltjes over de breedte van de zifter is bij de verschillende superficiële luchtsnelheden constant gehouden (zie aanname in § 10.7.), en dit blijkt in de berekeningen toch goede resultaten te geven.

De vraag is, in hoeverre de verdeling van het aantal deeltjes over de breedte, en de vorm van de snelheidsverdelingshogrammen, niet beïnvloed worden door veranderingen in de luchtsnelheid. Hiervoor zijn analyses van deeltjesbewegingen bij andere luchtsnelheden vereist.

11. INVLOED VAN DE BREEDTE VAN DE 120° ZIFTER OP SCHEIDINGS- SCHERPTE EN CAPACITEIT

11.1 Inleiding

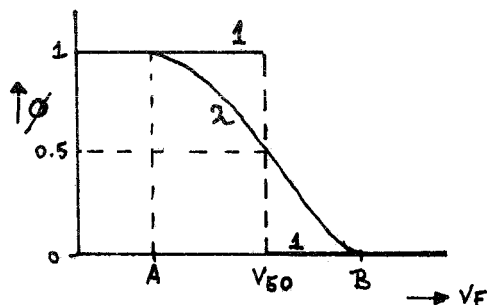
Om te zien wat de invloed van de breedte op scheidingscherpte en capaciteit van de 120° is, is voor een tweetal modelstoffen de scheidingscurve opgemeten bij een breedte die groter en een breedte die kleiner is dan de standaardbreedte met nul procent vrije doorgang. Bij deze twee breedtes is bovendien de gemiddelde verblijftijd opgemeten van de deeltjes die een kans van 50 % hebben om de zifter via de top te verlaten, terwijl ook het luchtstromingsprofiel in de zifterknik werd gevisualiseerd m.b.v. de zeepbeltechniek.

Allereerst iets over de scheidingscurve:

In een 'ideale zifter', waarin het proces beschreven kan worden met uitsluitend deterministische krachten (zwaartekracht, opwaartse kracht en meesleepkracht), zal bij een bepaalde luchtsnelheid het deeltje blijven zweven. Bij een superficiële luchtsnelheid groter dan deze zgn. zweefsnelheid zal het deeltje de zifter aan de top verlaten, bij een snelheid kleiner dan de zweefsnelheid zal het in de bodem terecht komen.

Definiëren we nu $\phi(v_f)$ als de fractie van de aan de zifter toegevoerde identieke deeltjes, die bij een superficiële luchtsnelheid v_f de zifter aan de onderzijde verlaat, dan krijgen we in het geval van een ideale zifter een verloop van $\phi(v_f)$ met de superficiële luchtsnelheid v_f zoals die geschetst is in figuur 78, lijn 1.

Fig. 78 $\phi(v_f)$



1 ideale zifter
2 reële zifter

Of alle deeltjes verlaten de kolom aan de onderkant ($v_f < v_{50}$), zodat $\phi(v_f) = 1$, of alle deeltjes komen in de top terecht ($v_f > v_{50}$), zodat $\phi(v_f) = 0$.

In het geval van een niet-ideale zifter spelen ook stochastische factoren een rol, zoals deeltjes-deeltjesinteractie, interactie van het deeltje met de wand enz.

Er is dan een heel luchtsnelheidstraject AB, waarin een deel van de identieke deeltjes in de top terechtkomt en een deel in de bodem (figuur 78, lijn 2).

De scheidingsscherpte die in de zifter bereikt kan worden, wordt bepaald door de grootte van het traject AB, ofwel door de helling van lijn 2. Een bruikbare manier om de scheidingsscherpte te beschrijven, is de helling van de ϕ -curve bij v_{50} , de superficiële luchtsnelheid waarbij 50 % van de deeltjes de zifter aan de onderzijde verlaat.

11.2. Gebruikte apparatuur en modelstoffen

Breedtes De twee breedtes, afwijkend van de standaardbreedte van 10 cm, waarbij de metingen zijn verricht, bedragen $b = 5.2$ en $b = 15.1$ cm.

Annubar Bij de breedte $b = 5.2$ cm komen we terecht bij luchtdebieten die helemaal onder in de ijkcurve liggen (van de annubar) zoals die gemeten is door Savelsberg (lit. 2). Daarom is voor het gebied van deze lage luchtdebieten een aantal ijkingen verricht (zie bijlagen). De punten blijken op één lijn te liggen met de metingen van Savelsberg. De relatie tussen het annubarsignaal (drukverschil) en het luchtdebiet die op grond van de nieuwe en oude punten gevonden is, luidt:

$$\log Q_f = 0.5331 \cdot \log \Delta P - 2.2467 \quad (21^\circ\text{C}, 1 \text{ atm.}) \quad (\text{vgl. 11.1})$$

Q_f in m^3/s en ΔP in mm H_2O .

Dit wijkt slechts weinig af van de oude relatie:

$$\log Q_f = 0.53131 \cdot \log \Delta P - 2.2396 \quad (21^\circ\text{C} \text{ en } 1 \text{ atm.})$$

Voor de bepaling van het luchtdebiet is bij de verdere experimenten gebruik gemaakt van vgl. 11.1.

Model- Propoff wit papier, 100 g/m^2 , dikte 0.0121 cm.

stoffen Inferno paars papier, 280 g/m^2 , dikte 0.034 cm.

Bij de breedte $b = 5.2$ cm is gebruik gemaakt van 1 bij 1 cm plaatjes, bij de breedte $b = 15.1$ cm werden plaatjes van 2 bij 2 cm gebruikt.

Aan het gebruik van 1 bij 1 cm plaatjes werd bij de smalle breedte de voorkeur gegeven om de verhouding deeltjes-grootte / ziftkanaal niet zo hoog op te laten lopen dat het $P_s - P_d$ model niet meer zou opgaan.

Overigens heeft dit verder geen consequenties: de scheidingscurven voor 1 bij 1 en 2 bij 2 cm plaatjes die gemeten zijn bij de standaardbreedte zijn volledig met elkaar tot dekking te brengen (lit. 1).

Voeding De voedingsplaats was centraal, d.w.z. tussen de knikken 5 en 6. Er werd gebruik gemaakt van de roterende voedingssluis, toerental 60 o.p.m.

Zeepbel-techniek Zie hoofdstuk 3. Gefotografeerd werden de zeepbelbanen in de knikken 5 en 6 van de zifter.

Verwerking annubar-signaal De annubar geeft via de drukopnemer en de meetversterker (zie hoofdstuk 2) een snel fluctuerend signaal. Om dit signaal goed te kunnen middelen werd het over de Probability Analyser gestuurd en op een digitale voltmeter afgelezen. De Probability Analyser bepaalt in de stand 'Enhance' het gemiddelde van het fluctuerende signaal (lit. 10).

11.3. Scheidingscurve en verblijftijd bij $b = 5.2$ cm

Propoff wit, 1×1 cm, zie tabel 40.

<u>Tabel 40</u>	ΔP (mm H_2O)	$\phi(v_f)$	v_f (m/s)	v_f/v_{50}
	15.98	0.000	2.39	1.390
	10.36	0.045	1.89	1.099
	9.77	0.086	1.84	1.070
	9.34	0.180	1.79	1.041
	8.85	0.411	1.74	1.012
	8.69	0.509	1.725	1.003
	8.33	0.705	1.69	0.983
	7.99	0.729	1.65	0.959
	7.28	0.972	1.57	0.913

$\phi(v_f)$ -curve: zie bijlagen, figuur 79.

Uit deze curve is de superficiële luchtsnelheid bepaald waarbij $\phi = 0.5$: $v_{50} = 1.72$ m/s.

M.b.v. deze v_{50} is de superficiële luchtsnelheid dimensieloos gemaakt (4^e kolom tabel 40).

De reden voor dit dimensieloos maken is de volgende: om de scheidingscherpte te vergelijken bij verschillende zifterbreedtes, hanteren we de helling van de $\phi(v_f)$ -curve in het punt $(v_{50}, \phi = 0.50)$. Door hrt dimensieloos maken m.b.v. v_{50} gaan de $\phi(v_f)$ -curven bij de verschillende breedtes, ook al hebben zij een verschillende v_{50} ,

alle door het punt (1, $\phi = 0.50$), zodat de hellingen in dat punt goed te vergelijken zijn.

Voor het meten van de gemiddelde verblijftijd \bar{T} bij $\phi = 0.50$ werd van 100 deeltjes de verblijftijd opgemeten:

$\phi = 0.509$; $\bar{T} = 25.4$ seconde.

$b = 5.2$; inferno paars, 1*1 cm: zie tabel 41.

Tabel 41	$\Delta P(\text{mm H}_2\text{O})$	$\phi(v_f)$	$v_f(\text{m/s})$	v_f/v_{50}
	27.54	0.052	3.19	1.063
	26.23	0.234	3.11	1.037
	25.56	0.315	3.07	1.023
	24.88	0.441	3.02	1.007
	24.77	0.527	3.01	1.003
	23.08	0.721	2.90	0.967
	20.13	0.980	2.70	0.900

$\phi(v_f)$ -curve: zie figuur 80, bijlagen.

De v_{50} die uit deze curve volgt: $v_{50} = 3.00$ m/s. Hiermee zijn de overige luchtsnelheden dimensieloos gemaakt (kolom 4).

De over 100 deeltjes gemiddelde verblijftijd bedraagt:

$\bar{T} = 14.7$ sec., bij $\phi = 0.441$

11.4. Scheidingscurve en verblijftijd bij $b = 15.1$ cm

Propoff wit, 2*2 cm: zie tabel 42.

Tabel 42	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$\phi(v_f)$	$v_f(\text{m/s})$	v_f/v_{50}
	34.99	0.986	1.248	0.838
	41.48	0.887	1.373	0.921
	46.93	0.769	1.460	0.980
	47.45	0.500	1.469	0.986
	52.28	0.430	1.546	1.038
	48.97	0.380	1.493	1.002
	51.45	0.359	1.533	1.029
	56.14	0.151	1.606	1.078
	61.91	0.098	1.692	1.136
	67.14	0.035	1.767	1.186
	61.80	0.020	1.691	1.135

De $\phi(v_f)$ -curve: zie figuur 81 (bijlagen).

De v_{50} , bepaald uit deze curve: $v_{50} = 1.49$ m/s.

De over 50 deeltjes gemiddelde verblijftijd bedraagt:

$$\bar{\tau} = 18.7 \text{ sec.}, \text{ bij } \phi = 0.500$$

$b = 15.1$ cm; inferno paars, 2×2 cm: zie tabel 43.

<u>Tabel 43</u>	ΔP (mm H ₂ O)	$\phi(v_f)$	v_f (m/s)	v_f/v_{50}
	80.7	0.990	1.949	0.812
	91.3	0.923	2.082	0.868
	106.8	0.683	2.263	0.943
	120.9	0.540	2.418	1.008
	121.7	0.496	2.426	1.011
	130.5	0.250	2.518	1.049
	138.9	0.186	2.603	1.085
	150.3	0.068	2.715	1.131

De $\phi(v_f)$ -curve: zie figuur 82 (bijlagen).

De uit deze curve bepaalde v_{50} : $v_{50} = 2.40$ m/s.

De over 100 deeltjes gemiddelde verblijftijd bedraagt:

$$\bar{\tau} = 7.55 \text{ sec.}, \text{ bij } \phi = 0.540$$

11.5. Vastleggen stromingsprofiel m.b.v. zeepbellen

De techniek die werd toegepast is dezelfde zoals die beschreven is in hoofdstuk 3, evenals de soort film en ontwikkel- en fixeermiddelen.

a. Breedte $b = 5.2$ cm; v_f superficieel = 2.80 m/s.

Objectief: 50 mm

Diafragma: 2.8

Sluiterijd: 2 sec.

Foto's: pagina B3, bijlagen.

We zien dat bij deze breedte het punt van aanleg van de stroming (A) bereikt wordt, waardoor het 'dode' gebied niet meer aangesloten is. Dit heeft blijkbaar (§ 11.3.) een scherpere scheidingslijn tot gevolg, en een hogere v_{50} .

b. Breedte $b = 15.1$ cm; v_f superficieel = 1.79 m/s.

Objectief: 50 mm

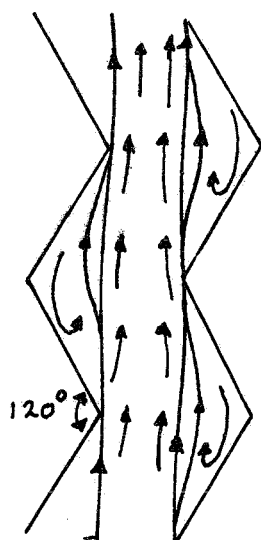
Diafragma: 2.8

Sluiterijd: 4 sec.

Foto's: pagina B3, bijlagen.

Bij deze breedte zien we globaal het volgende beeld (figuur 83, volgende pagina):

Fig. 83



Sommige zeepbellen gaan ongestoord recht omhoog. Ook bij het bekijken van deeltjesbewegingen viel het op dat af en toe deeltjes in één stap 3, 4 knikken naar boven schoten of naar beneden vielen. Het $P_s - P_d$ model, waarbij de eenheidsstap de zifting in één knik is, gaat hier niet meer op.

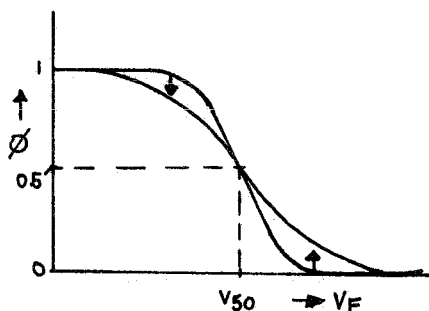
Dit verklaart ook de vorm van de $\phi(v_f)$ -curven bij deze breedte (fig. 81 en 82), nl. de verschuiving van de $\phi(v_f)$ -curven bij superficiële

luchtsnelheden $v_f > v_{50}$ en $v_f < v_{50}$. Immers, voor $v_f > v_{50}$ geldt, dat bij toename van $(v_f - v_{50})$, en dus bij toename van v_f , ook de drijvende kracht die een deeltje in één keer een paar knikken hoger kan doen belanden, toeneemt. M.a.w., de fractie die de bodem bereikt zal in dat geval kleiner zijn $\rightarrow \phi$ neemt af.

Het zelfde geldt voor de andere kant van de curve: voor $v_f < v_{50}$ geldt, dat een lage v_f de kans vergroot dat een deeltje min of meer recht naar beneden valt. Voor lage v_f betekent dit dus een toename van ϕ .

Omdat de ϕ -curve bij lage v_f uiteindelijk de waarde 1, en bij hoge v_f de waarde 0 bereikt, houdt een en ander in dat ook de helling, d.w.z. de afgeleide van ϕ naar v_f verandert. Dit alles is aangegeven in figuur 84.

Fig. 84



11.6. Discussie

Zoals gezegd zijn er twee belangrijke criteria om de doelmatigheid van de zigzagzifter te testen: de scheidingsscherpte en de capaciteit.

Om de scheidingsscherpte van de 120° zifter bij de diverse breedtes

te vergelijken, is in de figuren 85, 86 en 87 (bijlagen) de ϕ als functie van de dimensieloze snelheid uitgezet op waarschijnlijkheidspapier. We zien dat:

1. De zifter met de kleinste breedte het beste scheidt; zowel voor propoff wit (fig. 85) als inferno paars (fig. 87) is de helling bij $\phi = 0.50$ het grootst in het geval dat $b = 5.2$ cm.
2. Voor inferno paars neemt de scheidingscherpte geleidelijk af in de volgorde $b = 5.2, 10.7$ en 15.1 cm. (zie fig. 87)
3. Voor propoff wit is er geen verschil in scheidingscherpte tussen de breedtes $b = 10.7$ en $b = 15.1$ cm. (zie fig. 86)

Wat de capaciteit van de zifter betreft, moeten een aantal aannames gemaakt worden, en wel t.a.v. de rol die de breedte b in deze grootheid speelt. Je kunt je op het standpunt stellen dat de capaciteit van de zifter bepaald wordt door de hoeveelheid materiaal op de glijwand. In dat geval elimineer je min of meer b . Anderzijds kun je stellen, dat de capaciteit afhankelijk is van de hold-up in de zifter, zodat b lineair in de capaciteit zit. De waarheid ligt waarschijnlijk in het midden, maar in de rest van het verhaal gaan we ervan uit dat de capaciteit lineair afhankelijk is van de breedte van de zifter.

Een andere factor, die van grote invloed op de capaciteit van de zifter is, is de gemiddelde verblijftijd van de deeltjes in de zifter bij $\phi = 0.50$.

Als maat voor de capaciteit zou dan de verhouding $b/\bar{\tau}$ genomen kunnen worden.

In tabel 44 zijn de verblijftijden voor propoff wit en inferno paars bij de diverse breedtes vermeld.

Tabel 44

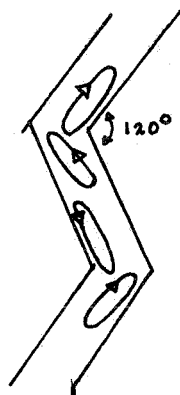
Breedte b	$\bar{\tau}$ propoff wit	$\bar{\tau}$ inferno paars
5.2 cm	25.4 s ($\phi = 0.51$)	14.7 s ($\phi = 0.44$)
10.7 cm	14.2 s ($\phi = 0.46$)	7.0 s ($\phi = 0.8$)
15.1 cm	18.7 s ($\phi = 0.50$)	7.55 s ($\phi = 0.54$)

De gemiddelde verblijftijden bij de breedtes 10.7 en 15.1 cm liggen dicht bij elkaar, en duidelijk beneden de verblijftijden bij $b = 5.2$ cm. Ook anderszins is er weinig verschil tussen het ziftgedrag bij de breedtes 10.7 en 15,1 cm; de v_{50} 's liggen dicht bij elkaar (tabel 45, pagina 84) en ook de scheidingscherpte, met name voor propoff wit, is goed vergelijkbaar.

De grote verblijftijd bij $b = 5.2$ cm wordt veroorzaakt door het grote aantal trekkingen; bij het meten van de verblijftijd viel op dat een

deeltje soms zeer vaak teruggeworpen werd en opnieuw in dezelfde knik aan de zifting werd onderworpen. De deeltjes volgden vele malen de in figuur 88 schematisch weergegeven banen.

Fig. 88



Tabel 45

$b(\text{cm})$	$v_{50} \text{ wit (m/s)}$	$v_{50} \text{ paars (m/s)}$
5.2	1.72	3.00
10.7	1.56	2.58
15.1	1.49	2.40

Als we voor de twee grootste breedtes het gemiddelde nemen van de verblijftijden, dan zien we het volgende verloop van de capaciteit, zoals we die gedefinieerd hebben, met de breedte: zie tabel 46.

<u>Tabel 46</u>	$b(\text{cm})$	$\bar{t}_{\text{wit}}(\text{s})$	$\bar{t}_{\text{paars}}(\text{s})$	'capaciteit' wit (b/\bar{t})	'capaciteit' paars (b/\bar{t})
	5.2	25.4	14.7	0.20	0.35
	10.7	16.5	7.3	0.65	1.47
	15.1	16.5	7.3	0.92	2.07

Het blijkt dus dat verkleining van de breedte tot 5.2 cm een on-evenredig groot verlies van 'capaciteit' tot gevolg heeft. Bovendien zal bij hogere beladingen om praktische redenen (verstoppingen) afgezien worden van al te kleine breedtes.

Als bovendien de capaciteit veel minder dan lineair afhankelijk is van de breedte, valt ook de veel grotere breedte af, omdat hiervoor dan te veel lucht nodig is.

Al met al lijkt daarom de standaardbreedte ($b=10.7$ cm) de optimale breedte te zijn voor de 120° zifter.

LITERATUURLIJST

1. H. Jacobs Het scheidingsgedrag van de 90° zigzagzifter
Afstudeerverslag THE, FT (aug. '77)
2. A. Savelsberg Onderzoek naar een stochastische beschrijving
voor het ziftproces
Afstudeerverslag THE, FT (dec. '76)
3. K. Rietema Fysische transport en overdrachts verschijnse-
len, deel B, collegedictaat THE
4. T.S.I. , Model 1125 or 1125A Calibrator instruction Manual
5. Honeywell, Instruction Manual, Model SAI-42A, Correlation and
Probability Analyser (1972)
6. M. Mostert De zigzagzifter, een multistage scheidings-
apparaat voor vaste stofdeeltjes
Afstudeerverslag THE, FT (feb. '75)
7. G. Vossers Fysische transportverschijnselen, college-
dictaat THE
8. M. Tels et al. Bijzondere Onderwerpen: verwerking vaste
afvalstoffen, collegedictaat THE
9. v. Nistelrooy Klassifikatie van vaste stofmengsels in een
zigzagzifter
Afstudeerverslag THE, FT (maa. '76)
10. zie 5.
11. K. Rietema Fysische transport en overdrachts verschijnse-
len, deel A, collegedictaat THE
12. T.S.I. General System Information for 1050 Series Anemometry

SYMBOLENLIJST

Symbol	Omschrijving	S.I. eenheid (tenzij anders vermeld)
A_{\perp}	Grootste deeltjesoppervlak loodrecht stroming	m^2
C_D	Meesleepcoëfficiënt	-
d	Dikte papieren plaatje	m
	Diameter sensor	m
	Diameter van de pijp, ijking	m
	Afstand tot de zifterwand, stijgdeeltjes	m
E	Anemometerspanning	V
E_{lin}	Gelineariseerde anemometerspanning	V
ΔE_{tot}	Totale spanningsbereik van alle bin's v.d. correlator	V
ΔE_{bin}	Spanningsinterval van een bin	V
E_i	Middenspanning van een bin	V
F_z	Zwaartekracht	N
F_d	Meesleepkracht	N
F_{op}	Opwaartse kracht	N
F_N	Normaalkracht	N
F_w	Wrijvingskracht	N
g	Versnelling van de zwaartekracht	m^2/s
i	Binnummer van de correlator	-
L	Zijde van papieren plaatje	m
m	massa deeltje	kg
N	Totaal aantal bin's van de correlator	-
$n(i)$	Functiespanning van een bin	V
$n(v_{p0})$	Aantal deeltjes met snelheid v_{p0} = $N(VPO)$	-
Nu	Getal van Nusselt	-
P_s	Stijgkans van een stijgdeeltje	-
P_d	Stijgkans van een daaldeeltje	-
ΔP	Drukverschil over de annubar	mm H_2O
ΔP	Drukverschil over de T.S.I.-ijkkamer	mm H_2O
Pr	Getal van Prandtl	-
Q_f	Luchtdebiet door de zifter	m^3/s
Re	Getal van Reynolds	-
s	Verplaatsing van een deeltje	m
t	Tijd(stip)	s
T_s	Temperatuur sensor	$^{\circ}C$
T_o	Temperatuur van de lucht	$^{\circ}C$
TV	Turbulentievariantiecoëfficiënt	-
RG	Richtingsgevoeligheid coëfficiënt	-

v_f (=VF)	Luchtsnelheid	m/s
	N.B. Waar nog andere indices zijn toegevoegd: zie definitie ter plaatse	
v_{50}	Superficiële luchtsnelheid waarbij de scheiding = 0.50	m/s
v_p	Snelheid van een deeltje	m/s
v_{p0} (=VPO)	Intreesnelheid van een deeltje in de knik	m/s
v_z	Luchtsnelheid in richting z	m/s
\bar{v}_z	Gemiddelde luchtsnelheid in richting z	m/s
v_z'	Fluctuatie t.o.v. het gemiddelde	m/s
v_{gem}	Gemiddelde locale luchtsnelheid	m/s
V	Volume van een deeltje	m ³
w	Valsnelheid van een deeltje in stilstaande lucht	m/s
x	Bepaalde afstand, zie definities ter plaatse	m
x' (=X ¹)	Afstand tot de linkerwand van de zifter	m
y	Afstand verticaal tot knik 6	m
ϕ	Scheidingscurve van de zifter	-
	Bepaalde hoek, zie definitie ter plaatse	o
α	Warmteoverdrachtscoëfficiënt	J/m ² , °C
β	Bepaalde hoek, zie definitie ter plaatse	o
δ	" " " " " "	o
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt van de sensor	J/m, °C
μ	Dynamische viscositeit	kg/m, s
ρ_l	Dichtheid lucht	kg/m ³
ρ_p	Dichtheid deeltje	kg/m ³
θ	Hoek van de sensor	o
θ_{max}	Hoek van de sensor waarbij de anemometerspanning maximaal is	o

INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN

Pagina	Omschrijving
A 1-A10	IJking hotfilmanemometer
A11-A31	Resultaten snelheidsmetingen
A11-A13	Tabel 5 (120° zifter, v_f superficieel= 1.99 m/s)
A13-A16	Tabel 6 (90° zifter, v_f superficieel= 1.645 m/s)
A16	Tabel 7 (" " " = 3.17 m/s)
A17-A31	Grafieken 7 t/m 36
A32-A34	Resultaten bepaling beginvoorwaarden
A32	Tabellen 11 t/m 15 (daalstroom 90° zifter)
A32-A33	Tabellen 16 t/m 18 (stijgstroom 90° zifter)
A33	Tabellen 19 t/m 22 (daalstroom 120° zifter)
A33-A34	Tabellen 23 t/m 26 (stijgstroom 120° zifter)
A35-A38	Berekening stromingsprofielen
A35-A36	90° zifter, geknikt profiel
A36-A37	90° zifter, rond profiel
A37-A38	120° zifter
A39-A40	IJking annubar 120° zifter
A41-A75	Figuren, waarnaar vanuit het verslag verwezen wordt.
A41	Fig. 8, camera-opstelling
A42	Fig. 9, belichting 90° zifter
A43	Fig. 10, belichting 120° zifter
A44	Fig. 11, persluchtkoeling
A45	Fig. 31, RG en TV, 90° zifter, geknikt profiel
A46	Fig. 34, RG en TV, 90° zifter, rond profiel
A47	Fig. 37B, RG en TV, 120° zifter
A48	Fig. 55, target in de 90° zifter
A49-A70	Fig. 56 t/m 77, de baanberekeningen
A71	Fig. 79, $\phi(v_f)$ propoff wit, $b= 5.2$ cm
	Fig. 80, $\phi(v_f)$ inferno paars, $b= 5.2$ cm
A72	Fig. 81, $\phi(v_f)$ propoff wit, $b= 15.1$ cm
	Fig. 82, $\phi(v_f)$ inferno paars, $b= 15.1$ cm
A73	Fig. 85, ϕ -vergelijking propoff wit
A74	Fig. 86, ϕ -vergelijking propoff wit
A75	Fig. 87, ϕ -vergelijking inferno paars
B1-B4	Foto's
B1	90° zifter, zeepbelopnamen, standaardbreedte
B2	120° zifter, zeepbelopnamen, standaardbreedte
B3	120° zifter, zeepbelopnamen, $b= 5.2$ en $b= 15.1$ cm
B4	90° zifter, draadjesopnamen

IJking hotfilm-anemometer

1. Laminaire pijpstroming. Zie figuur A1

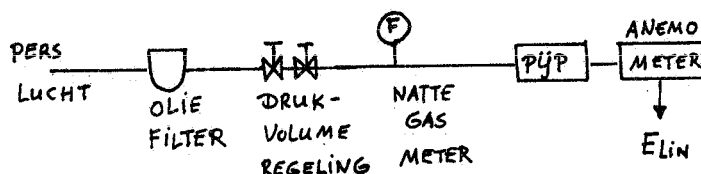
Fig. A1

De sensor wordt geplaatst in het verlengde van de as van de pijp, in een vlak loodrecht op het uiteinde van de pijp. Dit laatste is te bereiken door de probe om zijn as te roteren totdat de anemometerspanning maximaal is, bij een constant luchtdebiet door de pijp.

In het geval van laminaire stroming bestaat er een eenvoudige relatie tussen de snelheid in het centrum van de pijp, v_{\max} , en de gemiddelde luchtsnelheid \bar{v} : $v_{\max} = 2\bar{v}$ (lit. 11).

Door in het gebied van de laminaire stroming ($Re < 2500$) voor een aantal luchtdebieten de gemiddelde gelineariseerde anemometerspanning te noteren, wordt een verband gekregen tussen deze E_{lin} en de maximale snelheid in de pijp. Uit het debiet door de pijp, gemeten m.b.v. een natte gasmeter, en de doorsnee van de pijp, weet je de \bar{v} en dus de v_{\max} .

In figuur A2 is de meetopstelling schematisch weergegeven.

Fig. A2

Gegevens: lengte pijp: 1.10 m

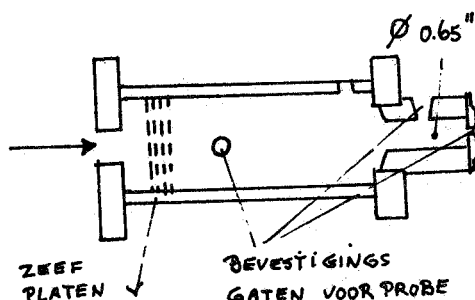
diameter: 0.785 cm

Natte gasmeter: Meetfabriek Dordrecht
type no. 5
max. cap. 3000 l/hr
5 1/omwenteling

$Re < 2500$ komt overeen met $\bar{v} < 4.5$ m/s, dus $v_{max} < 9$ m/s.

2. De T.S.I.-ijkkamer. Zie figuur A3.

Fig. A3 De T.S.I.-ijkkamer



De meetkamer is een cilindrische ruimte waarin de lucht axiaal doorstroomt. Een aantal zeefplaten zorgt voor een ééndimensionaal, turbulentievrij vlak stromingsprofiel. De sensor wordt via een van de bevestigingsgaten in de ijkkamer gebracht, en geïnstalleerd in de as van de cilinder, uiteraard weer loodrecht op het vlakke stromingsprofiel. De ijkkamer die gebruikt is heeft een diameter van 65" en is geschikt voor snelheden van 0.3 tot 18 m/s met een nauwkeurigheid van 1-2 %. De luchtsnelheid wordt bepaald aan de hand van het drukverschil tussen de meetkamer en de atmosfeer; hiervoor zijn ΔP - v_{kamer} grafieken beschikbaar (lit.12). De lucht die de T.S.I.-ijkkamer binnenkomt is afkomstig van een persluchtleiding, en passeert, alvorens in de ijkkamer te arriveren, eerst een druk/volume-regeling en een thermostaat. Het drukverschil over de meetkamer werd gemeten m.b.v. de HBM-inductieve ΔP -meter (zie hoofdstuk 2).

Resultaten van de ijkings:
zie pagina's A3 t/m A10

3. Resultaten ijkingen

Grafiek- Tabelnr. nr.	T.S.I.- probe	T.S.I. temp. corrector	Expno.	Spannings- bereik	$V = f(E_{lin})$
1	1 A,B,C	1210-B588	B 935	t/m 1023	$E \leq 1.8 \text{ V}$ $V=1.0384 \times E + 0.052$
2	1 A,B,C	"	"	"	$E > 1.8 \text{ V}$ $V=1.2138 \times E - 0.260$
3	2	1210-C225	B 937 1)	1024-1047	alle E $V=0.538 \times E - 0.475$
4	3 2)	"	"	1048-1634	alle E $V=1.039 \times E - 0.225$
5	4 2)	"	"	1635-1712	$E < 1.3 \text{ V}$ $V=1.0219 \times E + 0.071$
6	4	"	"	"	$E \geq 1.3 \text{ V}$ $V=1.457 \times E - 0.494$

- 1) Vervanging defecte probe
- 2) Vergroting van het "span" (lager voltage bij gelijke snelheid) om "overflow" bij een probability analyser te voorkomen.

De resultaten van de laminaire pijp-ijking en de ijking m.b.v. de T.S.I. ijk-kamer komen zeer goed overeen (grafieken 1 en 2).

De gebruikte T.S.I. ijkkamer: model 1125.

Tabel 1 IJking

1 A. Laminaire pijpstroming (16-8-'77)

E_{lin} (Volt)	$V(M/S)$	E_{lin} (Volt)	$V(M/S)$	E_{lin} (Volt)	$V(M/S)$
0.127	0.207	2.029	2.234	5.344	6.333
0.308	0.424	2.441	2.689	5.918	7.076
0.553	0.630	2.861	3.230		
0.745	0.821	3.369	3.823		
1.020	1.133	3.833	4.351		
1.323	1.432	4.344	4.989		
1.686	1.852	4.849	5.721		

Zie grafieken 1 en 2.

TABEL 1 B

T.S.I. ijkkamer (18-8-'77)

E_{lin} (Volt)	V(M/S)
0.346	0.442
0.599	0.677
0.840	0.909
1.117	1.190
1.422	1.495
1.717	2.013
2.018	2.184
2.160	2.364
2.431	2.653
2.714	2.989
3.122	3.447
3.518	3.935
4.026	4.575
4.506	5.124
5.055	5.795
5.443	6.283

Zie grafieken 1 en 2.

TABEL 1 C

T.S.I. ijkkamer (7-9-'77)

E_{lin} (Volt)	V(M/S)
0.319	0.439
0.521	0.589
0.750	0.799
1.005	1.070
1.214	1.275
1.413	1.46
1.638	1.77
1.922	2.09
2.235	2.32
2.511	2.78
2.908	3.23
3.260	3.60
3.609	4.09
3.953	4.51
4.304	4.94
4.654	5.40
5.009	5.80
5.349	6.25
5.618	6.65

Zie grafieken 1 en 2.

TABEL 2

T.S.I. ijkkamer
(7-11-'77)

E_{lin} (Volt)	V(M/S)
2.058	0.732
2.606	0.930
2.853	1.067
3.335	1.311
3.690	1.478
3.965	1.646
4.216	1.768
4.767	2.103
5.194	2.301
5.668	2.576
6.135	2.835
6.612	3.078
6.989	3.231
7.353	3.505
7.840	3.749
8.508	4.084
9.427	4.511
9.979	4.816
10.400	5.029
11.006	5.395
11.355	5.578
11.617	5.730
11.954	5.974
12.474	6.340
12.874	6.645

Zie grafiek 3.

TABEL 3

T.S.I. ijkkamer
(8-11-'77)

E_{lin} (Volt)	V(M/S)
0.634	0.570
1.030	0.875
1.210	1.064
1.426	1.269
1.668	1.495
1.911	1.769
2.152	1.998
2.412	2.257
2.648	2.532
2.888	2.78
3.152	3.02
3.404	3.26
3.649	3.57
3.912	3.81
4.158	4.09
4.419	4.36
4.658	4.64
4.927	4.94
5.146	5.12
5.405	5.40
5.647	5.64
5.907	5.92
6.152	6.19
6.442	6.47

Zie grafiek 4.

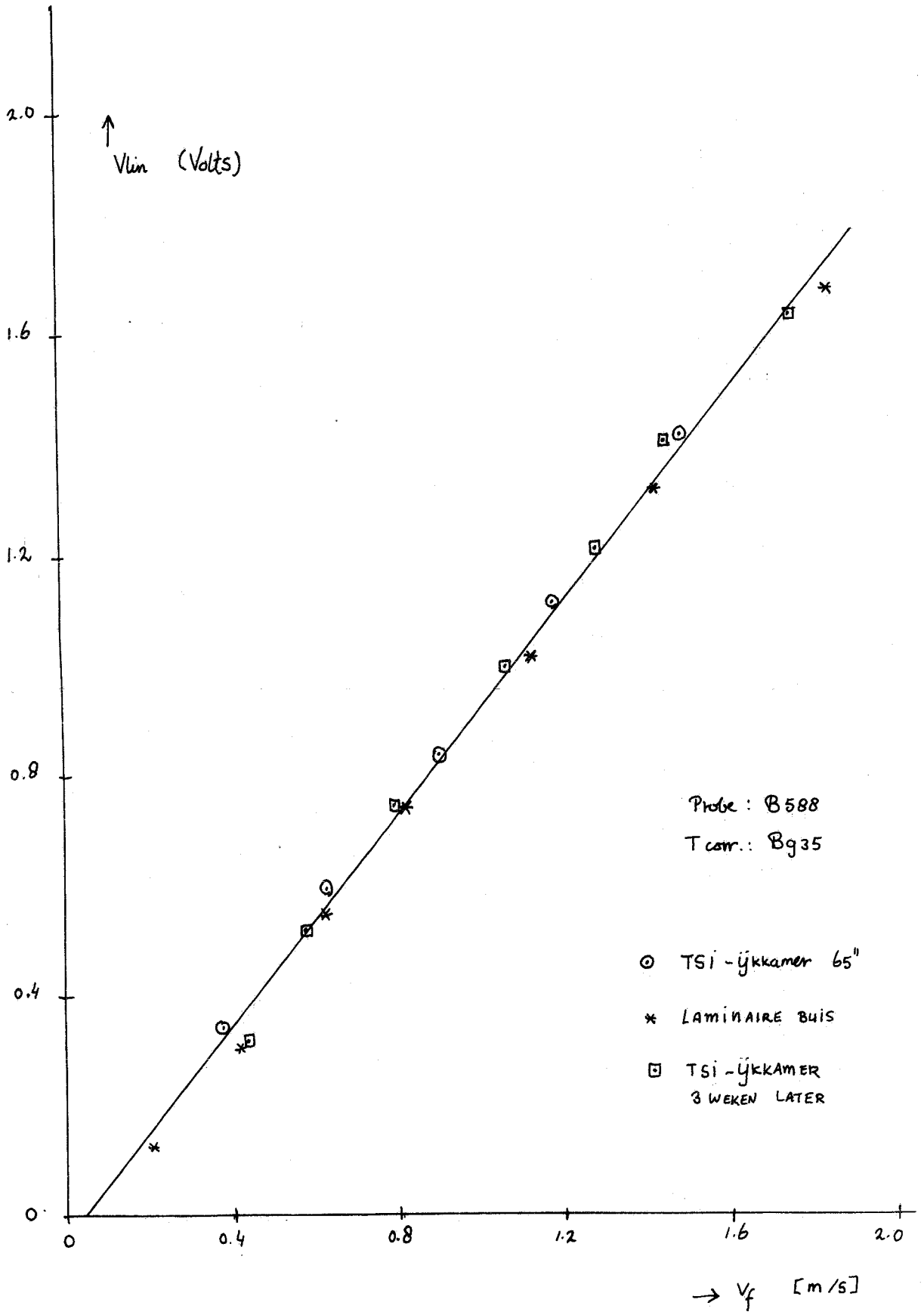
TABEL 4

T.S.I. ijkkamer
(16-1-'78)

E_{lin} (Volt)	V(M/S)
0.291	0.357
0.535	0.579
0.835	0.878
1.145	1.265
1.426	1.622
1.724	2.012
2.051	2.438
2.336	2.850
2.626	3.292
2.927	3.749
3.222	4.084
3.530	4.633
3.827	5.090
4.112	5.486
4.420	5.944
4.735	6.492

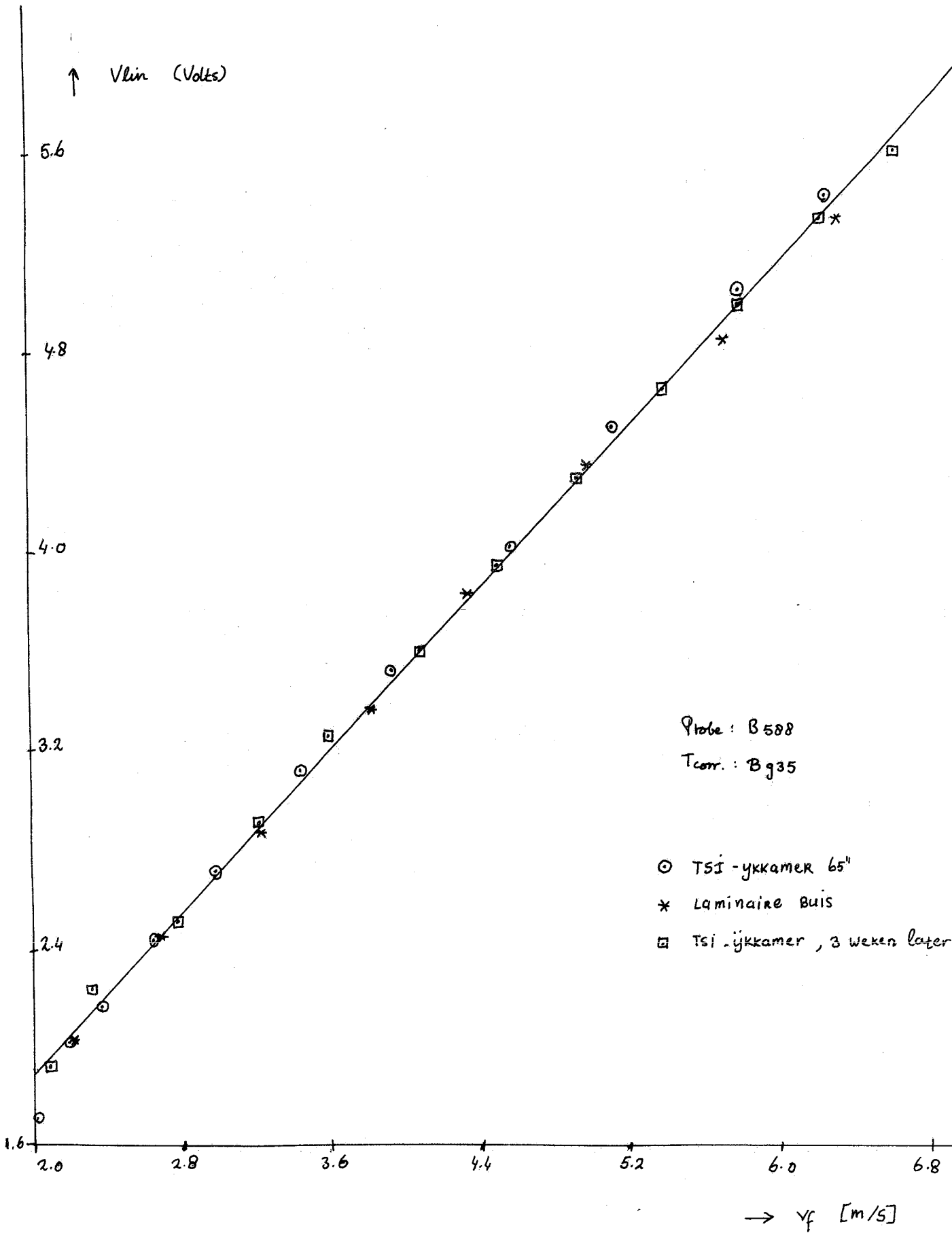
Zie grafieken 5 en 6

Grafiek 1 (zie tabel 1 A, B, C)



Grafiek 2 (zie tabel 1A,B,C)

-A7-

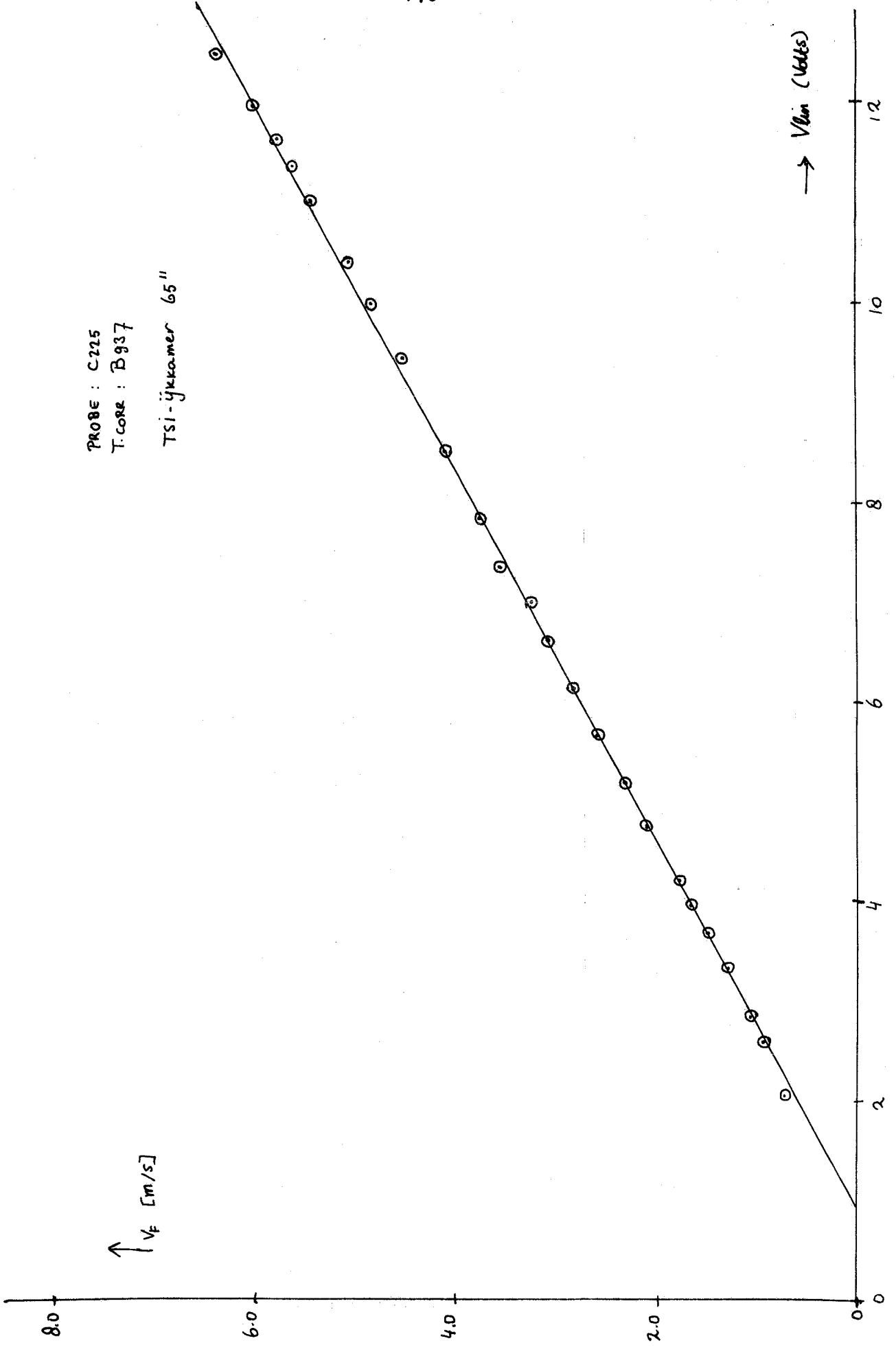


7-11-77

-A8-

PROBE : C225
T.CORE : B937
TSI-gjukkamer 65"

Grafikk 3 (se tabell 2)



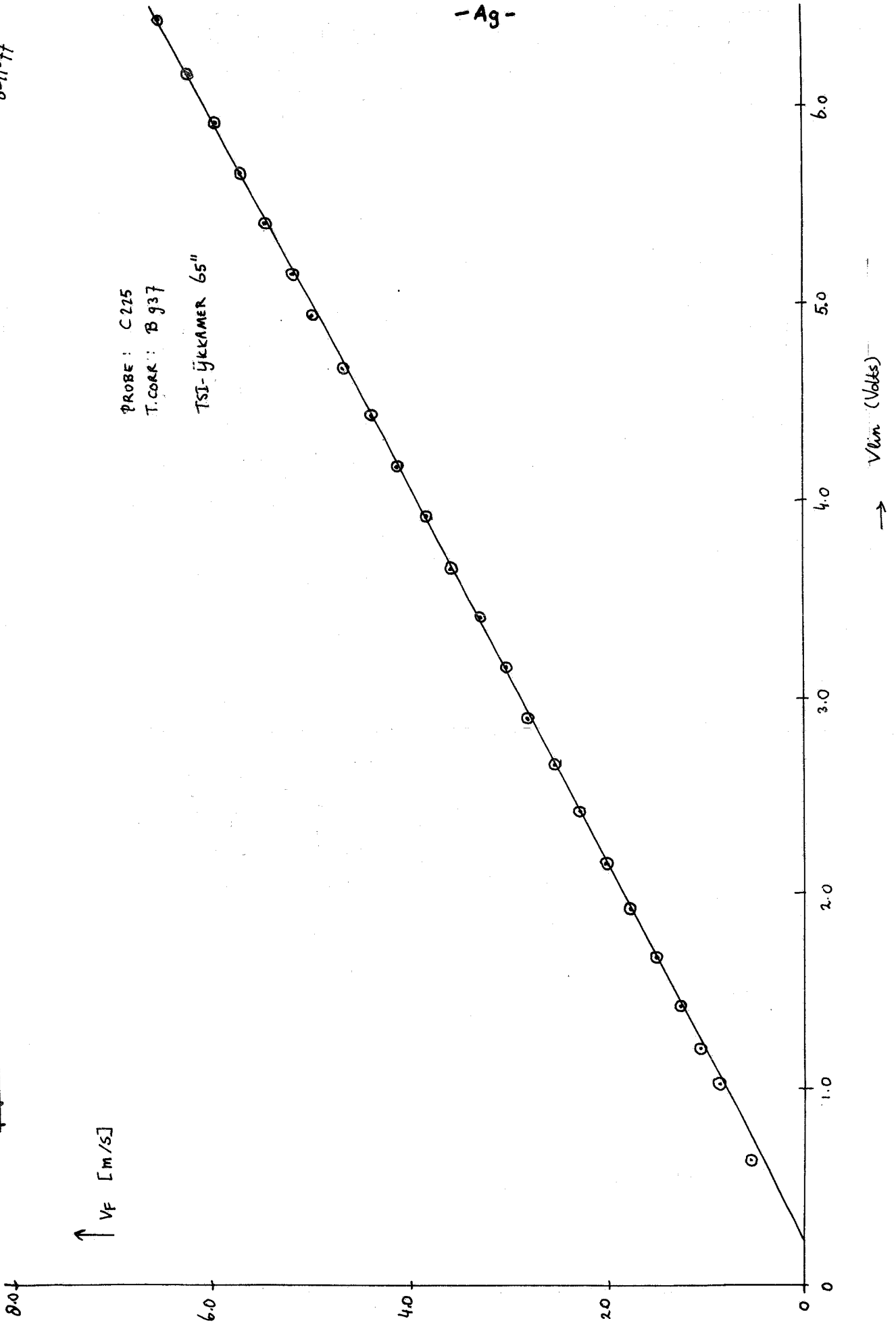
Grafik 4 (sua tabel 3)

8-11-77

PROBE : C225
T.CORR : B937

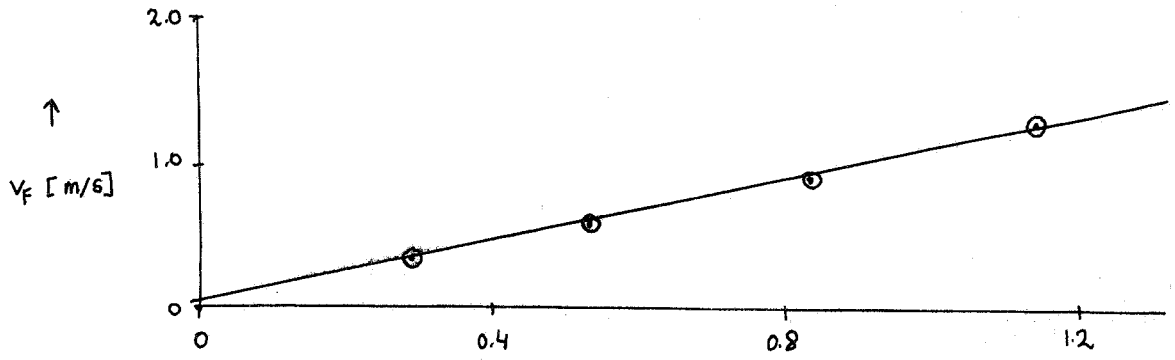
TSI-IKKAMER 65"

-Ag-



Grafik 5 (siehe tabel 4)

-A10-



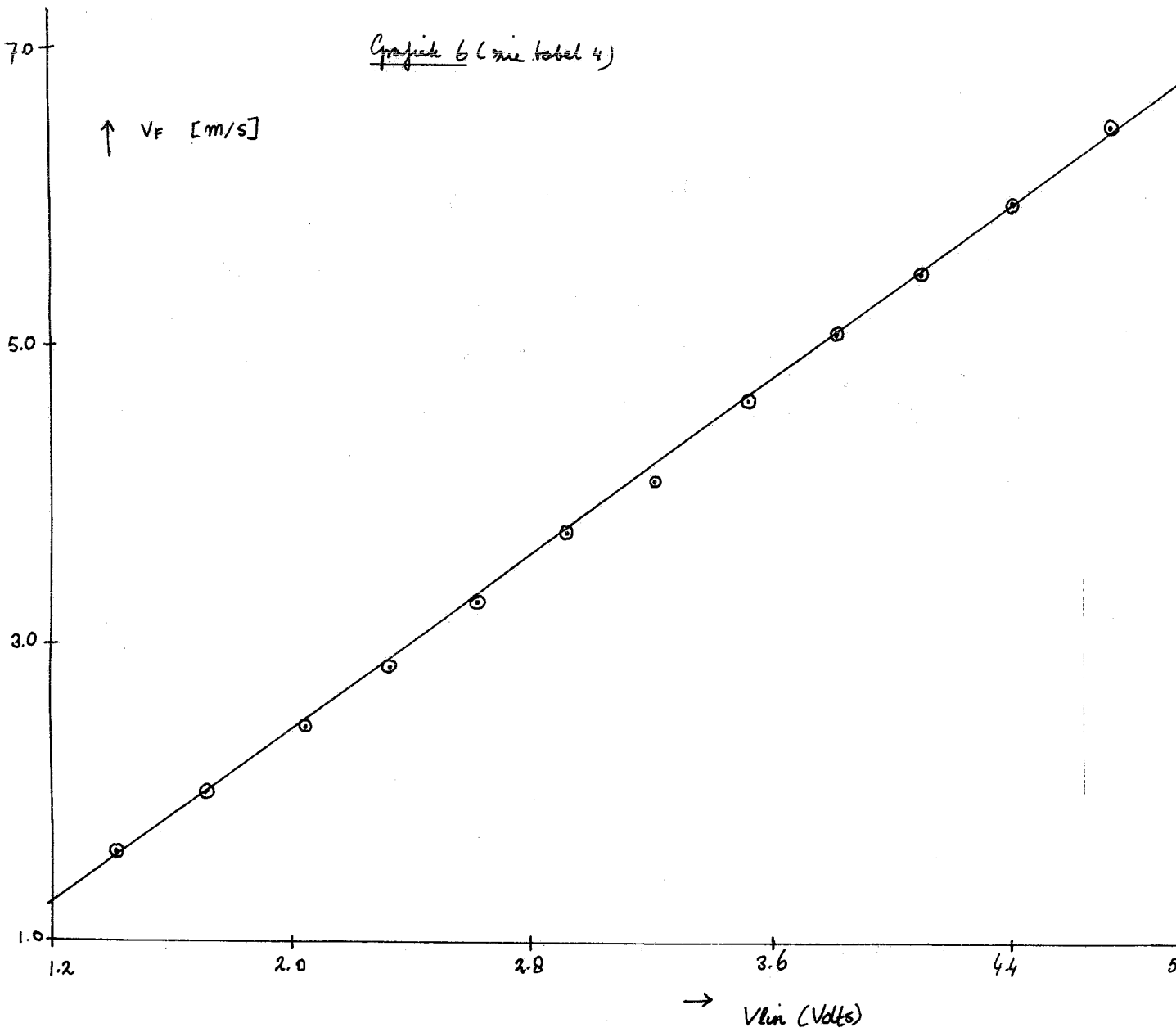
PROBE: C225

T. CORR: B937

T-SI- ÜKKAMER 65⁰

→ V_{lin} (Volts)

Grafik 6 (siehe tabel 4)



→ V_{lin} (Volts)

Resultaten snelheidsmetingen

1. De 120° zifter, standaardbreedte.

De superficiële snelheid: VF= 1.99 m/s. Zie tabel 5.



TABEL 5

y = 7.3 cm

x^1 (cm)	expno	gra- fiek- nr.	$\theta_{max} (^{\circ})$	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.4	J		150	1.4	1.0	0.66	0.286	0.4
3.4	J		150	2.8	1.45	0.92	0.482	0.3
5.4	710- 722	7	150	3.6	1.4	0.65	0.611	0.1
7.4	J		160	3.15	1.45	0.58	0.540	0.1
10.1	J		150	2.8	1.25	0.54	0.554	0.1

y = 5.3 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr.	$\theta_{max} (^{\circ})$	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.3		8	150	1.45	0.90	0.61	0.379	0.4
2.0	492-	8	150	1.7	1.15	0.87	0.324	0.5
4.0	569	8	165	3.5	1.4	0.77	0.600	0.2
6.0		8	165	3.1	1.35	0.71	0.565	0.2
8.0		8	165	2.55	1.25	0.59	0.510	0.2
10.2		8	150	2.05	1.05	0.64	0.488	0.3

y = 3.3 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr.	$\theta_{max} (^{\circ})$	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.5	J		150	1.45	0.95	0.64	0.345	0.4
1.8	723- 735	9	150	2.1	1.2	1.08	0.429	0.5
3.0	570-	9	0	3.7	1.45	0.76	0.608	0.2
5.0	J 582		0	3.2	1.4	0.65	0.563	0.2
7.0	583- 595	9	0	2.3	1.2	0.65	0.478	0.2
10.1	J		150	1.7	1.05	0.65	0.382	0.3

y = 1.3 cm

x^1 (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ_{max} (°)	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.2	J		150	1.0	0.8	0.50	0.200	0.5
1.5	736- 748	10	0	4.0	1.45	0.70	0.638	0.1
3.0	596- 607	10	0	3.3	1.5	0.61	0.545	0.1
5.3	J		0	2.5	1.3	0.74	0.480	0.2
7.0	620- 632	10	15	2.0	1.1	0.70	0.450	0.3
10.0	J		170	1.1	0.95	0.59	0.136	0.5

y = -0.7 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{max} (°)	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.6	J		20	4.05	1.5	0.63	0.630	0.1
2.3	453- 465	11	20	3.4	1.4	0.67	0.588	0.1
3.6	J		20	3.05	1.35	0.68	0.557	0.2
5.5	466- 473	11	30	2.35	1.2	0.74	0.489	0.2
7.6	479- 491	11	30	1.7	1.05	0.73	0.382	0.4
10.0	J		20	1.05	0.8	0.56	0.238	0.5

y = -2.7 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{max} (°)	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.3	390- 400	12	30	3.4	1.25	0.73	0.632	0.2
2.0	608- 619	12	30	3.4	1.3	0.65	0.618	0.1
4.0		12	30	3.0	1.3	0.76	0.567	0.2
6.0	401-	12	35	2.45	1.25	0.82	0.490	0.2
8.0	452	12	40	1.7	1.1	0.71	0.353	0.2
9.9		12	40	1.2	0.85	0.58	0.292	0.2

y = -4.7 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{max} (°)	$v_{gem,max}$ (m/s)	$v_{gem,min}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.7	J		30	3.2	1.5	0.74	0.531	0.1
3.4	J		30	3.4	1.5	0.67	0.559	0.1
5.9	J		30	2.9	1.4	0.83	0.517	0.1
8.4	J		30	1.9	1.2	0.79	0.368	0.1
10.4	J		30	1.4	0.9	0.66	0.357	0.1

$y = -6.7$ cm

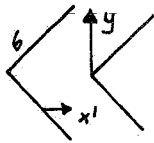
x^1 (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.4		13	30	2.5	1.3	1.07	0.480	0.4
2.0		13	30	3.35	1.2	0.59	0.642	0.1
4.0	633-	13	30	3.30	1.45	0.67	0.561	0.2
6.0	709	13	40	3.0	1.4	0.83	0.533	0.2
8.0		13	45	2.05	1.2	0.89	0.415	0.4
10.1		13	40	1.3	0.9	0.61	0.444	0.4

$y = -8.7$ cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.8		14	50	3.1	1.65	0.48	0.468	0.1
4.2	316-	14	30	3.5	1.6	0.60	0.543	0.1
7.2	367	14	40	2.95	1.5	0.87	0.492	0.2
10.7		14	30	1.55	1.15	0.65	0.258	0.4

2. De 90° zifter, standaardbreedte.

De superficiële luchtsnelheid: $VF = 1.645$ m/s. Zie tabel 6.



TABEL 6

$y = 8.0$ cm

x^1 (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	TV
0.3		15	30	3.25	2.45	1.26	0.246	0.3
2.0		15	15	4.4	2.45	1.49	0.443	0.3
4.0	749-	15	20	5.45	2.45	1.46	0.550	0.2
6.0	839	15	35	4.0	2.2	1.59	0.450	0.3
8.7		16	60	2.1	1.75	1.09	0.167	0.5
11.4		16	60	2.2	1.45	0.96	0.341	0.4
13.9		16	45	2.6	1.25	0.97	0.519	0.3

y = 6.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	T
0.3		17	geen	2.35	2.35	1.2	0.000	0.
2.0		17	165	2.9	2.05	1.27	0.293	0.
4.5	846-	17	0	5.2	2.3	1.64	0.558	0.
7.0	930	18	15	4.0	2.2	1.74	0.450	0.
9.5		18	80	2.0	1.55	1.03	0.225	0.
12.0		18	55	2.15	1.35	0.94	0.372	0.
13.9		18	45	2.4	1.2	0.93	0.500	0.

y = 4.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gr.nr	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	T
0.3		19	50	2.75	2.0	1.24	0.273	0.
2.2		19	125	2.25	1.8	1.13	0.200	0.
4.5	931-	19	155	3.25	2.0	1.47	0.385	0.
7.0	1021	19	165	5.75	2.4	1.74	0.583	0.
9.5		20	0-15	2.65	1.95	1.64	0.264	0.
12.0		20	60	1.9	1.15	0.88	0.395	0.
14.0		20	45	2.1	1.0	0.94	0.524	0.

y = 2.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gr.nr	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	T
0.8		21	40	2.5	1.6	1.08	0.360	0.
2.5		21	geen	1.8	1.75	2.00	0.028	1.
4.8	1022-	21	145	2.2	1.75	1.50	0.205	0.
7.2	1112	21	150	3.6	2.15	1.58	0.403	0.
9.6		22	150	6.3	2.4	1.70	0.619	0.
12.0		22	geen	1.6	1.3	1.00	0.188	0.
13.9		22	45	1.35	0.75	0.73	0.444	0.

y = 0.0 cm

x^1 (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	
2.6		23	155	1.85	1.45	0.86	0.216	0.4
4.6		23	geen	1.6	1.45	1.80	0.094	1.
7.0	1113-	23	130	1.95	1.4	1.07	0.282	0.
9.4	1190	23	145	3.05	2.05	1.50	0.328	0.
11.8		24	150	5.75	2.35	1.48	0.591	0.
13.9		24	145	7.9	2.45	1.25	0.690	0.

y = -2.0 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	
0.5		25	135	2.5	1.15	0.87	0.540	0.
3.0		25	135	1.8	1.3	0.80	0.278	0.
5.1	1191-	25	120	1.9	1.5	1.00	0.211	0.
7.4	1267	25	125	2.7	1.9	1.34	0.296	0.
9.8		26	140	5.1	2.25	1.41	0.559	0.
12.3		26	140-145	6.65	2.45	1.30	0.632	0.

y = -4.0 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	
0.5		27	135	2.5	1.05	0.89	0.580	0.
2.6		27	135	2.0	1.25	0.87	0.375	0.
4.8	1269-	27	105	1.85	1.4	0.95	0.243	0.
7.0	1359	27	130	2.6	1.85	1.33	0.288	0.
9.2		28	140	4.6	2.25	1.41	0.511	0.
11.3		28	145	6.0	2.4	1.41	0.600	0.
13.3		28	135	5.85	2.45	1.21	0.581	0.

y = -6.0 cm

x^1 (cm)	expno	gr.nr	θ_{\max} (°)	$v_{\text{gem.max}}$ (m/s)	$v_{\text{gem.min}}$ (m/s)	RMS v^1 (m/s)	RG	
0.5		29	135	2.2	0.95	0.85	0.568	0.
2.6		29	125	1.95	1.15	0.86	0.410	0.
5.0	1360-	29	105	1.75	1.3	0.88	0.257	0.
7.2	1450	29	135	2.55	1.8	1.33	0.294	0.
9.2		30	145	4.55	2.1	1.37	0.538	0.
11.4		30	150	5.2	2.3	1.31	0.588	0.
13.6		30	140	4.05	2.35	1.10	0.420	0.

y = -8.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gra- fiek- nr.	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	TV
0.5		31	135	2.1	0.9	0.86	0.571	0.4
2.6		31	135	1.9	1.05	0.92	0.447	0.4
4.8	1451-	31	105	1.65	1.2	0.88	0.273	0.4
7.0	1544	31	145	2.5	1.7	1.39	0.320	0.4
9.2		32	170	5.15	2.15	1.37	0.583	0.4
11.4		32	180	3.6	2.0	1.35	0.444	0.4
13.6		32	20	2.25	2.05	1.06	1.089	0.4

y = -10.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gr.nr	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	TV
0.5		33	135	1.75	0.75	0.88	0.571	0.4
2.6		33	120	1.7	0.85	0.86	0.560	0.4
4.8	1545-	33	120	1.5	1.25	1.03	0.167	0.4
7.0	1634	33	180	5.75	2.2	1.41	0.617	0.4
9.2		34	15	3.75	2.05	1.43	0.453	0.4
11.4		34	50	2.35	1.65	1.14	0.298	0.4
13.5		34	135	2.35	1.95	1.08	0.170	0.4

90° zifter: superficiële luchtsnelheid VF = 3.17 m/s: Tabel 7

TABEL 7

y = 0.0 cm

x ¹ (cm)	expno	gr.nr	θ _{max} (°)	v _{gem.max} (m/s)	v _{gem.min} (m/s)	RMS v ¹ (m/s)	RG	TV
2.4		35	155	3.15	2.65	1.42	0.158	0.4
4.7		35	120	3.05	2.70	1.49	0.115	0.4
7.0	1635-	35	130	3.75	3.00	1.95	0.200	0.4
9.3	1712	35	145	5.7	3.60	2.40	0.368	0.4
11.6		36	150	9.6	4.00	2.35	0.583	0.4
13.7		36	145	12.8 ¹⁾	4.00	1.88	0.688	0.4

- 1) Deze waarde is niet geheel betrouwbaar wegens "overflow" van de Probability Analyser, maar hij kan in werkelijkheid alleen maar hoger liggen.

Grafiek 8

120° rüfker ; $V_F \text{ sup.} = 1.99 \text{ m/s}$

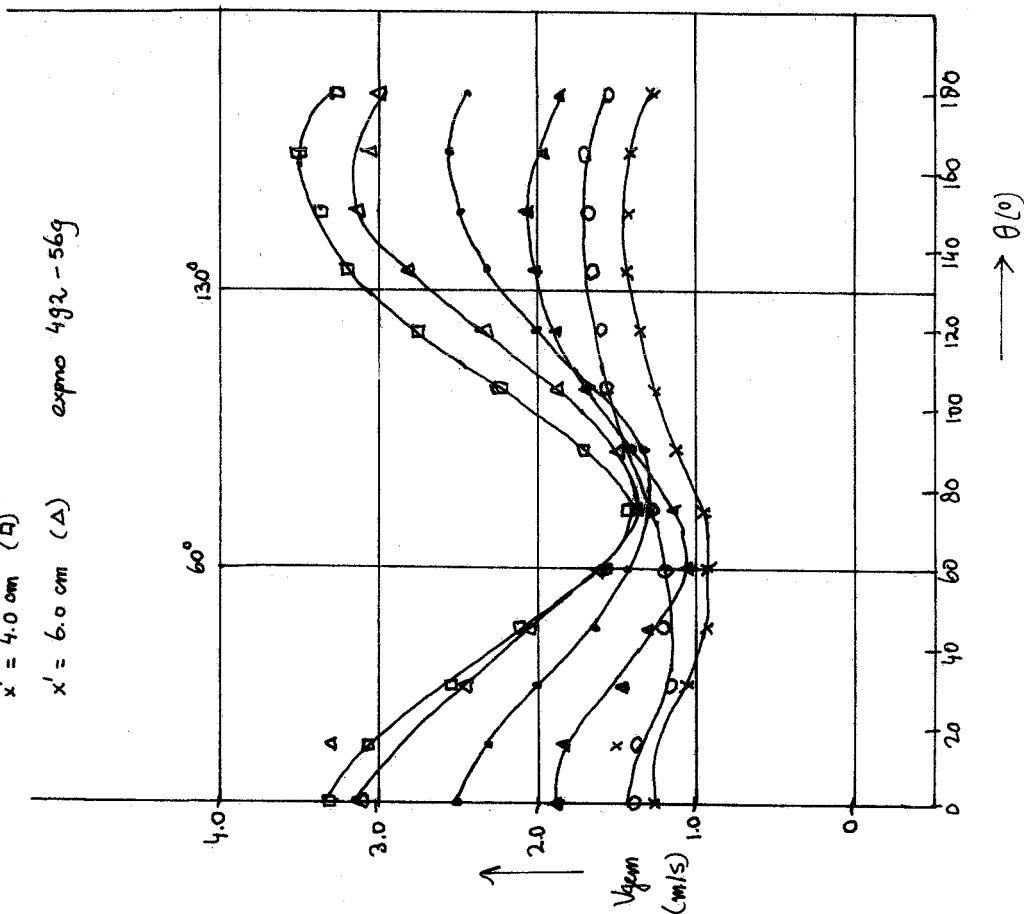
$\gamma = 5.3 \text{ cm}$

$x' = 0.3 \text{ cm}$ (x) $x' = 8.0 \text{ cm}$ (o)

$x' = 2.0 \text{ cm}$ (o) $x' = 10.2 \text{ cm}$ (Δ)

$x' = 4.0 \text{ cm}$ (□)

$x' = 6.0 \text{ cm}$ (Δ) expno 492-569



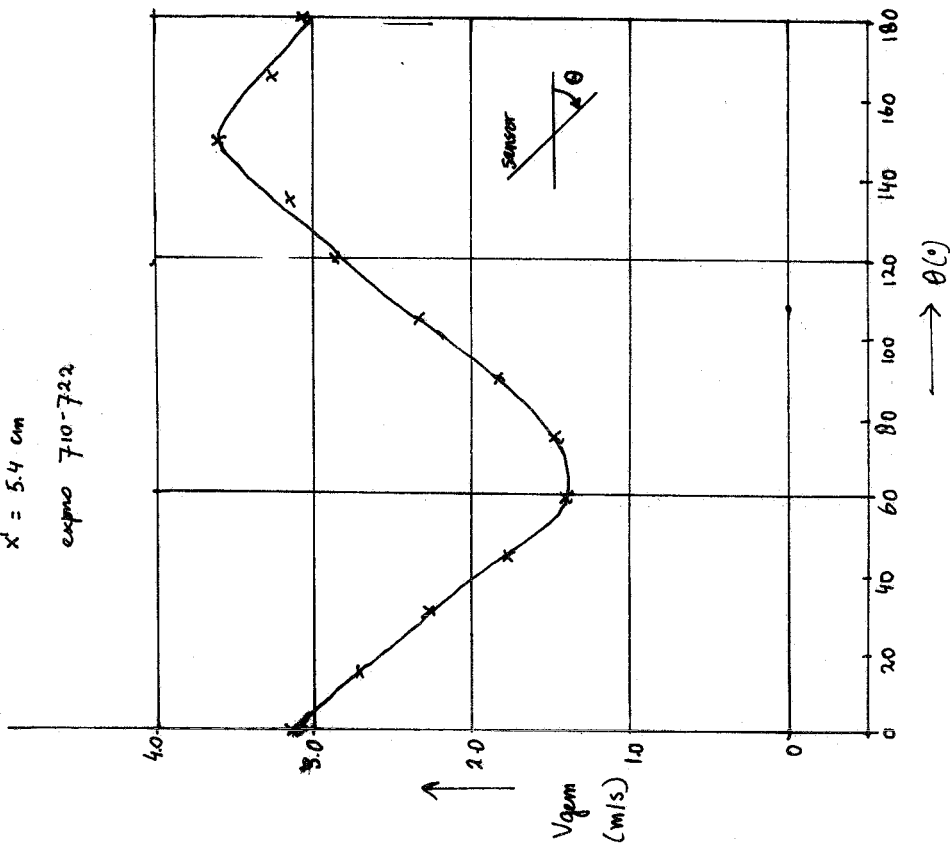
Grafiek 7

120° rüfker ; $V_F \text{ superfineel} = 1.99 \text{ m/s}$

$\gamma = 7.3 \text{ cm}$

$x' = 5.4 \text{ cm}$

expno 710-722



Grafiek 9

12.0° nuffer ; $V_F \text{ sup.} = 1.99 \text{ m/s}$

$\gamma = 3.3 \text{ cm}$

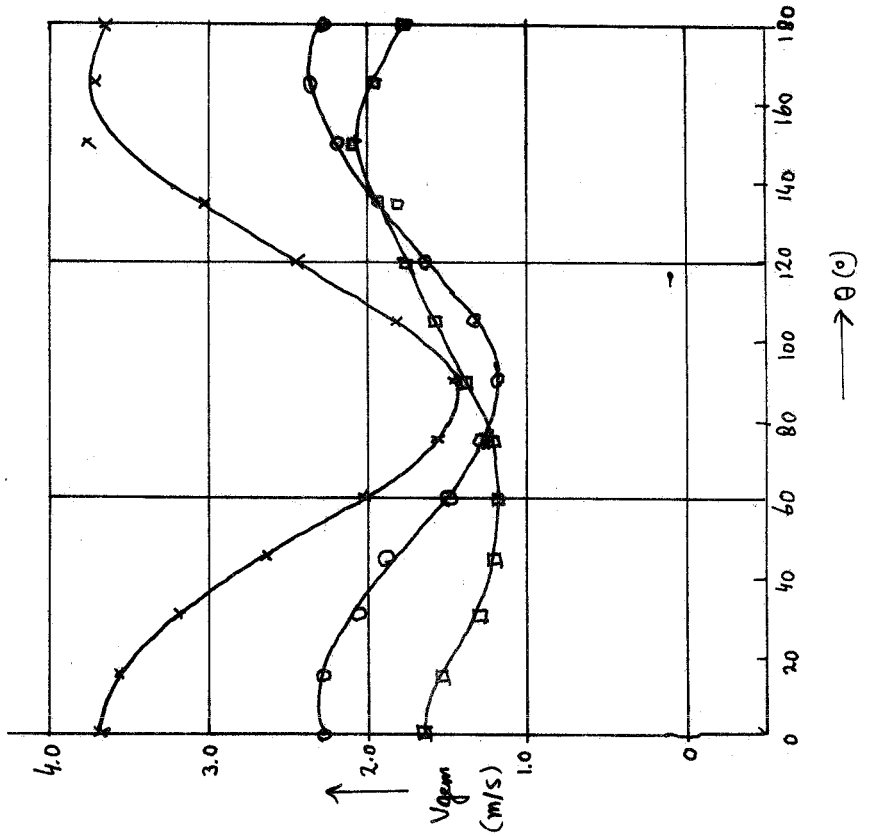
$x' = 1.8 \text{ cm}$ (□)

$x' = 3.0 \text{ cm}$ (x)

$x' = 7.0 \text{ cm}$ (o)

expno 570-595

723-735



Grafiek 10

12.0° nuffer ; $V_F \text{ sup.} = 1.99 \text{ m/s}$

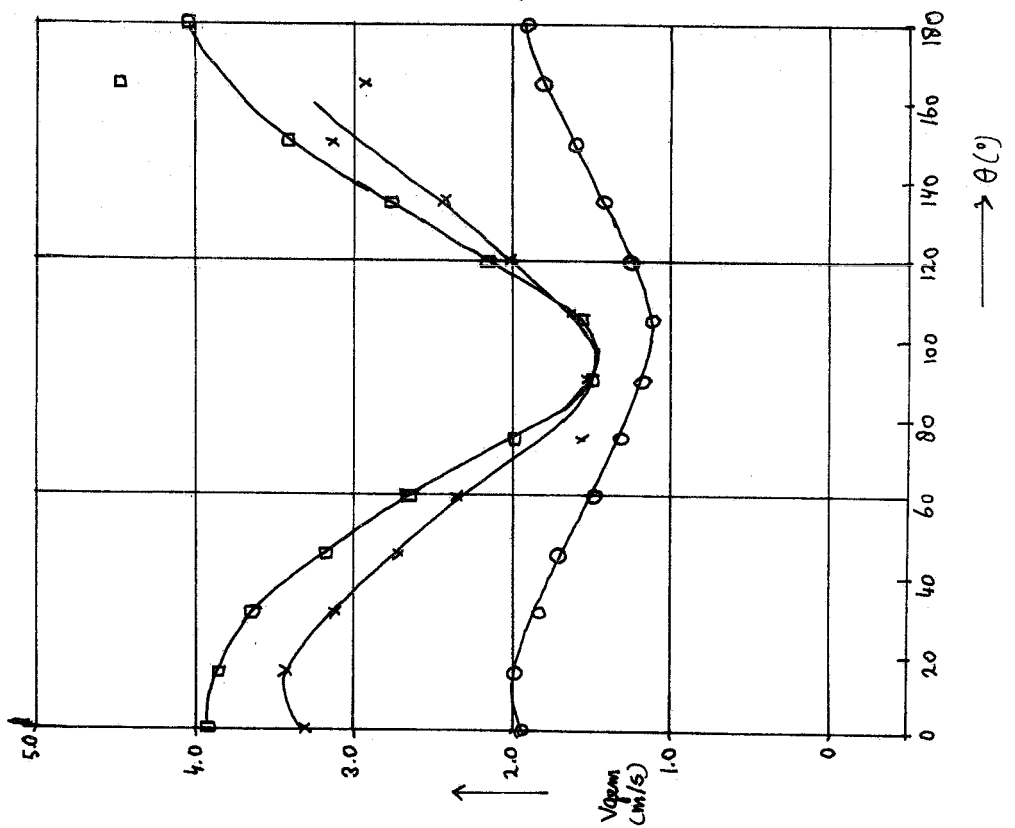
$\gamma = 1.3 \text{ cm}$

$x' = 1.5 \text{ cm}$ (□)

$x' = 3.0 \text{ cm}$ (x)

$x' = 7.0 \text{ cm}$ (o)

expno 596-607, 620-632, 726-748



Grafiek 11

120° riefen ; $V_{sup.} = 1.99 \text{ m/s}$

$\gamma = -0.7 \text{ cm}$

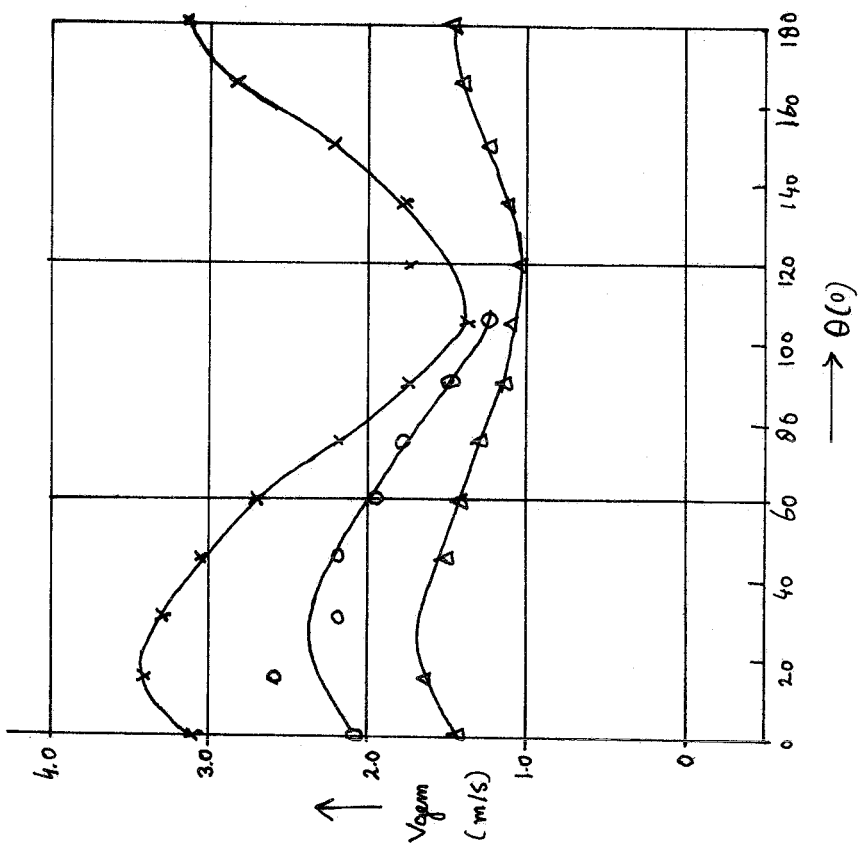
$x' = 2.3 \text{ cm } (\times)$

$x' = 5.5 \text{ cm } (o)$

$x' = 7.6 \text{ cm } (\Delta)$

expro 453-473

479-491



Grafiek 12

120° riefen ; $V_{sup.} = 1.99 \text{ m/s}$

$\gamma = -2.7 \text{ cm}$

$x' = 0.3 \text{ cm } (v)$

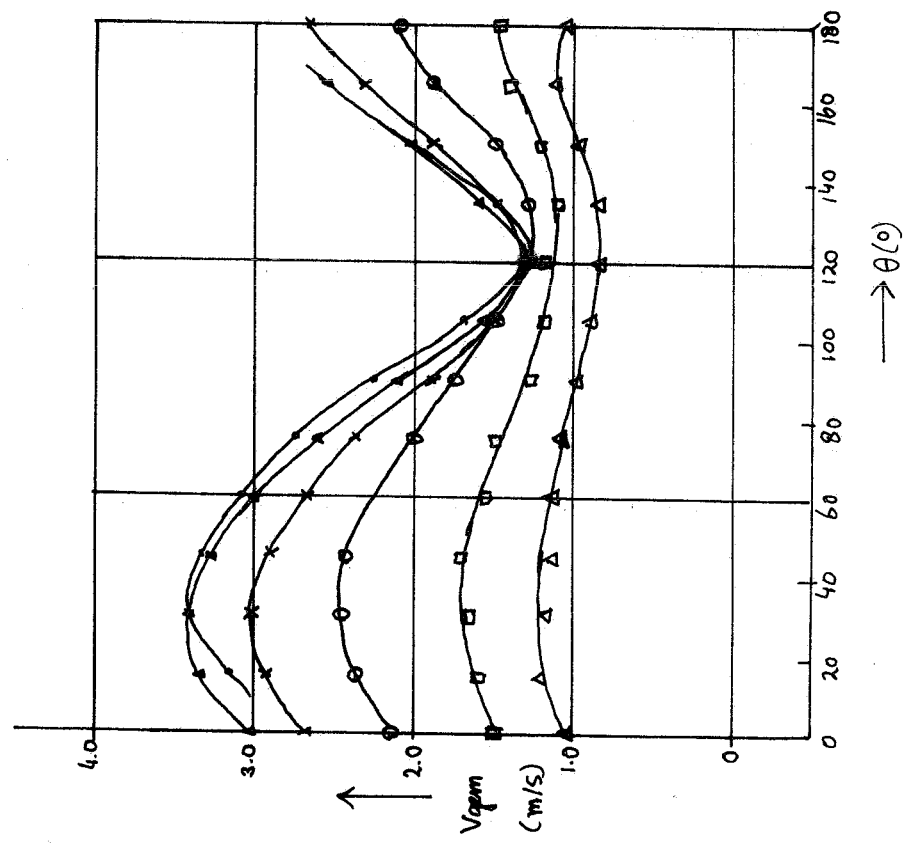
$x' = 2.0 \text{ cm } (\Delta)$

$x' = 4.0 \text{ cm } (\times)$

$x' = 6.0 \text{ cm } (o)$

expro 390-452

608-619



Grafiek 13

120° zufließen; $V_{F \text{ sup.}} = 1,99 \text{ m/s}$

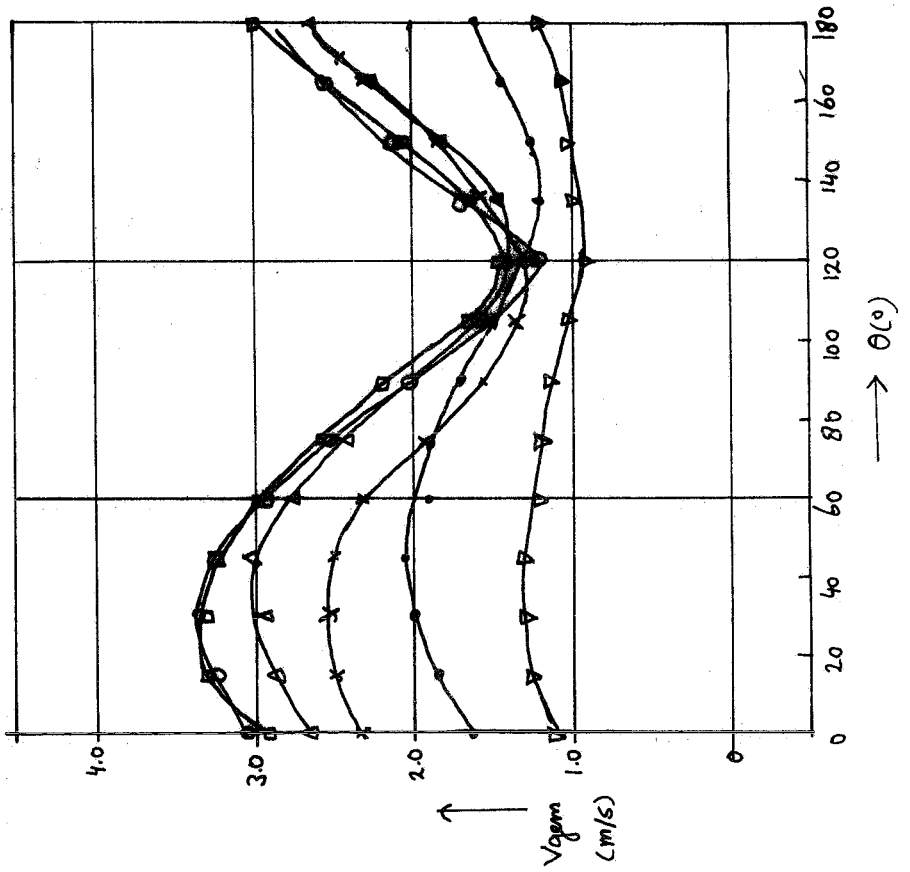
$Y = -6,7 \text{ cm}$

$x' = 0,4 \text{ cm (x)}$ $x' = 8,0 \text{ cm (o)}$

$x' = 2,0 \text{ cm (o)}$ $x' = 10,1 \text{ cm (v)}$

$x' = 4,0 \text{ cm (□)}$ $x' = 6,33 = 7,09$

$x' = 6,0 \text{ cm (Δ)}$



Grafiek 14

120° zufließen; $V_{F \text{ sup.}} = 1,99 \text{ m/s}$

$Y = -8,7 \text{ cm}$

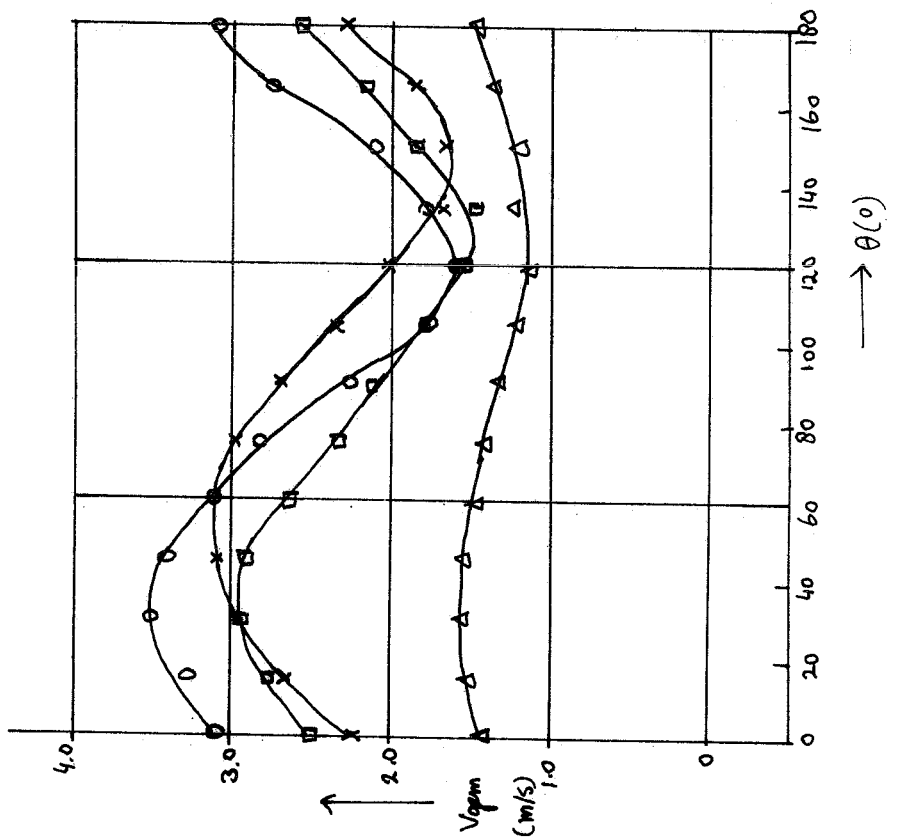
$x' = 0,8 \text{ cm (x)}$

$x' = 4,2 \text{ cm (o)}$

$x' = 7,2 \text{ cm (□)}$

$x' = 10,7 \text{ cm (Δ)}$

expno 316 - 367



Grafiek 16

90° riefen ; $v_{f\text{ sep}} = 1.645 \text{ m/s}$

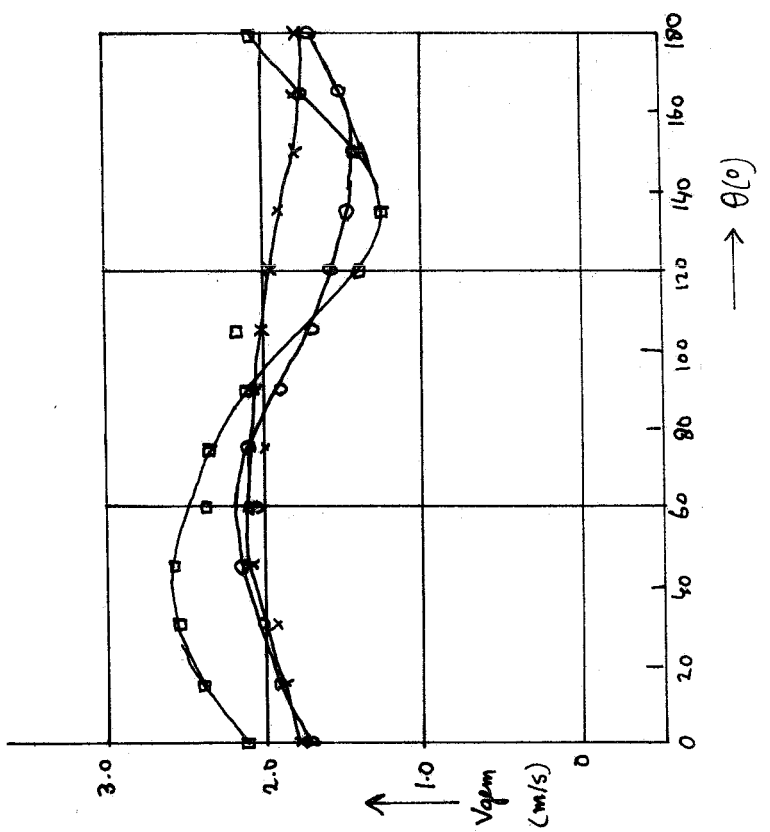
$\gamma = 8.0 \text{ cm}$

$x' = 8.7 \text{ cm (x)}$

$x' = 11.4 \text{ cm (o)}$

$x' = 13.9 \text{ cm (□)}$

expno 801-839



Grafiek 15

90° riefen ; $v_{f\text{ sep}} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 8.0 \text{ cm}$

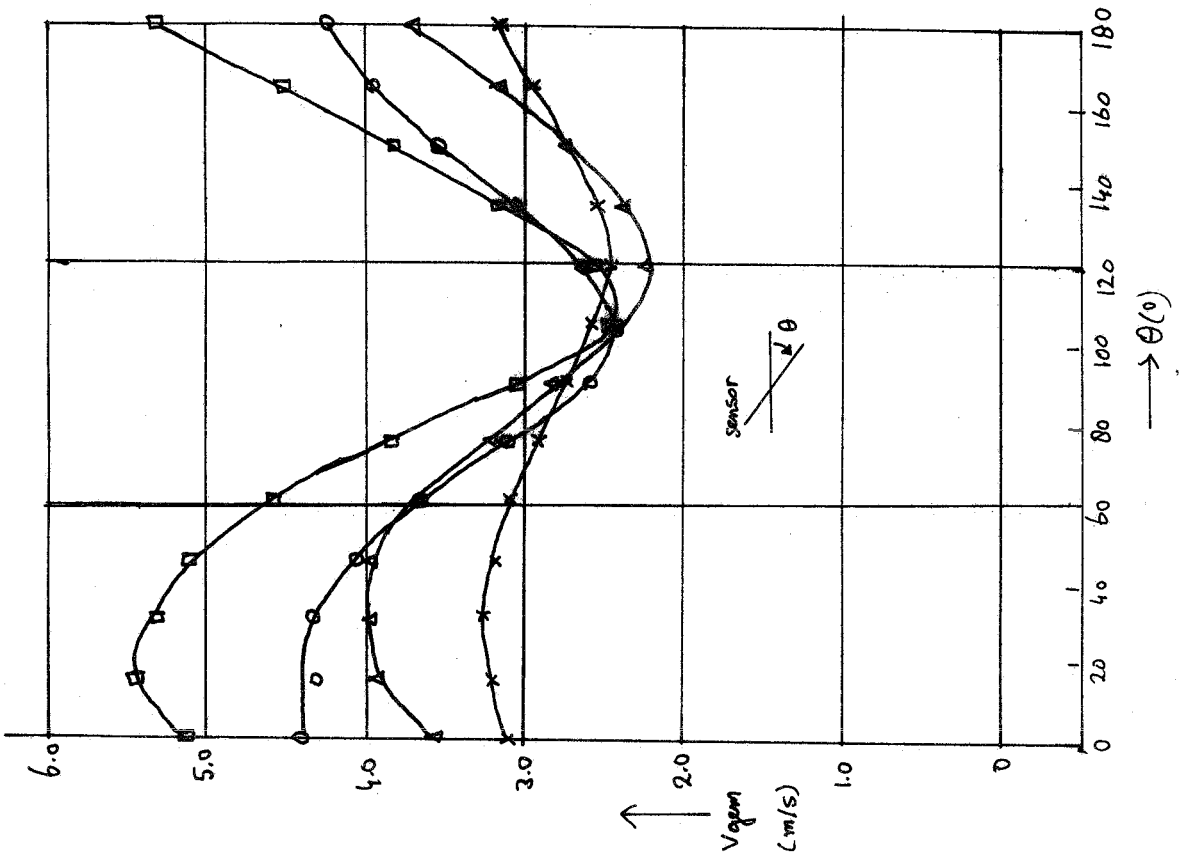
$x' = 0.3 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.0 \text{ cm (o)}$

$x' = 4.0 \text{ cm (□)}$

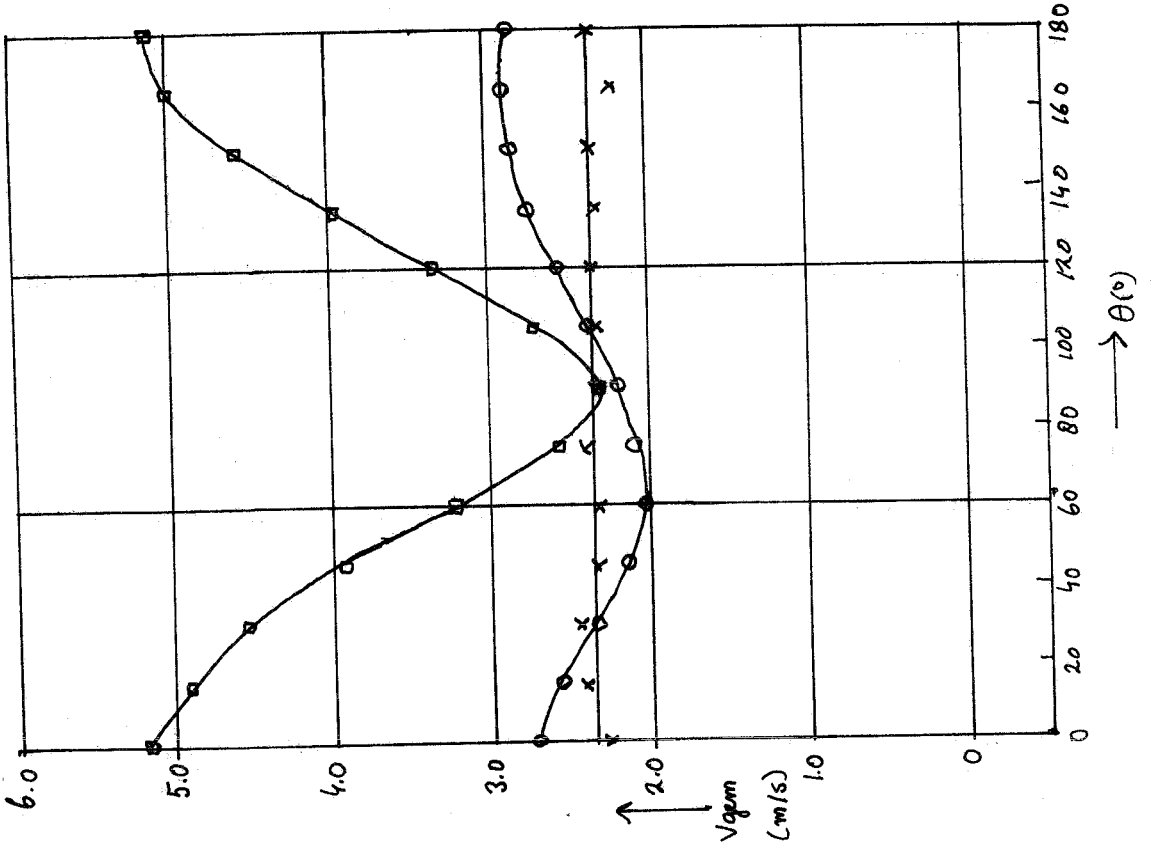
$x' = 6.0 \text{ cm (Δ)}$

expno 719-800



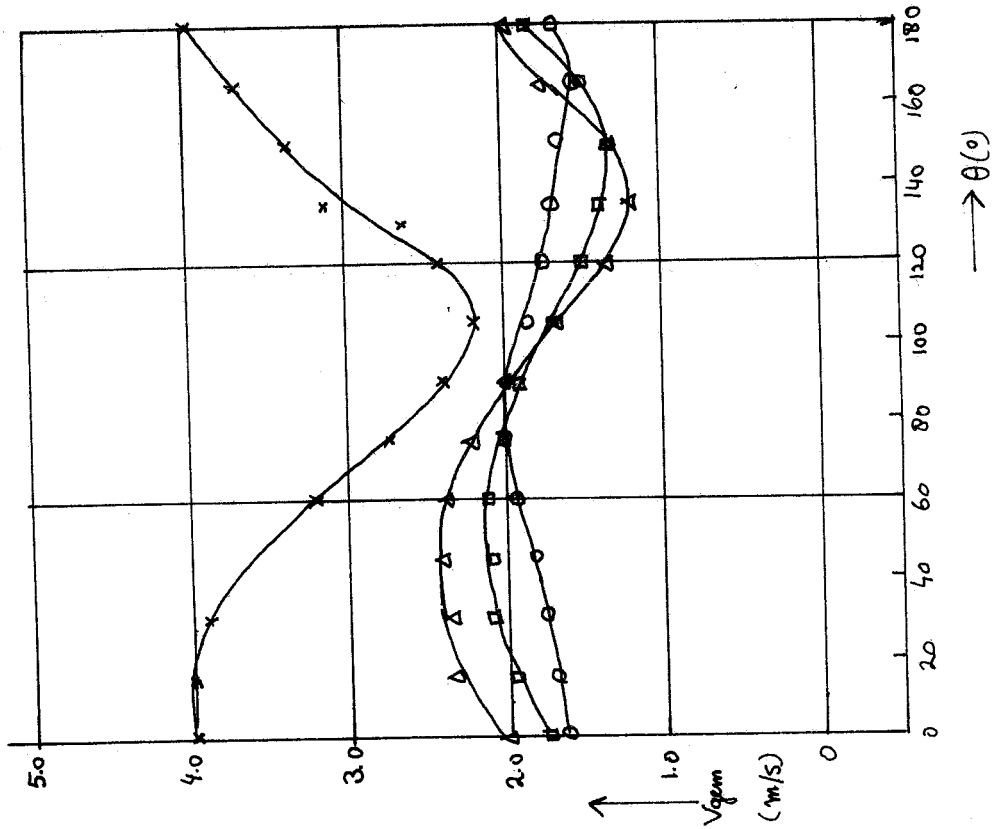
Grafiek 17

90° zufließen; $V_{F \text{ sup.}} = 1.645 \text{ m/s}$; $y = 6.0 \text{ cm}$
 $x' = 0.3 \text{ cm (x)}$ $x' = 4.5 \text{ cm (□)}$
 $x' = 2.0 \text{ cm (○)}$ expno 840-878



Grafiek 18

90° zufließen; $V_{F \text{ sup.}} = 1.645 \text{ m/s}$
 $y = 6.0 \text{ cm}$
 $x' = 7.0 \text{ cm (x)}$ $x' = 13.9 \text{ cm (Δ)}$
 $x' = 9.5 \text{ cm (○)}$ expno 879-930
 $x' = 12.0 \text{ cm (□)}$



Grafiek 2.0

90° wifler; $v_{sup} = 1.645 \text{ m/s}$

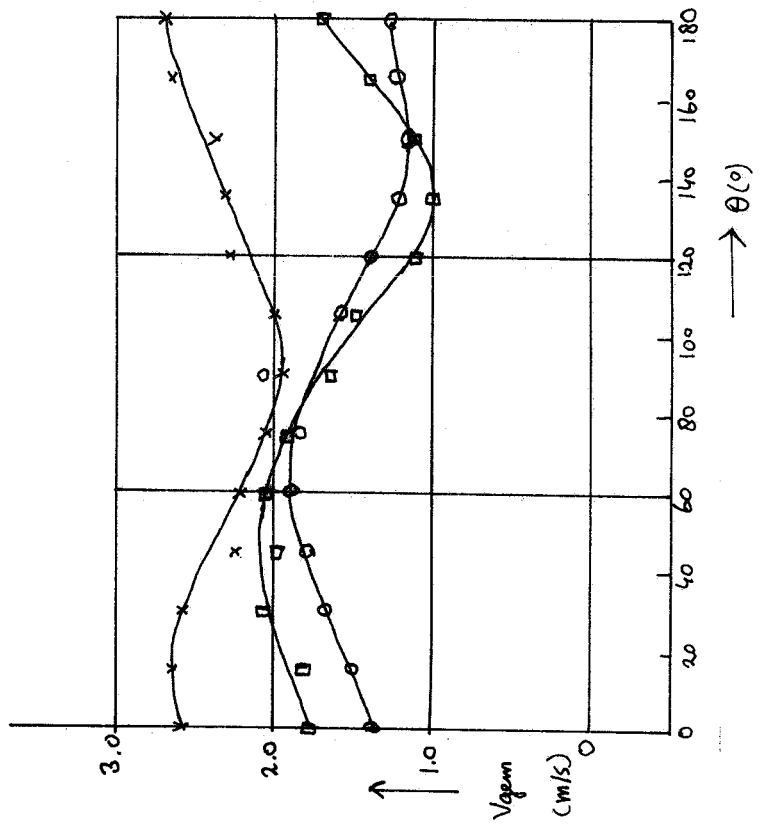
$\gamma = 4.0 \text{ cm}$

$x' = 9.5 \text{ cm (x)}$

$x' = 12.0 \text{ cm (o)}$

$x' = 14.0 \text{ cm (□)}$

expno 983-1021



Grafiek 1.9

90° wifler; $v_{sup} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 4.0 \text{ cm}$

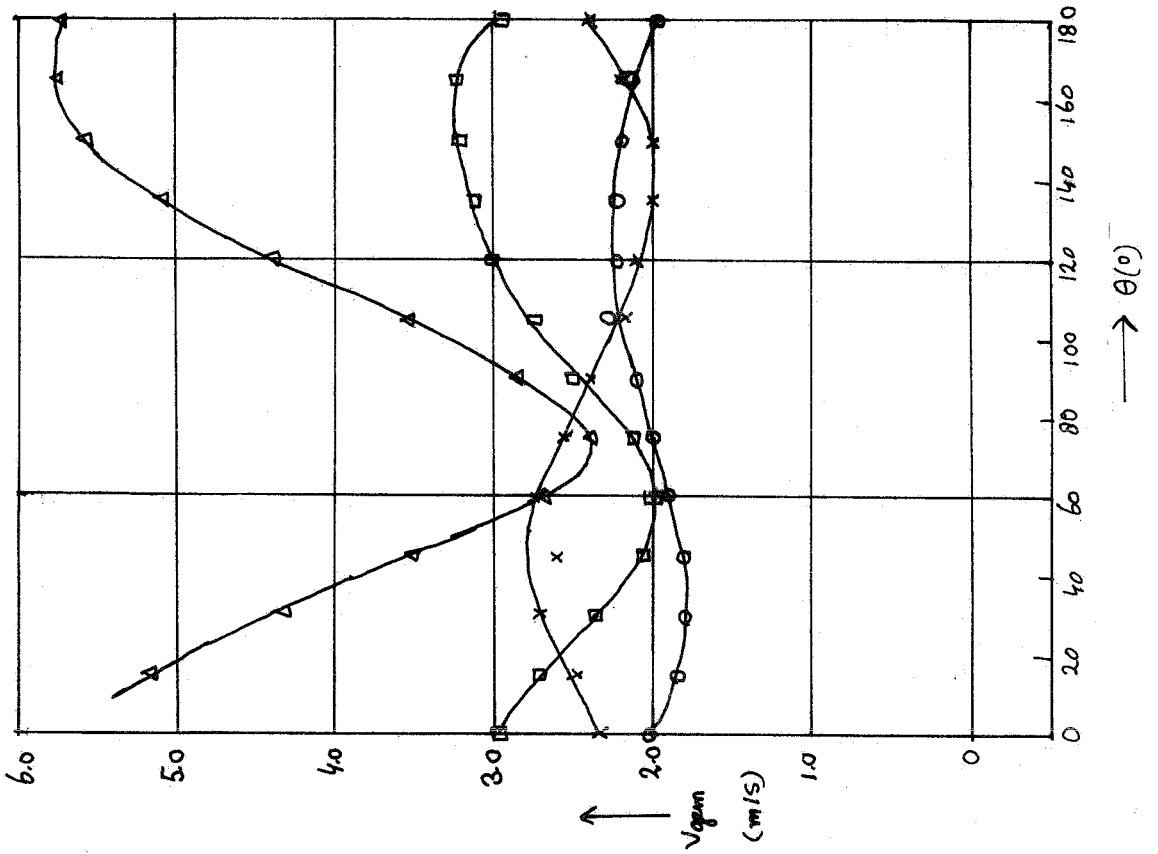
$x' = 0.3 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.2 \text{ cm (o)}$

$x' = 4.5 \text{ cm (□)}$

$x' = 7.0 \text{ cm (Δ)}$

expno 931-982



← Grafiek 2.2

90° riefen ; $V_{f\text{ sup.}} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 2.0 \text{ cm}$

$x' = 9.6 \text{ cm (x)}$

$x' = 12.0 \text{ cm (o)}$

$x' = 13.9 \text{ cm (II)}$

expno 1074-1112

↓ Grafiek 2.1

90° riefen ; $V_{f\text{ sup.}} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 2.0 \text{ cm}$

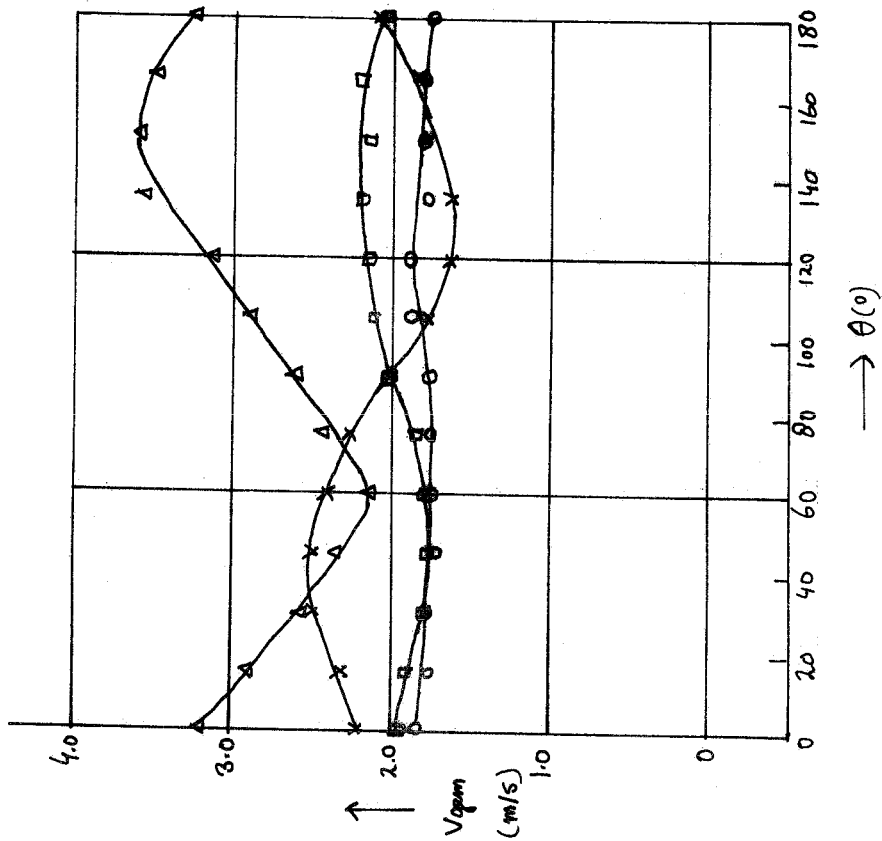
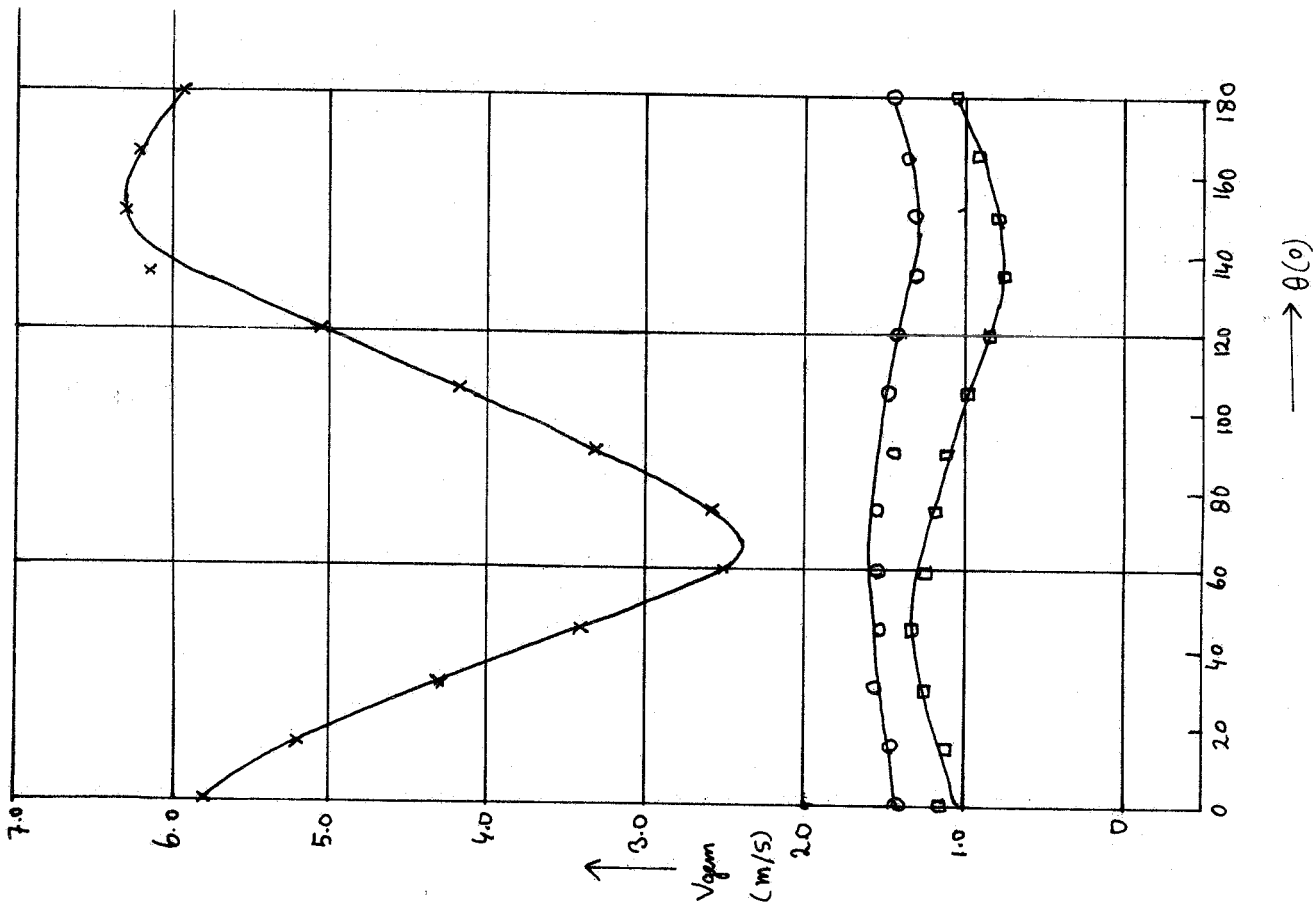
$x' = 0.8 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.5 \text{ cm (o)}$

$x' = 4.8 \text{ cm (II)}$

$x' = 7.2 \text{ cm (Δ)}$

expno 1022-1073



↓ Grafiek 24

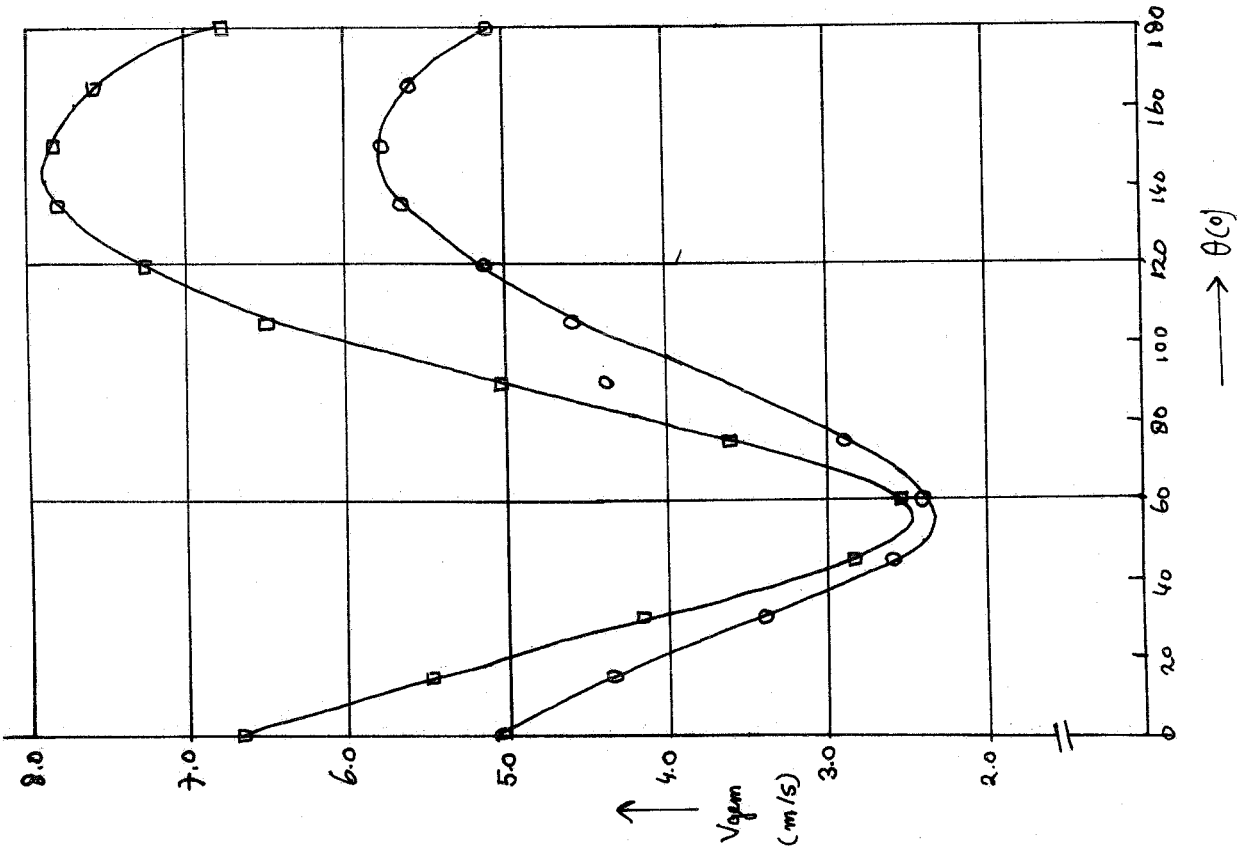
90° wifer; $V_{sup.} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 0.0 \text{ cm}$

$x' = 11.8 \text{ cm (O)}$

$x' = 13.9 \text{ cm (E)}$

expmo 1165 - 1190



↓ Grafiek 23

90° wifer; $V_{sup.} = 1.645 \text{ m/s}$

$\gamma = 0.0 \text{ cm}$

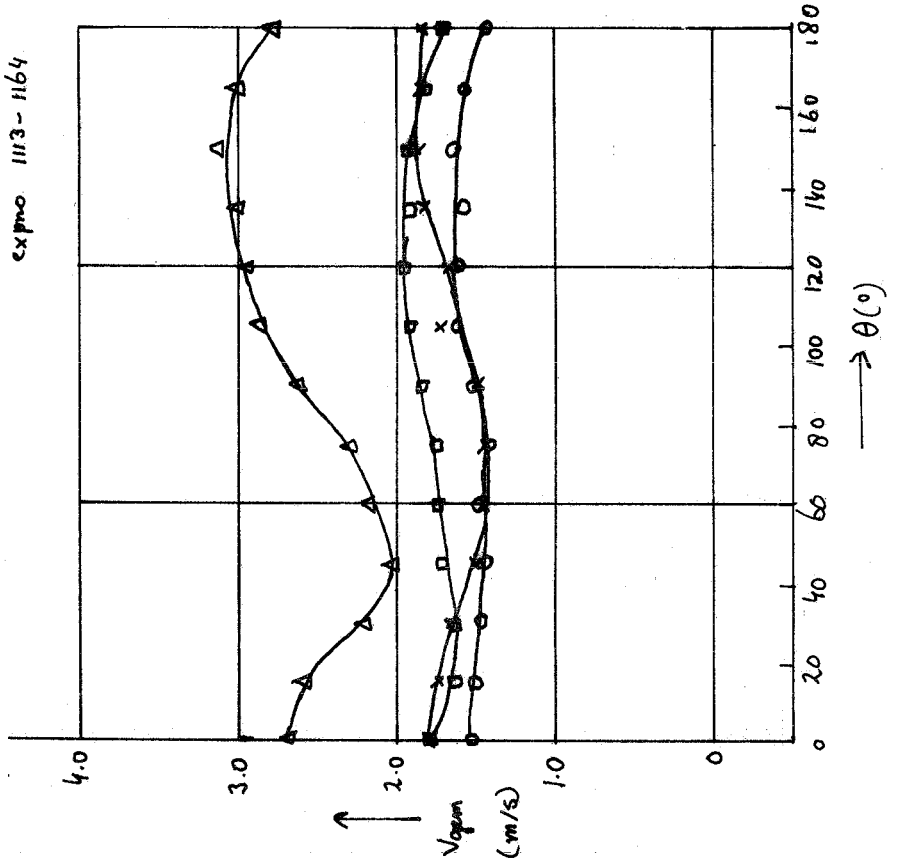
$x' = 2.6 \text{ cm (X)}$

$x' = 4.6 \text{ cm (O)}$

$x' = 7.0 \text{ cm (E)}$

$x' = 9.4 \text{ cm (Δ)}$

expmo 1113 - 1164



↓ Grafiek 25

90° zufließen; $V_{\text{sup}} = 1.645 \text{ m/s}$

$Y = -2.0 \text{ cm}$

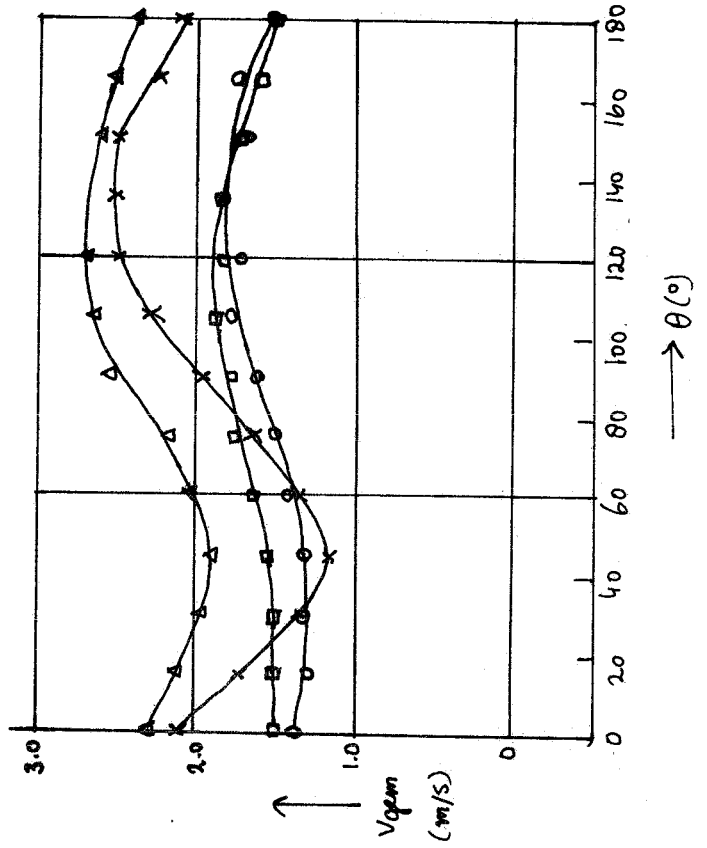
$x' = 0.6 \text{ cm (x)}$

$x' = 3.0 \text{ cm (o)}$

$x' = 5.1 \text{ cm (□)}$

$x' = 7.4 \text{ cm (Δ)}$

Expno 1191-1241



↓ Grafiek 26

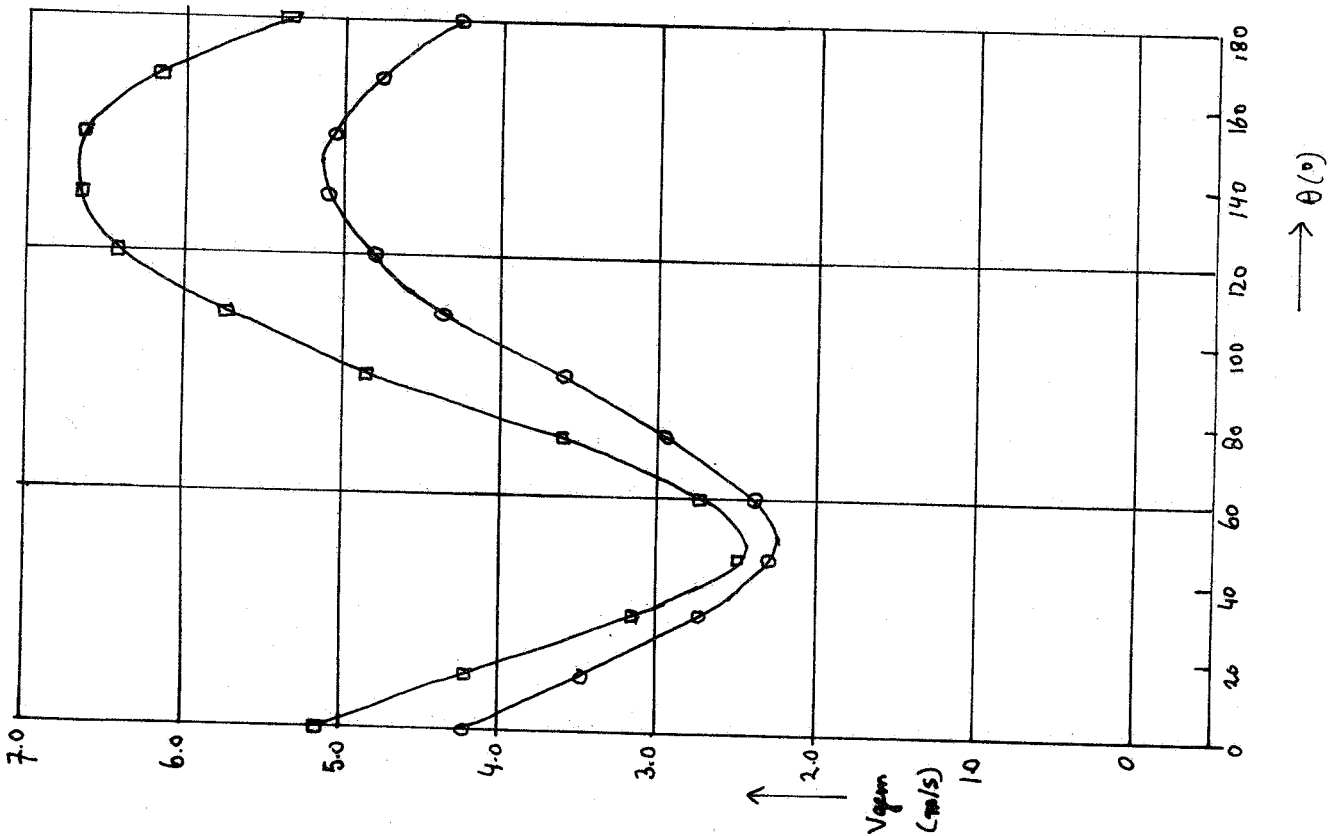
90° zufließen; $V_{\text{sup}} = 1.645 \text{ m/s}$

$Y = -2.0 \text{ cm}$

$x' = 9.8 \text{ cm (o)}$

$x' = 12.3 \text{ cm (□)}$

Expno 1242-1267



↓ Grafik 2.7

90° xifler ; $V_{f\text{sup}} = 1.645 \text{ m/s}$

$Y = -4.0 \text{ cm}$

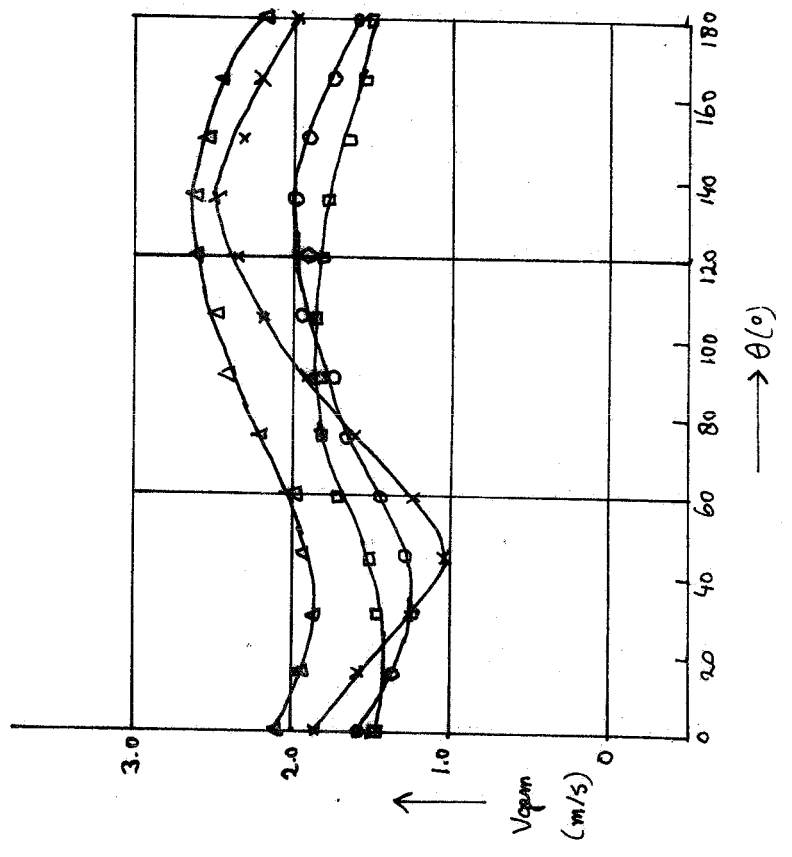
$x' = 0.5 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.6 \text{ cm (o)}$

$x' = 4.8 \text{ cm (□)}$

$x' = 7.0 \text{ cm (Δ)}$

expno 1269 - 1320



← Grafik 2.8

90° xifler ; $V_{f\text{sup}} = 1.645 \text{ m/s}$

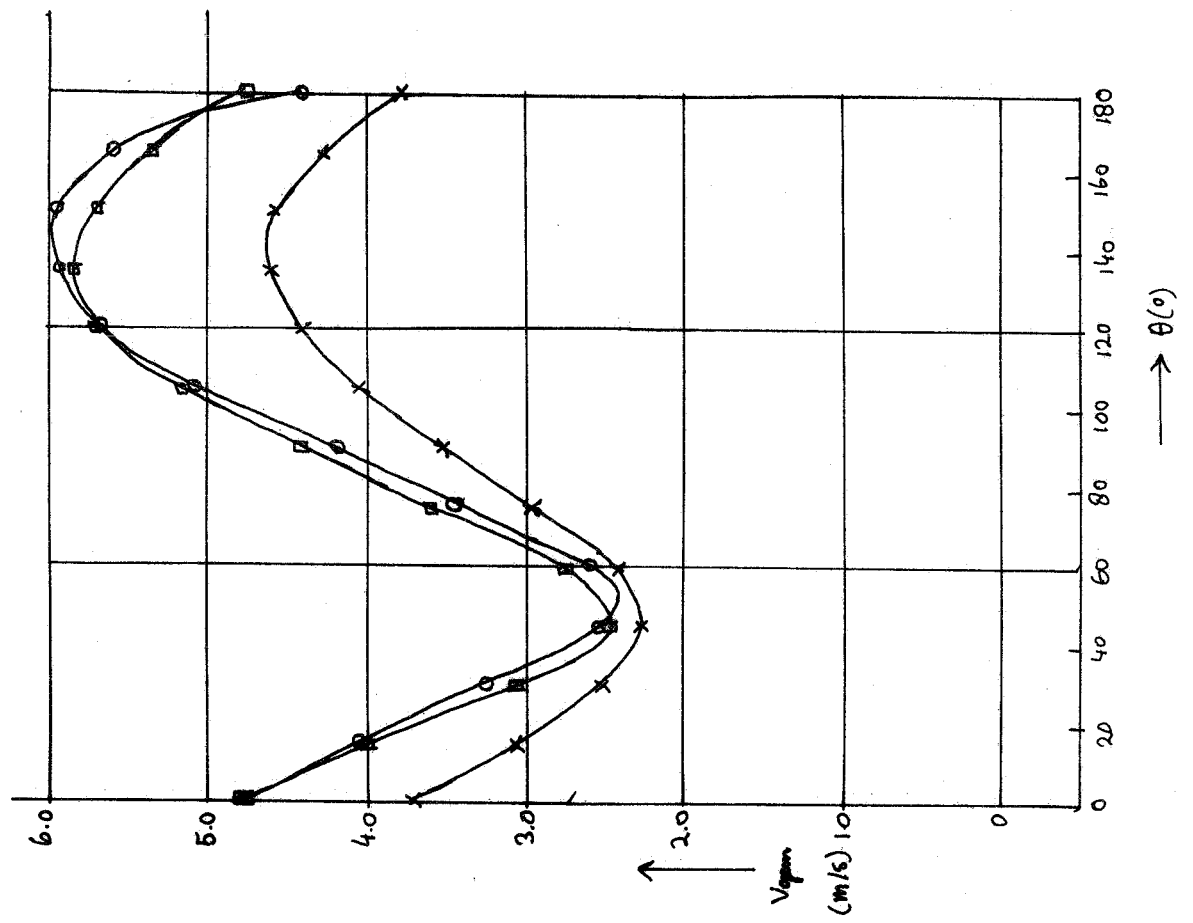
$Y = -4.0 \text{ cm}$

$x' = 9.2 \text{ cm (x)}$

$x' = 11.3 \text{ cm (o)}$

$x' = 13.3 \text{ cm (□)}$

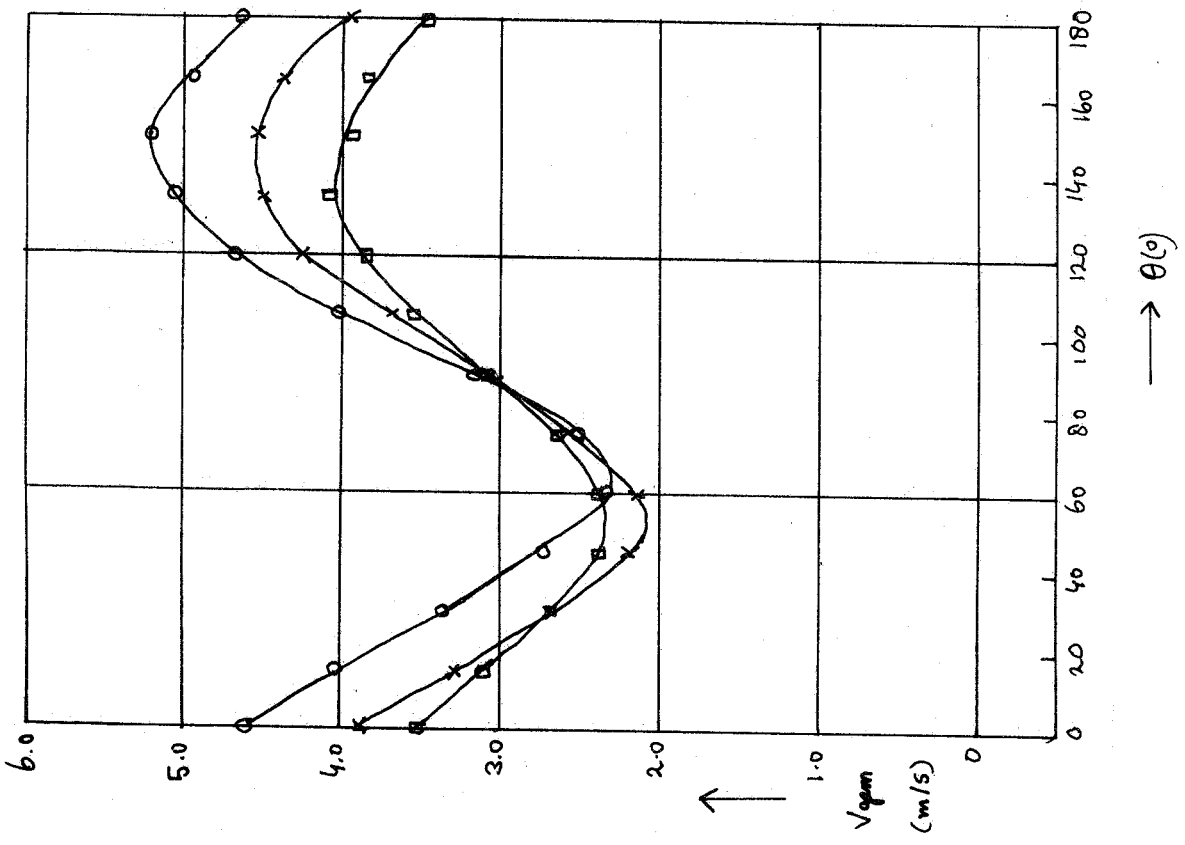
expno 1321 - 1359



↓ Graphik 30

90° Düfeler ; $V_{Fsup.} = 1.645 \text{ m/s}$

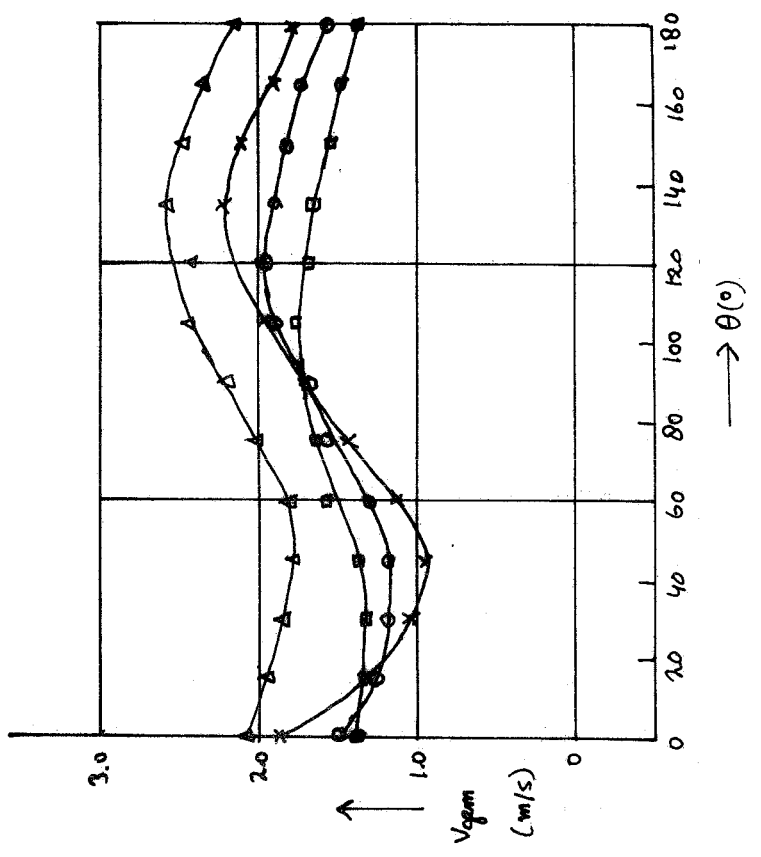
- $\gamma = -6.0 \text{ cm}$
 - $x' = 9.2 \text{ cm (x)}$
 - $x' = 11.4 \text{ cm (o)}$
 - $x' = 13.6 \text{ cm (□)}$
- expno 1412 - 1450



↓ Graphik 29

90° Düfeler ; $V_{Fsup.} = 1.645 \text{ m/s}$

- $\gamma = -6.0 \text{ cm}$
 - $x' = 0.5 \text{ cm (x)}$
 - $x' = 2.6 \text{ cm (o)}$
 - $x' = 5.0 \text{ cm (□)}$
 - $x' = 7.2 \text{ cm (Δ)}$
- expno 1360 - 1411



↓ Grafiek 31

90° zijter; $V_{sup} = 1.645 \text{ m/s}$

$Y = -8.0 \text{ cm}$

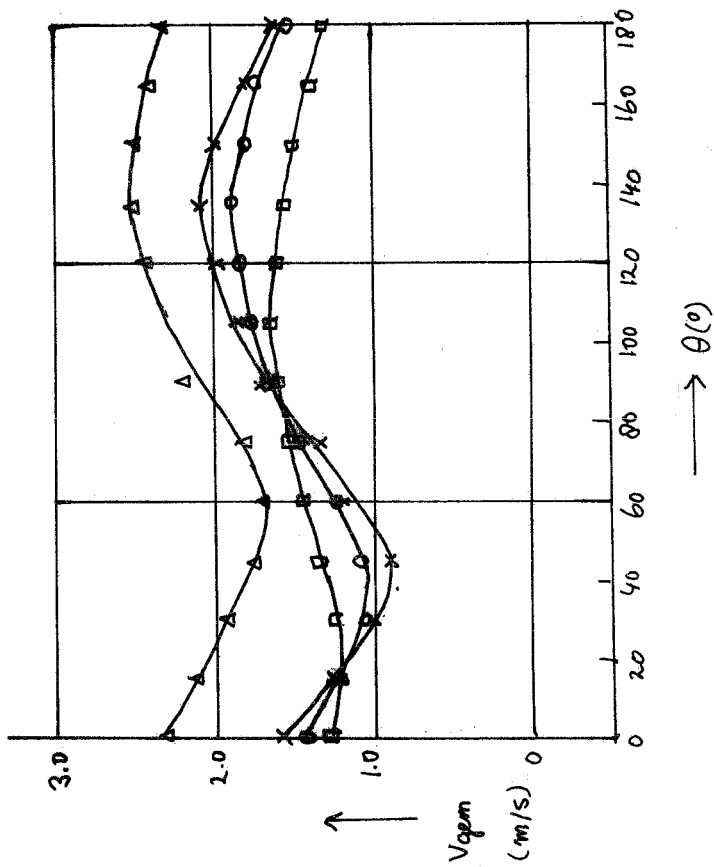
$x' = 0.5 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.6 \text{ cm (o)}$

$x' = 4.8 \text{ cm (II)}$

$x' = 7.0 \text{ cm (Δ)}$

expro 1451-1504



← Grafiek 32

90° zijter; $V_{sup} = 1.645 \text{ m/s}$

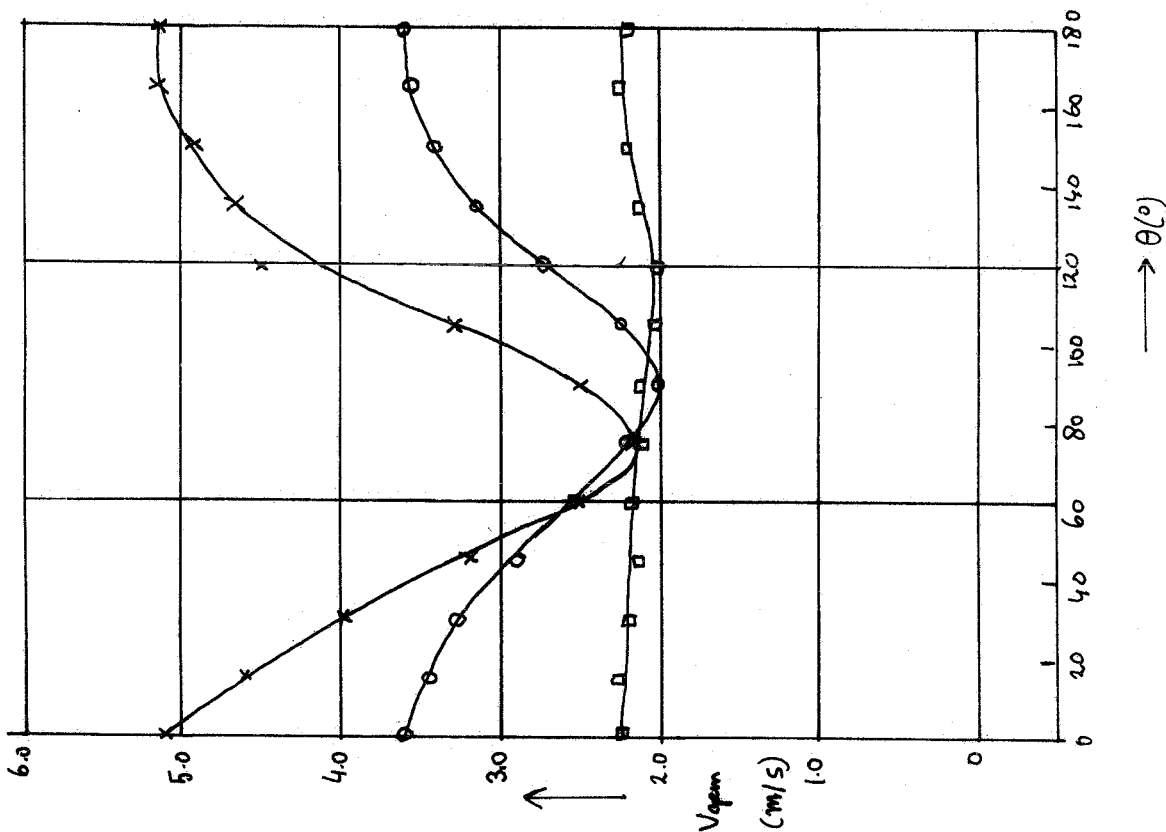
$Y = -8.0 \text{ cm}$

$x' = 9.2 \text{ cm (x)}$

$x' = 11.4 \text{ cm (o)}$

$x' = 13.6 \text{ cm (II)}$

expro 1505-1544



↓ Grafik 34

90° zylinder ; $V_{Fsup} = 1.645 \text{ m/s}$

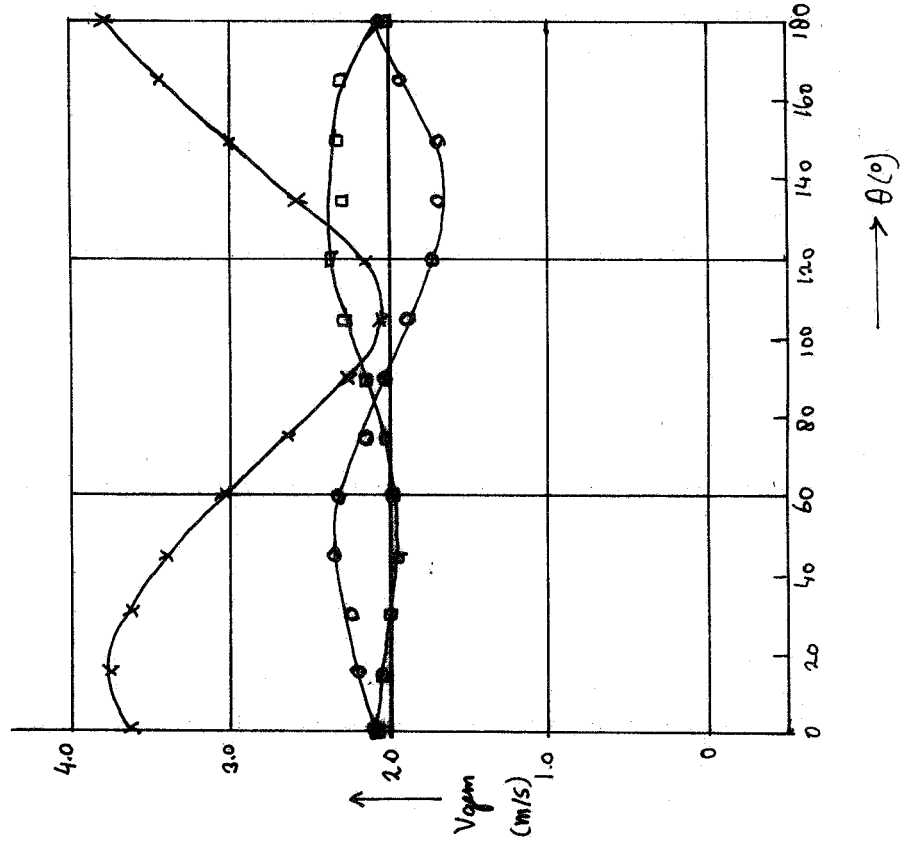
$r = -10.0 \text{ cm}$

$x' = 9.2 \text{ cm (x)}$

$x' = 11.4 \text{ cm (o)}$

$x' = 13.5 \text{ cm (□)}$

expno 1596 - 1634



Grafik 33 →

90° zylinder ; $V_{Fsup} = 1.645 \text{ m/s}$

$r = -10.0 \text{ cm}$

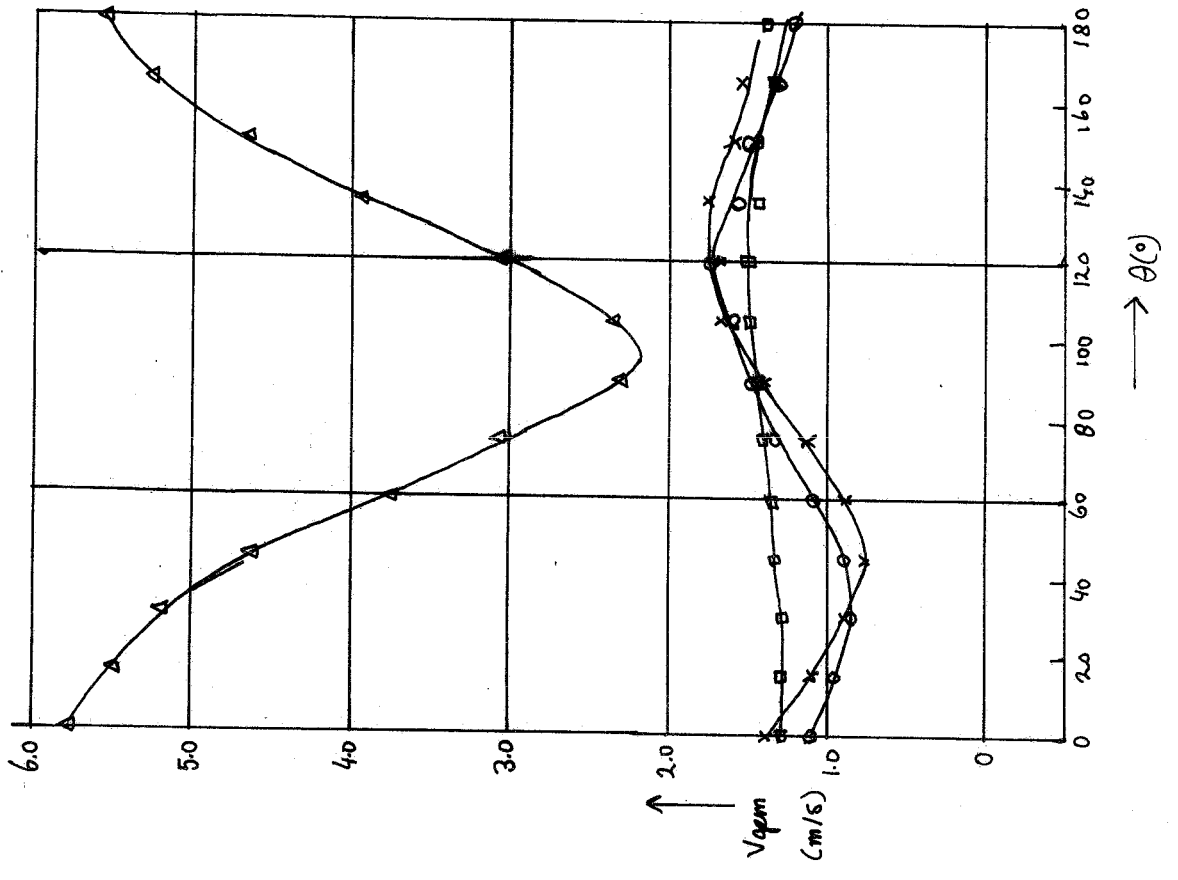
$x' = 0.5 \text{ cm (x)}$

$x' = 2.6 \text{ cm (o)}$

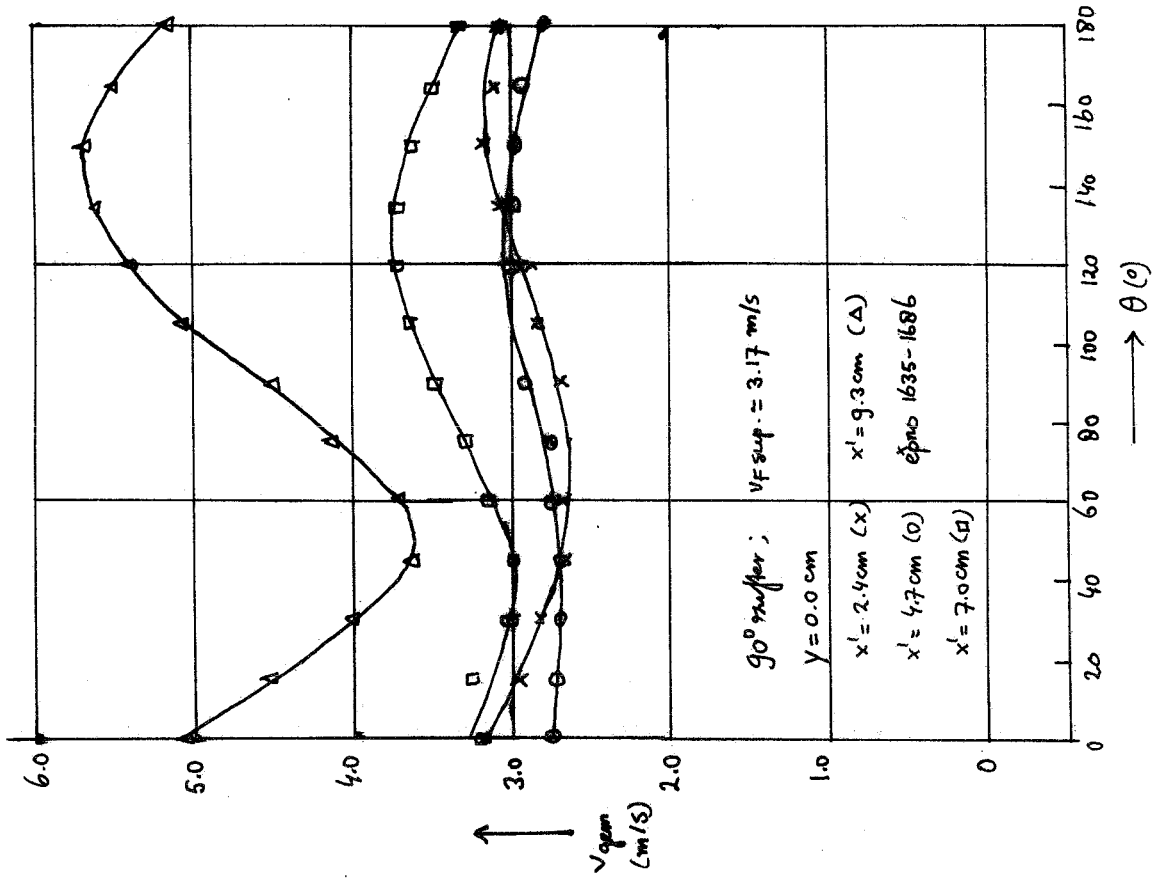
$x' = 4.8 \text{ cm (□)}$

$x' = 7.0 \text{ cm (Δ)}$

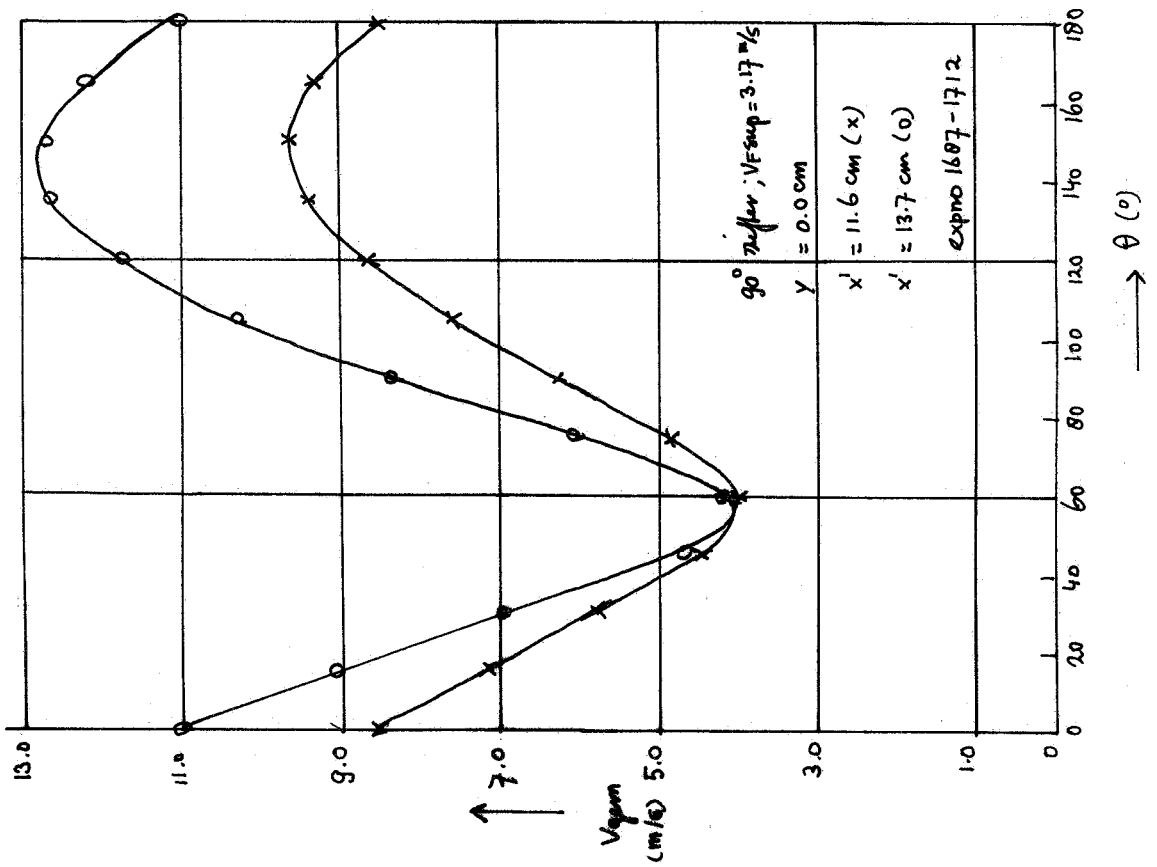
expno 1545 - 1593



Grafiek 35



Grafiek 36



Resultaten bepaling beginvoorwaarden

1. 90° daalstroom; VF superficieel = 2.0 m/s; totaal aantal daaldeeljes
 $N = 150$; $1-P_d = 0.20$

TABEL 11	VPO(cm/s)	N(VPO)
$0 < y \leq 2$ cm	30-75	1
Richting C	75-120	8
Aantal: 85	120-165	11
$1-P_d=0.29$	165-210	50
	210-255	15

Zie fig.44, (I)

TABEL 12	VPO(cm/s)	N(VPO)
$2 < y \leq 3.5$ cm	45-90	2
Richting B	90-135	14
Aantal: 23	135-180	5
$1-P_d=0.09$	180-225	2

Zie fig.44 (II)

TABEL 13	VPO(cm/s)	N(VPO)
$3.5 < y \leq 5$ cm	45-90	2
Richting A	90-135	12
Aantal: 20	135-180	6

Zie fig.44, (III)

TABEL 14	VPO(cm/s)	N(VPO)
$5 < y \leq 7$ cm	45-90	6
Richting A	90-135	11
Aantal: 22	135-180	4
	180-225	1

Zie fig.44, (IV)

TABEL 13 + TABEL 14 : TABEL 15

TABEL 15	VPO(cm/s)	N(VPO)
$3.5 < y \leq 7$ cm	45-90	8
Richting A	90-135	23
Aantal: 42	135-180	10
$1-P_d=0.07$	180-225	1

Zie fig.44, (V)

2. 90° zifter, stijgstroom; VF superficieel = 2.0 m/s; totaal aantal stijg-
 deeltjes $N = 247$; $1-P_s = 0.67$

TABEL 16	VPO(cm/s)	N(VPO)
$0 < d \leq 2$ cm	30-70	1
Richting A	70-110	6
Aantal: 114	110-150	6
$1-P_s=0.48$	150-190	35
	190-230	66

Zie fig.47, (I)

TABEL 17	VPO(cm/s)	N(VPO)
$2 < d \leq 4$ cm	70-110	2
Richting B	110-150	28
Aantal: 57	150-190	27
$1-P_s=0.70$		

Zie fig.47, (II)

TABEL 18	VPO(cm/s)	N(VPO)
$4 < d \leq 7$ cm	30-70	2
Richting C	70-110	21
Aantal: 48	110-150	25
$1 - P_s = 0.90$		

Zie fig.47, (III)

De 4e fractie ($d > 7$ cm) :

Aantal: 28
 $1 - P_s = 1.00$

3. 120° zifter, daalstroom; VF superficieel = 1.56 m/s; totaal aantal daaldeeltjes $N = 171$; $P_d = 0.60$

TABEL 19	VPO(cm/s)	N(VPO)
$0 < y \leq 1$ cm	30-50	8
Richting D	50-70	21
Aantal: 131	70-90	67
$P_d = 0.50$	90-110	26
	110-130	9

Zie fig.49, (I)

TABEL 20	VPO(cm/s)	N(VPO)
$1 < y \leq 3$ cm	30-45	3
Richting C	45-60	8
Aantal: 21	60-75	4
$P_d = 0.86$	75-90	4
	90-105	1
	105-120	1

Zie fig.49, (II)

TABEL 21	VPO(cm/s)	N(VPO)
$3 < y \leq 5$ cm	Gemiddelde VPO=65	
Richting B	cm/s	
Aantal: 7		
$P_d = 1.00$		

TABEL 22	VPO(cm/s)	N(VPO)
$4 < y \leq 5$ cm	Gemiddelde	
Richting A	VPO=46.5 cm/s	
Aantal: 12		
$P_d = 1.00$		

4. 120° zifter, stijgstroom; VF superficieel = 1.56 m/s; totaal aantal stijgendeeltjes $N = 170$; $P_s = 0.35$

TABEL 23	VPO(cm/s)	N(VPO)
$0 < d \leq 2$ cm	45-60	4
Richting A	60-75	10
Aantal: 35	75-90	10
$P_s = 0.91$	90-105	10
	105-120	1

Zie fig.52, (I)

TABEL 24	VPO(cm/s)	N(VPO)
$2 < d \leq 4$ cm	35-50	1
Richting B	50-65	9
Aantal: 33	65-80	9
$P_s = 0.52$	80-95	8
	95-110	5
	110-125	1

Zie fig.52, (II)

TABEL 25	VPO(cm/s)	N(VPO)
$4 < d \leq 6$ cm	20-35	1
Richting C	35-50	3
Aantal: 35	50-65	6
$P_s = 0.23$	65-80	11
	80-95	6
	95-110	7
	110-125	1

TABEL 26	VPO(cm/s)	N(VPO)
$d > 6$ cm	35-50	2
Richting D	50-65	11
Aantal: 33	65-80	12
$P_s = 0.09$	80-95	4
	95-110	2
	110-125	2

Zie fig.52, (III)

Zie fig.52, (IV)

De fractie, die de lijn AB niet haalde, telde 34 deeltjes; $P_s = 0.0$

Berekening stromingsprofielen

1. 90° zifter, geknikt profiel

Gebied 1 Benaderd profiel: $v_f = 5.42 \text{ m/s}$

Deze waarde is het gemiddelde van de meetpunten die in dit gebied liggen.

Meegenomen meetpunten:	y (cm)	x'(cm)	v_{gem} (m/s)	Δv_f (%)
	-2.0	9.8	5.1	- 5.9
		12.3	6.65	+22.7
	-4.0	9.2	4.6	-15.1
		11.3	6.0	+10.7
		13.3	5.85	+ 7.9
	-6.0	9.2	4.55	-16.0
		11.4	5.2	- 4.0

$$|\overline{\Delta v_f}| = 11.8 \%$$

Gebied 2 Benaderd profiel: $v_f = 112 \times (y/\sqrt{3} + x) + 820 \text{ cm/s}$, gevonden door trial and error.

In de onderstaande tabel wordt de met deze benadering berekende snelheid vergeleken met de anemometermeetpunten.

y (cm)	x'(cm)	x(cm) ¹⁾	v_{gem} (m/s)	v_f berekend (m/s)	Δv_f (%)
0.0	13.9	-0.3	7.9	7.86	-0.5
	11.8	-2.4	5.75	5.51	-4.2
	9.4	-4.8	3.05	2.82	-7.5
2.0	9.6	-2.6	6.3	6.58	+4.4
	7.2	-5.0	3.6	3.89	+8.1

¹⁾ Zie figuur 29

$$|\overline{\Delta v_f}| = 4.9 \%$$

Gebied 3 Benaderd profiel: $v_f = -100 \times x + 895 \text{ cm/s}$, eveneens gevonden door trial and error.

In de tabel op devolgende pagina wordt de met deze benadering

berekende snelheid vergeleken met de anemometerresultaten die in dit gebied liggen.

y (cm)	x'(cm)	x (cm)	v_{gem} (m/s)	v_f berekend (m/s)	Δv_f (%)
4.0	4.5	-5.7	3.25	3.25	0
	7.0	-3.2	5.75	5.75	0
6.0	2.0	-6.2	2.9	2.75	-5.2
	4.5	-3.7	5.2	5.25	+1.0

$$|\overline{\Delta v_f}| = 1.6 \%$$

Gebied 4 Benaderd profiel: $v_f = 4.24$ m/s , het gemiddelde van de meetpunten in dit gebied.

Meegenomen meetpunten:	y (cm)	x' (cm)	v_{gem} (m/s)	Δv_f (%)
	6.0	2.0	2.9	-31.6
		4.5	5.2	+22.6
	8.0	0.3	3.25	-23.3
		2.0	4.4	+ 3.8
		4.0	5.45	+28.5

$$|\overline{\Delta v_f}| = 22\%$$

Gebied 5 = Gebied 1 : Benaderd profiel: $v_f = 5.42$ m/s.

2. 90° zifter, rond profiel

Gebied 1 Benaderd profiel: $v_f = 0.97 \cdot (x + y) / \sqrt{2} + 7.74$ m/s, gevonden door trial and error. Zie onderstaande tabel voor vergelijking met de anemometingen.

y (cm)	x' (cm)	x (cm)	v_{gem} (m/s)	v_f berekend (m/s)	Δv_f (%)
-2.0	12.3	0.4	6.65	6.64	0
-4.0	11.3	1.4	6.0	5.96	-1.0
	9.2	-0.7	4.6	4.52	-2.0

$$|\overline{\Delta v_f}| = 1.0 \%$$

Gebied 2 benaderd profiel A :

$$-45^{\circ} \leq \varnothing < -30^{\circ} \quad v_f = -1.0 * (R - 6) + 8.0 \text{ m/s}$$

$$-30^{\circ} \leq \varnothing < 30^{\circ} \quad v_f = -1.07 * (R - 6) + 7.42 \text{ m/s} \quad R: \text{ zie fig.}$$

$$30^{\circ} \leq \varnothing \leq 45^{\circ} \quad v_f = -1.0 * (R - 6) + 7.0 \text{ m/s} \quad 32$$

Benaderd profiel B :

$$-45^{\circ} \leq \varnothing \leq +45^{\circ} \quad v_f = -1.07 * (R - 6) + 7.42 \text{ m/s}$$

vergelijking van de benaderde profielen A en B (gevonden door trial and error) met de meetpunten:

y (cm)	x' (cm)	R (cm)	v _{gem} (m/s)	v _f A (m/s)	Δv _f (%)	v _f B (m/s)	Δv _f (%)
0.0	13.9	6.1	7.9	7.90	0	7.30	-7
-2.0	9.8	9.0	5.1	5.00	-2	4.21	-17
0.0	11.8	7.8	5.75	5.49	-4	5.49	-4
0.0	9.4	10.0	3.05	3.14	+3	3.14	+3
2.0	9.6	7.1	6.3	6.24	-1	6.24	-1
2.0	7.2	9.4	3.6	3.78	+5	3.78	+5
4.0	7.0	7.4	5.75	5.92	+3	5.92	+3
4.0	4.5	9.9	3.25	3.25	0	3.25	0
6.0	4.5	8.1	5.2	5.17	-1	5.17	-1
8.0	2.0	9.1	4.4	4.10	-6	4.10	-6
8.0	4.0	7.3	5.45	5.70	+5	6.03	+11

$$|\overline{\Delta v_f A}| = 2.7 \%$$

$$|\overline{\Delta v_f B}| = 5.3 \%$$

3. 120° zifter

Gebied 1 Benaderd profiel: $v_f = 3.15 \text{ m/s}$, het gemiddelde van de meetpunten in dit gebied.

Meegenomen meetpunten:

y (cm)	x' (cm)	v _{gem} (m/s)	Δv _f (%)
-6.7	2.0	3.35	+6.3
	4.0	3.3	+ 4.8
	6.0	3.0	- 4.7
-4.7	0.7	3.2	+ 1.6
	3.4	3.4	+ 7.9
	5.9	2.9	- 7.9
-2.7	0,3	3.4	+ 7.9
	2.0	3.4	+ 7.9

(vervolg)

y (cm)	x' (cm)	v _{gem} (m/s)	Δv _f (%)
-2.7	4.0	3.0	- 4.7
	6.0	2.45	-22.0
-0.7	0.6	4.05	+28.6
	2.3	3.4	+ 7.9
	3.6	3.05	- 3.1
	5.5	2.35	-25.4

$$|\overline{\Delta v_f}| = 10 \%$$

Gebied 2 Benaderd profiel: $v_f = 3.13$ m/s, het gemiddelde van de meetpunten die indit gebied liggen. Hieronder staat de vergelijking van deze benadering met de meetpunten.

y (cm)	x' (cm)	v _{gem} (m/s)	Δv _f (%)
1.3	1.5	4.0	+27.8
	3.0	3.3	+ 5.4
	5.3	2.5	-20.1
3.3	3.0	3.7	+18.2
	5.0	3.2	+ 2.2
	7.0	2.3	-26.5
5.3	4.0	3.5	+11.8
	6.0	3.1	- 0.9
	8.0	2.55	-18.5

$$|\overline{\Delta v_f}| = 14.6 \%$$

Gebied 3 Benaderd profiel: $v_f = 2$ m/s, het gemiddelde van de meetpunten in dit gebied. Zie onderstaande tabel.

y (cm)	x' (cm)	v _{gem} (m/s)	Δv _f (%)
-0.7	5.5	2.35	+17.5
1.3	7.0	2.0	0
3.3	7.0	2.3	+15
	10.1	1.7	-15
5.3	10.2	2.05	+ 2.5

$$|\overline{\Delta v_f}| = 10 \%$$

Gebied 4 = gebied 1: benaderd profiel: $v_f = 3.15$ m/s.

IJking annubar van de 120° zifter

<u>ΔP (mm H₂O)</u>	<u>1000*Q_f (m³/s)</u>
1.39	6.57
2.15	8.74
2.91	9.86
4.73	13.11
5.01	13.11
7.53	16.10
8.15	17.47
12.5	21.84
17.5	26.21
23.5	30.58
29.75	34.95
36.25	39.32
44.5	43.69
53.5	48.06
63.8	52.43
73.5	55.92

Methode ijking : m.b.v. rotameter

Type nr. annubar: 713-316-ss

Serie nr. : 102276

Zie figuur A4 (pagina A40)

Fig. A4

Yking Annubar
Seri no. 102276

- A. Savelsberg
- egen meting

$$\log Q_F = 0.5331 \log \Delta P - 2.2467$$

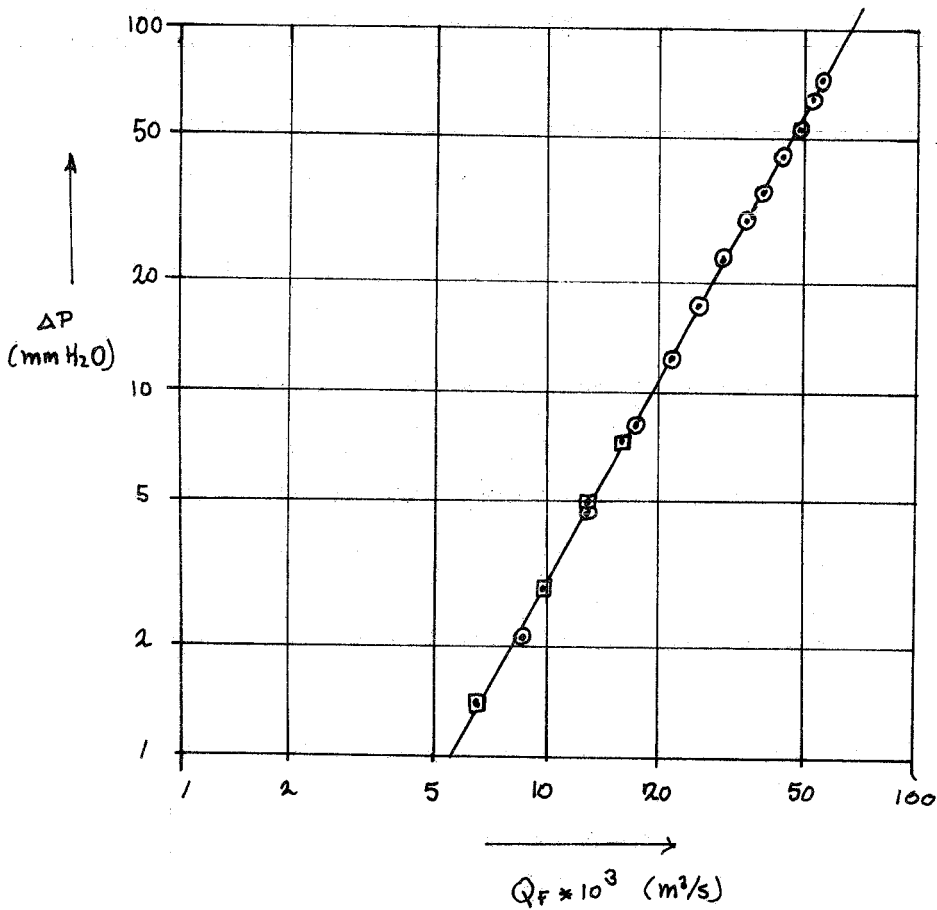
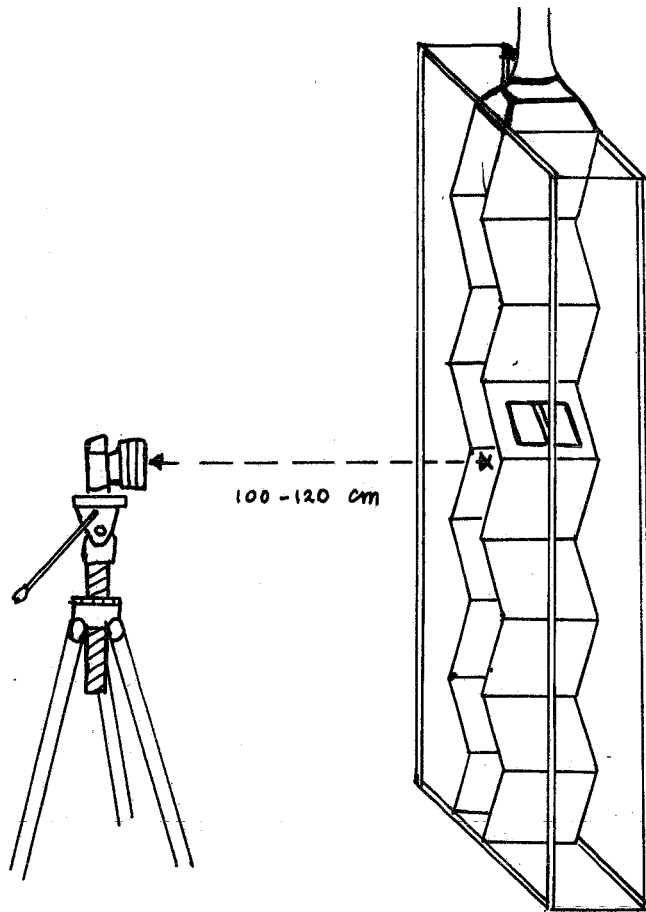


Fig 8.



Camera opstelling
(loodrecht glazen voorplaat)

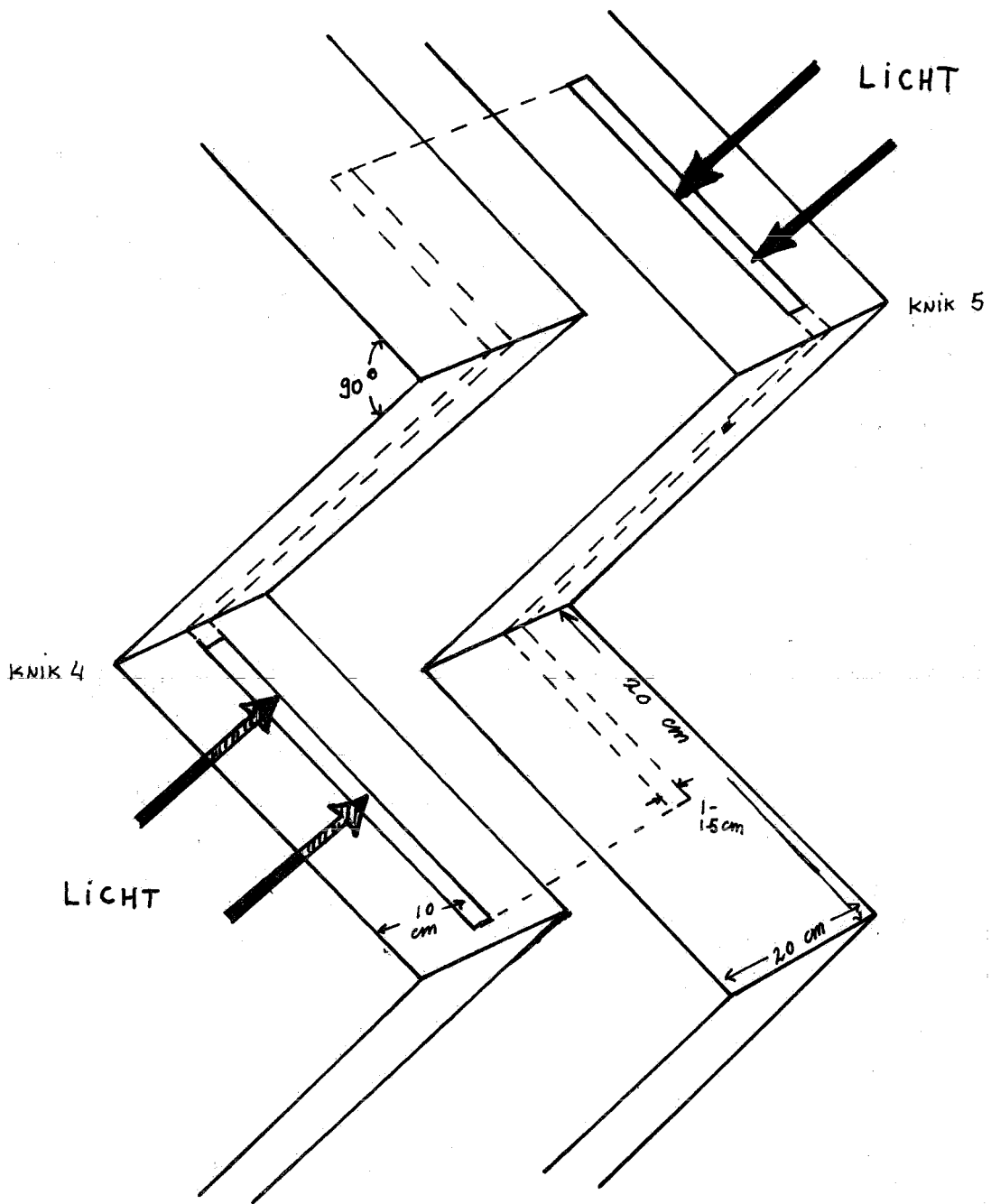


Fig 9 Belichting 90° rafter

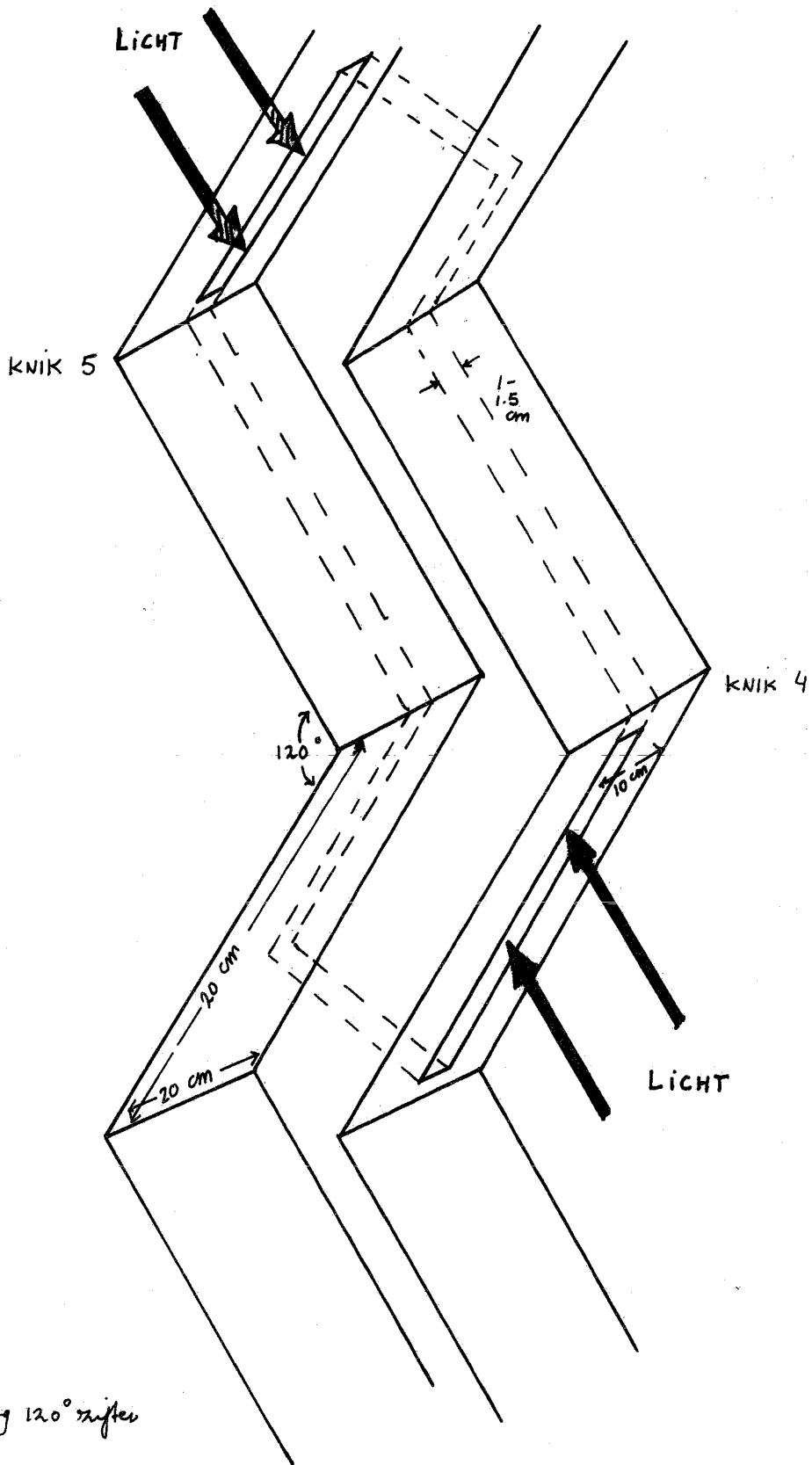


Fig 10 Belichting 120° miften

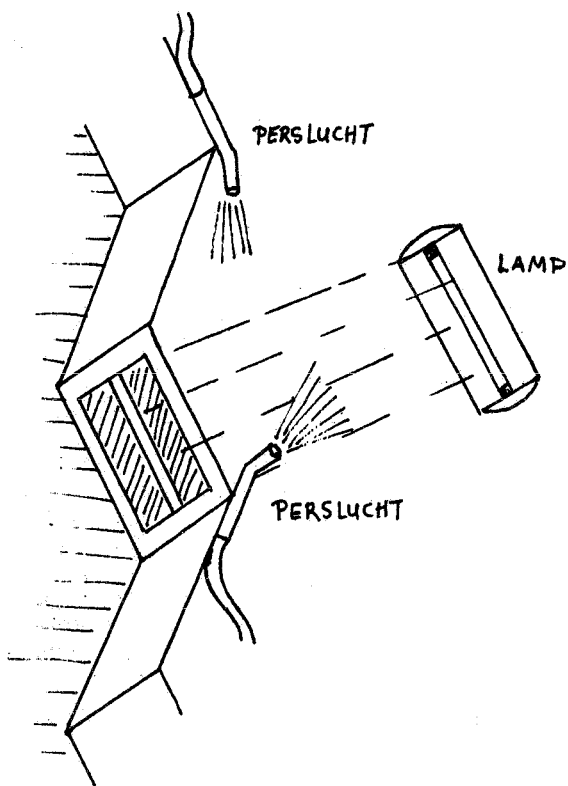


Fig. 11

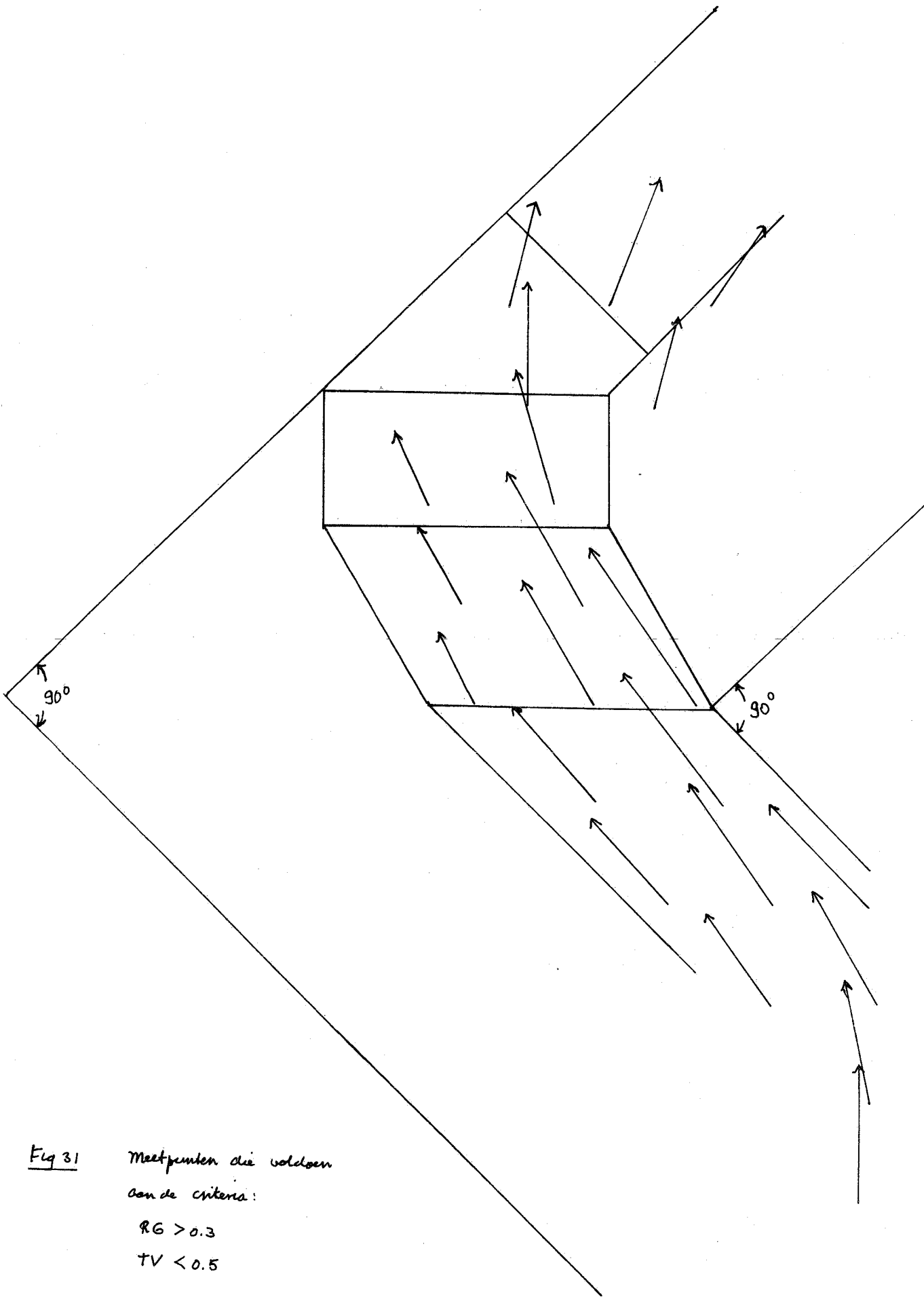


Fig 31 Meetpunten die voldoen
aan de criteria:
 $RG > 0.3$
 $TV < 0.5$

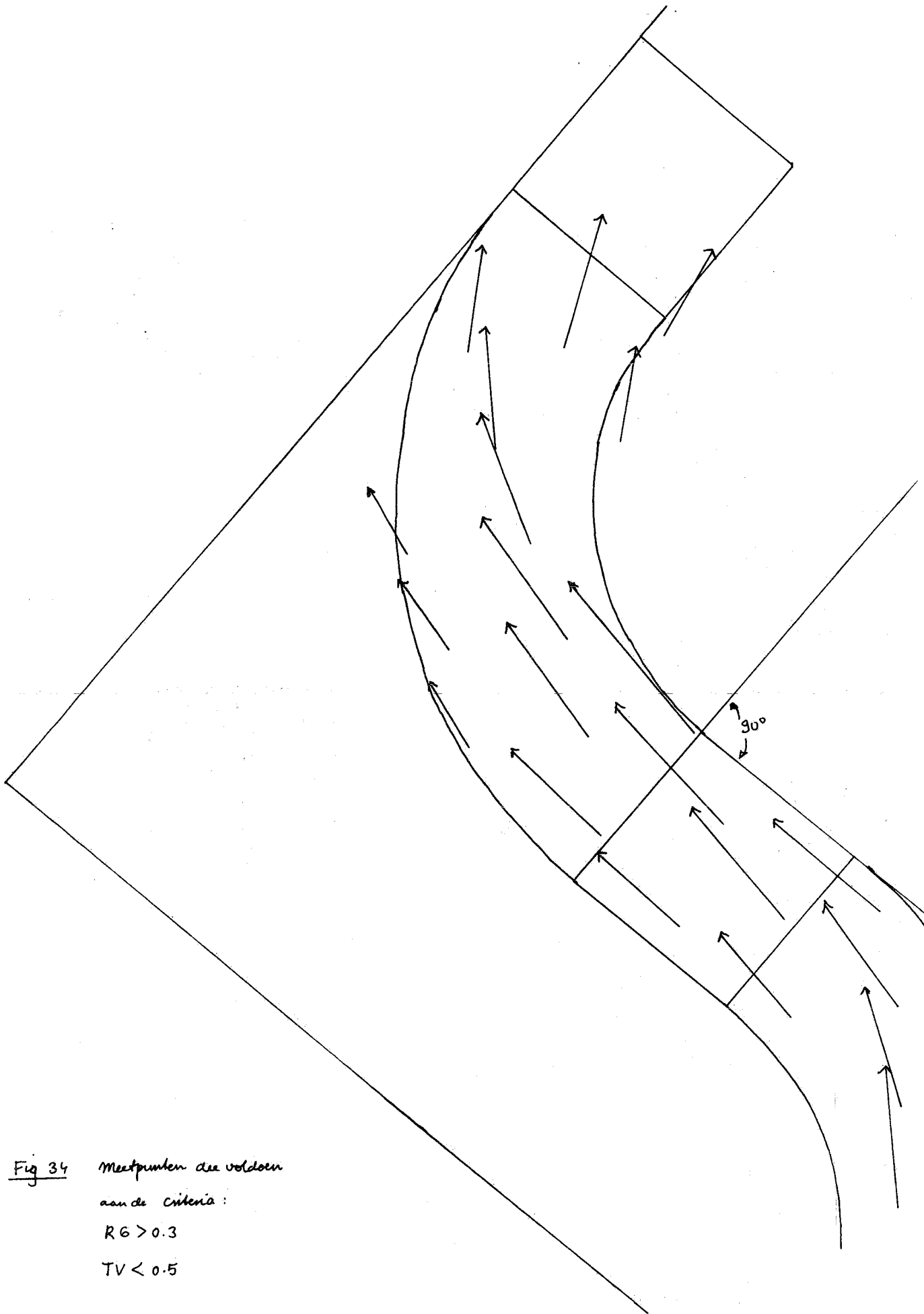


Fig 34 Meetpunten die voldoen
aan de criteria:
 $RG > 0.3$
 $TV < 0.5$

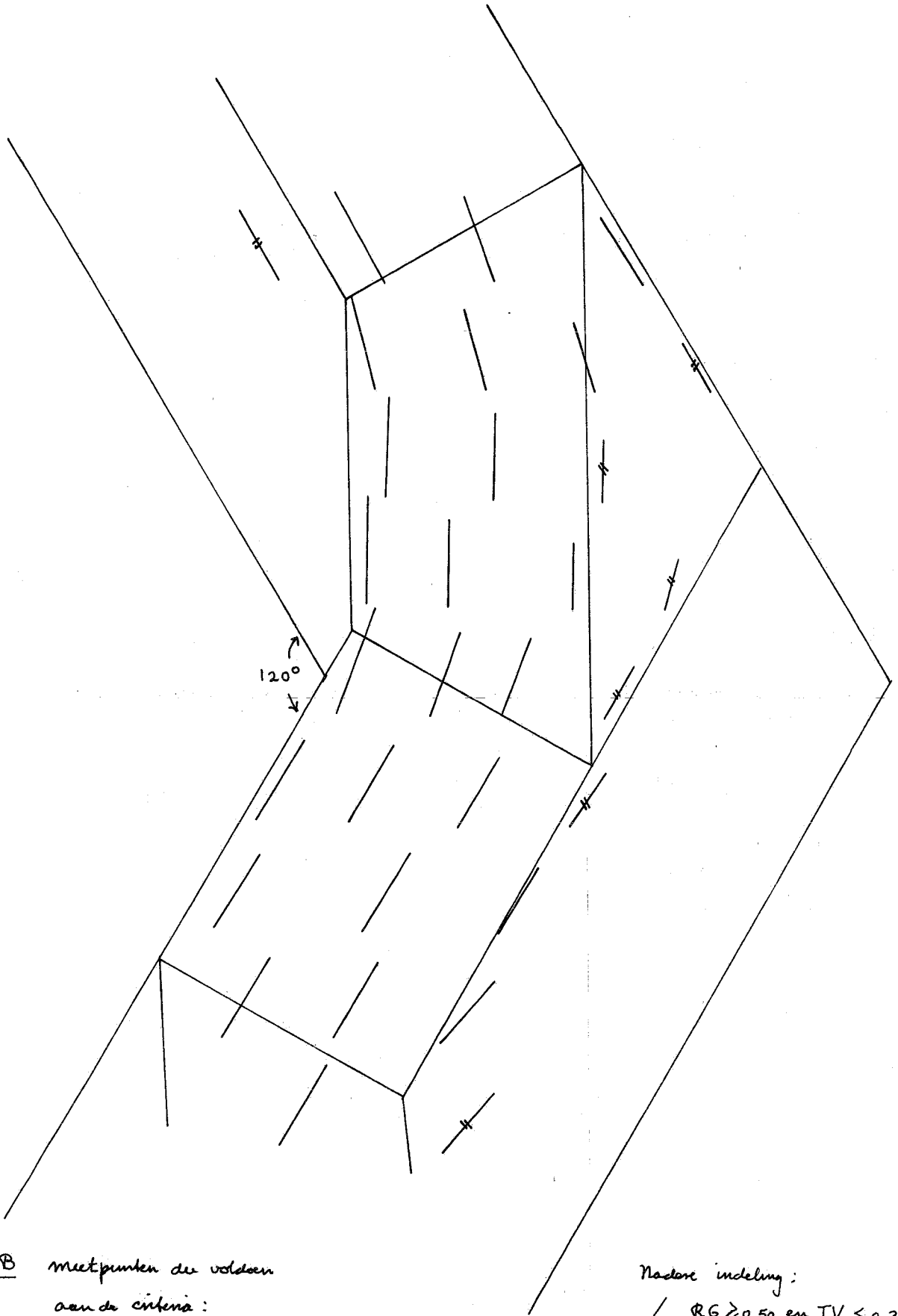


Fig 37 B meetpunten die voldoen
aan de criteria:
 $RG \geq 0.45$
 $TV \leq 0.35$

Naast de indeling:
/ $RG \geq 0.50$ en $TV < 0.30$
≠ $RG \geq 0.45$ maar < 0.50
 $TV \leq 0.35$ maar ≥ 0.30

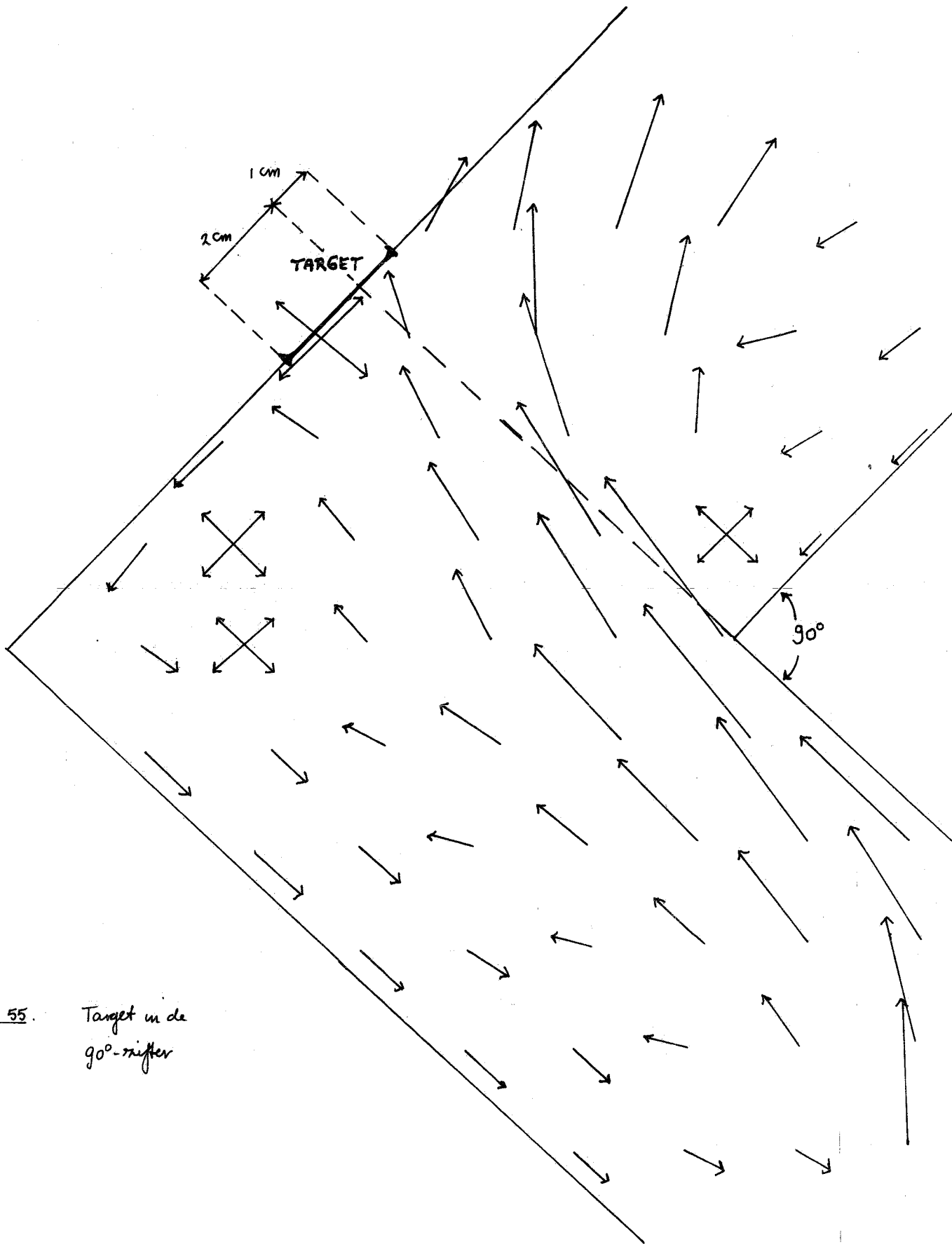


Fig 55. Target in de 90°-nifler

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $V_{p0} = 52.5 \text{ cm/s}$
- ② $V_{p0} = 97.5 \text{ ''}$
- ③ $V_{p0} = 142.5 \text{ ''}$
- ④ $V_{p0} = 187.5 \text{ ''}$
- ⑤ $V_{p0} = 232.5 \text{ ''}$

$[1 - P_d]_{0.4/m} \text{ ⑤} = 0.29$

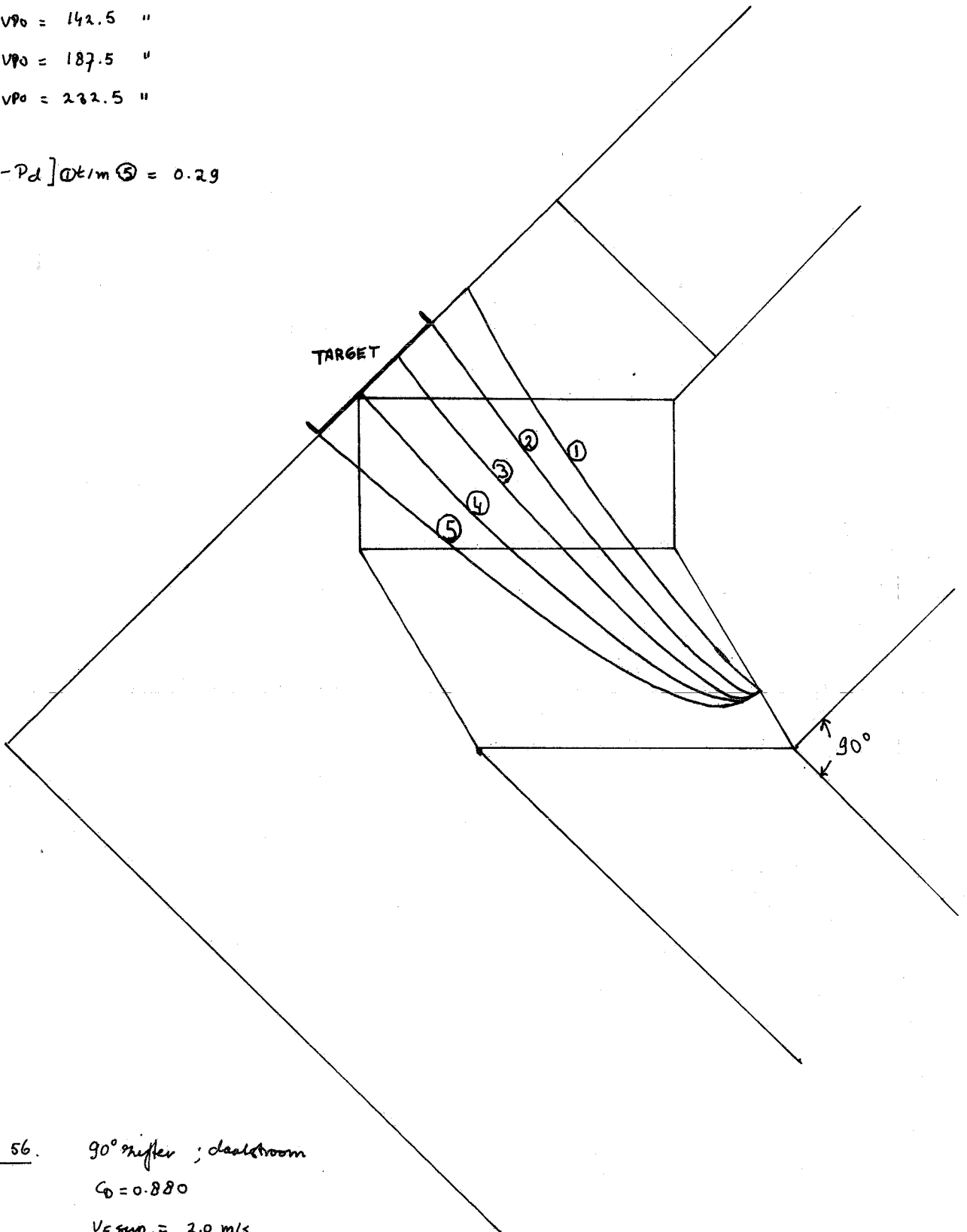


Fig 56. 90° diffuser ; ductroom
 $C_D = 0.880$
 $V_{F \text{ sup.}} = 2.0 \text{ m/s}$
 See §10.3.1.

- ① $y = 6.0 \text{ cm}$; $V_{P0} = 225 \text{ cm/s}$
- ② $y = 4.25 \text{ cm}$; $V_{P0} = 225 \text{ ''}$
- ③ $y = 2.75 \text{ cm}$; $V_{P0} = 225 \text{ ''}$

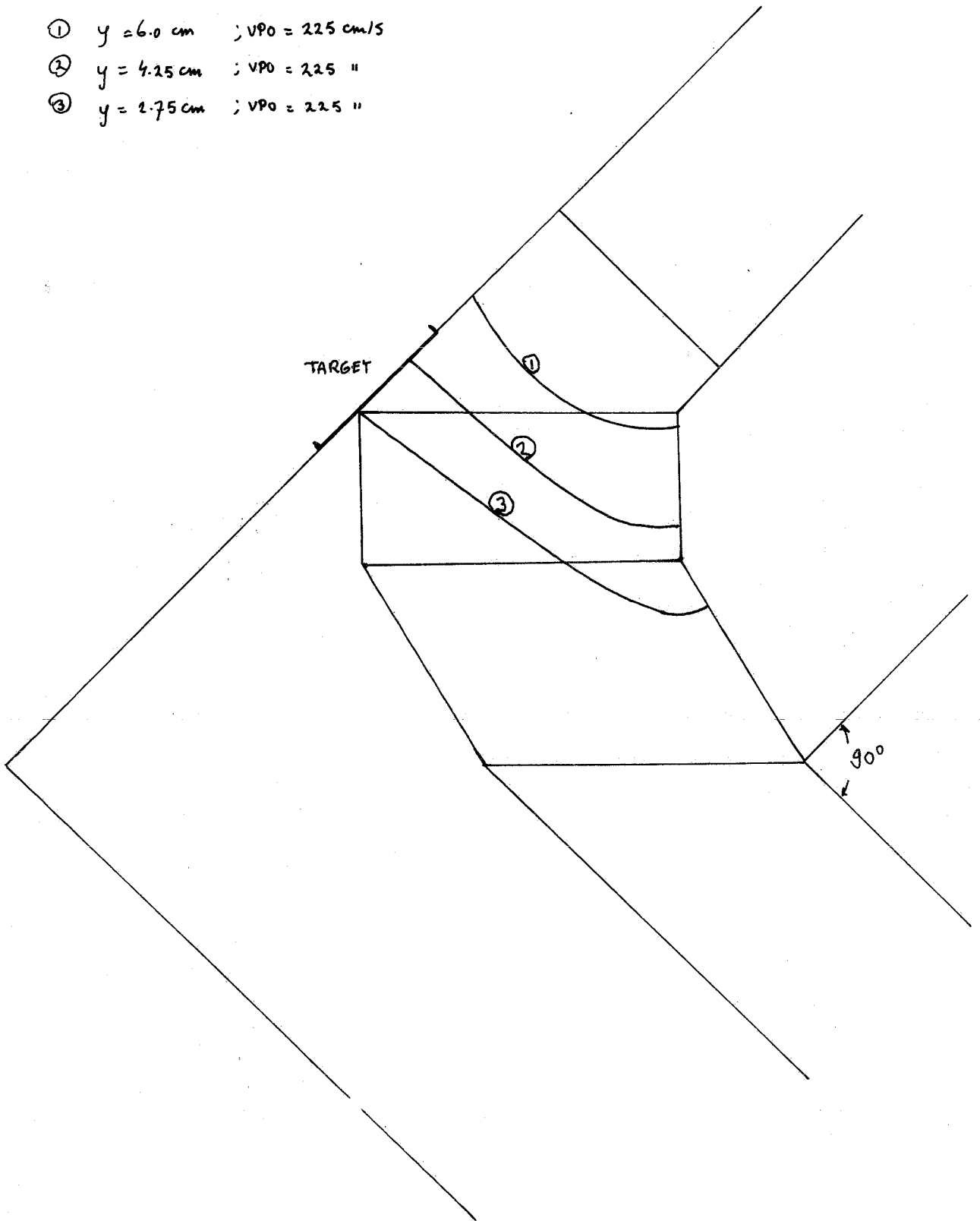


Fig 57

90° miter ; ductroom

$$C_D = 0.880$$

$$V_{F \text{ sup.}} = 2.0 \text{ m/s}$$

the § 10.3.1.

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $V_{p0} = 52.5 \text{ cm/s}$
- ② $V_{p0} = 97.5 \text{ cm/s}$
- ③ $V_{p0} = 142.5 \text{ cm/s}$
- ④ $V_{p0} = 187.5 \text{ cm/s}$
- ⑤ $V_{p0} = 232.5 \text{ cm/s}$

$[1-P_d]_{①} t/m_{⑤} = 0.29$

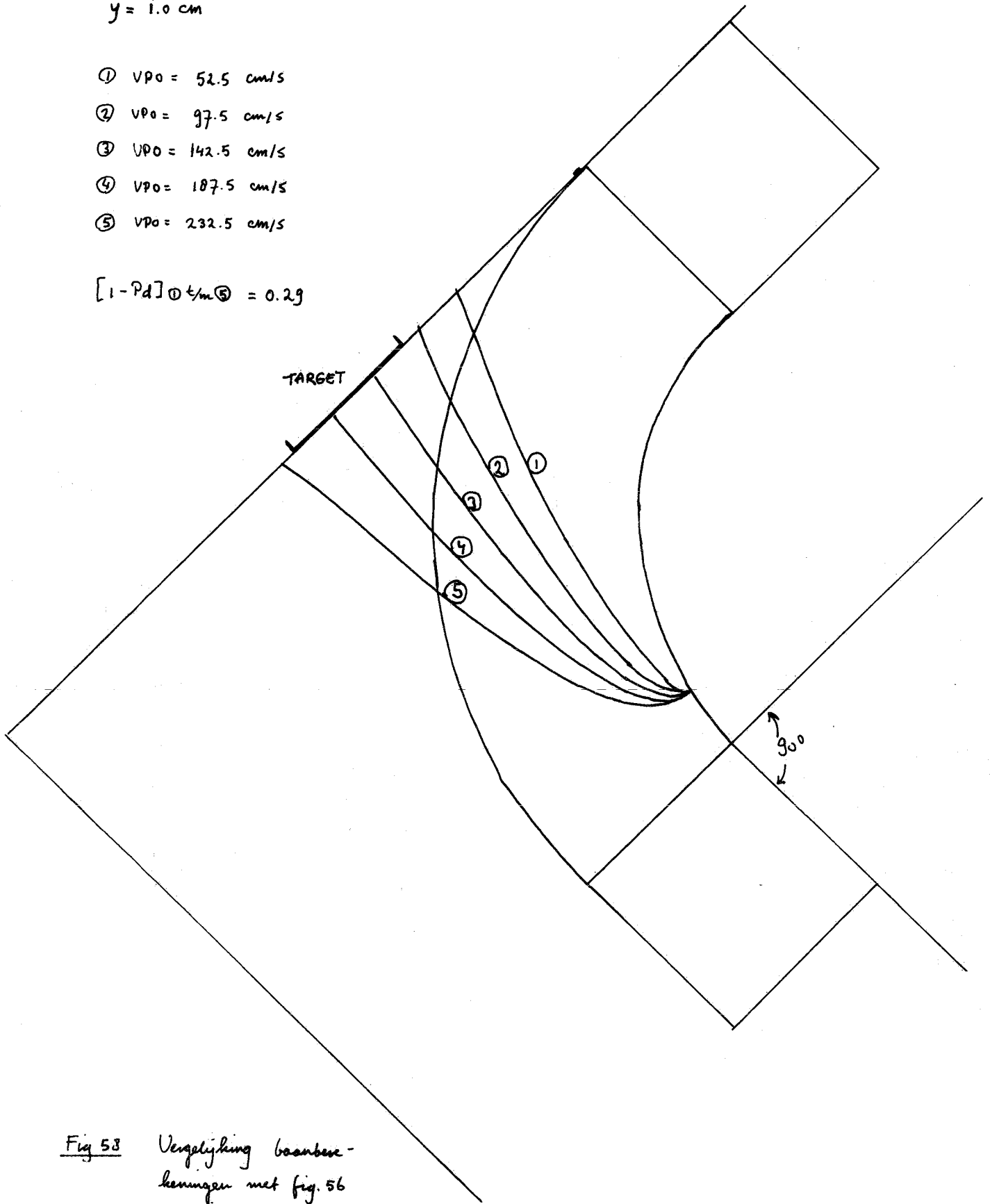


Fig 53

Vergelijking baanbe-
keningen met fig. 56

90° nuffer, daalstroom

$C_f = 0.88$; $V_{f \text{ sup}} = 2.0 \text{ m/s}$

zie § 10.2.2.

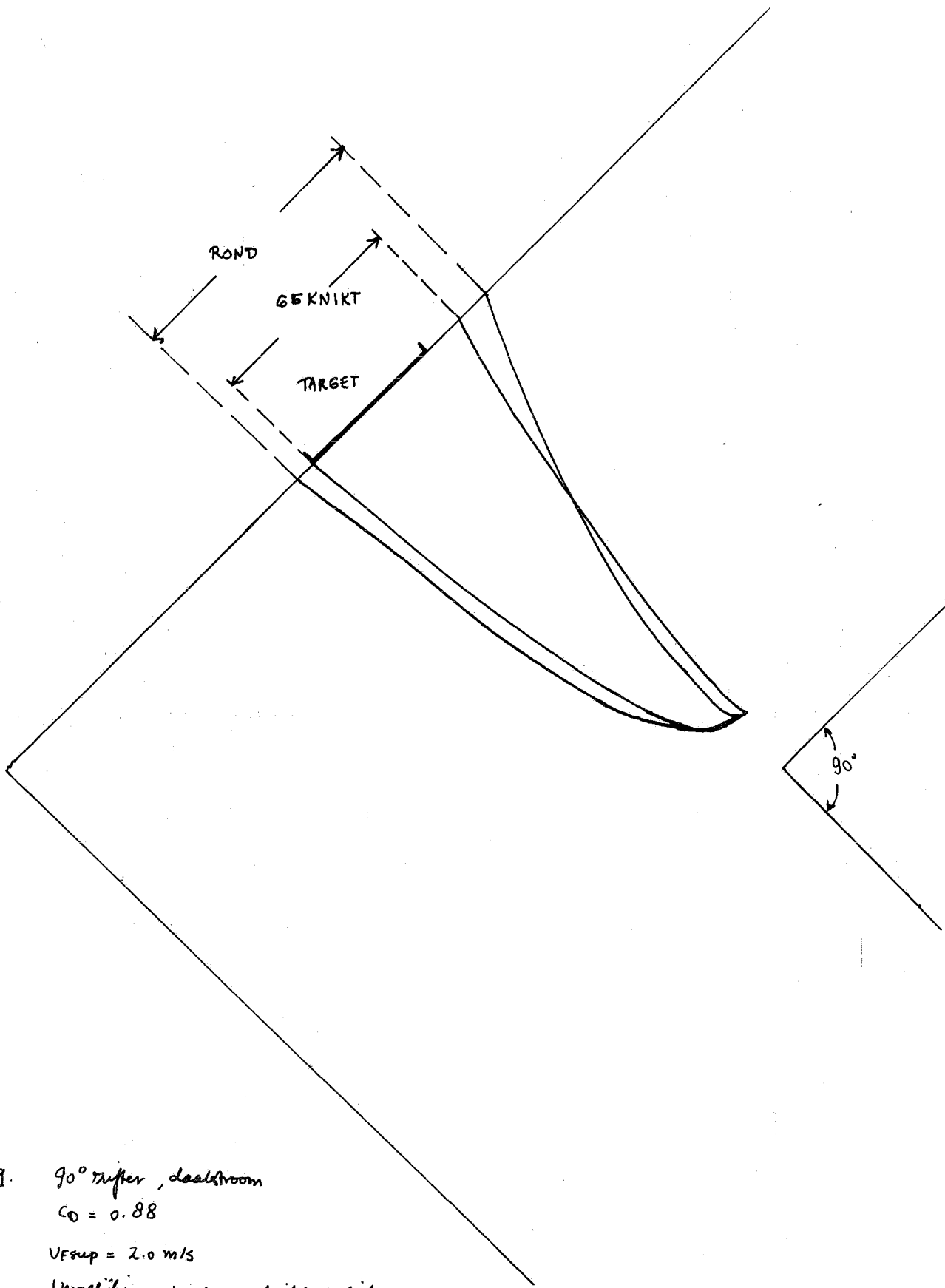


Fig 59.

90° muffer, daalstroom

$$C_D = 0.88$$

$$V_{\text{foup}} = 2.0 \text{ m/s}$$

Vergelijking ronde - geknikte profiel

(fig 56 en fig 52)

zie § 10.3.2.

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $v_{p0} = 52.5 \text{ cm/s}$
- ② $v_{p0} = 97.5 \text{ cm/s}$
- ③ $v_{p0} = 142.5 \text{ cm/s}$
- ④ $v_{p0} = 187.5 \text{ cm/s}$
- ⑤ $v_{p0} = 232.5 \text{ cm/s}$

$[1-Pd] \text{①} \text{②} \text{③} = 0.29$

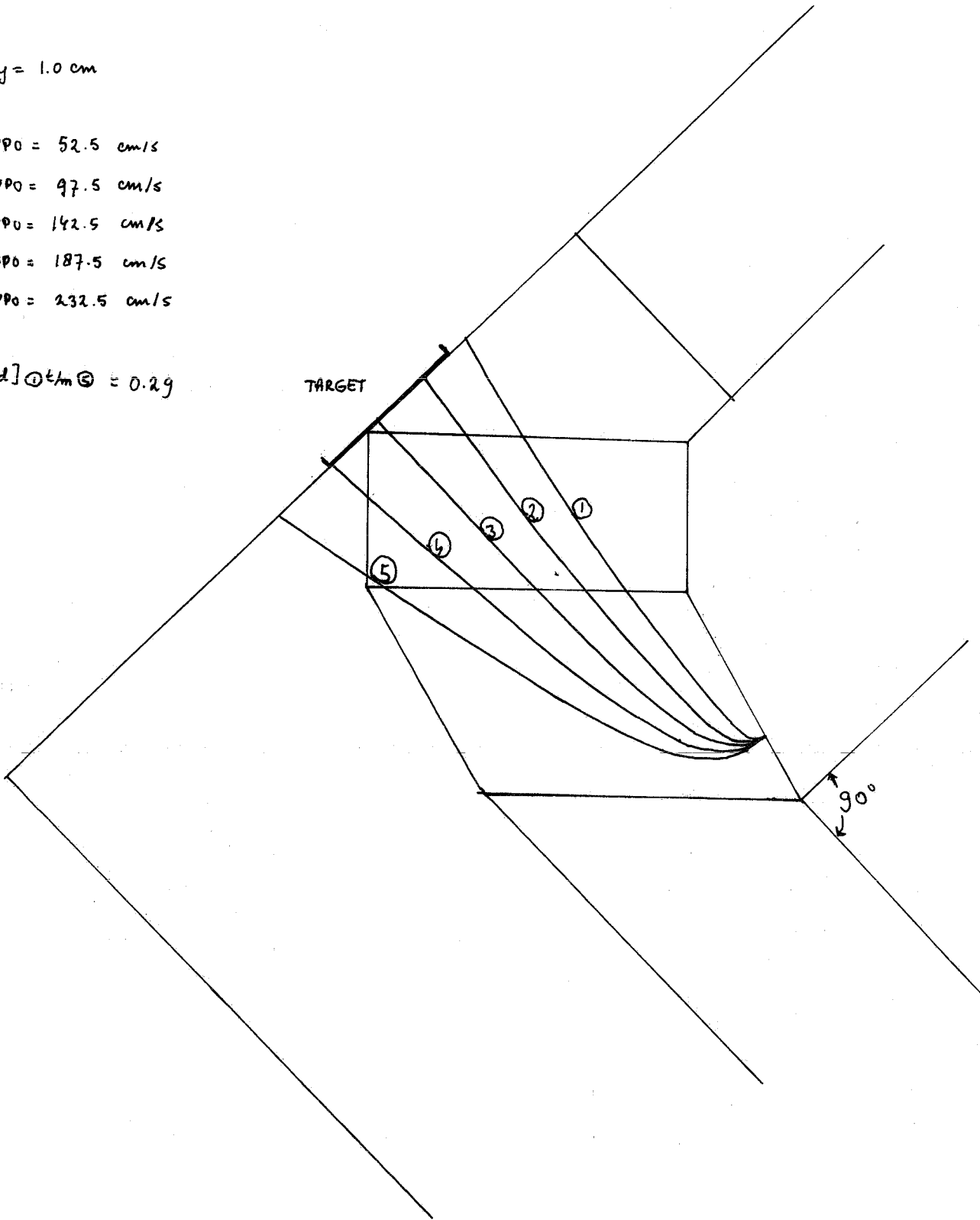


Fig 60 90° rafter, daalstroom

$C_D = 0.75$

$v_{F \text{ sup.}} = 2.0 \text{ m/s}$

zie § 10.3.3.

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 210 \text{ cm/s}$
- ② " $V_{p0} = 50 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 2.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 30 \text{ cm/s}$
- ④ $d = "$ $V_{p0} = 190 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 3.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 190 \text{ cm/s}$

$[1 - P_s]_{\text{total}} = 0.67$

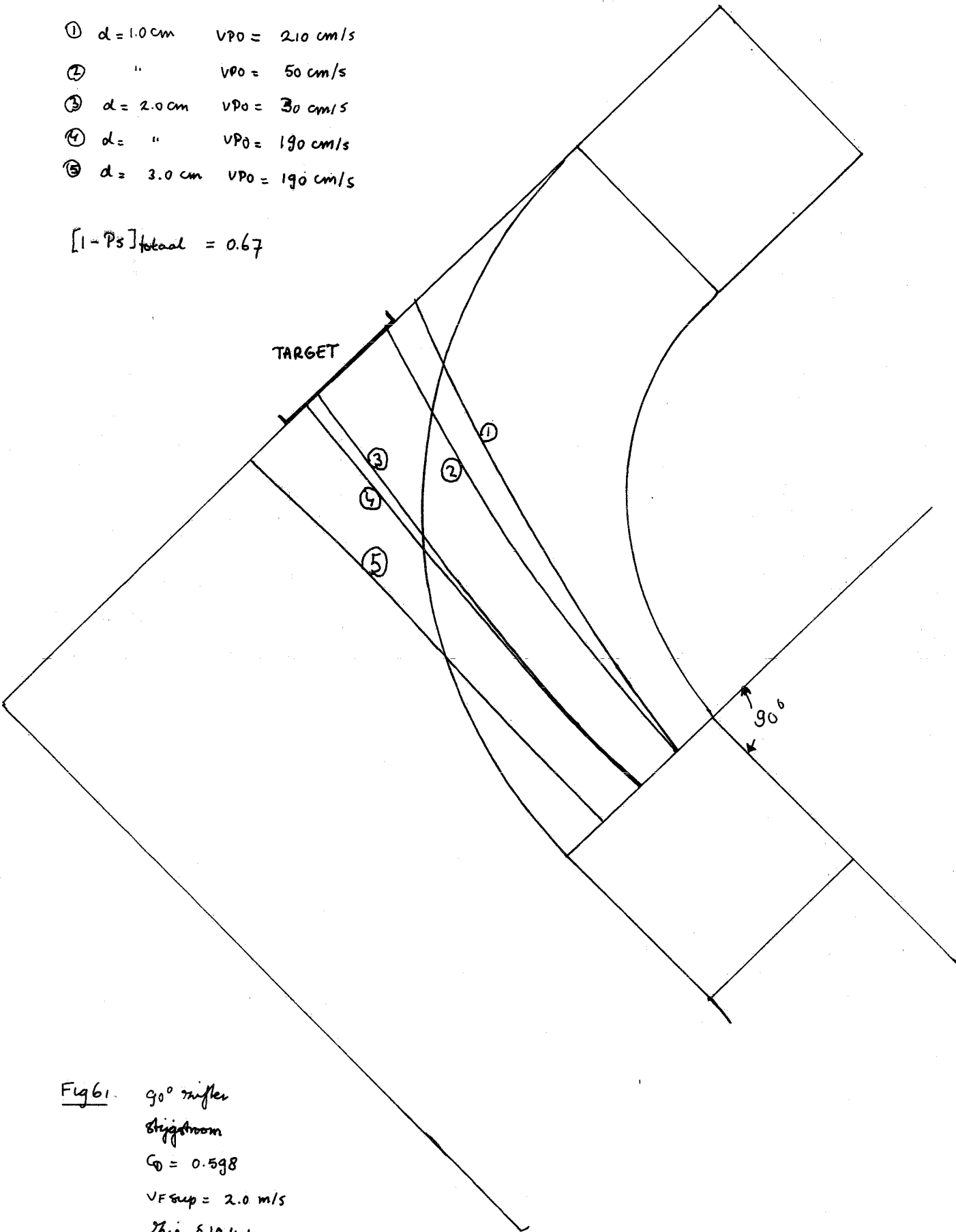


Fig 61. 90° rifler
Stigghorn
 $C_D = 0.598$
 $V_{f \text{ sup}} = 2.0 \text{ m/s}$
The § 10.4.1.

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 210 \text{ cm/s}$
- ② $d = \text{"}$ $v_{p0} = 50 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 2.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 190 \text{ cm/s}$
- ④ $d = \text{"}$ $v_{p0} = 30 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 3.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 190 \text{ cm/s}$

$[1 - P_s]_{\text{totaal}} = 0.67$

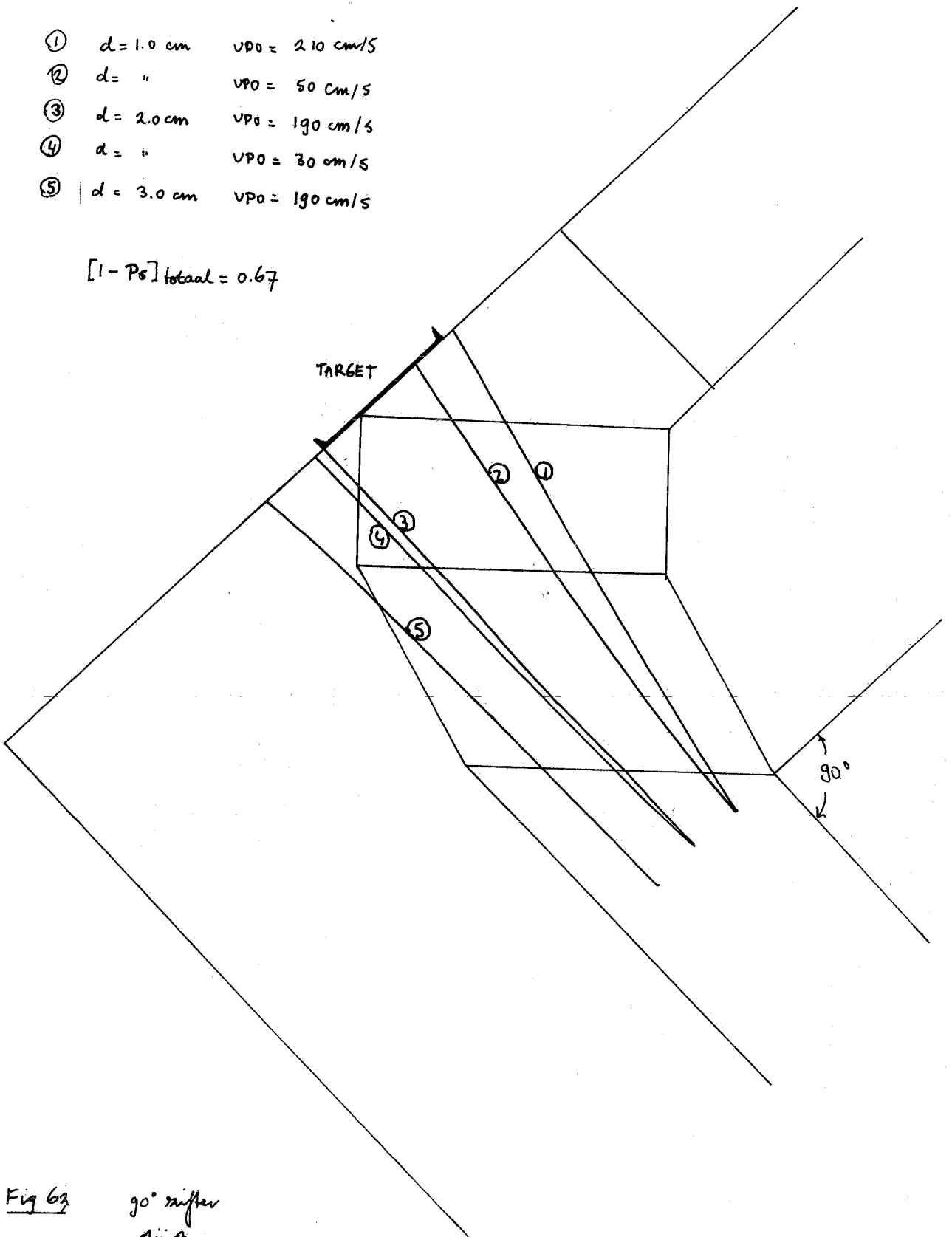


Fig 63

90° diffuser
stijgstrroom

$C_D = 0.598$

$v_{f \text{ sup}} = 2.0 \text{ m/s}$

zie § 10.4.2.

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 210 \text{ cm/s}$
- ② " $V_{p0} = 50 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 2.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 30 \text{ cm/s}$
- ④ $d = "$ $V_{p0} = 190 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 3.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 190 \text{ cm/s}$

$[1 - P_s]_{\text{totaal}} = 0.67$

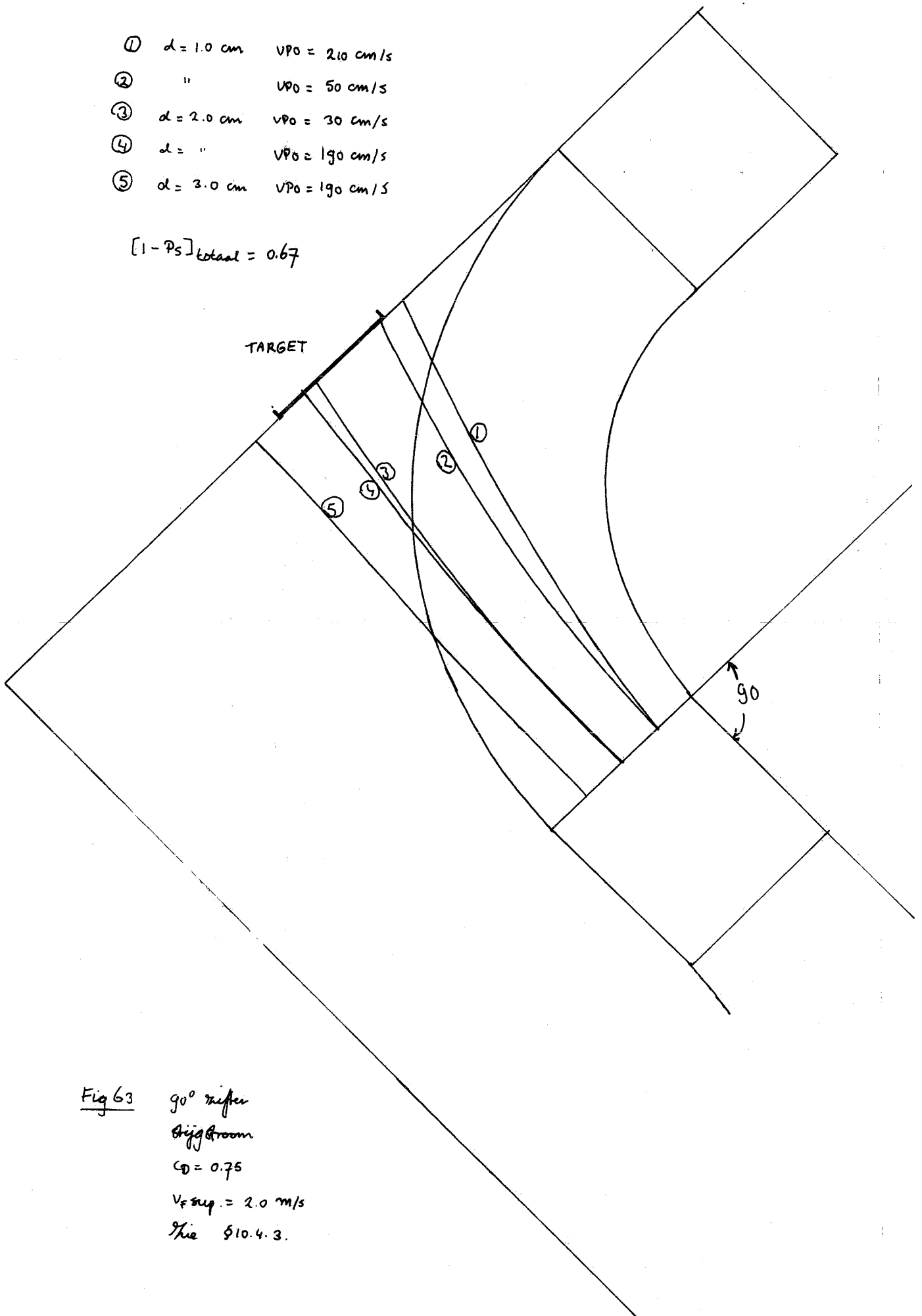


Fig 63 90° riefen
Biggboom
 $C_D = 0.75$
 $V_{\text{sup}} = 2.0 \text{ m/s}$
The $\phi 10.4.3.$

$y = 0.5 \text{ cm}$

① $V_{P0} = 40 \text{ cm/s}$

② $V_{P0} = 80 \text{ cm/s}$

③ $V_{P0} = 120 \text{ cm/s}$

$[Pd]_{y=0.5} = 0.50$

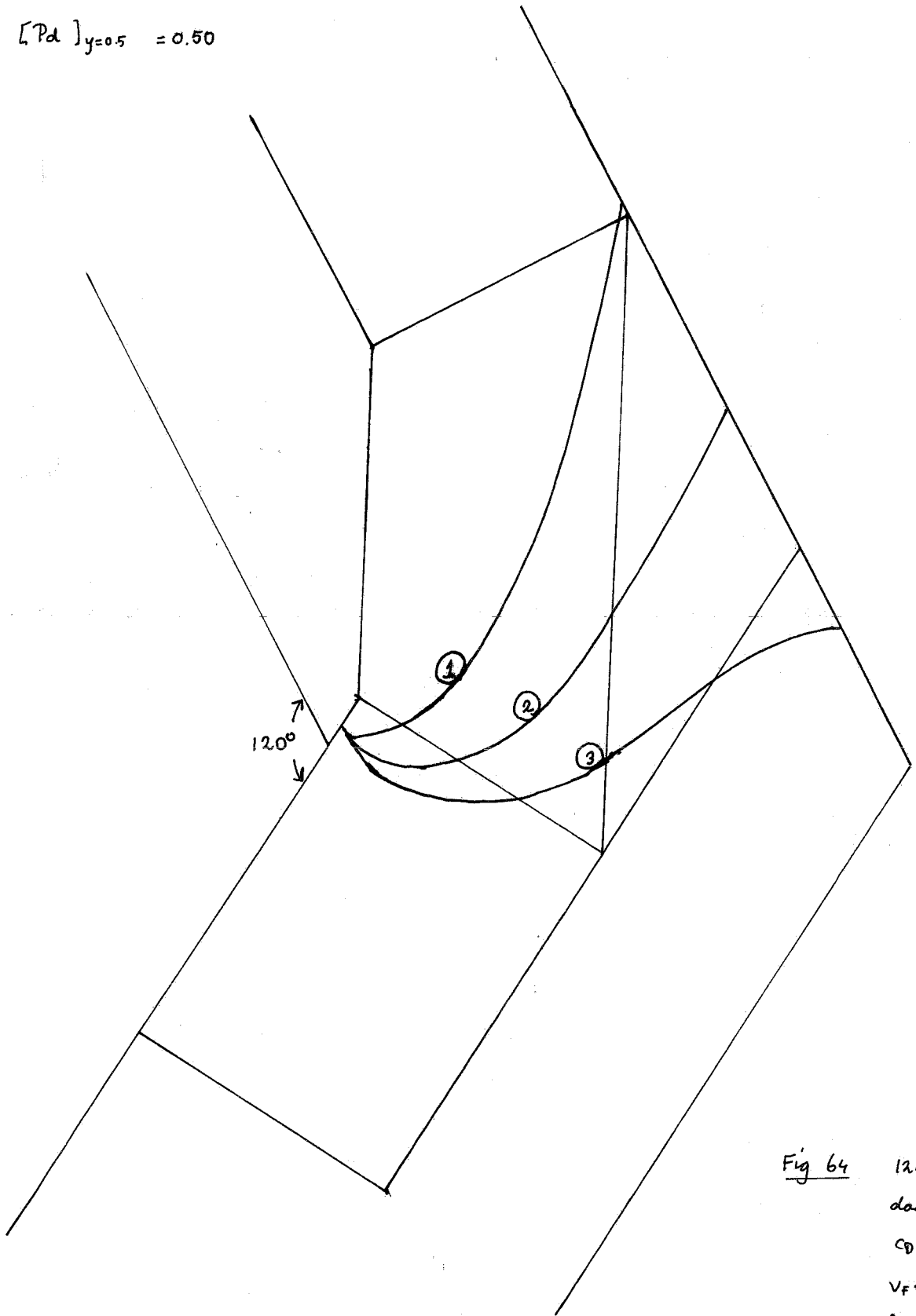


Fig 64 120° diffuser
ductroom

$C_D = 1.04$

$V_{f \text{ sup}} = 1.56 \text{ m/s}$

The § 10.5.1

$y = 0.5 \text{ cm}$

- ① $V_{p0} = 40 \text{ cm/s}$
- ② $V_{p0} = 80 \text{ cm/s}$
- ③ $V_{p0} = 120 \text{ cm/s}$

$[Pd]_{y=0.5} = 0.50$

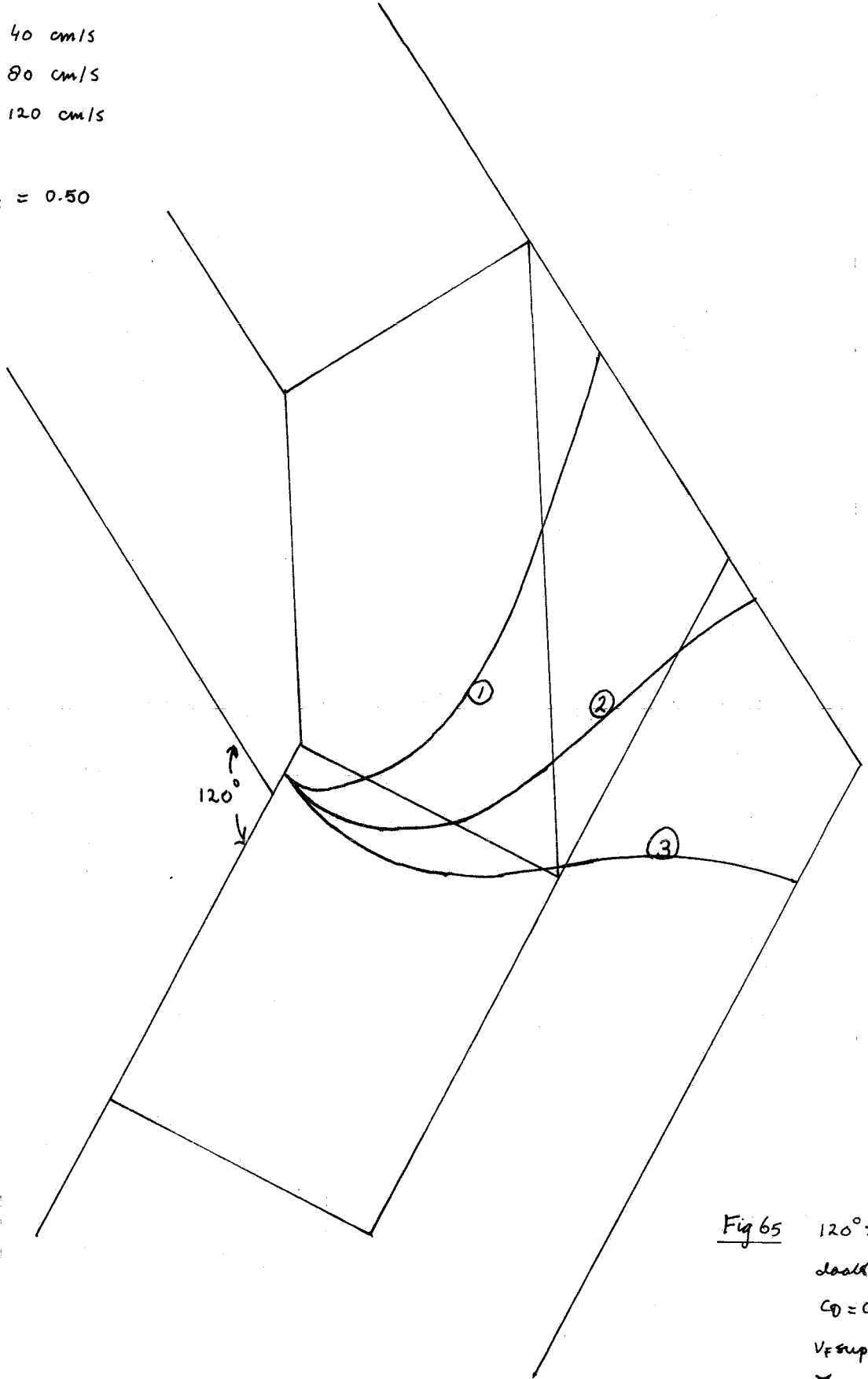




Fig 65 120° diffuser
ductroom
 $C_D = 0.75$
 $V_{f \text{ sup}} = 1.56 \text{ m/s}$
The § 10.5.2 .

zie fig 64 en 65

 $C_D = 1.04$

 $C_D = 0.75$

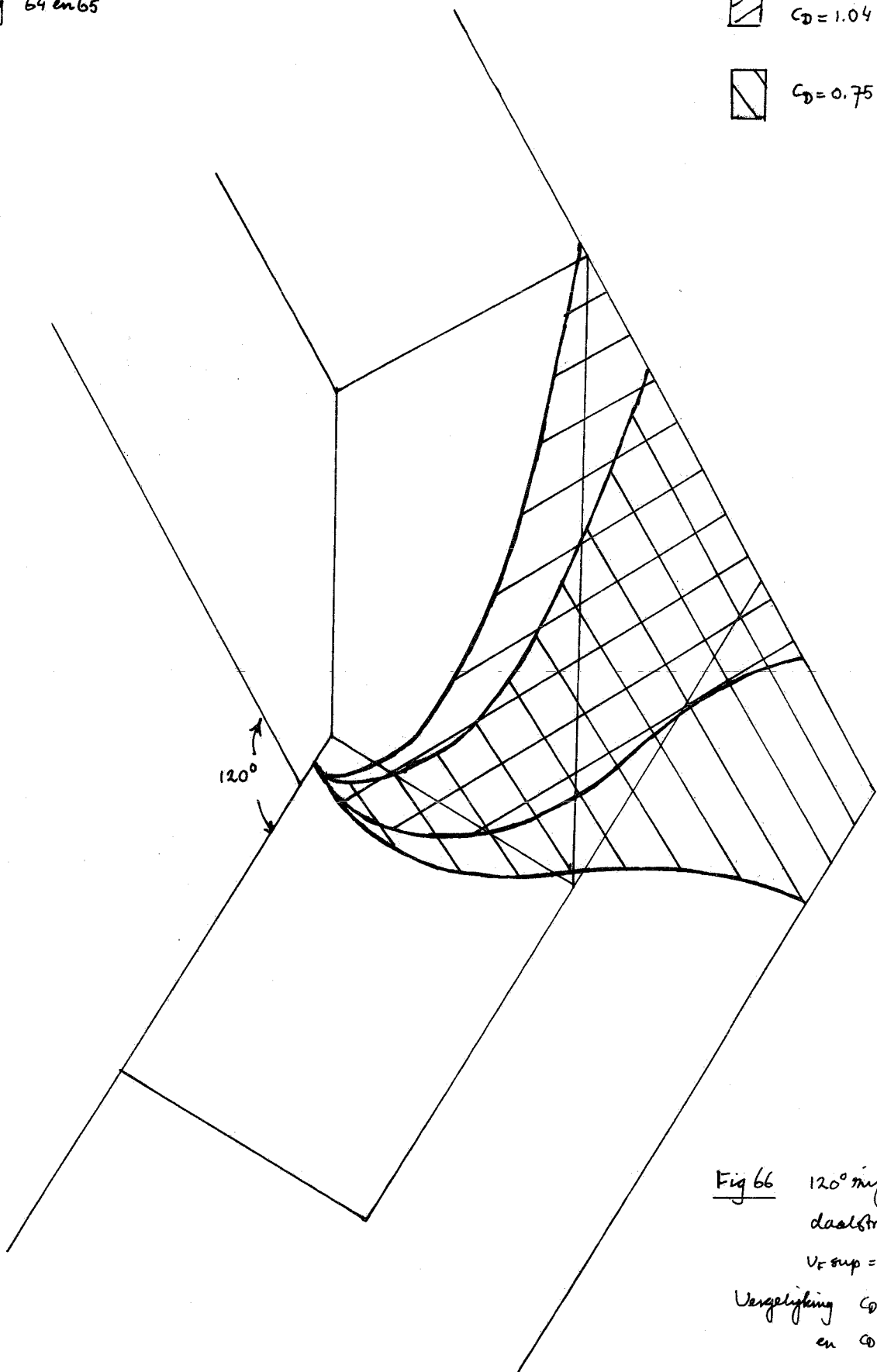
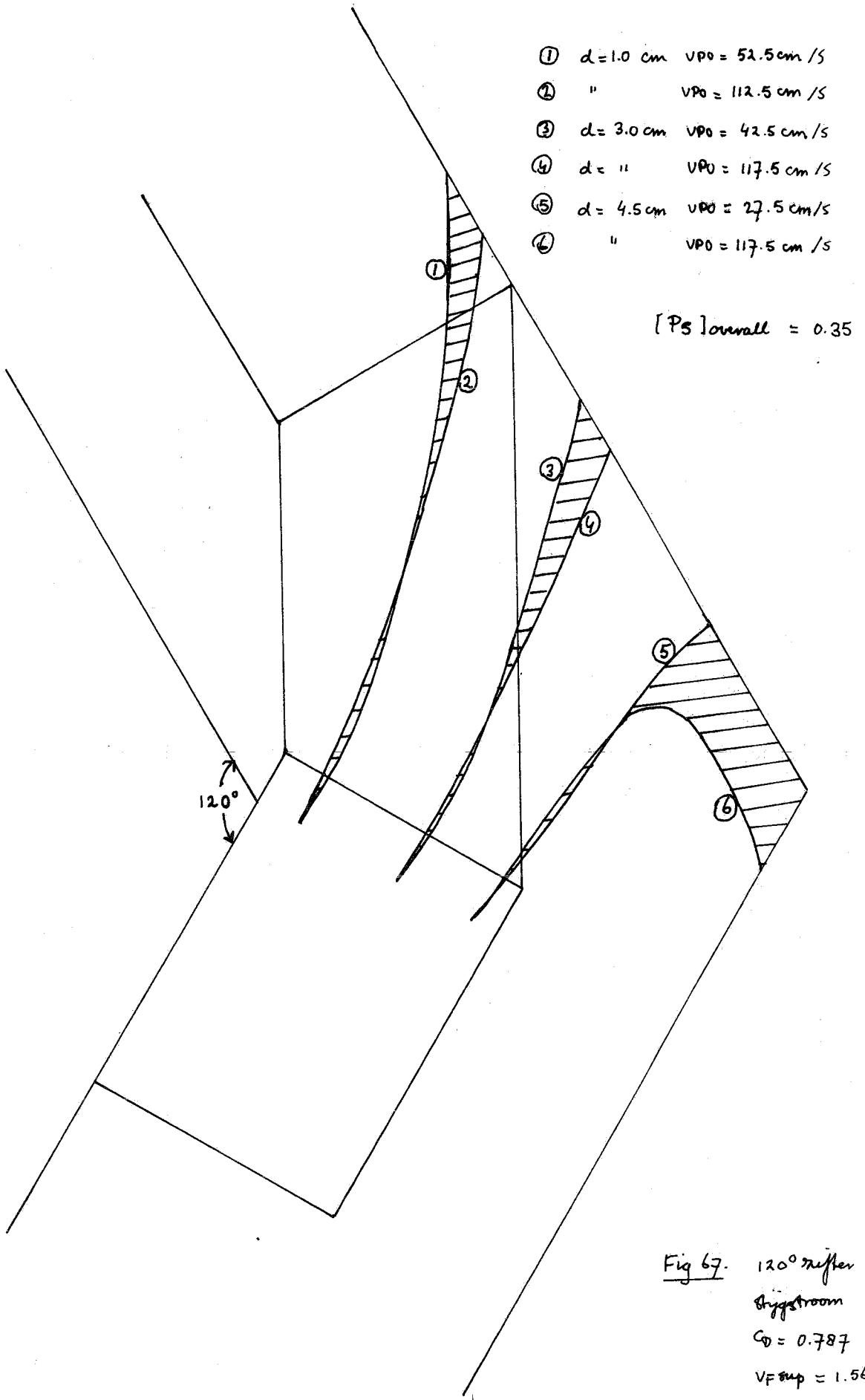


Fig 66 120° nifler
daalstroom
 $V_{f\ sup} = 1.56\ m/s$
Vergelijking $C_D = 0.75$
en $C_D = 1.04$

-A60-



- ① $y = 1.0 \text{ cm}$ $V_{PO} = 52.5 \text{ cm/s}$
- ② " $V_{PO} = 97.5 \text{ cm/s}$
- ③ " $V_{PO} = 142.5 \text{ cm/s}$
- ④ " $V_{PO} = 187.5 \text{ cm/s}$
- ⑤ " $V_{PO} = 232.5 \text{ cm/s}$

$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.75$

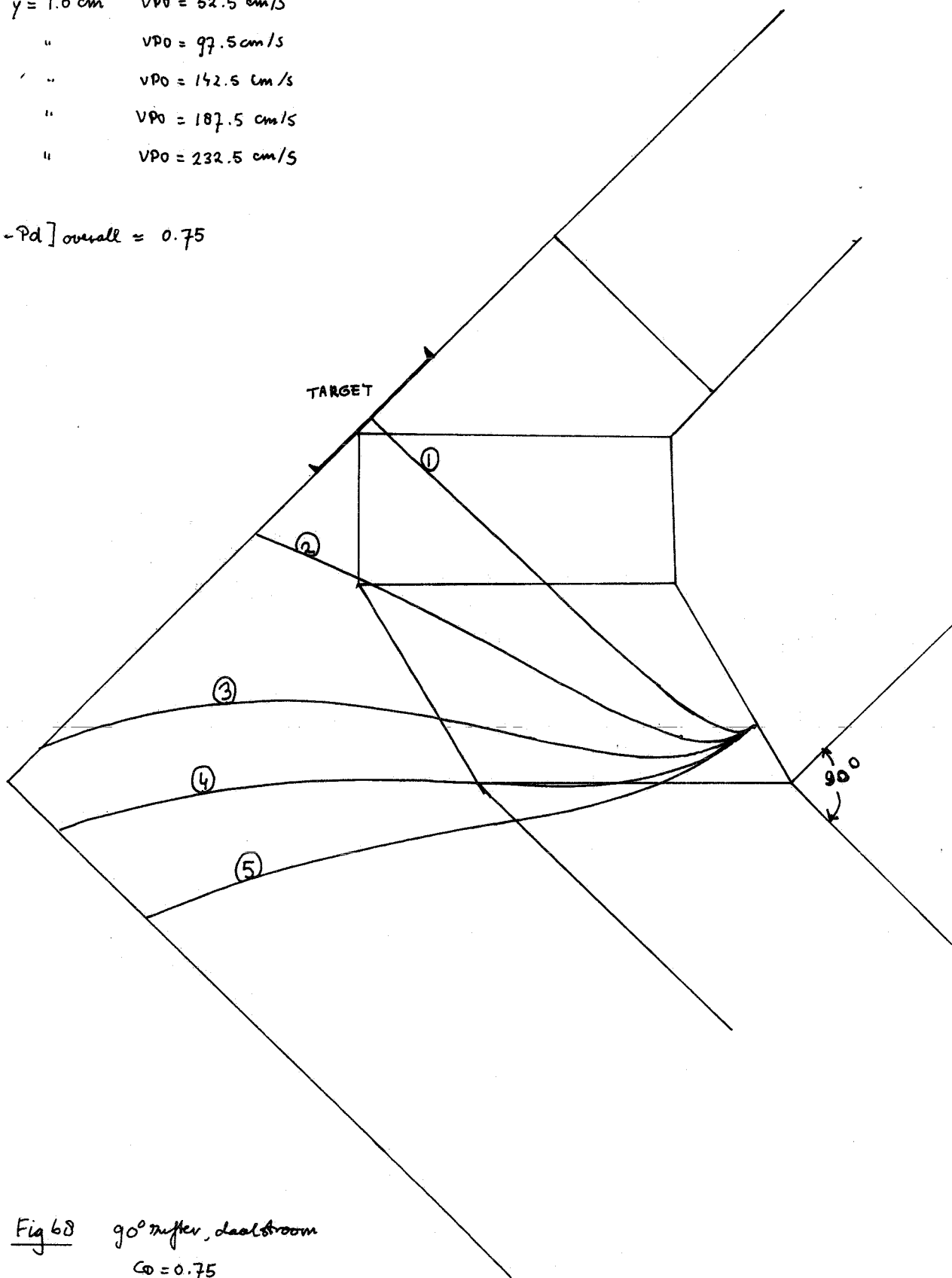


Fig 68 90° nifter, daalstroom
 $C_D = 0.75$
 $V_{f \text{ sup}} = 1.0 \text{ m/s}$
 $V_{PO} = \text{onafh. van } V_{f \text{ sup}}$
zie § 10.8.1.

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $V_{PO} = 26.3 \text{ cm/s}$
- ② $V_{PO} = 48.8 \text{ cm/s}$
- ③ $V_{PO} = 71.3 \text{ cm/s}$
- ④ $V_{PO} = 93.8 \text{ cm/s}$
- ⑤ $V_{PO} = 116.3 \text{ cm/s}$

$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.75$

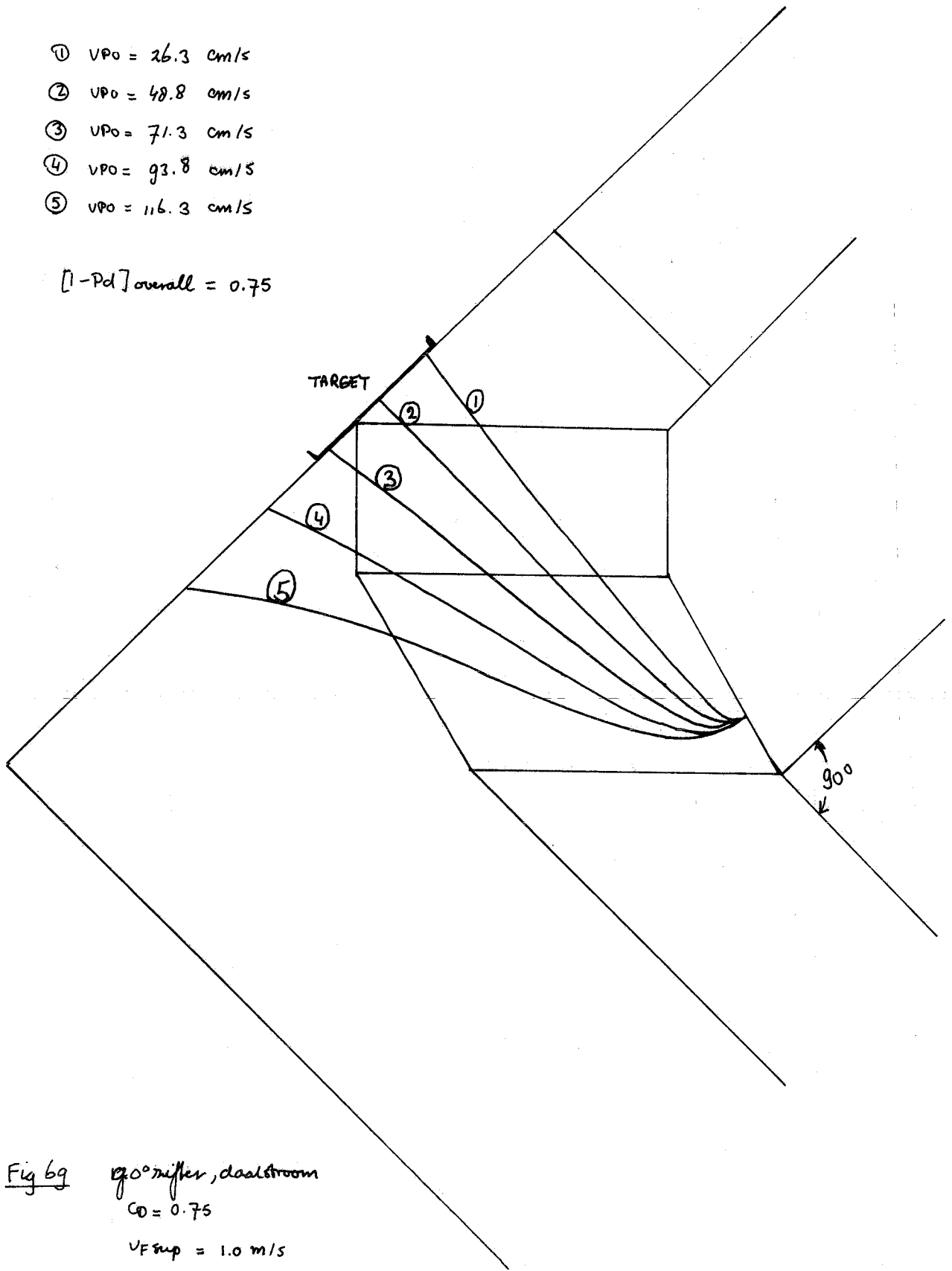


Fig 69

90° diffuser, dual stream

$C_D = 0.75$

$V_{F \text{ sup}} = 1.0 \text{ m/s}$

$V_{PO} = 1/2 V_{PD} \text{ (} V_F = 2.0 \text{ m/s)}$

Thi § 10.8.2.

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $v_{p0} = 52.5 \text{ cm/s}$
- ② $v_{p0} = 97.5 \text{ cm/s}$
- ③ $v_{p0} = 142.5 \text{ cm/s}$
- ④ $v_{p0} = 187.5 \text{ cm/s}$
- ⑤ $v_{p0} = 232.5 \text{ cm/s}$

$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.08$

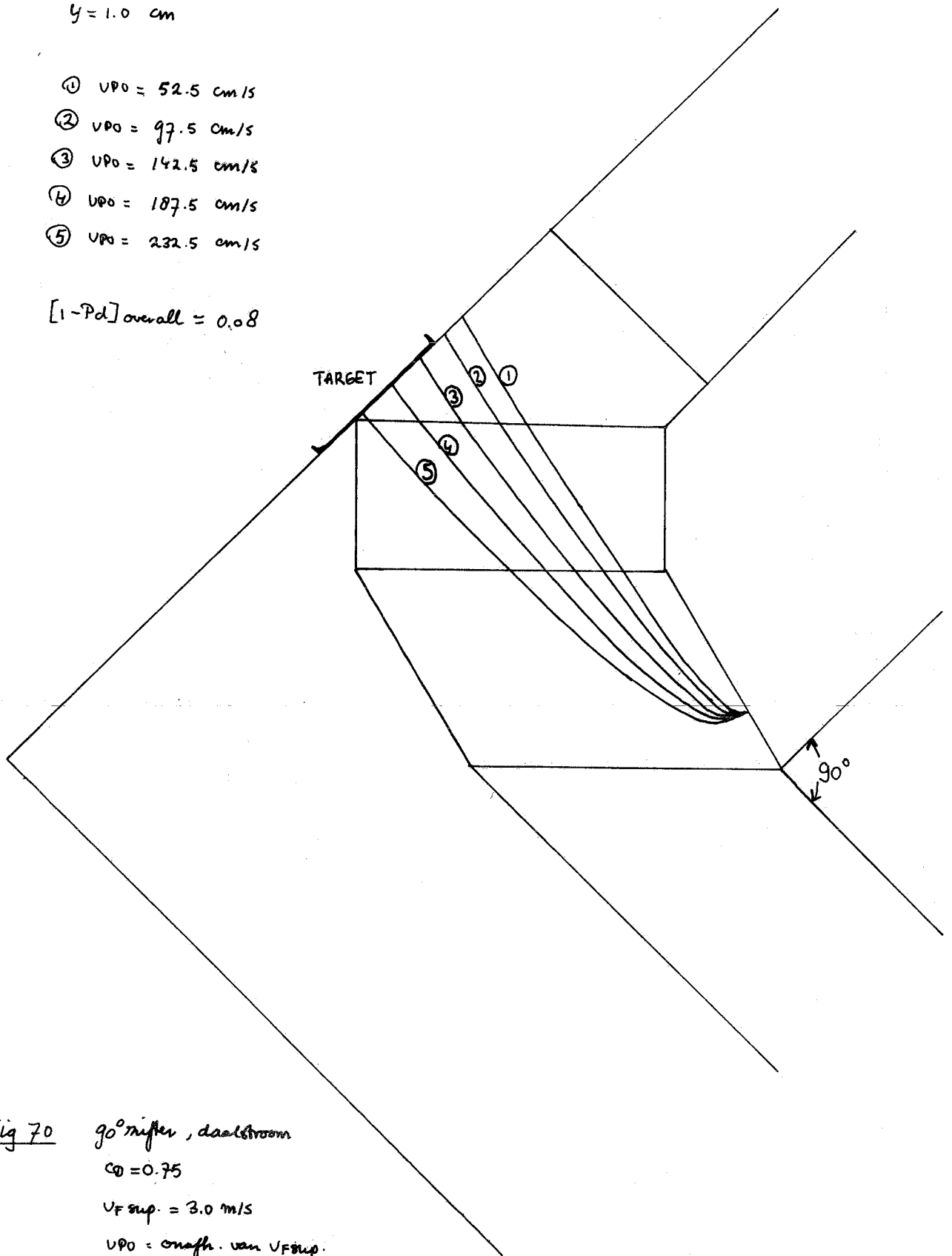


Fig 70 90° nifler, daalstroom

$C_D = 0.75$

$v_{Fsup.} = 3.0 \text{ m/s}$

v_{p0} = onafh. van $v_{Fsup.}$

zie § 10.8.3.

$y = 1.0 \text{ cm}$

- ① $v_{p0} = 78.8 \text{ cm/s}$
- ② $v_{p0} = 146.2 \text{ cm/s}$
- ③ $v_{p0} = 213.8 \text{ cm/s}$
- ④ $v_{p0} = 281.3 \text{ cm/s}$
- ⑤ $v_{p0} = 348.7 \text{ cm/s}$

$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.08$

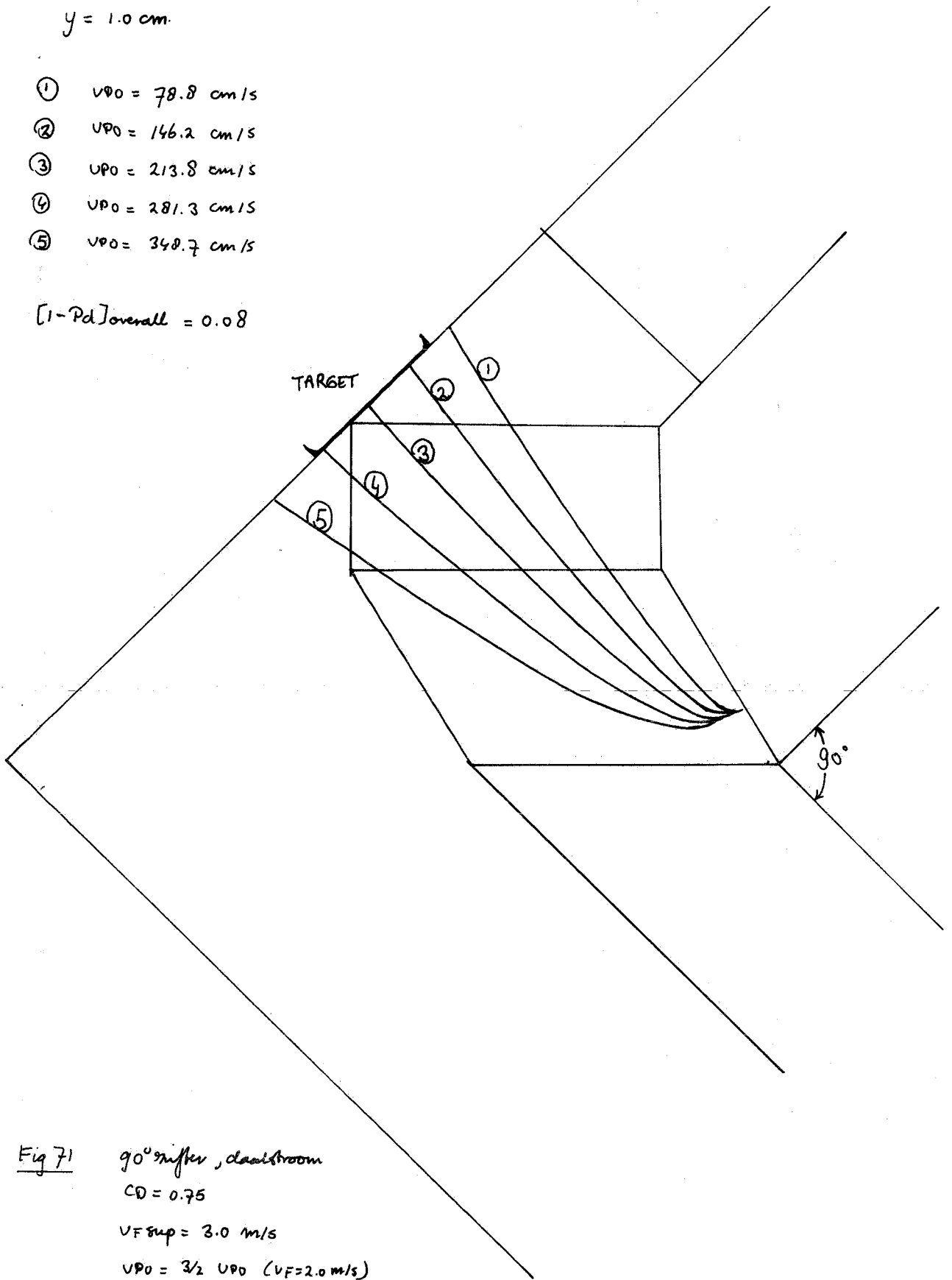


Fig 71 90° miter, duct/broom
 $CD = 0.75$
 $v_{Fsup} = 3.0 \text{ m/s}$
 $v_{p0} = \frac{3}{2} v_{p0} \text{ (} v_F = 2.0 \text{ m/s)}$
This § 10.8.4.

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 105 \text{ cm/s}$
- ② " $v_{p0} = 25 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 2.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 95 \text{ cm/s}$
- ④ " $v_{p0} = 15 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 3.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 95 \text{ cm/s}$
- ⑥ " $v_{p0} = 15 \text{ cm/s}$

$[1 - \rho_s]_{\text{overall}} = 0.90$

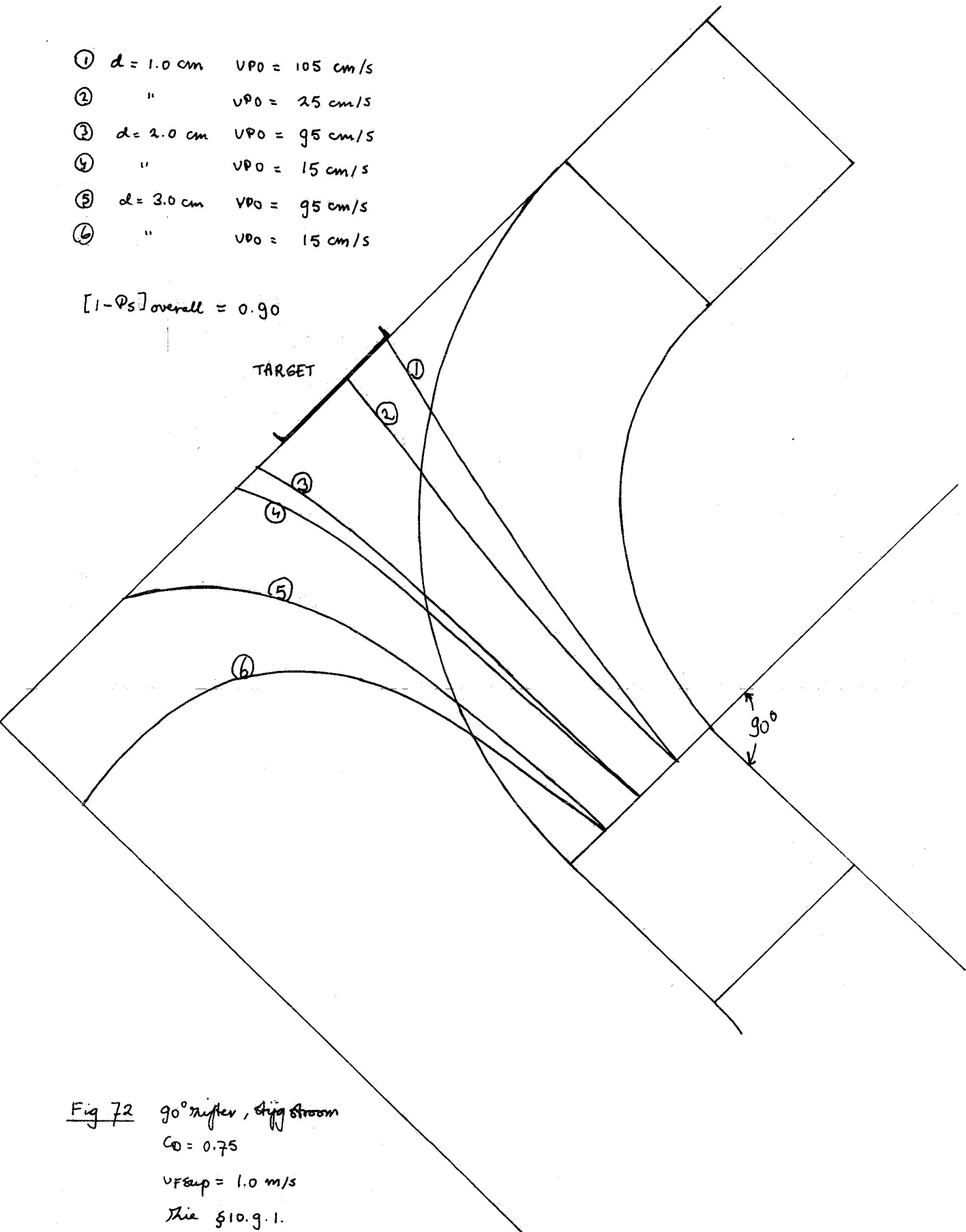


Fig 72 90° nifter, stiff stream
 $C_0 = 0.75$
 $v_{\text{sup}} = 1.0 \text{ m/s}$
 The §10.g.1.

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 315 \text{ cm/s}$
- ② " $V_{p0} = 75 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 2.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 45 \text{ cm/s}$
- ④ $d = "$ $V_{p0} = 285 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 3.0 \text{ cm}$ $V_{p0} = 45 \text{ cm/s}$
- ⑥ $d = "$ $V_{p0} = 205 \text{ cm/s}$

$[1-P_s]_{\text{overall}} = 0.51$

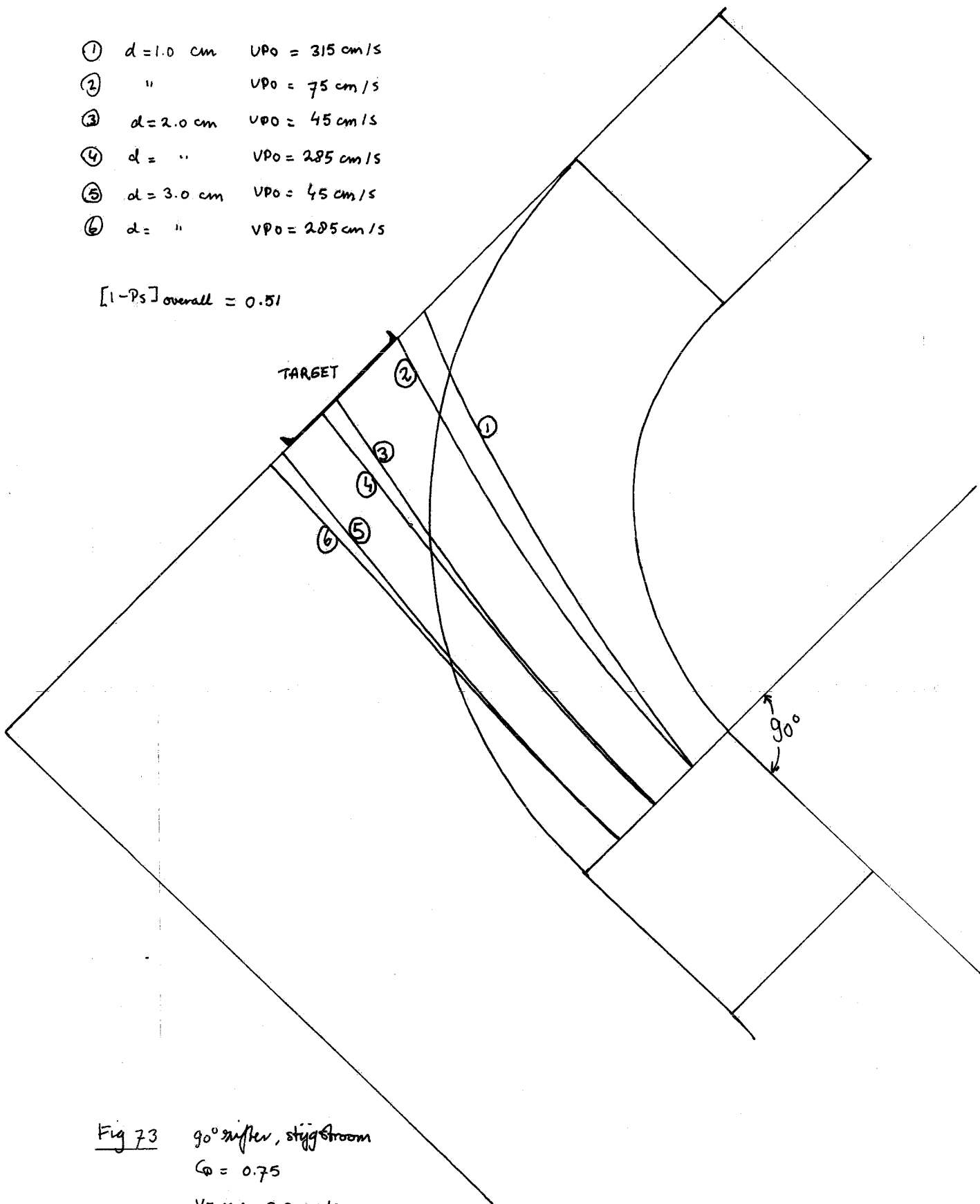


Fig 73 90° diffuser, stagg stream
 $C_w = 0.75$
 $V_{F \text{ sup}} = 3.0 \text{ m/s}$
See § 10.g.2.

$y = 0.5 \text{ cm}$

① $U_{P0} = 40 \text{ cm/s}$

② $U_{P0} = 80 \text{ cm/s}$

③ $U_{P0} = 120 \text{ cm/s}$

$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.88$

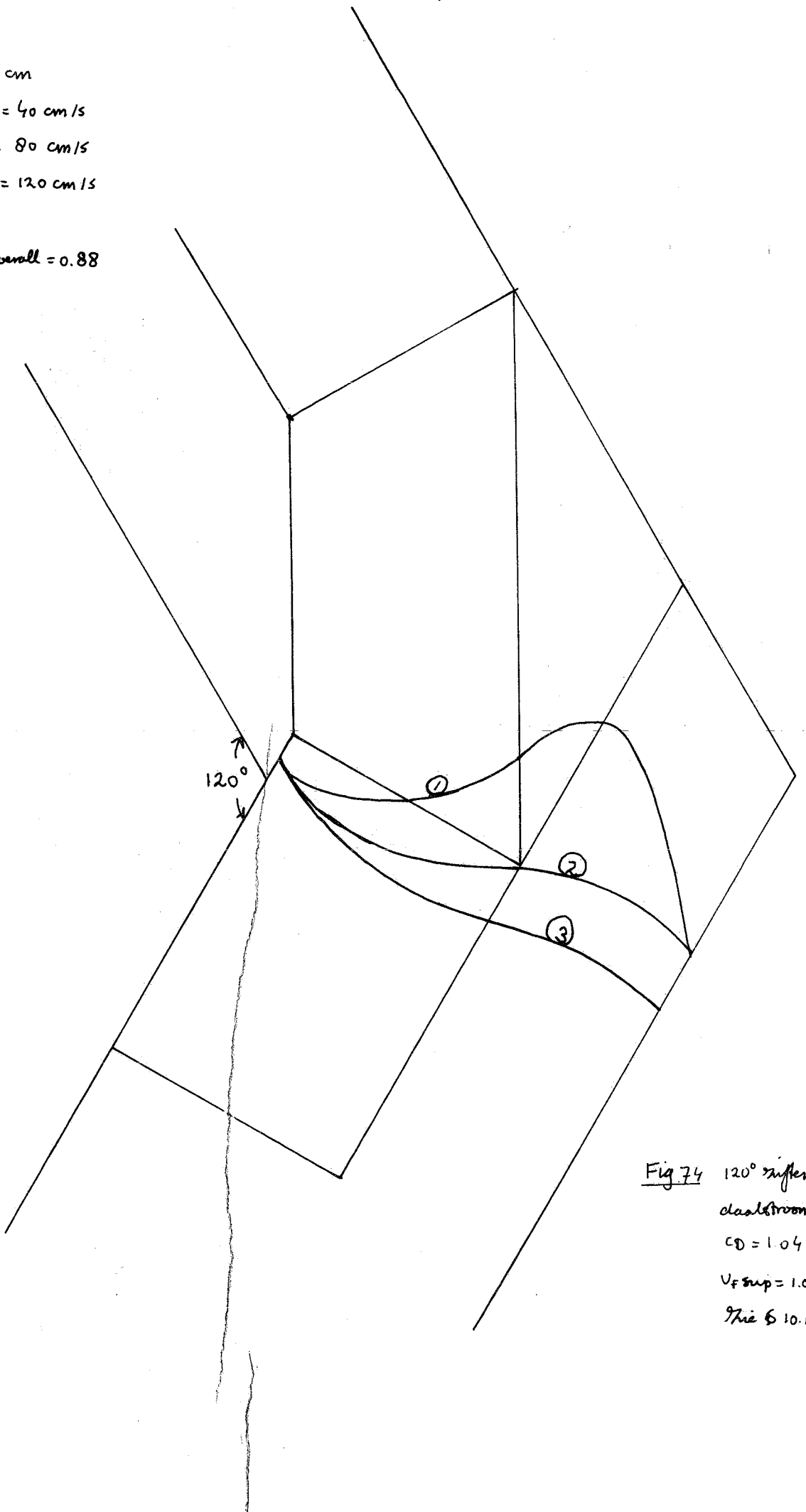


Fig 74 120° diffuser
classroom
 $C_D = 1.04$
 $V_{\text{sup}} = 1.0 \text{ m/s}$
The 6 10.10 1.

-A68-

$$y = 0.5 \text{ cm}$$

① $v_{p0} = 40 \text{ cm/s}$

② $v_{p0} = 80 \text{ cm/s}$

③ $v_{p0} = 120 \text{ cm/s}$

$$[1-Pd]_{\text{overall}} = 0.04$$

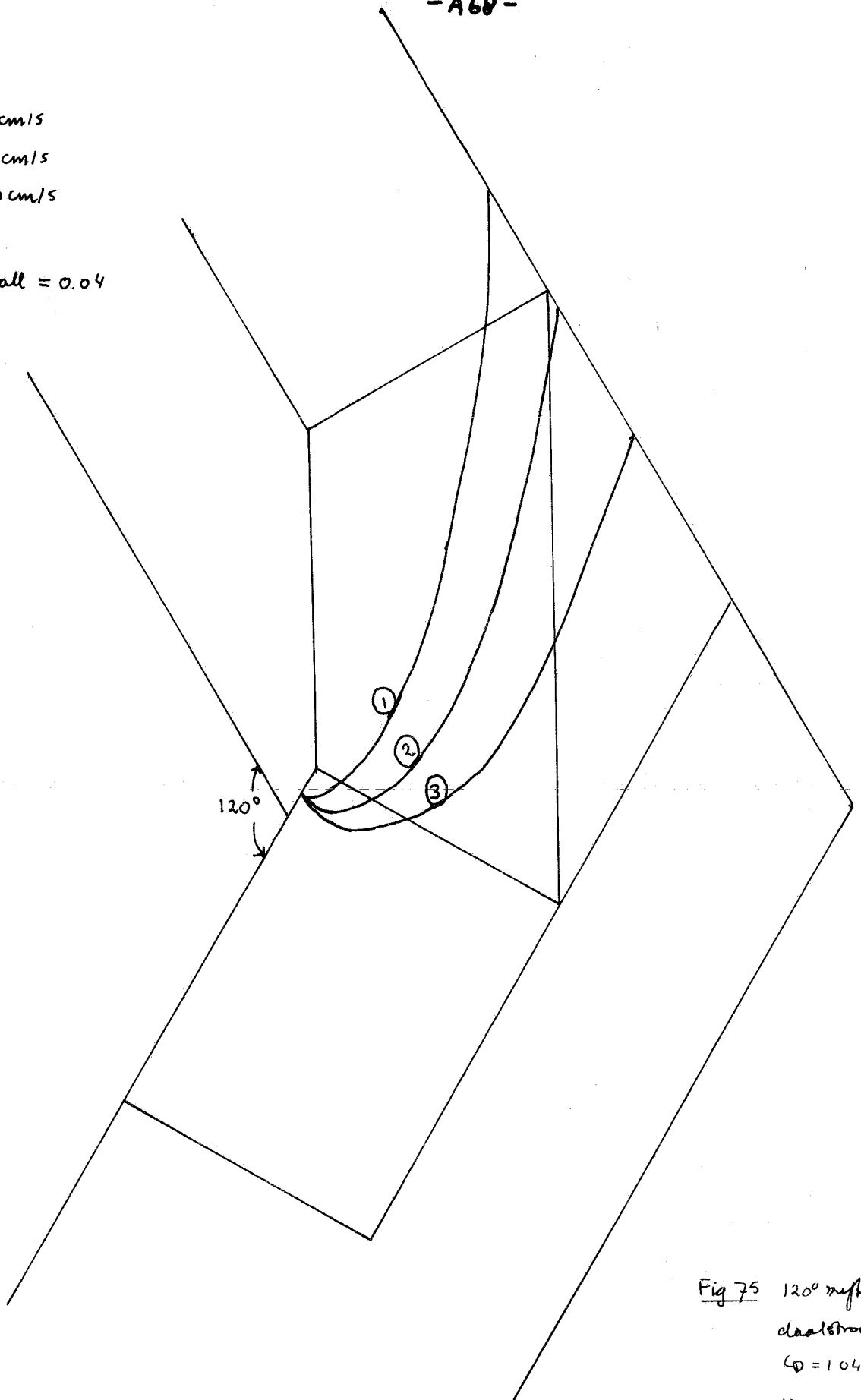


Fig 75 120° reflex
ductroom
 $\phi = 104$
 $v_{\text{sup}} = 2.2 \text{ m}$
The ϕ 10.10.2

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 33.7 \text{ cm/s}$
- ② " $v_{p0} = 72.1 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 3.0 \text{ cm}$ $v_{p0} = 27.2 \text{ cm/s}$
- ④ " $v_{p0} = 75.3 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 4.5 \text{ cm}$ $v_{p0} = 17.6 \text{ cm/s}$

$[1 - P_s]_{\text{overall}} = 0.94$

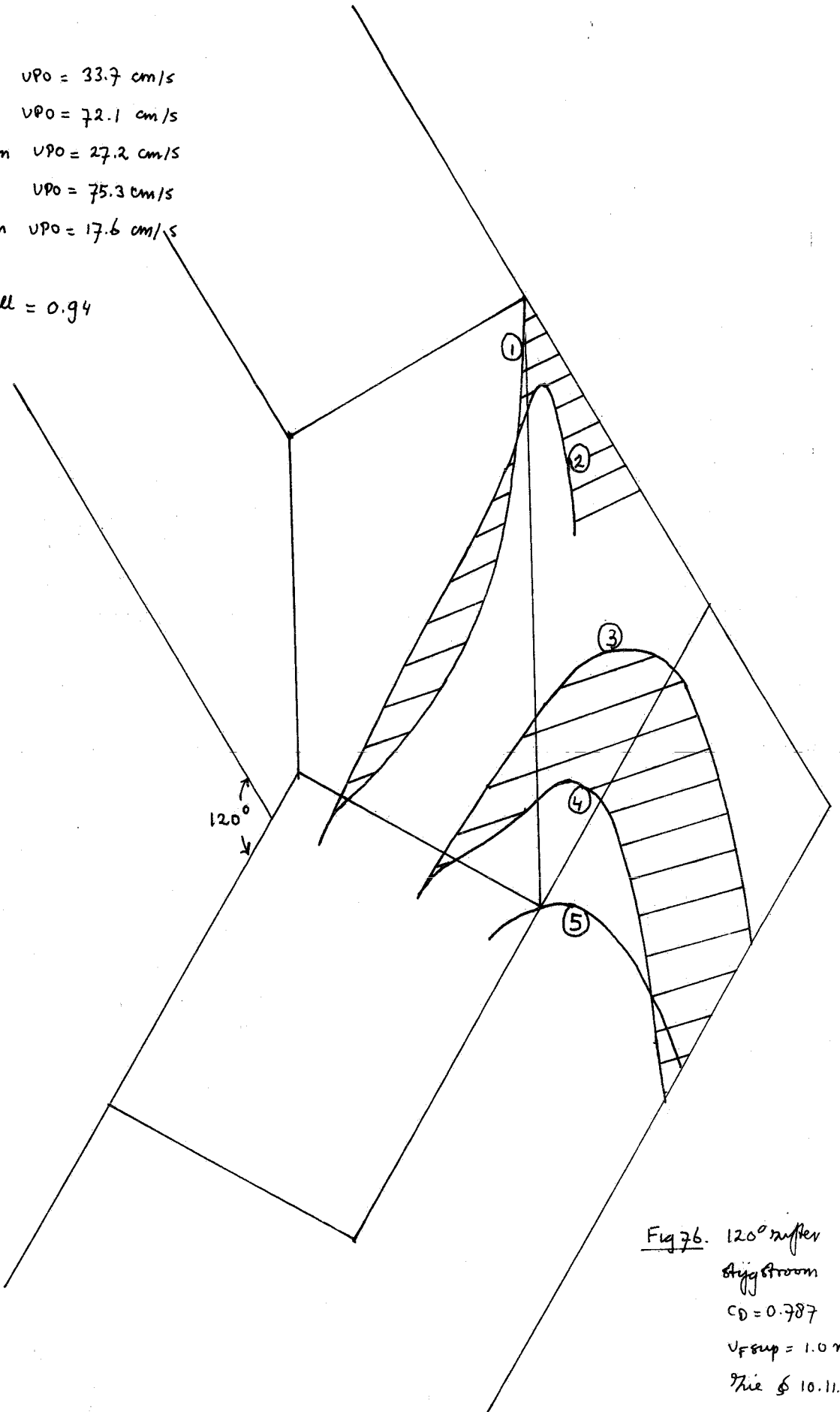


Fig 76. 120° diffuser
diffuser
 $C_D = 0.787$
 $v_{f \text{ sup}} = 1.0 \text{ m/s}$
The 6 10.11.1.

-A70-

- ① $d = 1.0 \text{ cm}$ $U_{PO} = 74.0 \text{ cm/s}$
- ② " $U_{PO} = 158.7 \text{ cm/s}$
- ③ $d = 3.0 \text{ cm}$ $U_{PO} = 59.9 \text{ cm/s}$
- ④ " $U_{PO} = 165.7 \text{ cm/s}$
- ⑤ $d = 4.5 \text{ cm}$ $U_{PO} = 38.8 \text{ cm/s}$
- ⑥ $d = "$ $U_{PO} = 165.7 \text{ cm/s}$

$[1-P_s]_{\text{overall}} = 0.29$

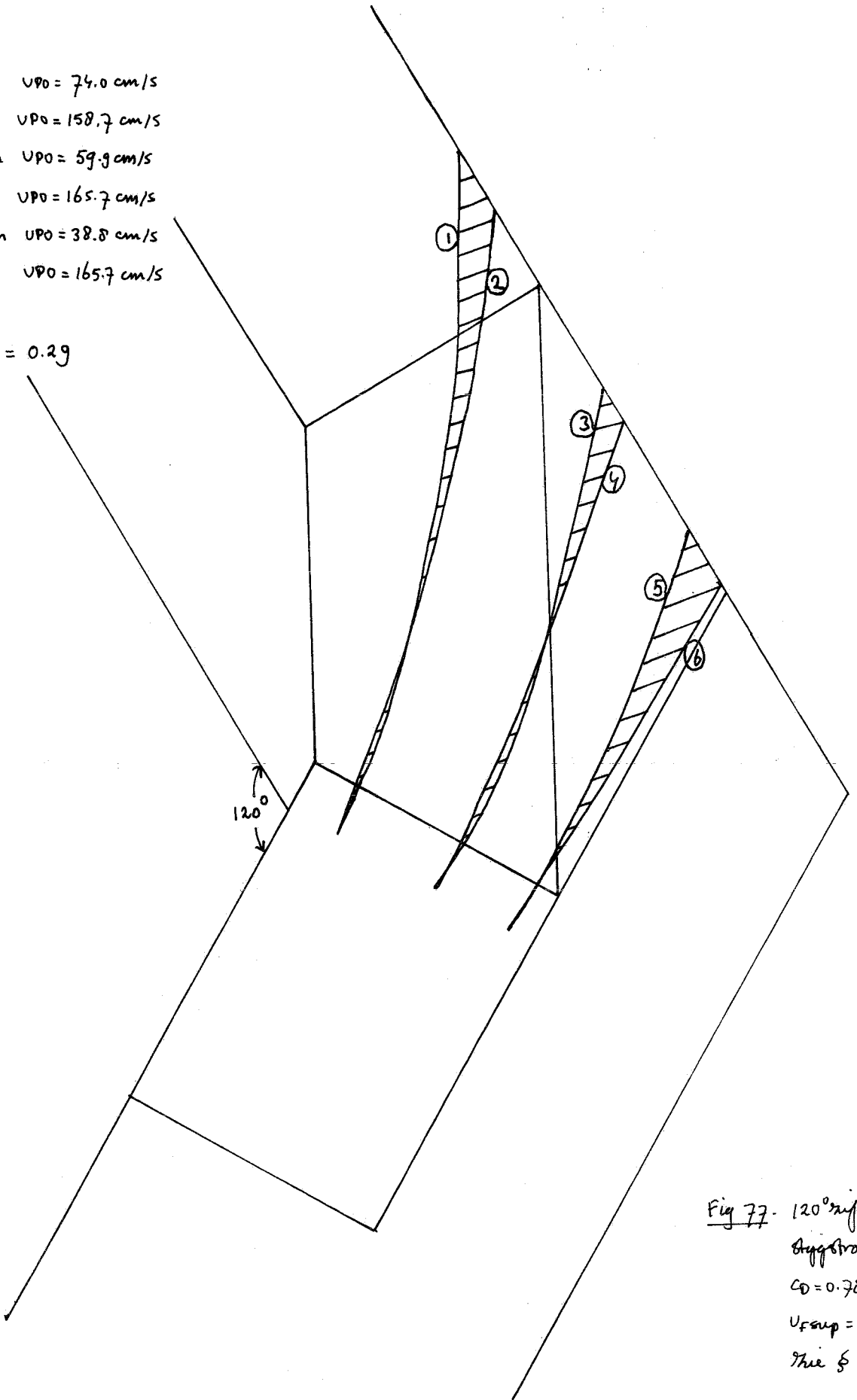


Fig 77. 120° diffuser
step stream
 $C_D = 0.787$
 $U_{\text{sup}} = 2.2 \text{ m/s}$
Re $\approx 10.11.2$

Fig 80 $\phi(VF)$ voor infervo paars, 1×10 cm
 120° zijfler : $B = 5.2$ cm

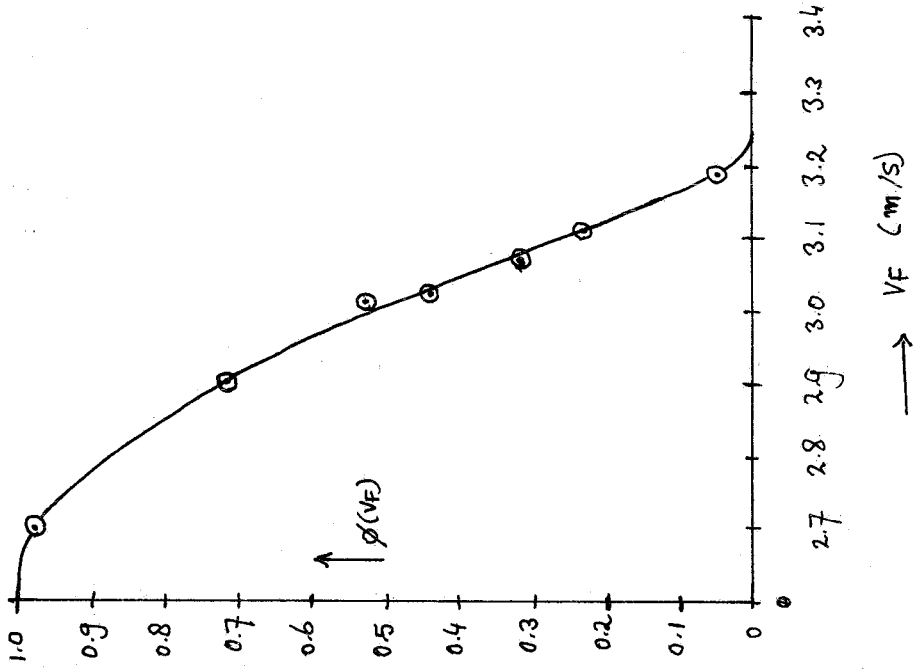


Fig 79 $\phi(VF)$ voor propoff wit, 1×10 cm
 120° zijfler : $B = 5.2$ cm

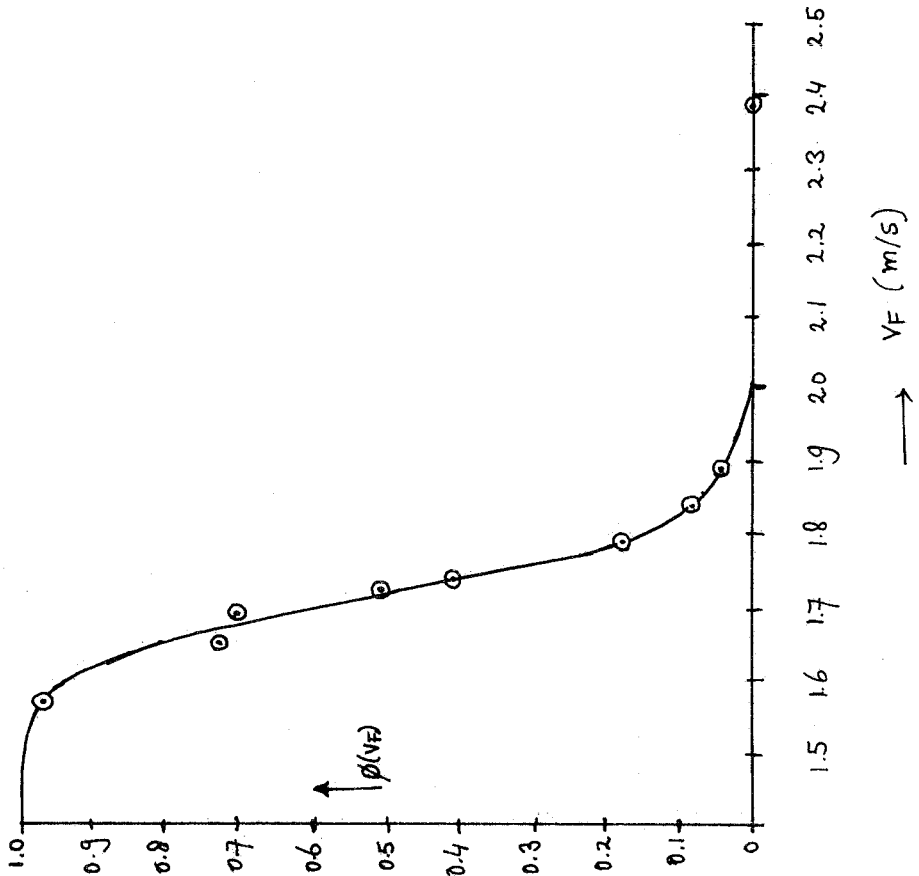


Fig 81 $\phi(V_F)$ voor propeller wit, $2 \times 2 \text{ cm}$
 120° zijfer ; $B = 15.1 \text{ cm}$

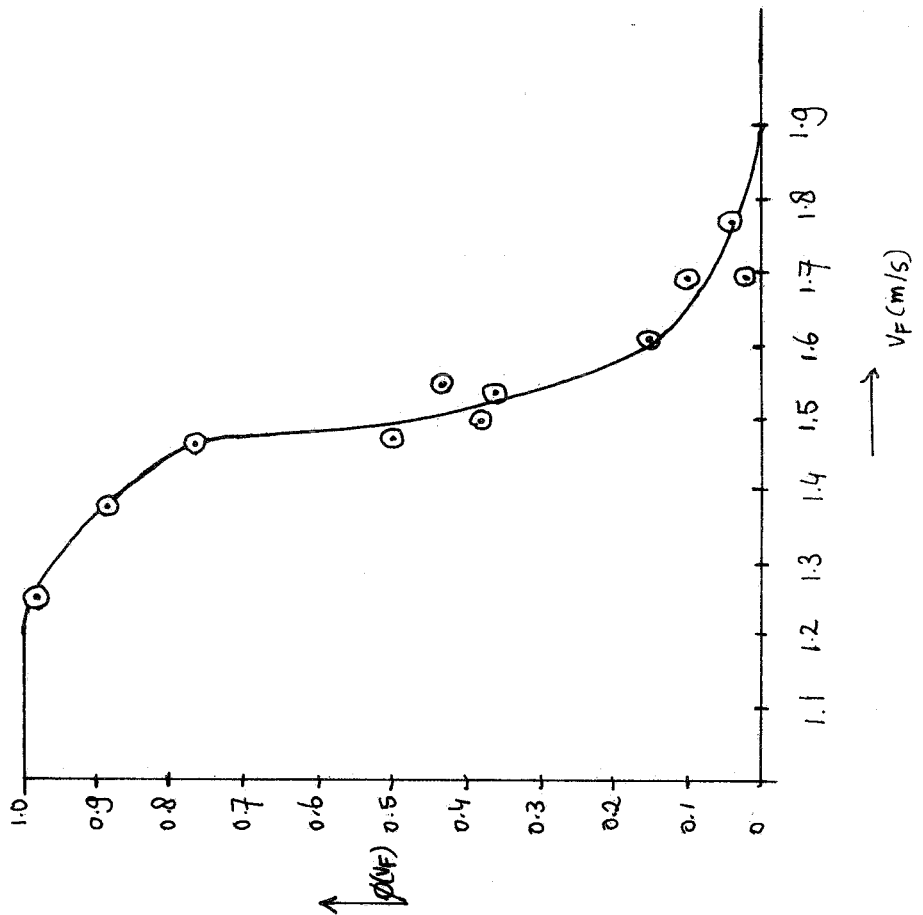


Fig 82 $\phi(V_F)$ voor inlempaars, $2 \times 2 \text{ cm}$
 120° zijfer ; $B = 15.1 \text{ cm}$

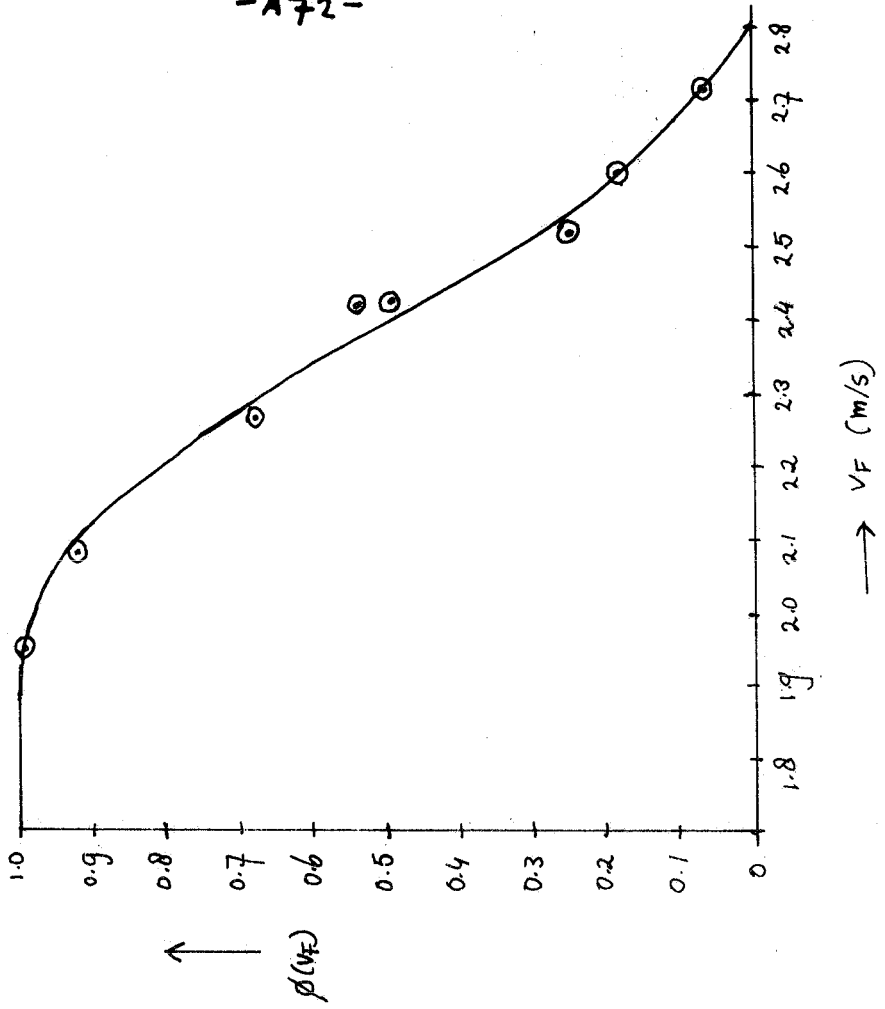


Fig 85 $\phi(\omega)$ vergelijking
120° ruyter, propoff wit

□ $B = 5.2 \text{ cm}$; $1 \times 1 \text{ cm}$

○ $B = 10.7 \text{ cm}$; $2 \times 2 \text{ cm}$ (litg)

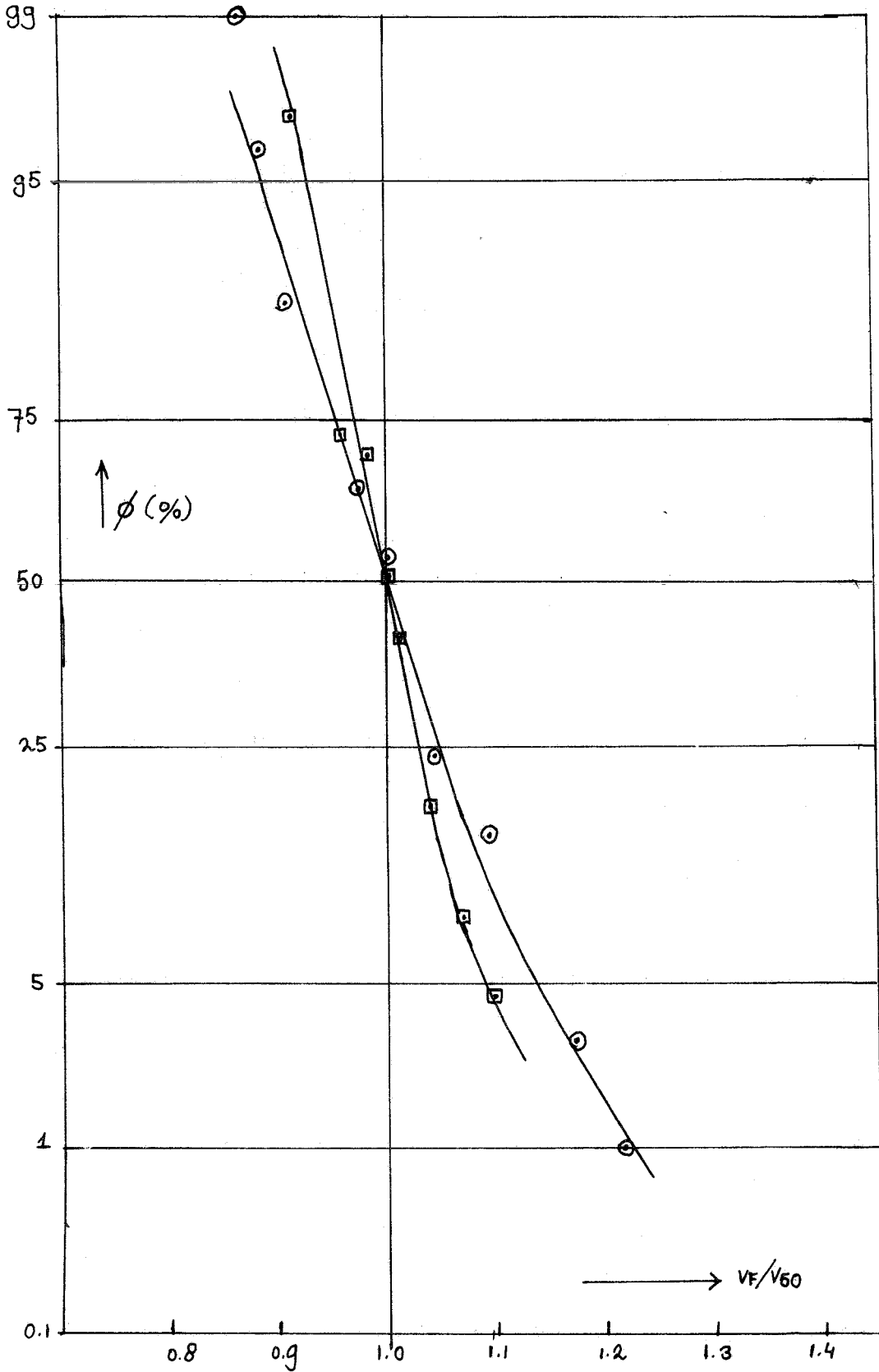


Fig 86 $\phi(V_F)$ vergelijking
120° raster, propoff wit 2x2 cm

- B = 10.7 cm (lit.g)
- △ B = 15.1 cm

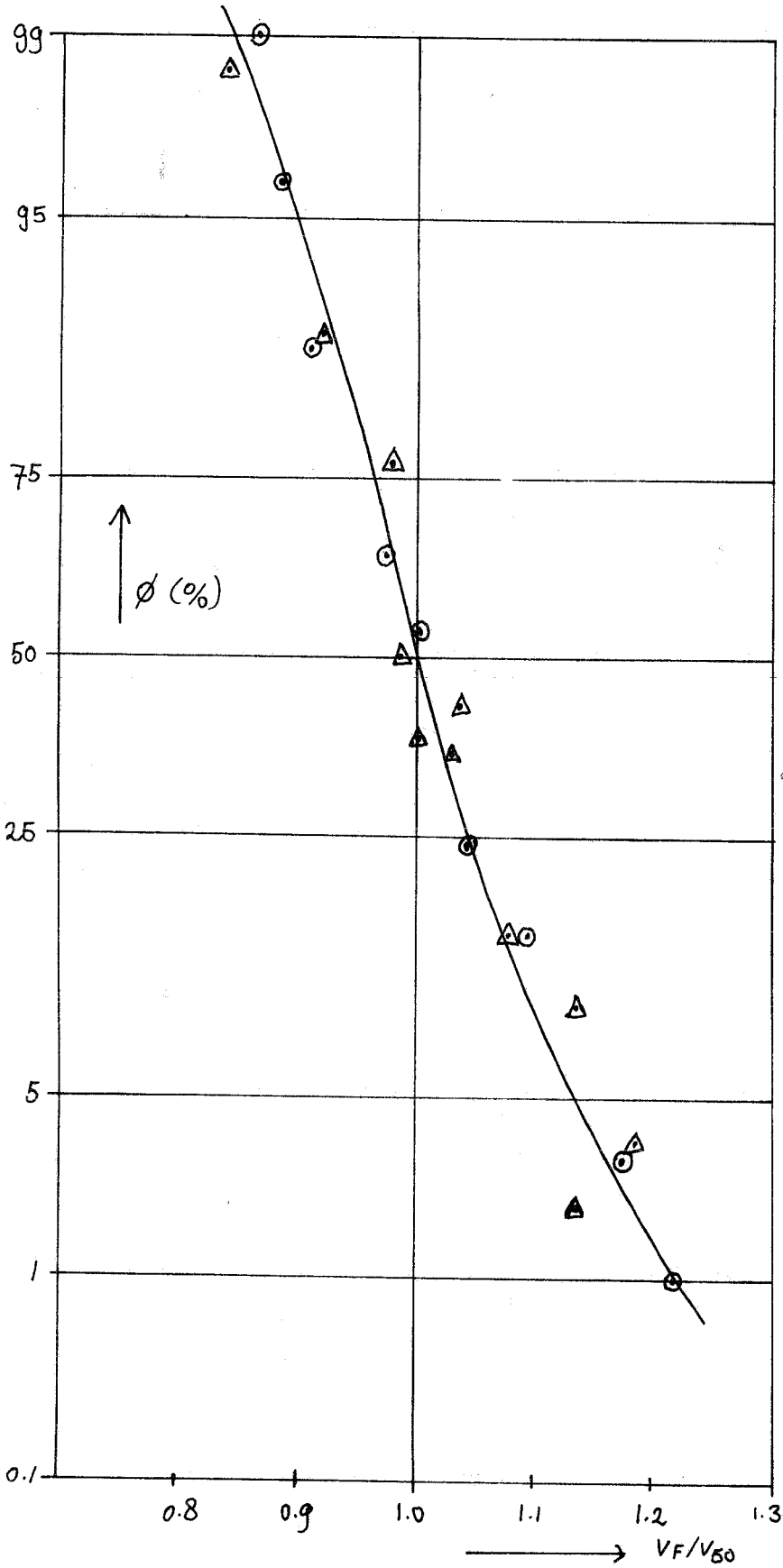
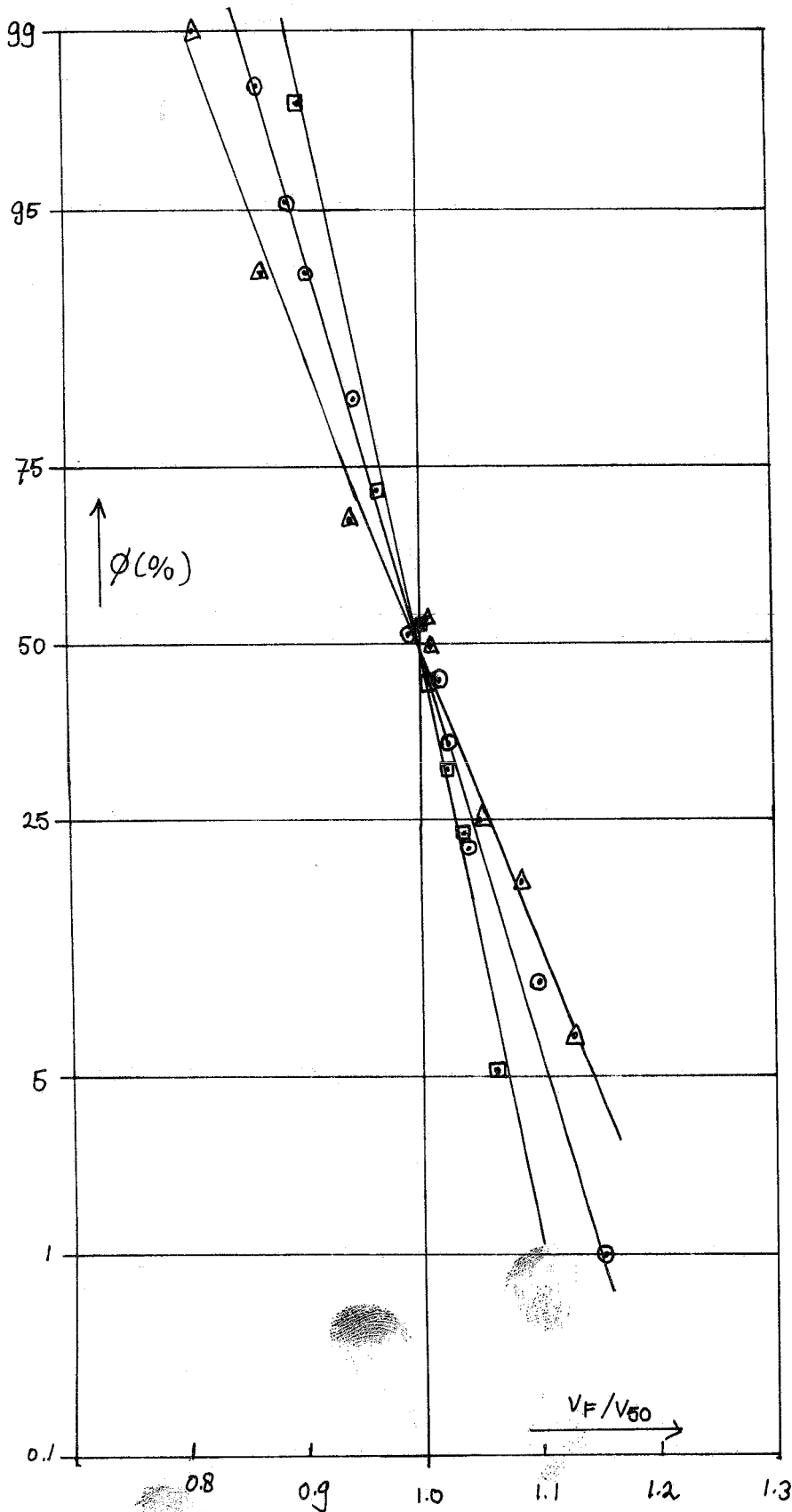


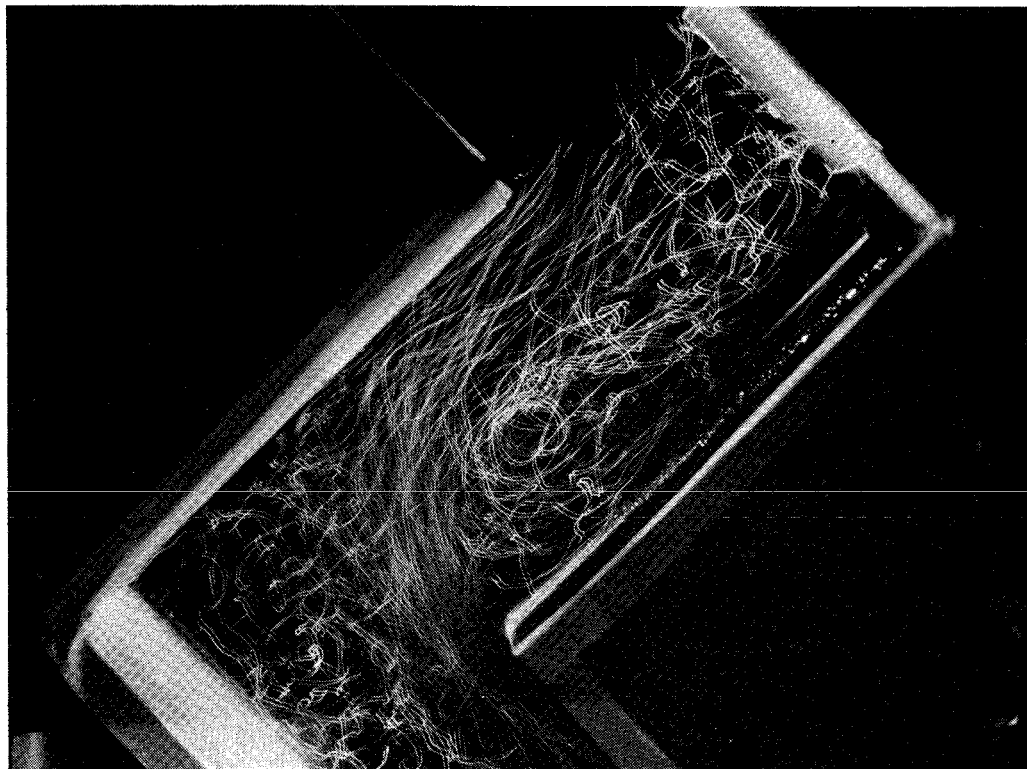
Fig 87 $\phi(V_F)$ vergelijking
120° rafter, infamo paars

□ B = 5.2 cm (1x1 cm)

○ B = 10.7 cm (2x2 cm, lit g)

△ B = 15.1 cm (2x2 cm)



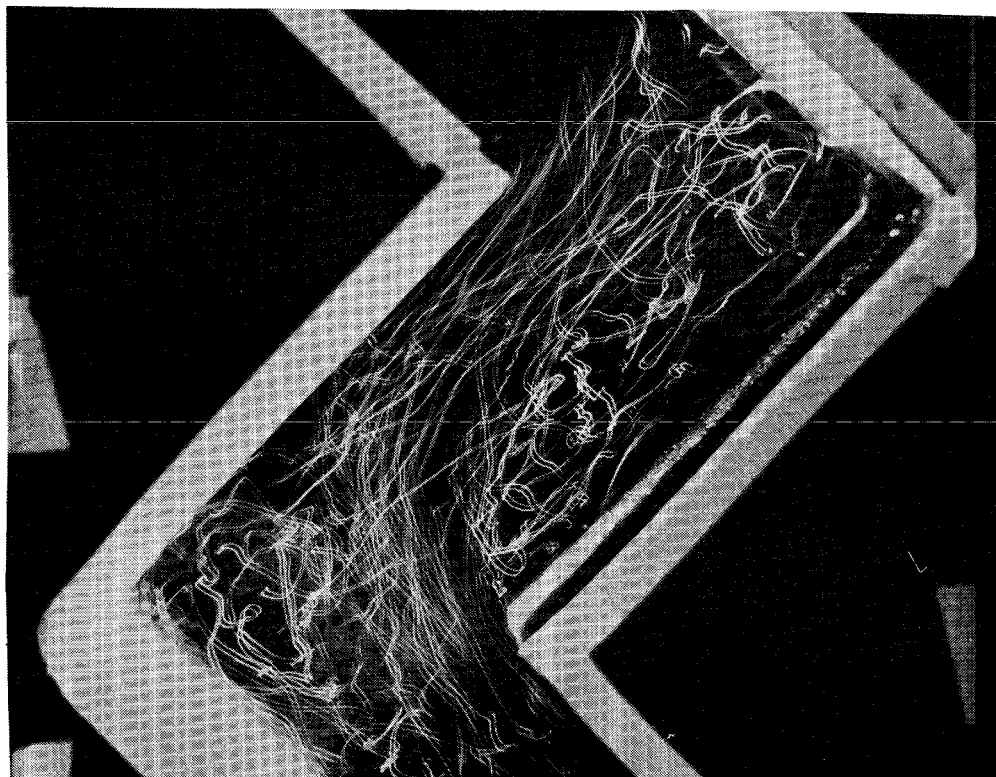


↑ $V_F = 1.645$ m/s

objectief : 85 mm

diafragma : 4.0

sluiterijd: 1 sec.



↑ $V_F = 3.20$ m/s

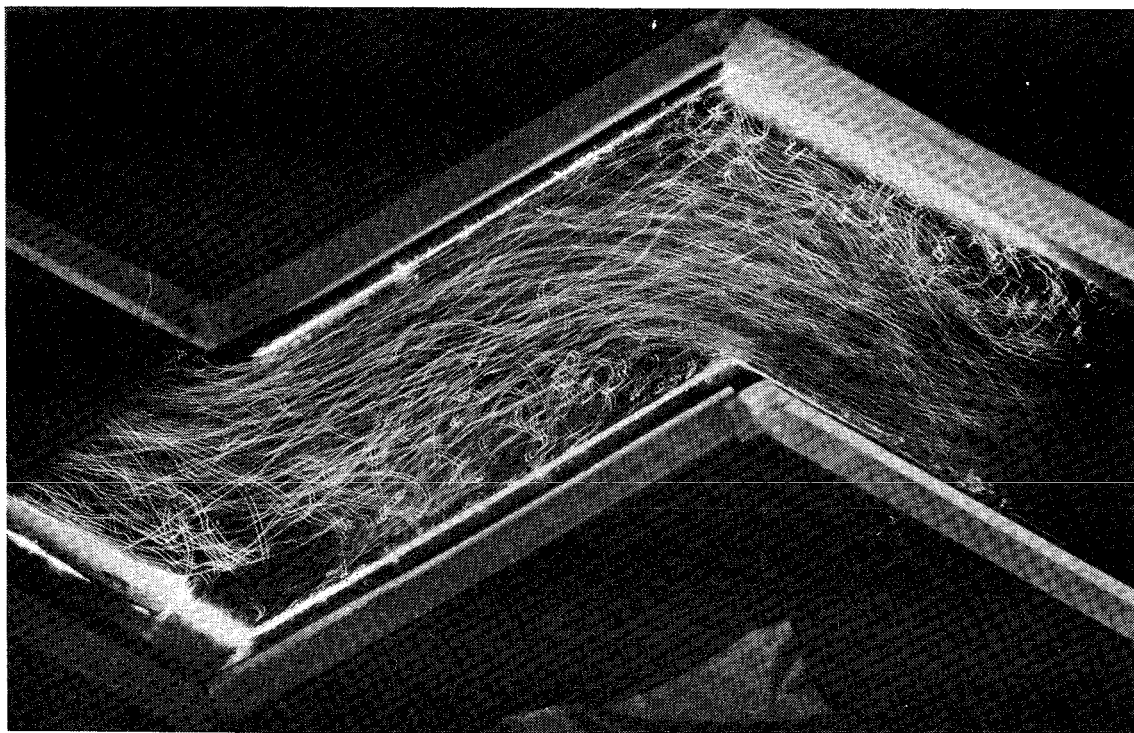
objectief : 85 mm

diafragma : 2.8

sluiterijd: 1 sec.

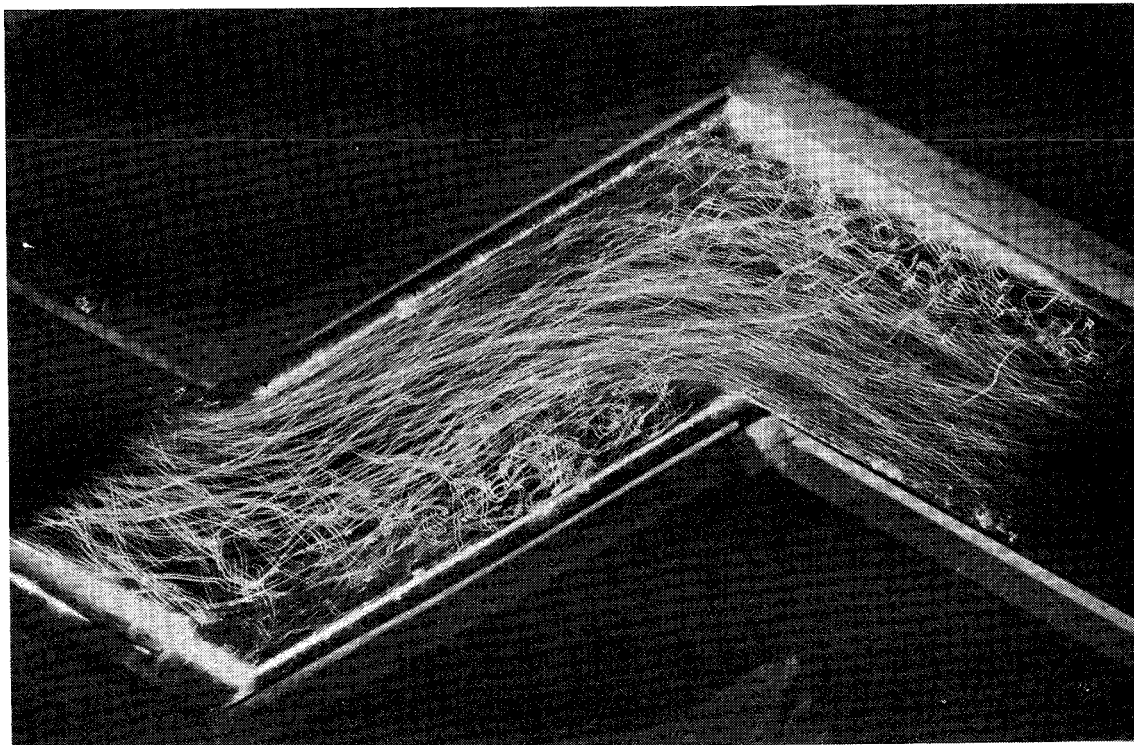
← $V_F = 1.99$ m/s

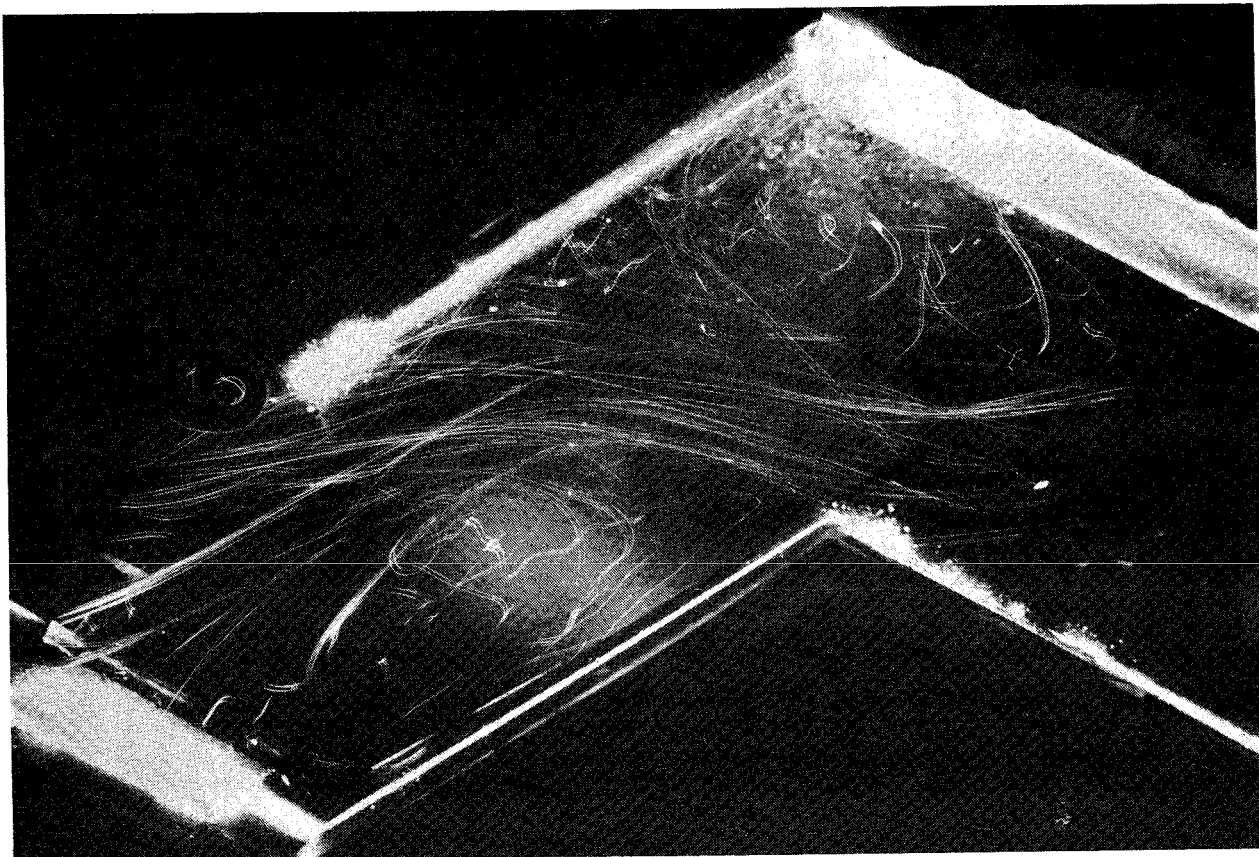
objectief : 50 mm
 diafragma : 4.0
 sluitertijd: 3 sec.



$V_F = 3.67$ m/s →

objectief : 50 mm
 diafragma : 4.0
 sluitertijd: 4 sec.





$B = 5.2 \text{ cm}$

$\rightarrow V_F = 2.80 \text{ m/s}$

objectief : 50 mm

diafragma : 2.8

sluittertijd: 2 sec.

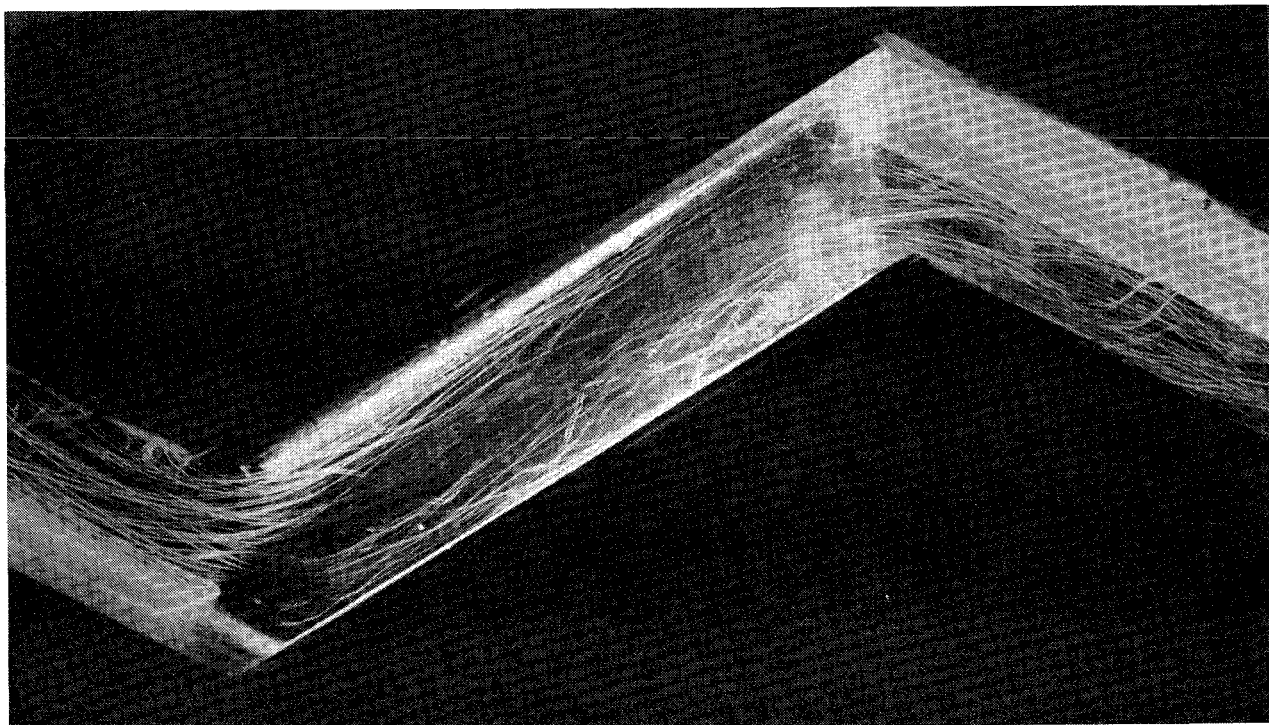
$B = 15.1 \text{ cm}$

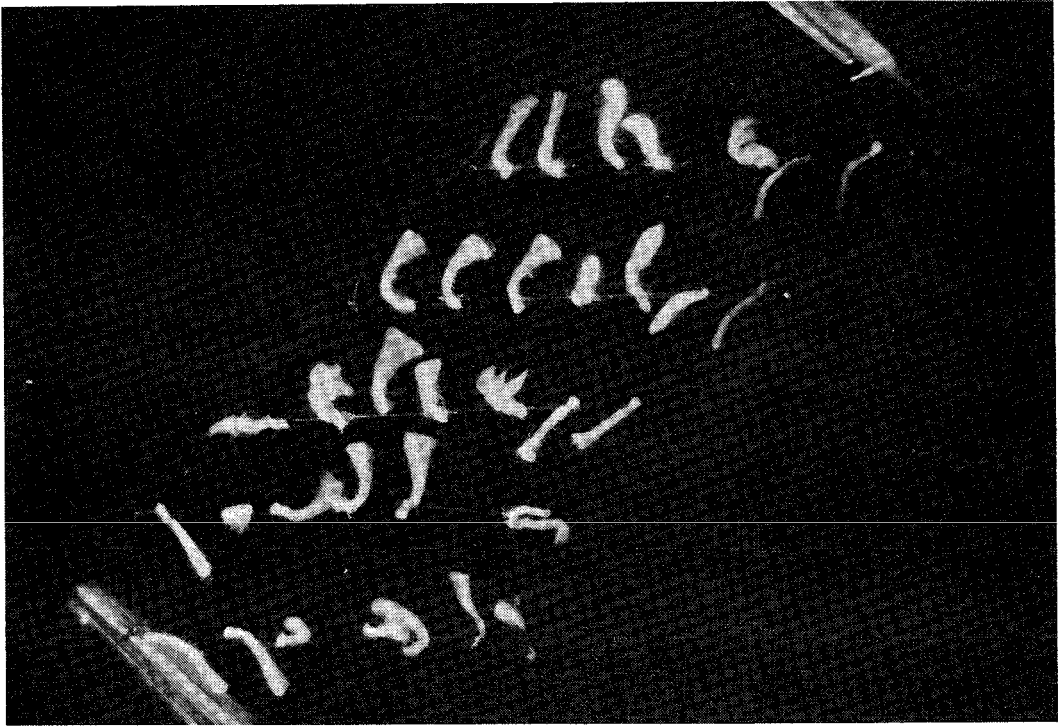
$V_F = 1.79 \text{ m/s} \rightarrow$

objectief : 50 mm

diafragma : 2.8

sluittertijd: 4 sec.



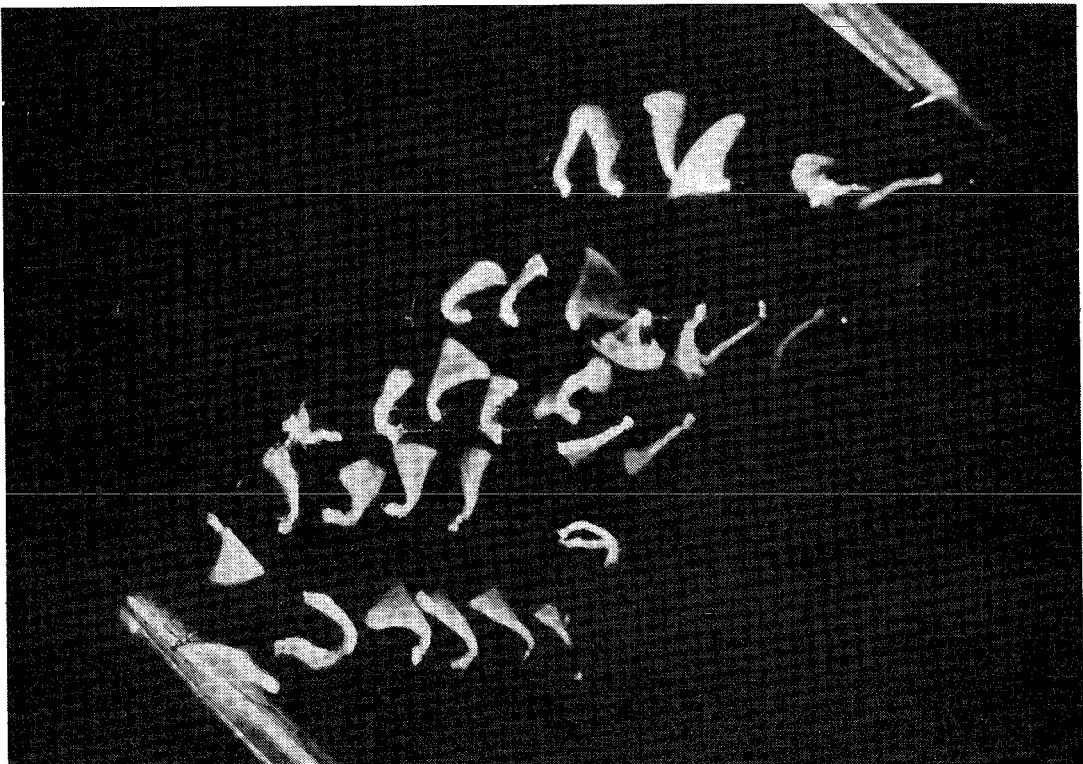


$\uparrow V_F = 1.645 \text{ m/s}$

objectief : 85 mm

diafragma : 1.8

sluittijd: 1/60 sec.



$\uparrow V_F = 3.20 \text{ m/s}$

objectief : 85 mm

diafragma : 2.8

sluittijd: 1/60 sec.