

Afstudeerverslag No.

door

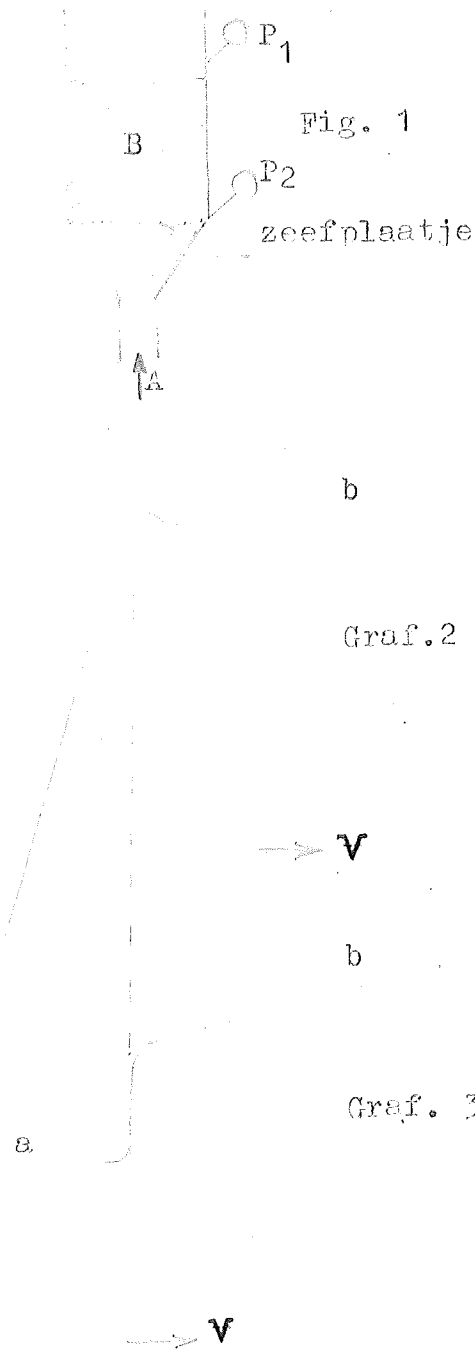
D. Meyer Timmer

Laboratorium voor
PHYSISCHE TECHNIEK
der Technische Hogeschool
Pr. Bernhardlaan 6 -

STROMINGSVERSCHIJNSLEN IN EEN FLUID BED.

DEEL I

(Literatuuroverzicht).



ALGEMEEN.

De verschijnselen die optreden, wanneer men bij A (fig.1) lucht door het korrelbed B blaast met toenemende snelheid, zijn beschreven door Parent en Yagol c.s.1)

Zij onderscheiden hierbij 3 fasen:

Phase I:

Bij kleine luchtsnelheden is geen beweging in de korrels waarneembaar. De drukval $P_2 - P_1 = \Delta P$ (fig.1) neemt hierbij voortdurend toe, terwijl de bedhoogte L, en daarmee het poriegehalte δ gelijk blijven.

In grafiek 2: a

In grafiek 3: a.

Graf. 2

Phase II:

Op een gegeven moment neemt men een plotselinge toename van de bedhoogte waar, waarbij de deeltjes echter nog geen warreling vertonen. ΔP vertoont hierbij een overgangsverloop - evenals δ . Men spreekt hier van expansiephase.

Phase III:

Bij nog grotere luchtsnelheden ontstaat een warrelige circulatie van deeltjes die t.g.v. de expansie blijkbaar los van elkaar zijn gekomen en zich zodoende betrekkelijk vrij kunnen bewegen. Dit stadium wordt fluidization genoemd. Gedurende fluidization neemt de bedhoogte en daarmee δ steeds toe t.g.v. het volume dat doorborrelende luchtbelllen (die klein of groot kunnen zijn) innemen. Parent en Yagol merkten op, dat in dit stadium bij toenemende luchtsnelheid de drukval ΔP nagenoeg constant blijft:

In grafiek 2: b

In grafiek 3: b.

Tevens werd door hen gevonden, dat de constante waarde van ΔP gedurende fluidizatio

Graf. 3

Afwijkingen v. Lewis:

overeen komt met de druk benodigd om het bed op de luchtstroom te laten zweven. Zij nemen dan ook aan, dat ΔP veroorzaakt wordt ~~door~~ door:

1. de hydrastatische druk van het bed;
 2. de complexe beweging der deeltjes;
- waarbij 2. te verwaarlozen is bij 1.

De conclusie van Parent en Yagol is als volgt in formule te brengen:

$$\Delta P = \frac{V'}{A} (1 - \delta) (\rho_s - \rho) \quad (1)$$

V' = bedvolume
 A = buisoppervlak
 ρ_s = dichtheid korrels
 ρ = dichtheid gas.

Form. (1) werd juist bevonden door de volgende onderzoekers: M. Leva c.s. 2); Wilhelm en Kwauk 3); Matheson, Herbst c.s. 4).

Hoewel Lewis c.s. 5) bij nauwkeurigere metingen afwijkingen constateerden, die in het ongunstigste geval 20 % bedragen, kan m.i. form. 1 zeer wel als richtlijn dienen.

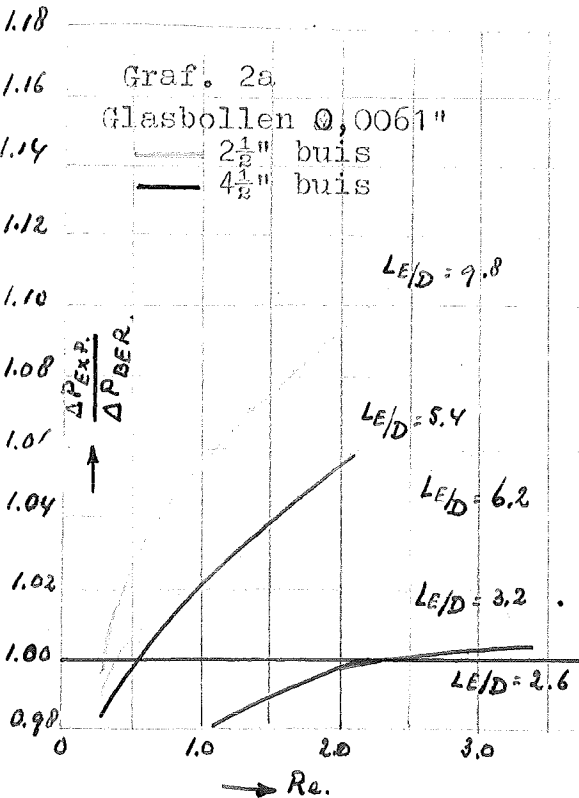
UITERLIJKE KENMERKEN VAN HET FLUID BED.

Een goed fluid bed wordt veelal vergeleken met een kokende vloeistof en mijns inziens kan deze vergelijking inderdaad zeer wel als oppervlakkig criterium voor de kwaliteit van het bed dienen: de deeltjes zijn hierbij in een voortdurende complexe beweging, terwijl het bed als geheel, behoudens borrelen aan het oppervlak een rustige indruk maakt. In de Angelsaksische literatuur wordt deze toestand met de term "smooth fluidization" aangeduid. Lewis 5) constateerde, dat hierbij form. (1) binnen nauwe grenzen voldoet.

Anderzijds bestaan 2 extremen, die men algemeen als ongunstig beschouwt:

a. "Slugging": De luchtbellen die door het bed dringen verzamelen zich, naarmate zij op grotere hoogte komen, tot steeds omvangrijker bellen, die tenslotte de gehele oppervlakte van de buis kunnen beslaan (z.g. "slugs"). Matheson c.s. 4) deelen mede, dat men, door een hoog bed te nemen, kan waarnemen, op welke hoogte zich de slugs beginnen te vormen (lsl.), zoodat men als quan-

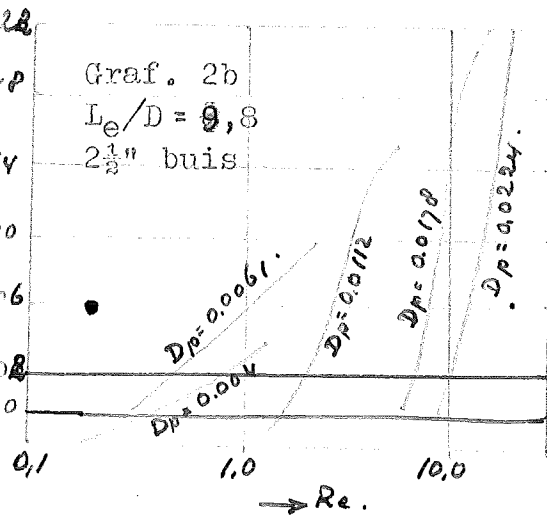
- 2) Chem. Eng. Progr. 44 (1948) 511
- 3) Id. 201
- 4) Ind. Eng. Chem. 41 (1949) 1099
- 5) Id. 1104



L_e = hoogte geëxpandeerde bed

D = buisdiameter

D_p = deeltjesdiameter



titatieve maat voor de "slug-neiging" van een bepaalde stof zou kunnen beschouwen de factor

$$\frac{L_{sl}}{D}$$

Indien het waar is, dat L_{sl} met eenige nauwkeurigheid bepaald kan worden, is m.i. deze opmerking van Matheson van groot belang voor de industrie, gezien het feit dat men m.b.v. een zeer eenvoudig toestel zou kunnen bepalen:

a. welke stoffen en welke deeltjesgrootte van die stoffen een groote

L_{sl}/D hebben en dus gunstig zijn;

b. tot welk een maximale bedhoogte men een bed van een bepaalde stof kan maken zonder dat slugging optreedt.

Men zou er bij een derg. onderzoek rekening mee moeten houden, dat de factor L_{sl}/D voor zeer kleine buisdiameters zijn waarde verliest, aangezien optredende wandeffecten dan storend gaan werken (vooral bij continu fluidiseeren). Volgens Wilhelm en Kwauk 3) is voor $D = 3"$ het wandeffect te verwaarlozen.

De invloed van de deeltjesgrootte wordt door Parent en Yagol 1) als volgt geformuleerd en sindsdien algemeen aangenomen:

a. grote deeltjes hebben sterke neiging tot slugvorming;

b. grote uniformiteit in deeltjesgrootte is eveneens ongunstig.

Een andere quantitatieve maat voor de slugvorming vormt wellicht de mededeeling van Lewis c.s. 5) als zouden de door hen geconstateerde afwijkingen in de geldigheid van form. (1) met slugvorming in verband staan. Zij constateeren n.l. dat gen. afwijking toeneemt bij toename van de verhouding

$$\frac{L_e}{D}$$

L_e = bedhoogte van het geexpandeerde bed.

voor een bepaalde stof.

~~Mixtuur van gas en vloeistof~~ Op de gegevens van Lewis wordt later nog teruggekomen.

Omtrent het mechanisme van de belvorming tracht Morse 6) een verklaring te geven, die m.i. niet juist is en waarop dan ook niet nader wordt ingegaan. Belangwekkender lijkt mij

Wanke met 20 gals

X

6) Ind. Eng. Chem. 41 (1949) 1117

de opvatting van Matheson 4) als zoude het vrije volume, waarin een deeltje zich kan bewegen, gedurende het fluidiseeren bij toenemende gassnelheden constant blijven. Anders gezegd, zou dus de expansie gedurende b (graf. 2 en 3) alleen veroorzaakt worden door steeds toenemende grootte van de luchtbelllen, die in het geheel geen deeltjes bevatten, zoodat men de "fluid phase" als een "homogeen" medium kan beschouwen, dat zich afscheidt van het overtollige gas. Met een 1-phase systeem van dit "homogene" medium heeft men te maken op het punt, waar phase II juist overgaat in phase III (zie "Algemeen"). Wil men nu bij hogere gassnelheden het ontstaan van een 2-fasen-systeem verklaren, dan moet men aan het "homogene" medium een soort "oppervlaktenspanning" toekennen. Deze samenhang tusschen de deeltjes wordt door Wilhelm en Kwak verklaard uit:

1. electrostatische krn.
2. hydrodymanische krn.
3. Froude-krn.

in de porien

Op dit krachtenstelsel zou dus de gassnelheid van grote invloed zijn. Zou men dus i.p.v. gas een vloeistof nemen voor het fluidiseeren nemen, m.a.w. een medium van veel grotere dichtheid, zoodat reeds bij veel kleinere poriesnelheden fluidiseeren plaats heeft, dan zouden optredende "oppervlaktenspanningen" een veel kleinere orde van grootheid bereiken. Inderdaad bleken bij Wilhelm's onderzoekingen met water de ~~expansies~~ veeleer het karakter van een gas te hebben dan van een kokende vloeistof; een geheel ander mechanisme dus, waarbij gedurende fluidisatie een regelmatige expansie optreedt, zonder "bel"-vorming, en daarmee een gestadig toenemen van het vrije volume voor elk deeltje afzonderlijk. Wilhelm spreekt hier van

"particulate" fluidization - bij vlstn:
"aggregative" " - bij gassen.

NB. Bovenstaande opvatting idealiseert de toestand wellicht te veel, doch geeft een sprekend en kwalitatief niet onjuist beeld. Redden waarom er hierboven in extenso op in werd gegaan is de volgende: indien men dit beeld als juist aanvaard is dus het vrije volume van een deeltje bij elke gassnelheid gelijk aan dat van het geëxpandeerde bed en dus eenvoudig te bepalen. Aangezien de bewegelijkheid van de deeltjes ten nauwste zal samenhangen met het vrije volume, zal het wellicht mogelijk blijken uit de mate van expansie gedurende Phase II iets omtrent de bewegelijkheid van de deeltjes af te leiden.

De nadeelen van slugging bij de industriciele toepassing van het fluid bed mogen blijken uit het volgende:

1. Het gas in de "holle" ballen is niet in aanraking met de vaste stof: slecht contact. Dit wordt duidelijk gedemonstreerd in foto's gepubliceerd door Matheson c.s. 4).
2. Het systeem gaat stoten (vgl. kookvertraging) hetgeen hoge constructie-eischen stelt.
 - b. "Channelling". Het andere extreem dat kan optreden bij een fluid bed is het z.g. channelling waarbij de lucht bepaalde doorgangen in het bed maakt, terwijl de deeltjes nagenoeg niet in circulatie zijn. Dit verschijnsel treedt op bij zeer kleine deeltjes.

CORRELATIES BETREFFENDE DE STROMING.

In het onderstaande zullen correlaties betreffende phase I en III zooveel mogelijk afzonderlijk behandeld worden.

a. Phase I.

Het ligt voor de hand, dat phase I overeenkomt met het vaste korrelbed, waarmee men b.v. te maken heeft bij filtratie e.d. Ten overvloede toont M. Leva aan, dat het P-V-verloop gelijk blijft voor een opwaartsche en een dalende gasstroom.

Omtrent de eerste pogingen om tot een correlatie van grootheden voor een vast korrelbed te komen wordt een overzicht gegeven door Carman 7).

In het kort komt dit op het volgende neer: Men kan een korrelbed opvatten als

1. een stapel bollen, waardoor het gas zich een weg baant; (bollentheorie)
2. een poreuze massa, waardoor zich kanalen kronkelen die het gas een doorgang verschaffen. (buizen-theorie).

1. Bollentheorie.

Indien een gladde bol zich in een gasstroom bevindt, is de door de stroom op de bol uitgeoefende kracht

$$F = C_w \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \frac{1}{4} \pi D_p^2 \quad (2)$$

7) Trans. Inst. Chem. Engrs. 15 (1937) 150.

C_w = weerstandsconstante

Form. (2) is af te leiden m.b.v. de z.g. dimensie-analyse 8), waaruit dan tevens blijkt,

a. dat de formule nog dimensieloze grootheden (b.v. ruwheidsfactor) kan bevatten;

b. dat C_w een functie is van het getal van Reynolds, en wel op de volgende wijze:

Volgt voort uit de dimensie-analyse

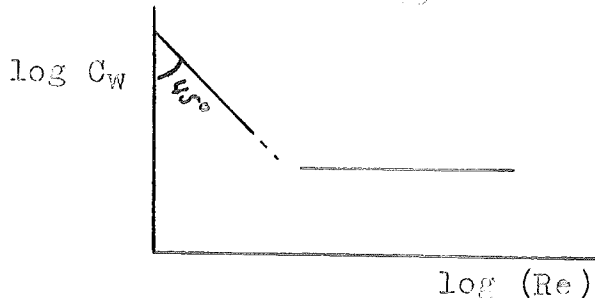


Fig. 4

Burke en Plummer 9) veronderstellen nu, dat 1. de kracht op een korrelbed als geheel uitgeoefend ($\Delta P \cdot A$) gelijk is aan de som van de krachten op elk deeltje in dat bed uitgeoefend:

$$\Delta P \cdot A = N \cdot F'$$

F' = de kracht op een deeltje van het bed

N = aantal deeltjes in het bed.

NB. Hierbij is uniforme deeltjesgrootte verondersteld.

2. F' te vinden is uit form. (2) indien men hierin voor V de gemiddelde snelheid in de poriën substitueert ($= V/\delta$).

Daar

$$N = A \cdot L \cdot \frac{1 - \delta}{1/6 \pi D_p^3}$$

komen zij tot de algemeene formule:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{k}{D_p} \cdot \frac{1 - \delta}{\delta^2} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \left[\frac{D_p \cdot V \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{1}{\delta} \right]^n \quad (3)$$

Voor het ~~maximum~~ gebied der kleine Re-getallen (waar $n = -1$) wordt dit:

$$\frac{\Delta P}{L} = k \cdot \frac{\mu \cdot V}{D_p^2} \cdot \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (4)$$

Voor dit gebied is de formule door Carman e.a. proefondervindelijk gecontroleerd door de gewijzigde wrijvingsfactor, berekend uit de waarnemingen logaritmisch uit te zetten tegen het gewijzigde Re-getal.

8) Walker c.s. Frind. Chem. Eng. bl. 75

9) J. Ind. Chem. Eng. 20 (1928) 1197

In de zoodoende verkregen grafiek, waarin dus naar verwachting de bij verschillende verkregen resultaten op een soortgelijke lijn als fig. 4 zouden moeten samenvallen, bleek de spreiding der punten zoo groot te zijn, dat de correlatie van Burke en Plummer volgens Carman moet worden verworpen.

2. Buizentheorie.

De eerste, die de dimensieanalyse op een korrelbed toepaste was Blake (10), die hierbij uitging van de Fanning-verg. voor gladde buizen:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{D_1} \cdot \frac{1}{2} \rho V_1^2 \cdot C_w' \quad (5)$$

C_w' = wrijvingsfactor.

De wrijvingsfactor hangt op soortgelijke wijze met het Re-getal samen als in fig. 4 is weergegeven.

Om deze verg. op een korrelbed toe te passen verving Blake D_1 door de z.g. hydraulische diameter van de poriën (d.w.z. de diameter van een overeenkomstige ronde buis met dezelfde weerstand) en stelde deze gelijk aan: totaal inhoud v.d. poriën/de totale opp. van de deeltjes (p. $\text{cm}^2 = S$). M.a.w.

$$D_1 = \delta / S$$

NB. Deze werkwijze wordt eveneens toegepast voor niet-ronde buizen en heeft hier zijn belang bewezen.

Voorts verving Blake V_1 door de snelheid in de poriën:

$$V_1 = V / \delta$$

Tenslotte kan S vervangen worden door

$$\frac{6(1 - \delta)}{D_p}$$

indien de deeltjes rond zijn, terwijl bij niet-ronde deeltjes de uitdrukking

$$\frac{6(1 - \delta)}{\phi D_p}$$

(ϕ = vormfactor)

kan worden gebezigd.

Door invulling in form. (5) vindt men dan:

$$\frac{\Delta P}{L} = 6 \cdot \frac{1}{D_p} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \frac{1-\delta}{\delta^3} \left[\frac{C_w' V}{6 \mu (1-\delta)} \right]$$

10) Tr. Am. Inst. Chem. Eng. 14 (1922) 415

Voor het gebied der kleine Re-getallen is:

$$C'_w = \frac{1}{Re} \quad 11)$$

zoodat voor dit gebied de volgende betr. zou moeten gelden:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\kappa \cdot V \cdot s^2}{\delta^3}$$

De praktische waarnemingen bleken echter steeds een constante waarde hiermede te verschillen, hetgeen Kozeny 12) op het idee bracht dat de lengte der aequivalente kanalen niet L is, doch L_e (lengte der aequivalente kanalen) zoodat de uiteindelijke "Kozeny-formule" luidt:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\kappa}{2} \cdot \frac{\kappa \cdot V \cdot s^2}{\delta^3} \quad \text{oftewel} = \frac{\kappa}{2} \cdot \frac{\kappa \cdot V \cdot 36(1-\delta)^2}{\delta^3 \phi^2 \Delta p^2} \quad (6)$$

Carman heeft de waarde van form. (6) aan de hand van zeer goede waarnemingen bewezen, ook voor het gebied van de gróote Re-getallen. Hij komt daarbij tot de volgende algemene betrekking:

$$C''_w = \frac{\Delta p \cdot g \cdot \delta^3}{L \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 s} = 10 \left(\frac{\delta s}{\rho V} \right) + 0.07 \left(\frac{\delta s}{\rho V} \right)^{0.1}$$

hetgeen voor het laminaire gebied beteekent:

$$k = 10$$

Leva c.s. 5) vinden voor k een waarde = 11 en voor het gebied der grote Re-getallen:

$$C''_w = \frac{0.93}{\rho V} \left(\frac{\delta s}{\rho V} \right)^{0.1}$$

hetgeen dus zeer goed overeenstemt met Carman. Carman wijst er tenslotte nog op, dat de correlatie opgaat voor alle mogelijke soorten vullichamen (b.v. spiralen en zadels), doch dat ringen duidelijke afwijkingen vertonen. Bij een mengsel van verschillende deeltjes-grootte berekenen zoowel Carman als Leva D_p uit volgens:

$$D_p = \sum x \alpha_p$$

x = gew.% v.e. fractie; d_p = diam. v. die fractie

De volgende bevestigingen van de correlatie van Kozeny worden nog door Carman vermeld:

1. Bepast men ϕ m.b.v. de formule, dan klopt

11) Perry, Chem. Eng. Hndbk Bl. 810

12) Zie Carman 7)

pen de berekende waarden met de waarden gevonden langs microscopische weg volgens Heywood.

2. Pirie 13) vergelijkt de berekende waarde voor S uit de formule met langs andere weg bepaalde en vindt afwijkingen binnen 10%.

3. White 14) gaat zoo ver de denkbeeldige ronde kanalen door een bed te vergelijken met gebogen buizen en komt tot de conclusie, dat de equivalente kanalen spiralen zijn, waarvan de spiraaldiameter = 1,5x diameter van de kanalen.

4. Lewis 5) vindt alleen een iets afwijkende waarde voor k (= 8,5), hetgeen echter m.i. binnen de waarnemingsnauwkeurigheid valt.

Rose

Het is dan ook geen wonder, dat de Kozenyformule tot nu toe als de beste op dit gebied beschouwd wordt en uitgebreide toepassing vindt voor het berekenen van de met vullichamen gevulde torens en filters in de industrie 15).

Prof. Heertjes wijst er echter op, dat de theoretische afleiding van de formule niet geheel exact is, hetgeen ook overduidelijk wordt aangetoond door Brinkman 16).

Brinkman schrijft form. (6) door enkele eenvoudige handgrepen in de volgende vorm:

$$\frac{3\pi \cdot V \cdot \sigma_p \cdot N}{\Delta P \cdot O} = \frac{\delta^3}{1-\delta} \times \frac{1}{10}$$

N = totaal aantal deeltjes i/h bed
Oftewel:

$$\frac{F \cdot N}{\Delta P \cdot O} = \frac{\delta^3}{1-\delta} \times \frac{1}{10}$$

F = de kracht op één deeltje uitgeoefend, indien zich dit alleen in de buis bevond.

Het is hieruit onmiddellijk duidelijk, dat hier een ongelijkheid staat voor het gebied, waar de deeltjes (door welke oorzaak dan ook) verder uitsen zouden komen te liggen: wanneer $\delta = 1$ wordt F gelijk aan de kracht berekend voor de vrije val. Het linkerlid nadert dan tot 1. Daar het rechterlid dan tot oneindig nadert, moeten in dit gebied afwijkingen ~~van~~ van de Kozeny-correlatie optreden. In het δ -gebied waarmee men bij filtratie e.d. te maken heeft zijn deze afwijkingen blijkbaar binnen de waarnemingsnauwkeurigheid.

13) persoonlijke mededeeling aan Carman

14) Proc. Roy. Soc. 1929, 645

15) College Prof. Heertjes 1949-1950

16) Appl. Scient. Res. Vol. A1 No.1 bl. 27

Alvorens echter form.(6) als basis te gebruiken voor beschouwingen omtrent fluidisatie, zoals dit wordt gedaan door Leva c.s. 5) en R.D. Morse 6), is voorzichtigheid geboden, daar men hier in een groter δ -gebied komt. Volgens Brinkman zijn de tot nu toe besproken beschouwingen te simplistisch en dient men rekening te houden met de invloed welke de deeltjes d.m.v. secundaire luchtsnelheden enz. op elkander uitoefenen.

Teneinde deze in rekening te kunnen brengen beschouwt hij de deeltjes-zwerm als een poreuze massa, waarvoor de wet van d'Arcy geldt 17), en berekent m.b.v. deze wet plus de wet van Navier Stokes 18), die in de open ruimten in de poreuze massa geldt, de kracht uitgeoefend op een zich in de massa bevindend bolletje.

Op zeer vernuftige wijze komt hij tenslotte tot zijn formule:

$$\frac{3\pi \mu D_p V N}{\Delta P \cdot o} = 1 + \frac{3}{4}(1-\delta)\left(1 - \sqrt{\frac{\delta}{1-\delta} - 3}\right) \quad (7)$$

In fig. 5 zijn zoowel de Kozeny-verg. als de Brinkman-formule afgebeeld. Hieruit blijkt duidelijk, dat groote verschillen in de waarden volgens beide formules berekend pas kunnen optreden bij $\delta > 0,8$; een gebied dat bij fluidisatie met gassen nooit bereikt wordt.

Bij de waarnemingen van Wilhelm en Kwauk 18), die o.a. met water fluidiseerden, vinden we echter waarden tot $\delta = 0,94$. Deze waarnemingen zijn in de grafiek aangegeven en vertoŕnen opvallende overeenkomst met de Brinkman-lijn.

Bij de omrekening van de gegevens van Kwauk werd gebruik gemaakt van form. (2) ter berekening van $F \cdot C_w$ werd opgezocht in de tabel van Perry 19). Het merkwaardige hierbij is, dat de waarnemingen van Kwauk voor een groot deel reeds in het overgangsgebied van C_w liggen, zodat de door Brinkman voor kleine Re-getallen afgeleide betrekking ook op het gebied der groote Re-getallen van toepassing blijkt te zijn. NB. Bij de afleiding van Kozeny, evenals die van Brinkman is geen rekening gehouden met werveling of circulatie in het bed, en het is dus gevaarlijk deze formules aan fluidisatie-gegevens te toetsen. Inderdaad geven de resultaten van ver-

Brinkman combineert aldus de bollen- en de buizentheorie.

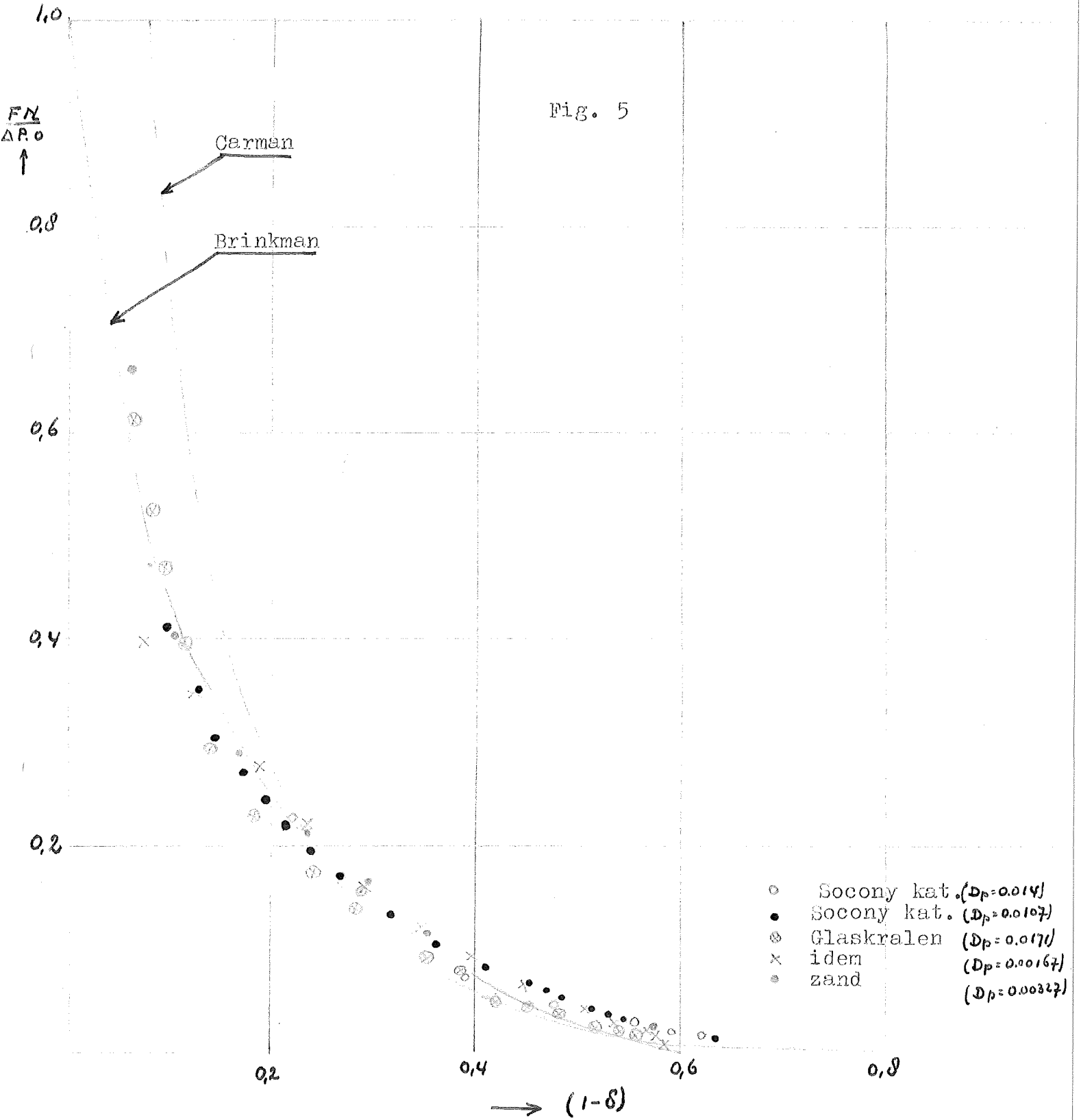
In een later gepubliceerd artikel vergelijkt Verschoor 16') door hem m.b.v. vloeistof-fluidisatie verkregen resultaten eveneens met de correlatie van Brinkman, waarbij zeer goede overeenstemming bleek te bestaan.

18) Chem. Eng. Progr. 44 (1948) 201

19) Chem. Eng. Handbk, bl. 1853

17) $v = -\frac{k}{\mu} \Delta P$
 $k = \text{permeabiliteit}$

16') Appl. Scient. Res. Vol. A2 No. 2 (1950) 155



schillende onderzoekers betreffende fluidisatie met gassen grote afwijkingen met beide formules. Ik heb echter aangenomen, dat bij fluidisatie met vloeistoffen de wervelingen in het bed zeer gering zijn.

Samenvatting: Betreffende een isothermisch proces, dat plaats heeft in phase I zijn alle zijn alle onderzoekers het erover eens, dat

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{D_p} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot f(Re) \cdot f(\delta) \quad (8)$$

De meeningen lopen echter uiteen omtrent de ware vorm van $f(\delta)$.

Leva 20) en Carman 7) komen beide tot de conclusie dat

$$f(Re) = k \left(\frac{D_p V \rho}{\mu} \right)^{-1} \text{ voor kleine Re-getallen}$$
$$= k' \left(\frac{D_p V \rho}{\mu} \right)^{-0,1} \text{ voor groote Re-getallen.}$$

Uit het bovenstaande heb ik tenslotte de conclusie getrokken, dat de kozeny voor een vast korrelbed zeer goed voldoet, hoewel men op theoretische gronden beter gebruik zou kunnen maken van de formule van Brinkman. In het δ -gebied waarmede men bij vaste korrelbedden en gas-fluidisatie te maken heeft, komen beide formules vrijwel overeen.

Opm. Het zou voor de hand hebben gelegen de beginselen van de dimensie-analyse direct op het bed als geheel toe te passen. Dit zou dan hebben geleid tot de betrekking:

$$\frac{\Delta P}{L} = L_k^{-1} \cdot \frac{1}{2} \rho v_k^2 \cdot f\left(\frac{L_k v_k \rho}{\mu}\right) \quad (21)$$

waarin: L_k = een lengtedimensie
 v_k = een snelheidsdimensie

In deze formule is nog geen rekening gehouden met dimensieloze factoren, terwijl geen antwoord wordt gegeven op de vraag, welke lengte resp. snelheid onder L_k resp. v_k moeten worden verstaan.

Neemt men aan, dat

$$L_k = D_p \cdot f(\delta) \quad \text{en}$$
$$v_k = V \cdot f(\delta),$$

hetgeen ~~duurzaam~~ voor de hand ligt, dan is men op form. (8) teruggekomen.

*het van Brinkman-sterkte
model is acceptabel voor
klein δ , maar gaat
besselijk fout op bij grote
 δ . Voor $\delta < 0,6$ gaat
Brinkman naar*

/verderop wordt hier nader op ingegaan:
"fluidisatie-energie" van Leva.

20) Chem. Eng. Progr. 43 (1947) 549

21) Happel, Ind. Eng. Chem. 41 (1949) 1161.

Hoewel deze beschouwing wellicht van waarde is als bevestiging van form. (8) is het duidelijk dat m.b.v. dimensieanalyse nooit een oplossing gevonden kan worden voor de ~~wetenschappelijke~~ gedaante van $f(\delta)$.

b. Phase II.

Het overgangs-gebied tusschen phase I en III is bij proefnemingen weinig reproduceerbaar gebleken, zoodat hier weinig concrete gegevens over beschikbaar zijn. Daar er gedurende de expansie nog geen circulatie van deeltjes plaats heeft, mag aangenomen, dat hetgeen voor Phase I geldt ook hier van kracht is; met dit verschil, dat δ nu een veranderlijke grootheid is. Of form. (1) hier reeds van kracht is, is twijfelachtig.

c. Phase III.

Voor een goede fluidisatie geldt hier form. (1) binnen de grenzen die vermeld werden op bl. 2 en 3. De overgang van Phase I in Phase III moet dus te vinden zijn door substitutie van form. (1) in form. (8). Leva²²⁾, die van de Kozeny-formule uitgaat, concludeert uit zijn proefnemingen de juistheid van de volgende overgangs-voorwaarde:

(alleen voor kleine Re-getallen)

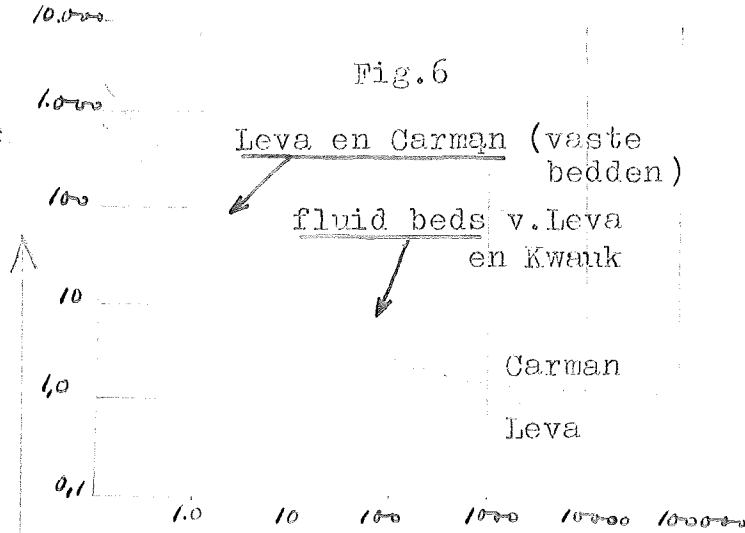
$$V = \frac{0.005 \cdot D_p^3 \cdot \delta_{mf}^3 (\rho_s - \rho)}{\phi^2 \cdot \mu \cdot (1 - \delta_{mf})}$$

δ_{mf} = het poriegehalte aan het einde van de expansie.

Volgens Leva is voorts δ_{mf} te vinden door het bed zeer voorzichtig te storten: de aldus verkregen stapeling zou overeenkomen met het einde van de expansie.

Indien deze beweringen juist zijn - hetgeen m.i. nog wel wat bevestiging behoeft - zou dit van zeer veel belang zijn voor het berekenen van fluidisatie-apparatuur: uit enkele eenvoudig te bepalen constanten is op deze wijze de doorvoersnelheid te berekenen.

De vraag is nu: blijft de formule van Kozeny, die voor een vast bed - althans bij benadering geldt - ook voor fluidisatie gelden?



Teneinde een antwoord op deze vraag te geven correleert R.D. Morse 6) de gegevens van Leva 22) op de wijze van Carman (zie fig.7). Hieruit zijn 2 conclusies te trekken:

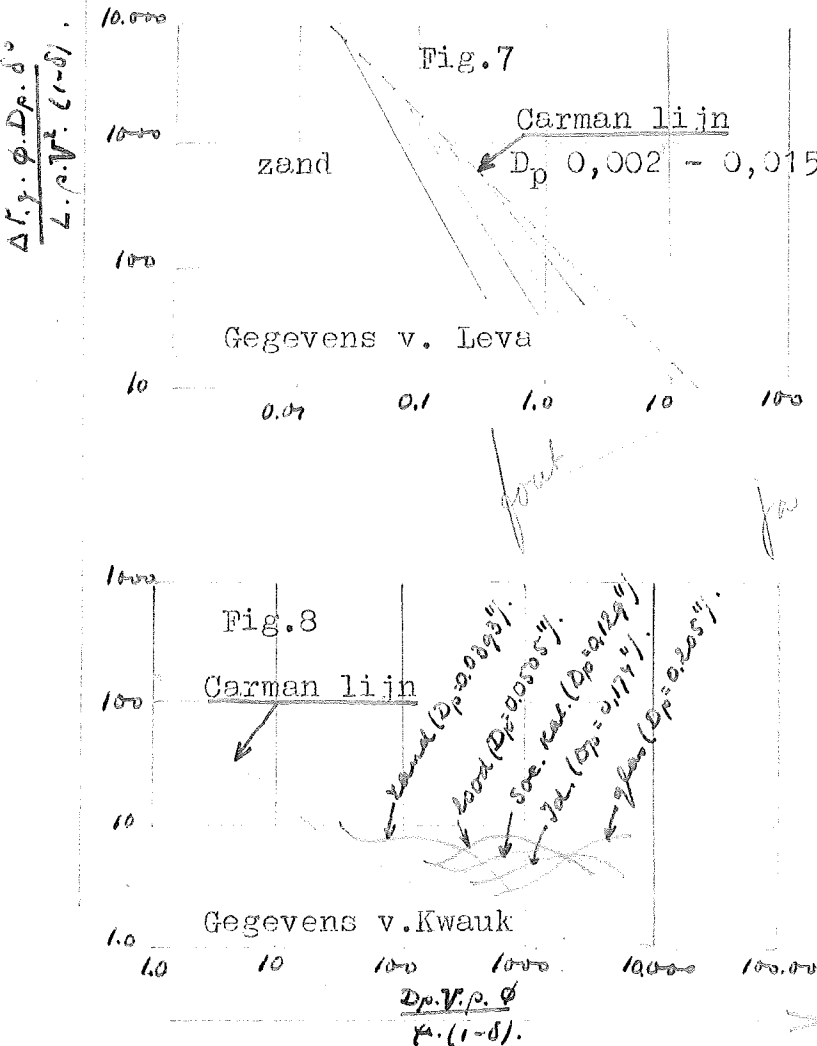
1. Alle punten van Leva liggen lager dan men voor een overeenkomstig vast bed kan verwachten;
2. Het verloop van de lijnen is te steil.

Hierbij zij opgemerkt, dat Leva met zeer kleine zanddeeltjes werkt, zoodat diens gegevens in het gebied der kleine Re-getallen gelegen zijn. Men ziet in fig.7 de lijnen meer en meer tot de Carmanlijn naderen, naarmate het Re-getal groter wordt. Leva, die genoemde afwijkingen zelf reeds constateerde, meent, dat zij alleen voor zanddeeltjes kleiner dan 0,014" optreden en wel in toenemende mate naarmate de deeltjes kleiner worden (zie fig.7).

De afwijkingen, die tengevolge hebben, dat men bij een bepaald drukverval een grotere luchtsnelheid waarneemt dan men zou verwachten, worden volgens Leva veroorzaakt doordat de "extra" snelheid wordt omgezet in energie, benodigd voor de complexe beweging van de deeltjes. Daar de circulatie van de deeltjes intensiever wordt naarmate de deeltjes kleiner worden, zou deze "fluidisatie-energie" hier sterker gaan overheerschen.

R.D. Morse heeft een andere verklaring gevonden in de vorm van een veronderstelde flocculatie van de deeltjes (die inderdaad voor zeer kleine deeltjes waarneembaar is), die tengevolge zou hebben, dat men voor de deeltjesdiameter een grotere waarde zou moeten substitueeren, dan de werkelijke diameter. Hierdoor wordt een punt in de grafiek naar rechts en naar boven verschoven.

De afwijkingen welke de gegevens van Kwauk 18) betr. fluidisatie met lucht zijn te zien in fig.8. In het door Kwauk onderzochte gebied der groote Re.getallen blijkt men dus te hooge waarden voor de



*Fluïdificatie
in slugging met
debuïtatie*

wrijvingsfactor te vinden, terwijl de lijnen een zeer onregelmatig verloop hebben. Dit zou volgens R.D. Morse wijzen op slug-vorming.

Fluïdificatie met water geeft volledige overeenstemming met de lijn volgens Carman. Morse ziet hierin een bevestiging van zijn opvatting als zouden de afwijkingen resp. met flocculatie en slugging in verband staan. Beide verschijnselen doen zich n.l. niet voor bij vloeïstof-fluïdisatie.

✓ Verschoor 16') heeft ook eenige segregatie bij vloeïstof-fluïdisatie geconstateerd (de drukgradient neemt af naarmate deze hoger in het bed gemeten wordt). De mate van segregatie moet echter ongetwijfeld minder zijn geweest dan bij gassen.

Ook om andere redenen doet de uitleg van Leva omtrent de door hem vastgestelde verschijnselen onwaarschijnlijk aan: indien het gas extra arbeid moet verrichten, zou men juist een grotere drukval verwachten.

De theorie van Morse komt mij om de volgende redenen zeer belangrijk voor: Indien samenballing inderdaad optreedt, moet dit nadeelig zijn voor het contact vaste stof - gas. Dat het andere uiterste (slugging) nadeelig is, is reeds besproken. Het overgangspunt zou misschien als criterium voor een "goed" bed kunnen gelden. Voor zand ligt, blijkens graf. 6 dit overgangspunt bij $Re = 10$. Het zou interessant zijn na te gaan of andere stoffen eenzelfde overgangspunt hebben.

*is een 'goed' bed en
dat dat van Carman
betreft?*
Wen

Andere schrijvers trachten de oplossing van een fluïdisatie verg. te vinden in een andere gedaante van $f(\delta)$ (form. (8), bl. 11). Zoo vindt Lewis 5) geheel experimenteel

$$f(\delta) = \delta^{4,65} \times \text{const.}$$

daarbij opmerkende, dat dit alleen voor een slugging bed geldt.

Happel, 21), die soortgelijke beschouwingen toepast als Brinkman, daarbij echter uitsluitend van een "bollen-theorie" uitgaande (zonder zich dus het bed als een poreuze massa voor te stellen), vindt:

$$f(\delta) = (1 - \delta)^2 \times 6520$$

voor kleine Re -getallen. Hij heeft deze betrekking gecontroleerd en juist bevonden door metingen aan een continue fluïdisatie.

✓ Algemeen:

$$Re_m = Re \cdot (1 - \delta) < 5 \rightarrow \frac{\Delta P_g \cdot D_p}{2\rho V^2 (1 - \delta)^3} = \frac{1630}{Re_m}$$

$$5 - 200 \rightarrow \quad \quad \quad = \frac{1000}{Re_m} + \frac{200}{Re_m^{0.22}}$$

$$> 200 \rightarrow \quad \quad \quad = \frac{207}{Re_m^{0.22}}$$

Beide laatste formules heb ik slechts zeer in het kort besproken, aangezien mij de redeneering van Morse vruchtbaarder lijkt: Door uit te gaan van de grondig onderzochte Carman-formule, waarvan men met zekerheid kan aannemen, dat hij - althans bij kleine waarden van δ \rightarrow geldt voor een vast bed, kan men afwijkingen constateeren, die kenmerkend zijn voor fluidisatie. Dit kan t.z.t. tot conclusies leiden, die verstrekkende gevolgen hebben.

print

Deze afwijkingen uitsluitend te zoeken in $f(\delta)$ lijkt mij gevaarlijk, aangezien omstandigheden als slugging, channeling en samenballing naar mijn meening ook andere factoren, als b.v.

$\frac{D_0}{\rho} v^2$ (zie Morse, bl.14) en

zullen kunnen beïnvloeden.

Bij de bestudeering van vloeistof-fluidisatie zou men dan i.p.v. de Carman-correlatie die van Brinkman moeten kiezen, indien men bij groote waarden van δ wil werken.

.....

*11/13
 Dr. Henning (besluit, Groningen)
 Ind. Eng. Chem. June 1949 met
 Brinkman al een voorbeeld.*

PROEFNEMINGEN

In aansluiting op het voorgaande hebben wij voor zand van verschillende deeltjesgrootte het verband tusschen P en V bepaald.

Apparatuur.

In fig.9 is de gebruikte apparatuur geschetst:

Door ventilator P werd lucht aangevoerd. M.b.v. rotameter R werd het per tijdseenheid door het toestel stromende volume lucht (V_1) gemeten. In principe was het toestel voorts geheel gelijk aan fig.1. De drukaftappen A,B,C,D en E zijn zoodanig gelegen, dat E zich boven het oppervlak van het bed bevond, terwijl de onderlinge afstanden AB, BC en CD precies 5 cm bedroegen.

Het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de buis bedroeg $71,25 \text{ cm}^2$, terwijl het s.g. van het zand m.b.v. een pyknometer bepaald $2,69 \text{ g/cm}^3$ bedroeg.

De manometers waren gevuld met paraffineolie, waarvan het s.g. werd bepaald op $0,865 \text{ g/cm}^3$.

Tabellen.

De op dit onderdeel betrekking hebbende waarnemingen zijn vermeld in de tabellen 1, 2, 3 en 4. Het gebruikte zand werd daarin aangeduid naar de zeeffractie in mikrons.

De vermelde theoretische drukval werd berekend volgens:

$$\Delta P_{th} = \frac{G}{A} = \frac{G}{71,25} \quad (G = \text{gewicht zand})$$

V_1 werd omgerekend in V (d.i. lineaire snelheid berekend op de lddige buis) in cm/sec.

De bedhoogte L is uitgedrukt in cm.; terwijl AE, AB enz. betrekking hebben op de drukval tusschen de punten A en E, A en B enz. omgerekend in cm. water.

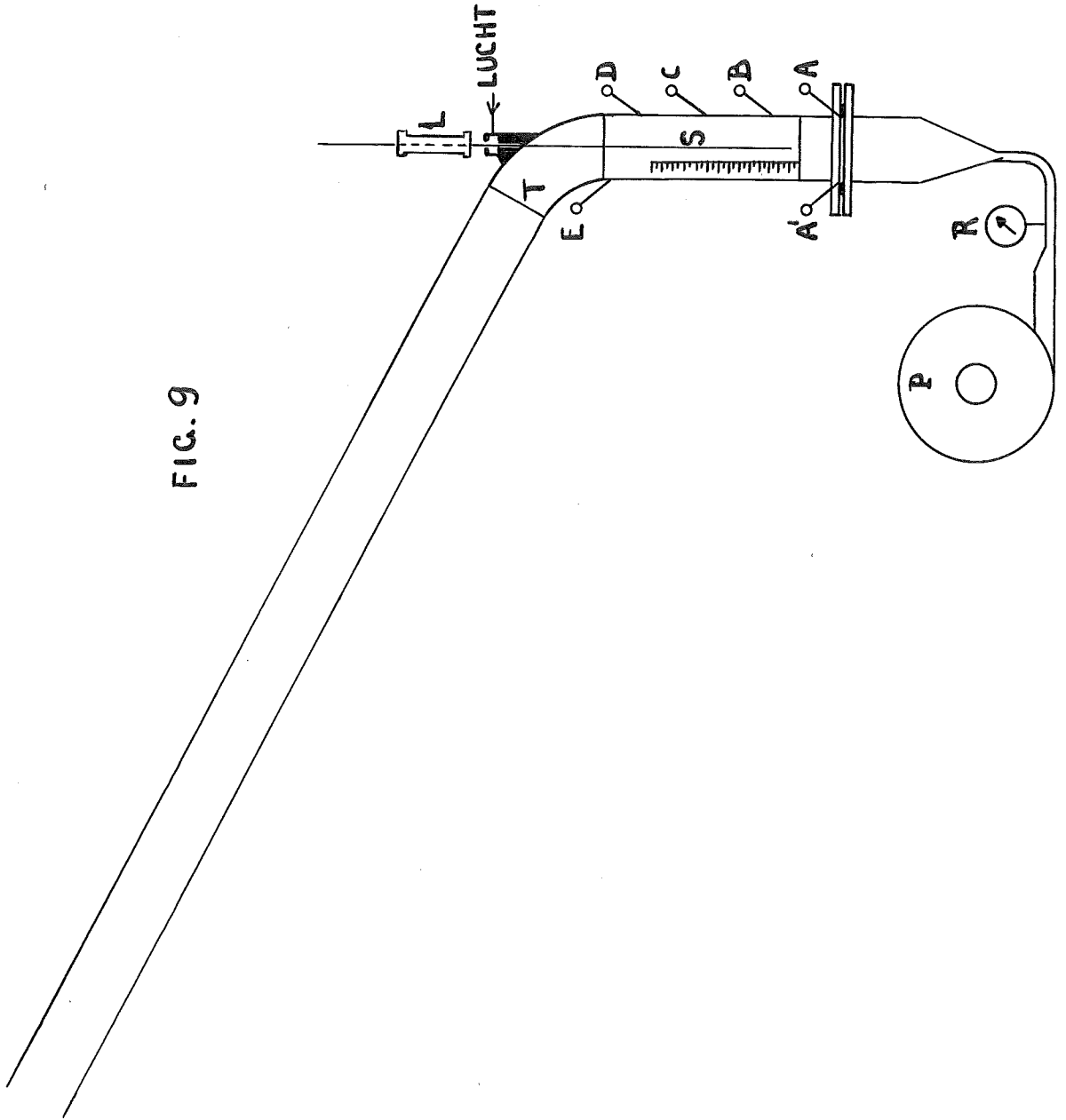
$\frac{\Delta P}{\Delta P_{th}}$ werd gevonden door AE te deelen door ΔP_{th} .

De gegevens van de tabellen 1, 2, 3 en 4 zijn uitgezet in de overeenkomstige grafieken.

In de tabellen 1a, 2a, 3a en 4a vindt men de resultaten van de tabellen 1, 2, 3 en 4 (alleen de laatste groep, die betrekking heeft op het grootste bedvolume) omgerekend in de coördinaten volgens Carman. Hierbij werd de volgende moeilijkheid ondervonden:

D_p en ϕ waren niet nauwkeurig bekend. Derhalve werd voor D_p een betrekkelijk willekeurige gemiddelde waarde aangenomen, terwijl $\phi = 1$ werd verondersteld. M.b.v. deze aanname werd, voor die waarnemingen, die betrekking hebben op een nog niet gefluidiseerd bed, de coördinaten berekend.

FIG. 9



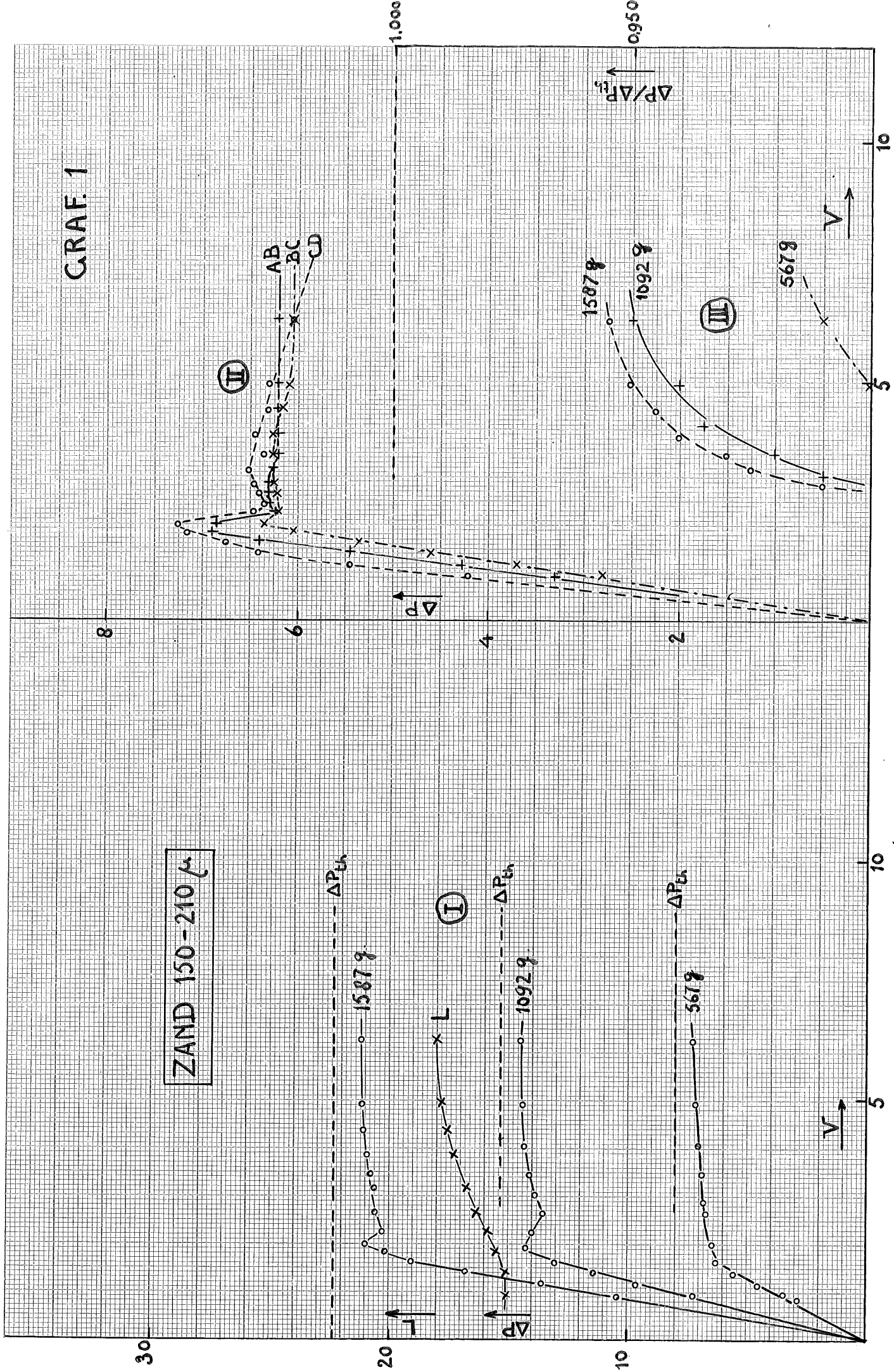
TABEL 1

	V	L	AE	AB	BC	CD	$\Delta P / \Delta P_{th}$	
Zand 150 - 210 Gew. 567 g ΔP_{th} 7,95 g/cm ²	0,83	5,3	2,80				0,350	
	0,93	5,3	3,40				0,430	
	1,16	5,3	4,50				0,570	
	1,40	5,3	5,50				0,690	
	1,61	5,3	6,30				0,790	
	1,82	5,4	6,40				0,805	
	2,00	5,5	6,40				0,805	
	2,63	5,6	6,70				0,840	
	2,89	5,9	6,75					
	3,44	6,0	6,85				0,860	
	4,05	6,1	7,00				0,880	
	4,91	6,3	7,15				0,900	
	6,24	6,5	7,25				0,910	
	Gew. 1092 g ΔP_{th} 15,30 g/cm ²	0,93	10,0	7,20				
1,16		10,0	9,60					
1,40		10,1	11,60					
1,61		10,3	13,00					
1,92		10,6	14,20					
2,24		10,9	13,95					
2,63		11,0	13,50				0,880	
3,02		11,3	13,85				0,905	
3,44		11,5	14,10				0,920	
4,05		11,8	14,30				0,935	
4,91		12,1	14,40				0,940	
6,24		12,4	14,50				0,950	
Gew. 1587 g ΔP_{th} 22,30 g/cm ²		0,93	15,0	10,40	2,80	3,30	4,20	
		1,16	15,0	13,60	3,70	4,30	5,45	
	1,40	15,1	16,70	4,60	5,45	6,40		
	1,61	15,3	19,05	5,35	6,40	6,75		
	1,82	15,5	20,15	6,05	6,90	7,15		
	2,00	15,7	20,95	6,85	6,85	7,25		
	2,24	15,9	20,25	6,25	6,20	6,45		
	2,42	16,1	20,40	6,30	6,20	6,35		
	2,63	16,3	20,55	6,30	6,20	6,40		
	2,84	16,5	20,35	6,30	6,25	6,45	0,910	
	3,14	16,7	20,60	6,25	6,25	6,50	0,925	
	3,44	16,8	20,75	6,20	6,25	6,35	0,930	
	3,86	17,2	20,90	6,20	6,25	6,45	0,940	
	4,38	17,5	21,05	6,20	6,15	6,30	0,945	
	4,91	17,7	21,15	6,20	6,10	6,30	0,950	
	6,24	18,0	21,25	6,20	6,05	6,05	0,955	

cm/sec cm/sec cm/sec

GRAF. 1

ZAND 150-210 μ



TABEL 2

	V	L	AE	AB	BC	CD	$\Delta P / \Delta P_{th}$
Zand 105 - 150 μ . Gew. 500 g $\Delta P_{th} = 7,02 \text{ g/cm}^2$	1,40	5,6	6,40				0,915
	1,82	5,8	6,20				0,835
	2,24	5,9	6,30				0,900
	2,63	6,1	6,45				0,920
	3,02	6,3	6,55				0,935
	3,86	6,4	6,70				0,955
	4,91	6,6	6,75				0,965
	6,24	6,7	6,75				0,965
	7,00	6,8	6,80				0,970
	8,88	7,0	6,80				0,970
10,71	7,0	6,80				0,970	
25,02	7,0	6,80				0,970	
Gew. 1000g $\Delta P_{th} = 14,04 \text{ g/cm}^2$	1,40	10,7	12,40				0,885
	1,82	11,5	12,80				0,915
	2,24	12,0	13,10				0,935
	2,63	12,3	13,30				0,950
	3,02	12,4	13,40				0,955
	3,86	12,7	13,50				0,965
	4,91	12,9	13,60				0,970
	6,24	13,2	13,65				0,975
	7,00	13,4	13,75				0,980
	8,88	13,7	13,80				0,985
10,71	-----	13,85				0,985	
Gew. 1575 g $\Delta P_{th} = 22,10 \text{ g/cm}^2$	1,40	17,3	20,40				0,925
	1,82	18,1	20,50				0,930
	2,24	18,7	21,05				0,950
	2,63	19,0	21,35				0,965
	3,02	19,3	21,45				0,970
	3,86	19,6	21,55				0,975
	4,91	20,0	21,65				0,980
	6,24	20,4	21,75				0,985
	10,71	-----	21,80				0,985
	Gew. 1605 g $\Delta P_{th} = 22,50 \text{ g/cm}^2$	0,93	16,5	16,75	4,65	5,05	6,05
1,16		16,8	20,90	6,30	6,60	6,70	928
1,45		17,4	20,40	5,70	5,70	5,90	906
1,61		17,9	20,55	5,80	5,65	5,90	913
2,00		18,5	20,85	5,80	5,65	5,90	917
2,42		19,0	21,10	5,80	5,60	5,85	936
2,89		19,4	21,30	5,80	5,60	5,67 5,75	916
3,24		19,6	21,45	5,80	5,55	6,70 5,80	953
3,66		19,7	21,50	5,80	5,50	6,60 5,70	955
4,26		19,9	21,50	5,80	5,50	6,45 5,50	955
5,00		20,1	21,55	5,80	5,50	6,30 5,45	957
6,24		20,5	21,65	5,90	5,50	6,10 5,30	962

GRAF. 2

ZAND 105-150 μ

30

20

10

ΔP_{th}
1575 g

ΔP_{th}
1000 g

ΔP_{th}
500 g

(I)

(II)

(III)

AB
BC
CD

1575 g
1000 g
500 g

$\Delta P / \Delta P_{th}$

0.950

1.000

V

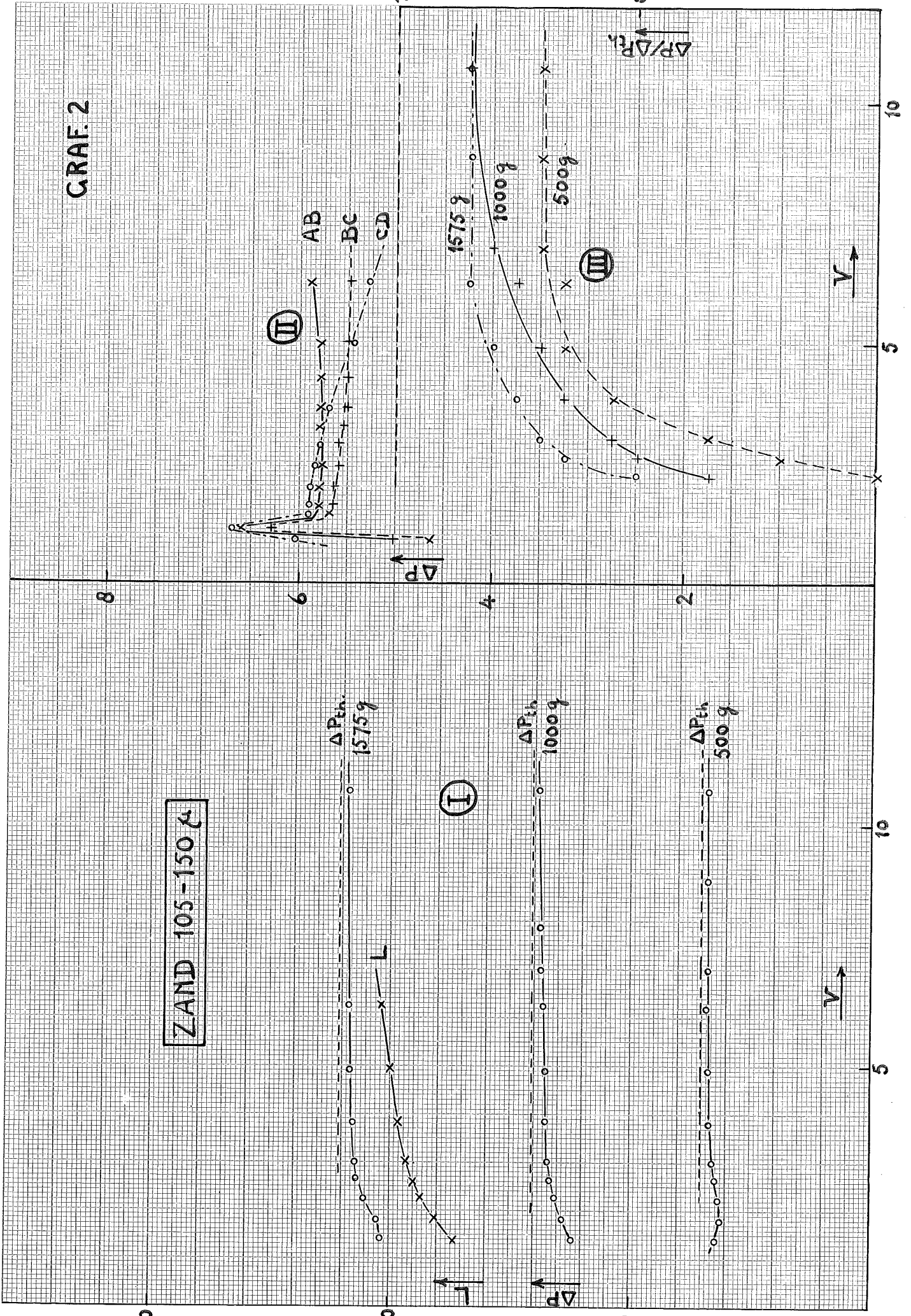
V

10

5

5

10

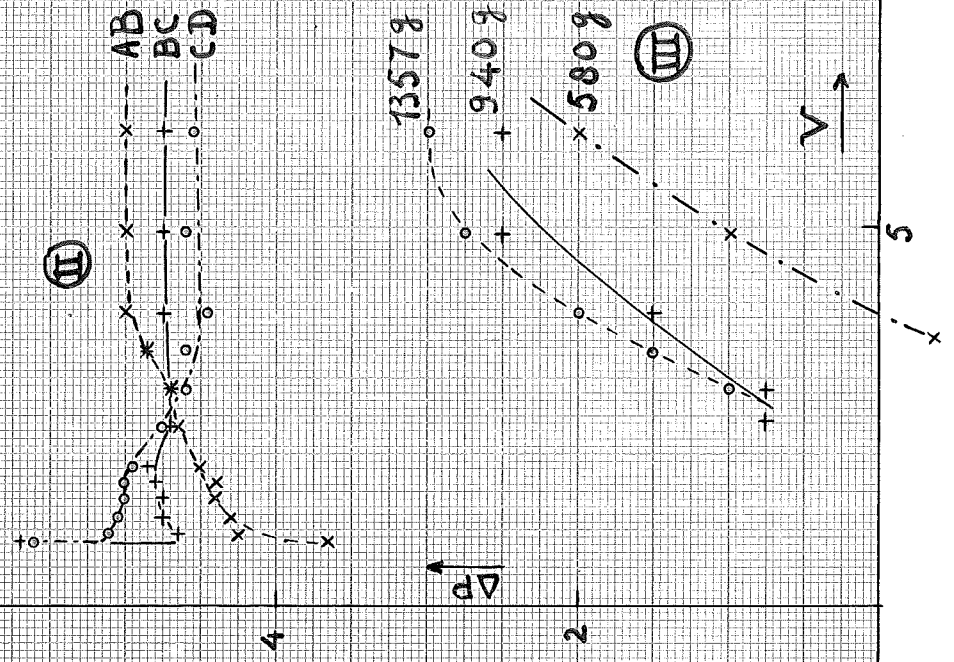
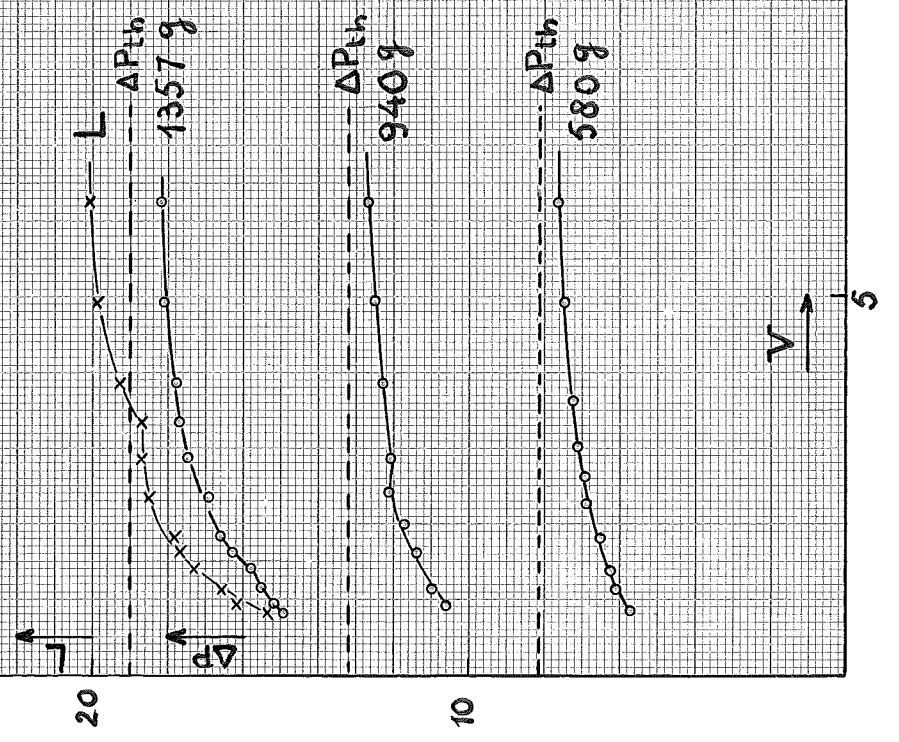


TABEL 3

	V	L	AE	AB	BC	CD	$\Delta P / \Delta P_{th}$
Zand 75 - 105	0,83	6,8	5,70				0,700
Gew. 580 g	0,93	7,0	5,90				0,725
ΔP_{th} 8,15 g/cm ²	1,16	7,3	6,10				0,750
	1,40	7,4	6,30				0,775
	1,82	7,5	6,50				0,800
	2,24	8,0	6,90				0,850
	2,63	8,2	6,95				0,855
	3,02	8,6	7,15				0,875
	3,64	8,7	7,25				0,890
	4,91	9,0	7,50				0,920
	6,24	9,1	7,65				0,940
Gew. 940 g	0,93	11,8	10,60				0,805
ΔP_{th} 13,20 g/cm ²	1,16	12,1	11,00				0,830
	1,61	12,6	11,40				0,865
	2,00	13,0	11,70				0,885
	2,42	13,4	12,10				0,915
	2,84	13,5	12,10				0,915
	3,86	13,8	12,30				0,930
	4,91	13,9	12,50				0,950
	6,24	14,1	12,70				0,950
Gew. 1357 g	-----	14,3	10,80	5,70	6,30	5,45	
ΔP_{th} 19,00 g/cm ²	0,83	15,4	14,90	3,65	5,70	5,60	
	0,93	16,2	15,20	4,25	4,65	5,10	
	1,16	16,6	15,50	4,30	4,75	5,05	
	1,40	17,3	15,80	4,40	4,75	5,00	0,830
	1,61	17,6	16,30	4,40	4,80	5,00	0,860
	1,82	17,8	16,60	4,50	4,85	4,95	0,875
	2,33	18,5	16,95	4,65	4,70	4,75	0,890
	2,84	18,7	17,50	4,70	4,70	4,60	0,920
	3,34	18,7	17,70	4,85	4,85	4,60	0,930
	3,86	19,3	17,80	5,00	4,75	4,45	0,940
	4,91	19,9	18,10	5,00	4,75	4,60	0,955
	6,24	20,1	18,20	5,00	4,75	4,55	0,960

GRAF. 3

ZAND 75-105 (4)



30

8

6

4

2

Ⓘ

10

5

10

ΔP

$\Delta P / \Delta P_{th}$

V

V

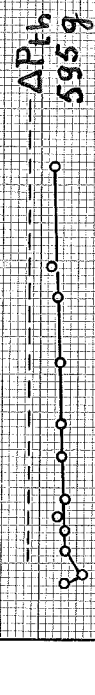
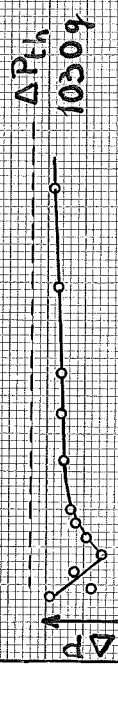
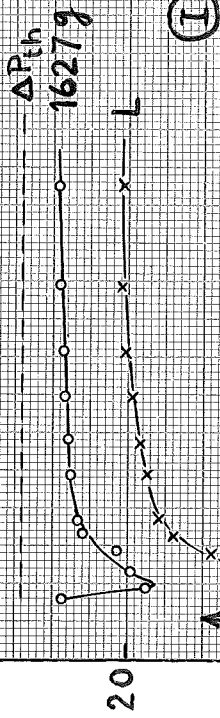
TABEL 4

	V	L	AE	AB	BC	CD	$\Delta P / \Delta P_{th}$
Zandmengsel:	-----	6,0	6,50				0,780
75 - 105 en 150 - 210	0,77	6,1	7,30				0,875
verh. 1:1	0,83	6,2	6,30				0,730
Gew. 595 g	0,93	6,5	7,30				0,875
ΔP_{th} 8,35 g/cm ²	1,16	6,7	7,25				0,870
	1,40	6,8	7,30				0,875
	1,61	7,0	7,50				0,900
	1,82	7,2	7,30				0,875
	2,00	7,3	7,30				0,875
	2,42	7,5	7,40				0,890
	2,84	7,7	7,40				0,890
	3,64	7,8	7,50				0,900
	4,49	7,9	7,55				0,905
	4,91	7,9	7,65				0,915
	6,24	7,9	7,65				0,915
Gew. 1030 g	-----	9,7	11,20				
ΔP_{th} 14,45 g/cm ²	-----	9,8	12,30				
	-----	10,0	13,60				
	0,77	10,1	13,70				
	0,83	10,2	13,90				
	0,93	10,8	12,75				
	1,16	11,3	13,15				
	1,40	11,7	12,50				0,865
	1,61	12,0	12,90				0,890
	1,82	12,3	13,20				0,915
	2,00	12,6	13,30				0,920
	2,63	12,8	13,50				0,935
	3,24	12,9	13,60				0,940
	3,86	13,1	13,60				0,940
	4,91	13,3	13,65				0,945
	6,24	13,5	13,80				0,955
Gew. 1627 g	-----	15,2	8,25	1,95	2,60	3,55	
ΔP_{th} 22,80 g/cm ²	-----	15,2	17,30	4,35	5,60	7,25	
	0,77	15,9	21,70	6,75	7,25	7,10	
	0,83	15,9	21,85	6,90	7,30	6,75	
	0,93	16,3	19,50	5,70	6,00	6,80	
	1,16	17,0	19,90	6,00	5,25	7,00	0,870
	1,40	17,8	20,20	6,10	5,25	6,25	0,885
	1,61	18,8	21,15	5,55	5,60	5,90	0,925
	1,82	19,2	21,30	5,50	5,55	5,80	0,935
	2,42	19,5	21,50	5,50	5,45	5,65	0,940
	2,84	19,7	21,55	5,45	5,30	5,55	0,945
	3,44	19,9	21,65	5,55	5,30	5,60	0,950
	4,05	20,1	21,70	5,60	5,30	5,35	0,950
	4,91	20,2	21,80	5,60	5,40	5,35	0,955
	6,24	20,2	21,80	5,70	5,45	5,20	0,955

GRAF. 4

ZANDMENGSEL

30



→ V

6

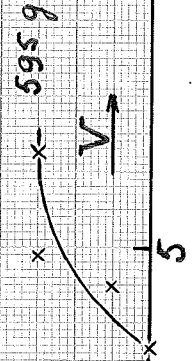
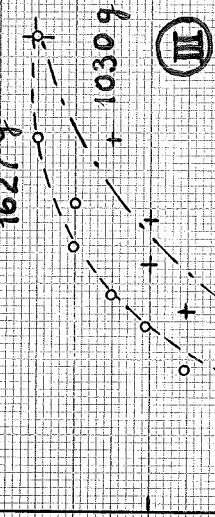
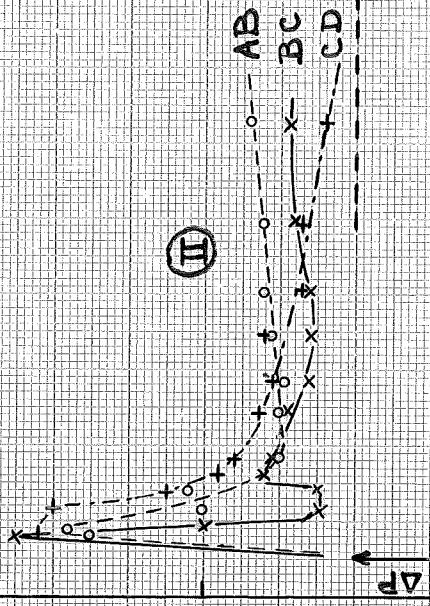
10

8

6

4

2



$\Delta P / \Delta P_{th}$

0.950

10

0.900

1,000

Zoedoende vindt men b.v. in tabel 1a:

abscis 0,204

ordinaat 1930

indien men $D_p = 1,8 \times 10^{-2}$ cm veronderstelt.

In grafiek 5^p kan men zien, dat volgens Garman bij een abscis van 0,204 een ordinaat van 880 behoort; zoodat de aangenomen waarden van D_p en ϕ onjuist zijn. Daarom werd overgegaan tot invoering van een correctie-factor, die gelijk is aan

$$\frac{D_p \times \phi}{1,8 \times 10^{-2}}$$

Deze factor beïnvloedt abscis en ordinaat in dezelfde mate en is dus in dit geval

$$= \sqrt{\frac{880}{1930}} = 0,675$$

Door alle op bovengenoemde wijze gevonden abscissen en ordinaten met de correctiefactor te vermenigvuldigen vindt men dus de juiste waarde voor Re_M en f_M .

NB. Het spreekt vanzelf dat voor elke korrelgrootte de correctiefactor afzonderlijk werd bepaald.

Door de aldus berekende waarden in grafiek 5 uit te zetten, werd een soortgelijke correlatie bewerkstelligd als op bl. 13 werd besproken (zie fig.7).

Conclusies.

A. Grafieken 1, 2, 3 en 4.

1. Uit gedeelte I van bovengen. grafieken blijkt, dat het P-V verloop goed overeenkomt met de beschrijving van Parent en Yagol 1) (zie graf.2 bl.1).

2. Tevens blijkt echter uit het L-V verloop, dat de overgang van gepakt- naar gefluidiseerd bed geleidelijker gaat dan de literatuur in het algemeen doet vermoeden (graf.3 bl.1). Waarschijnlijk staat dit in verband met het feit, dat het bed reeds gedurende de expansie plaatselijk begint te borrelen. Hierdoor wordt de homogeniteit verstoord, hetgeen tevens te merken was aan een veelvuldig optredend verschil in drukval tusschen AE eenerzijds en A'E anderzijds gedurende de expansiephase.

3. Uit de gedeelten I en III van gen. grafieken blijkt dat de drukgradient bij geen van de proeven de theoretisch te verwachten drukgradient bereikte, terwijl Lewis 5) juist een overschrijding van de theoretische drukval constateerde (vgl. grafieken bl.2). Bedenkt men echter, dat Lewis bij grotere L_e/L en grotere Re -getallen werkte, dan kan men hierin m.i. toch min of meer een bevestiging van de waarneming

TABEL 1a

Zand 150 - 210

$V_0 = G/\rho_s = 590$

$\rho_{\text{lucht } 18^\circ\text{C}} = 0,18 \times 10^{-4} \text{ poise}$
 $\rho_{\text{lucht } 18^\circ\text{C}} = 1,21 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ } \rightarrow kin. visc. v. lucht = $1,49 \times 10^{-1}$

Veronderstelde $D_p = 1,8 \times 10^{-2} \text{ cm} \rightarrow$ abscis 0,204
 ordinaat 1930

Handwritten notes:
 $111 = 111 \times 10^{-3}$
 $111 = 111 \times 10^{-3}$
 $111 = 111 \times 10^{-3}$

Correctiefactor: 0,675

$V' = Lx71,25$	$1 - \delta = V_0/V'$	δ	$\delta^3 = \delta^3/1-\delta$	Re_M	f_M	
1070	0,550	0,450	0,091 0,165	0,137	1290	0,0180
1070	0,550	0,450	0,091 0,165	0,170	1070	0,0180
1078	0,547	0,453	0,093 0,170	0,207	938	180
1090	0,541	0,459	0,097 0,179	0,240	840	160
1105	0,534	0,466	0,101 0,189	0,276	730	169
1120	0,526	0,474	0,106 0,201	0,307	655	180
1132	0,520	0,480	0,110 0,212	0,348	526	200
1148	0,514	0,486	0,115 0,224	0,381	474	224
1161	0,508	0,492	0,119 0,234	0,419	417	240
1177	0,501	0,499	0,124 0,248	0,458	371	260
1190	0,495	0,505	0,128 0,258	0,513	316	286
1198	0,492	0,508	0,132 0,268	0,565	273	313
1227	0,481	0,519	0,140 0,291	0,648	232	349
1248	0,473	0,527	0,146 0,308	0,749	189	393
1261	0,467	0,533	0,152 0,325	0,850	157	440
1282	0,460	0,540	0,158 0,344	1,098	102	512

TABEL 2a

Zand 105 - 150

$V_0 = G/\rho_s = 596$

in Veronderstelde $D_p = 1,25 \times 10^{-2} \rightarrow$ abscis 0,154
 Ordinaat 2805

Correctiefactor: 0,643

V'	$1 - \delta$	δ	δ^3	$\delta^3/1-\delta$	Re_M	f_M	f_M/ρ
1175	0,507	0,493	0,120	0,236	0,099	1805	0,0238
1198	0,497	0,503	0,128	0,257	0,126	1549	237
1240	0,480	0,520	0,140	0,292	0,163	1061	304
1275	0,467	0,533	0,152	0,325	0,186	940	338
1319	0,456	0,544	0,160	0,351	0,237	645	403
1352	0,440	0,560	0,176	0,400	0,297	495	490
1381	0,431	0,569	0,184	0,426	0,362	365	580
1398	0,426	0,574	0,189	0,443	0,410	301	647
1403	0,425	0,575	0,190	0,447	0,465	238	727
1419	0,420	0,580	0,195	0,465	0,548	180	880
1431	0,416	0,584	0,199	0,478	0,650	133	940
1460	0,408	0,592	0,208	0,510	0,826	90,4	1115

TABEL 3a

Zand 75 - 105

$V_0 = 505$

Veronderstelde $D_p = 0,9 \times 10^{-2} \rightarrow$ abscis
Ordinaat 0,109
3520

Correctiefactor: 0,68

V'	$1-\delta$	δ	δ^3	$\delta^3/1-\delta$	Re_M	f_M	$\frac{d^3}{Re_M^3} \cdot \frac{1}{\delta^3}$
1098	0,460	0,540	0,158	0,344	0,074	2395	0,0350
1152	0,437	0,563	0,178	0,407	0,087	2190	304
1181	0,426	0,574	0,189	0,444	0,1120	1530	466
1231	0,410	0,590	0,205	0,500	0,140	1157	556
1252	0,402	0,598	0,215	0,535	0,165	950	615
1258	0,398	0,602	0,219	0,550	0,188	768	606
1318	0,383	0,617	0,239	0,625	0,250	524	774
1331	0,378	0,622	0,241	0,637	0,309	366	0,107
1331	0,378	0,622	0,241	0,637	0,364	268	118
1375	0,366	0,634	0,255	0,697	0,434	214	135
1418	0,356	0,644	0,267	0,750	0,568	140	170
1431	0,352	0,648	0,272	0,773	0,729	89,5	204

TABEL 4a

Zandmengsel

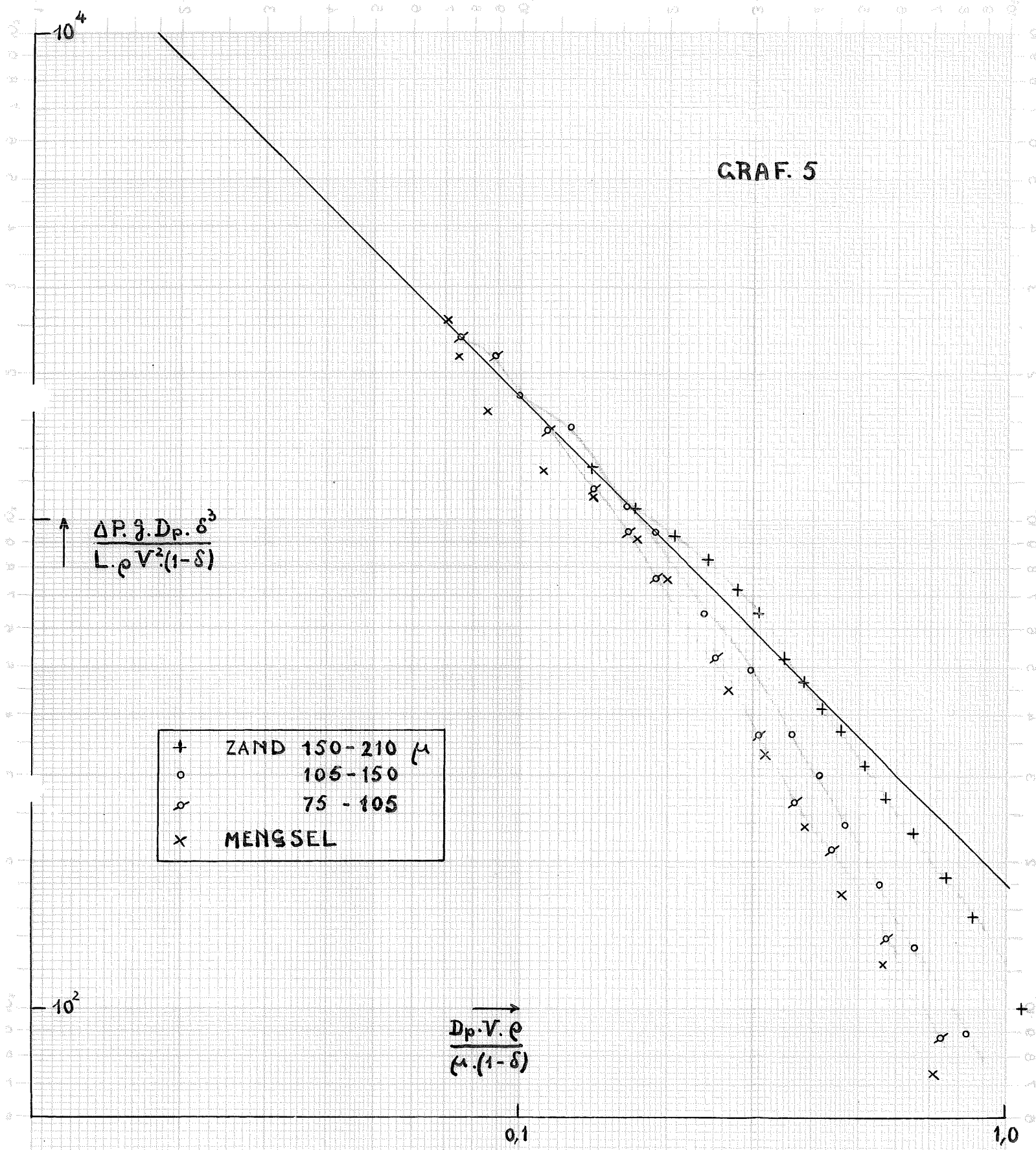
$V_0 = 605$

Veronderstelde $D_p = 0,14 \times 10^{-1} \rightarrow$ abscis
ordinaat 0,140
5000

Correctiefactor: 0,51

V'	$1-\delta$	δ	δ^3	$\delta^3/1-\delta$	Re_M	f_M	$\frac{d^3}{Re_M^3} \cdot \frac{1}{\delta^3}$
1132	0,533	0,467	0,102	0,191	0,071	2550	0,0190
1132	0,533	0,467	0,102	0,191	0,075	2200	0,0208
1161	0,520	0,480	0,110	0,212	0,085	1700	264
1211	0,498	0,502	0,126	0,253	0,112	1275	320
1269	0,476	0,524	0,144	0,302	0,141	1013	380
1340	0,450	0,550	0,166	0,369	0,172	927	414
1368	0,441	0,559	0,174	0,394	0,198	765	468
1390	0,435	0,565	0,180	0,415	0,267	454	618
1403	0,430	0,570	0,185	0,430	0,317	338	723
1419	0,425	0,575	0,190	0,447	0,388	239	870
1431	0,422	0,578	0,193	0,457	0,460	174	0,103
1440	0,420	0,580	0,195	0,465	0,561	120,5	0,124
1440	0,420	0,580	0,195	0,465	0,713	74,7	0,157

GRAF. 5



$$\frac{\Delta P \cdot g \cdot D_p \cdot \delta^3}{L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot (1 - \delta)}$$

- + ZAND 150-210 μ
- o 105-150
- o 75-105
- x MENGSEL

$$\frac{D_p \cdot V \cdot \rho}{\mu \cdot (1 - \delta)}$$

van Lewis zien.

4. Zeer belangrijk is m.i. gedeelte III van de grafieken. Hieruit blijkt n.l. dat de drukgradient varieert met de hoogte, waarop deze wordt gemeten, terwijl ook in de overgangstoestand het mechanisme in de verschillende lagen sterk varieert. (vooral bij kleine korrelgrootte)

In alle waarnemingen blijkt de drukgradient gedurende fluidisatie bovenin het bed kleiner te zijn dan onderin. Men mag zeker niet, zoals o.a. Matheson 4) dit doet, de dichtheid van het bed berekenen m.b.v. "de" drukgradient door gebruikmaking van form. (1).

Verschoor 16') constateerde eenzelfde verschijnsel bij vlocistof-fluidisatie en schreef dit toe aan het optreden van segregatie.

Samenvattend:

a. Bij kleine korrelgrootte plant zich de expansie geleidelijk naar boven voort (gevolg: kleine drukgradient onderin - grotere bovenin) Bij grotere korrelgrootte komt dit niet zoozeer naar voren.

b. Gedurende fluidisatie neemt de segregatie naar boven toe, m.a.w. de bellen groeien (gevolg: kleine drukgradient bovenin; grote drukgradient onderin).

B. Grafiek 5.

5. Grafiek 5 vormt een bevestiging van de opvattingen van R.D. Morse (zie graf. 7 bl.13) dat de gevonden waarden van f_m voor fluidisatie voor $Re < 10$ onder de waarde berekend volgens Carman liggen, terwijl de lijnen steiler lopen dan -45° .

6. Vooral voor het mengsel/wijken de waarnemingen gedaan gedurende expansie tamelijk sterk van de Carman-lijn af, zoodat m.i. te betwijfelen valt of men de Carman relatie op de expansie-phase mag betrekken. Wel dient te worden opgemerkt, dat de punten van het mengsel, alvorens definitief van de Carman-lijn te gaan afwijken, deze eerst naderen. Misschien is dit een aanwijzing dat men de berekening van het fluidisatie-overgangspunt volgens Leva 22) (zie bl.12) toch mag toepassen (mits men form (1), die hierin verwerkt is met de nodige voorzichtigheid handelt.).

INLEIDING

In deel I van dit verslag werd de nadruk gelegd op de vraag: wat zijn de kenmerken van de gefluidiseerde toestand waar het betreft de stroming van het fluidiseerend medium door de gefluidiseerde vaste stof.

Door het volgende onderzoek hebben wij getracht iets meer te weten te komen over de bewegings~~toestand~~, waarin zich de gefluidiseerde korrels zelf bevinden. Dit is van grote belang hiervan voor de studie van de homogeniseering in vloeistoffen. Hierover reeds een artikel is verschenen, welke voor het onderzoek op warmte- en stroming. Naast is een artikel over de homogenisatie.

INLEIDING

In deel I van dit verslag werd de nadruk gelegd op de vraag: wat zijn de kenmerken van de gefluidiseerde toestand waar het betreft de stroming van het fluidiseerend medium door de gefluidiseerde vaste stof.

Door het volgende onderzoek hebben wij getracht iets meer te weten te komen omtrent de bewegings~~toestand~~, waarin zich de gefluidiseerde korrels zelf bevinden. Gezien het grote belang hiervan voor de warmteoverdracht en de homogeniseering in het fluid bed, zijn hierover reeds een aantal onderzoekingen gedaan, welke voor het meerendeel gericht waren op warmte- en stofoverdrachtsmetingen. Daarnaast is een aantal proeven gedaan betr. de homogeniseering door injectie van hetzij anders gekleurde vaste stof, hetzij van vreemd gas, waarna men de vermenging trachtte te vervolgen. Bovengenoemde onderzoekingen vallen buiten het bestek van dit onderwerp en worden daarom niet nader besproken.

In het onderhavige geval bestond de opdracht uit het meten van de krachten die nodig zijn om bepaalde lichamen met een bepaalde snelheid door het bed te doen bewegen en hieruit te trachten tot eenige conclusies omtrent de bewegelijkheid van de deeltjes te komen.

Juist toen hiermede werd begonnen, verscheen het ^{reeds} genoemde artikel van Matheson c.s. 4) die een soortgelijk onderzoek hadden verricht. Zij waren tot het doen van hun proeven gedreven door de volgende overweging:

Indien men lucht door een zeer visceuze vloeistof leidt, ontstaan grotere bellen, dan wanneer men een minder visceuze stof neemt. Bij een fluid bed worden de bellen groter bij grote diameter van de korrels dan bij kleine (zie bl. 2 - "slughoogte"). Door hun onderzoek wilden zij bezien, of ook aan een fluid bed een "viscositeit" kon worden toegekend, die min of meer parallel liep aan de neiging tot slugvorming. De proeven werden verricht door een vlak plaatje als roerder in het bed te laten draaien en volgens het principe van de viscosimeter van Stormer te meten welk koppel benodigd was om dit plaatje met 200 toeren p. minuut te laten draaien. Zij herhaalden hun meting bij verschillende luchtsnelheden en kwamen zodoende tot hun "viscositeits"-V-kromme, welke voor kleine korrelgrootte een duidelijke, voor grote deeltjes een flauwe knik te zien gaf. De met deze knik overeenkomende "viscositeit" namen zij aan als ken-

merkend voor de onder handen stof. De "knik-viscositeit" bleek inderdaad samen te hangen met de deeltjesgrootte, zoodat aan hun doel beantwoord was. Aangezien na dit onderzoek nog niet vaststond of men hier inderdaad van een viscositeit kan spreken, noemen Matheson c.s. de door hen gevonden waarden "schijnbare viscositeit".

PROEFNEMINGEN. (1e serie)

Het leek ons allereerst van belang iets meer over de aard van bovengen. "schijnbare viscositeit" te weten te komen, door deze grootheid bij eenzelfde luchtsnelheid bij varieerend toerental te meten (i.p.v. alleen bij 200 toeren p.min.).

Hiertoe werden de proeven van Matheson herhaald bij wisselend toerental.

Apparatuur.

Wederom werd gebruik gemaakt van de apparatuur van fig.9, door hierin door de bocht F een roerder aan te brengen (S), waaronder een vlak plaatje van x cm was bevestigd. De roerder werd op zijn plaats gehouden door het lager L. Aangezien het toerental bij de eerste waarnemingen niet met het blote oog waar te nemen was, werd de roerder gedreven door een electromotor, waarvan de as met de roerderas in verbinding stond d.m.v. een spiraalveer. De hoekverdraaiing van deze spiraalveer werd tegelijk met het toerental opgenomen m.b.v. een stoboscoop. Hiertoe was aan de motoras een wijzer aangebracht, welke over een op de roerderstang aangebrachte schaal liep.

Teneinde de veer te ijken werd een draad over een katrol eenige slagen om de schaal gewonden, terwijl aan het andere uiteinde een gewicht werd bevestigd. De motoras werd zeer langzaam bewogen en de schaal afgelezen op het moment dat deze door de motoras werd meegenomen. Zie grafiek 6 en tabel 5 voor ijk-resultaten.

Tenslotte werden de gevonden waarnemingen gecorrigeerd voor de uitslag welke bij draaien in lucht optreedt. Zie grafiek 7 en tabel 6 voor correctie.

TABEL 5

Ijktabel

Diameter schaal: 12,7 cm

Gewicht	Aflezing	Koppel
o g	15,50	0
	14,75	
	16,50	
6,52 g	24,00	41,5 gxcn
	22,25	
	25,00	
9,52 g	27,00	60,5
	29,00	
11,52	28,00	73,0
12,52	31,00	79,5
	33,00	
15,52	35,50	98,5
	36,00	
16,52	35,50	105,0
18,52	40,00	117,5
	40,50	
21,52	46,00	137,0
	43,50	
	45,00	
24,52	52,00	156,0
	50,00	
26,52	52,00	168,0
27,52	57,50	175,0
	55,00	
30,52	62,00	194,0
	61,50	
31,52	59,25	200,0
33,52	67,00	213,0
	68,00	
36,52	68,00	232,0
41,52	77,00	264,0
46,52	84,00	296,0
51,51	90,75	327,0
56,52	95,00	360,0
	96,00	

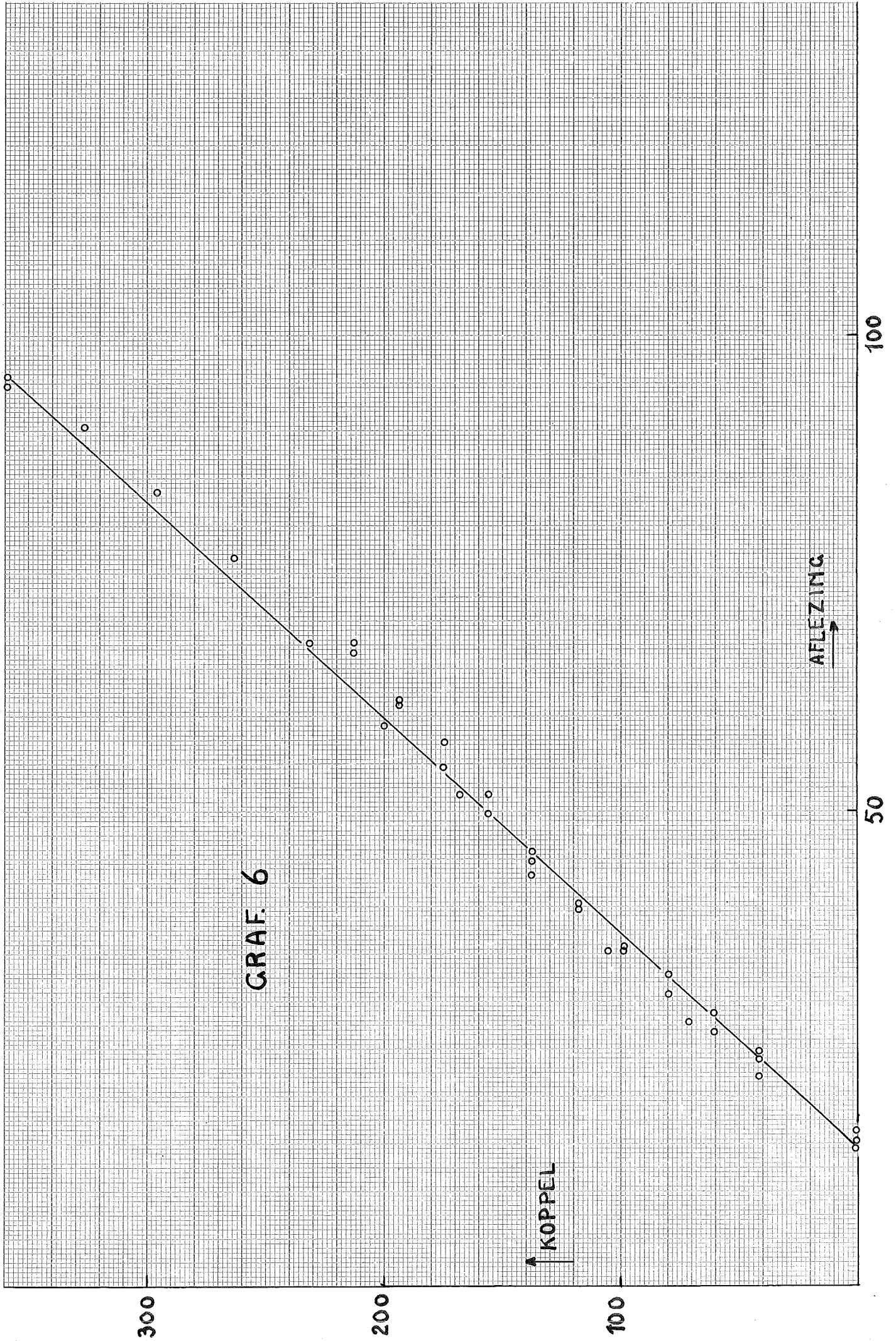
NB. De waarnemingen werden op verschillende dagen verricht.

TABEL 6

Draaien in lucht.

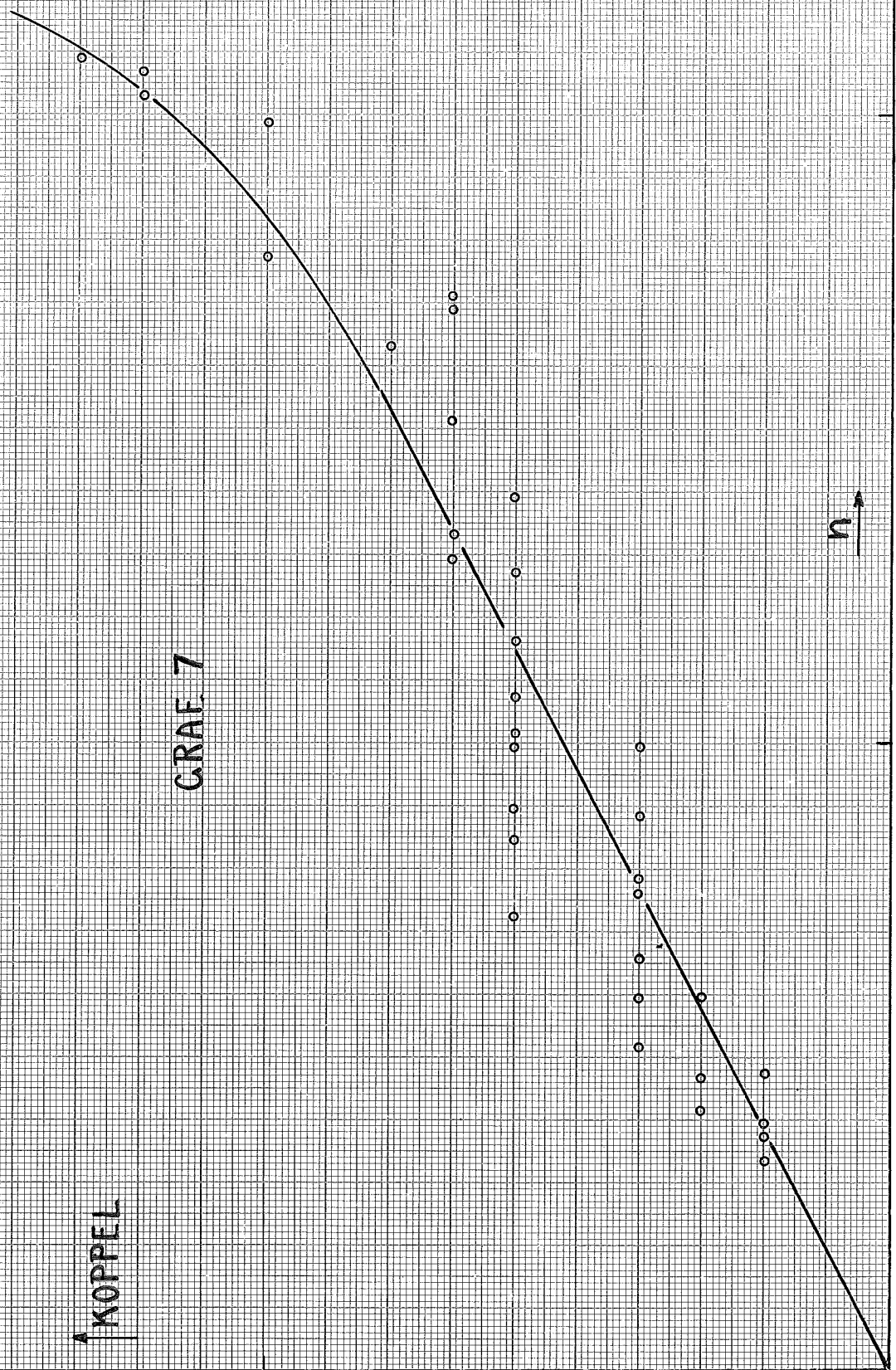
n = toerental p. minuut

V	n	Aflezing	Koppel	
2,10	200	15,00	2,0 2,0	
	300	15,25	12,0 3,0	
	365	15,75	34,0 6,0	
	430	15,75	34,0 6,0	
	500	15,75	64,0 6,0	
	655	16,25	7,0	
	850	16,25	7,0	
	1000	17,00	10,0	
	3,34	1050	17,75	14,0
		890	16,75	10,0
760		16,25	7,0	
640		16,00	6,0	
540		16,00	6,0	
450		15,75	6,0	
385		15,50	4,0	
300		15,50	4,0	
235		15,25	3,0	
210		15,25	3,0	
4,80	170	15,00	2,0	
	1040	17,25	12,0	
	860	16,25	7,0	
	700	16,00	6,0	
	585	15,75	6,0	
	500	15,50	4,0	
	445	15,50	4,0	
	395	15,50	4,0	
	300	15,25	3,0	
	240	15,00	2,0	
6,24	190	15,00	2,0	
	170	15,00	2,0	
	205	15,25	3,0	
	260	15,50	4,0	
	330	15,50	4,0	
	430	15,75	6,0	
	510	16,00	6,0	
	670	16,25	7,0	
	820	16,50	8,0	
	1020	17,50	12,0	



KOPPEL

GRAEF 7



n

500

1000

Waarnemingen.

Volgens de op bl.20 beschreven methode werden onderzocht de zandsoorten 210 - 280; 150 - 210; 105 - 150 en 75 - 105 μ .

Tabel 7 en de grafieken 8 en 9 geven de resultaten van het zand 105 - 150 weer. Grafiek 8 II (n = 3,3) is de figuur, zooals deze door Matheson werd gebruikt.

Conclusies.

1. Men ziet in grafiek 8 II dat het knik-punt van Matheson niet exact is af te lezen
2. Het merkwaardige verloop van de lijnen in graf. 8 I komt nog duidelijker tot uiting in graf. 9.

Men ziet hierin, dat op een gegeven moment

$$\text{Koppel} \propto n^{>2}$$

Men zal zich herinneren, dat deze verg. bij vloeistoffen zelfs bij de hevigste turbulentie niet kan voorkomen. De vraag doet zich dan ook voor, of dit verschijnsel niet geweten moet worden aan samendrukbaarheid van het bed, waardoor ρ plaatselijk kan toenemen door de shelheid van de roerder. Wellicht is de variatie van L bij variatie van het toeren-tal (zie tabel 7) hiervoor een aanwijzing: het bed wordt a.h.w. in elkaar gedraaid. Een afhankelijkheid van ρ en n zou de mogelijkheid van het bestaan van bovenst. betrekking inderdaad kunnen verklaren.

Dit beteekent echter, dat het bed niet in zijn oorspronkelijke toestand blijft, maar door de beweging van de roerder gestoord wordt.

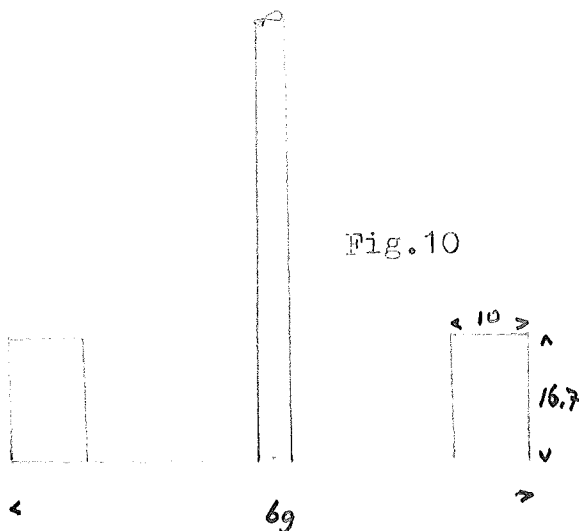
3. Op welk moment de storing begint op te treden valt uit het voorgaande niet af te leiden.

4. Bij de andere zandsoorten vonden wij een soortgelijk verloop. Derhalve hebben wij volstaan met vermelding van de resultaten betr. het zand 105 - 150.

PROEFNEMINGEN (2e serie)

Bij de proefnemingen van de 1e serie was tevens geconstateerd, dat de lucht zich t.g.v. de beweging van de roerder grotendeels door het midden van het bed gaat bewegen. Derhalve werden de proeven herhaald met een roerder van het model, zooals hiernaast is afgebeeld, teneinde te onderzoeken of de storing hierdoor geheel of gedeeltelijk kon worden opgeheven.

Fig.10



TABEL 7

Zand 105 - 150

n = toerental p, sec.

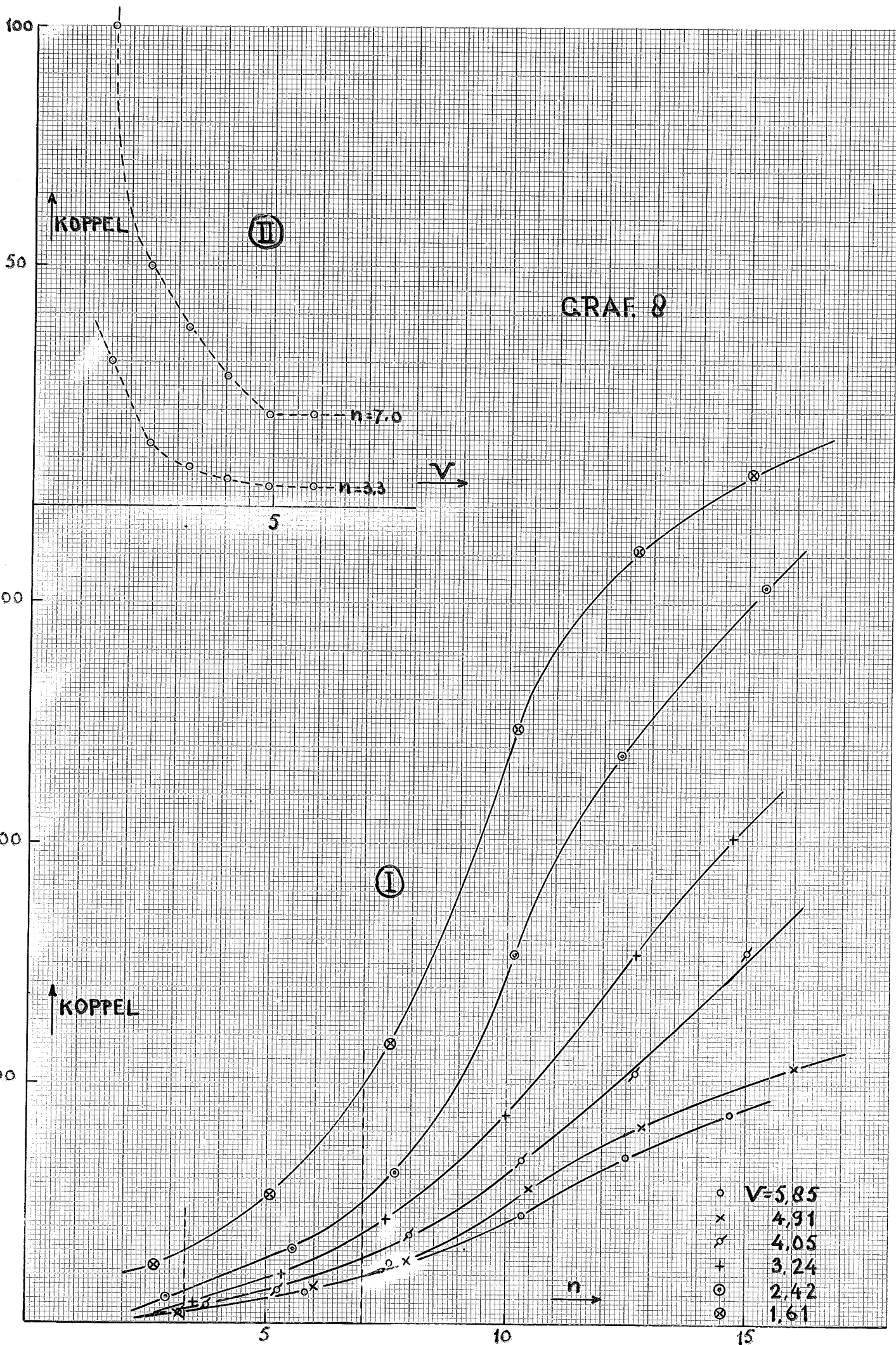
V	L	n	Afl.	Koppel	Koppel (sec.)
5,85	8,7				
	7,9	14,67	37,0	96,5	87,0
	8,1	12,50	32,0	77,5	69,5
	8,25	10,33	26,25	51,5	45,0
	8,35	7,58	21,5	30,0	25,0
	8,5	5,83	18,25	16,0	12,5
	8,6	3,20	16,0	6,0	4,0
	4,91	8,5			
7,6		15,00	41,0	116,5	107,0
7,7		12,83	35,0	90,5	82,5
7,8		10,50	28,75	62,5	56,0
8,1		7,91	22,0	30,5	25,5
8,2		6,00	19,0	19,0	15,0
8,3		3,17	16,0	6,0	4,0
8,4					
4,05	8,15				
	7,4	15,00	51,75	164,5	155,0
	7,5	12,67	40,25	113,5	105,5
	7,5	10,33	31,25	74,5	68,0
	7,7	8,00	24,0	41,5	36,5
	8,0	5,25	18,5	17,0	13,5
	8,1	3,78	16,75	9,5	7,0
	8,15				
3,24	7,6				
	6,9	14,70	62,5	212,0	202,5
	7,0	12,70	51,25	162,0	154,0
	7,2	10,00	35,75	93,5	87,0
	7,5	7,50	25,5	48,0	43,5
	7,6	5,33	20,0	23,5	20,0
	7,6	3,50	17,0	10,5	8,5
	7,7				
2,42	7,3				
	6,7	15,33	86,5	317,5	307,5
	6,8	12,33	70,0	245,0	237,5
	6,85	10,17	51,0	160,5	154,0
	7,0	7,67	30,0	68,0	63,0
	7,2	5,58	22,5	34,5	31,0
	7,3	2,91	17,5	12,5	10,5
	7,2				
1,61	6,9				
	6,6	15,06	97,0	364,0	354,0
	6,6	12,67	89,25	330,0	322,0
	6,6	10,17	72,0	254,0	247,5
	6,65	7,58	42,5	123,5	118,5
	6,55	5,08	27,5	56,5	53,5
	6,6	2,67	20,5	25,5	24,0
	6,7				

emf

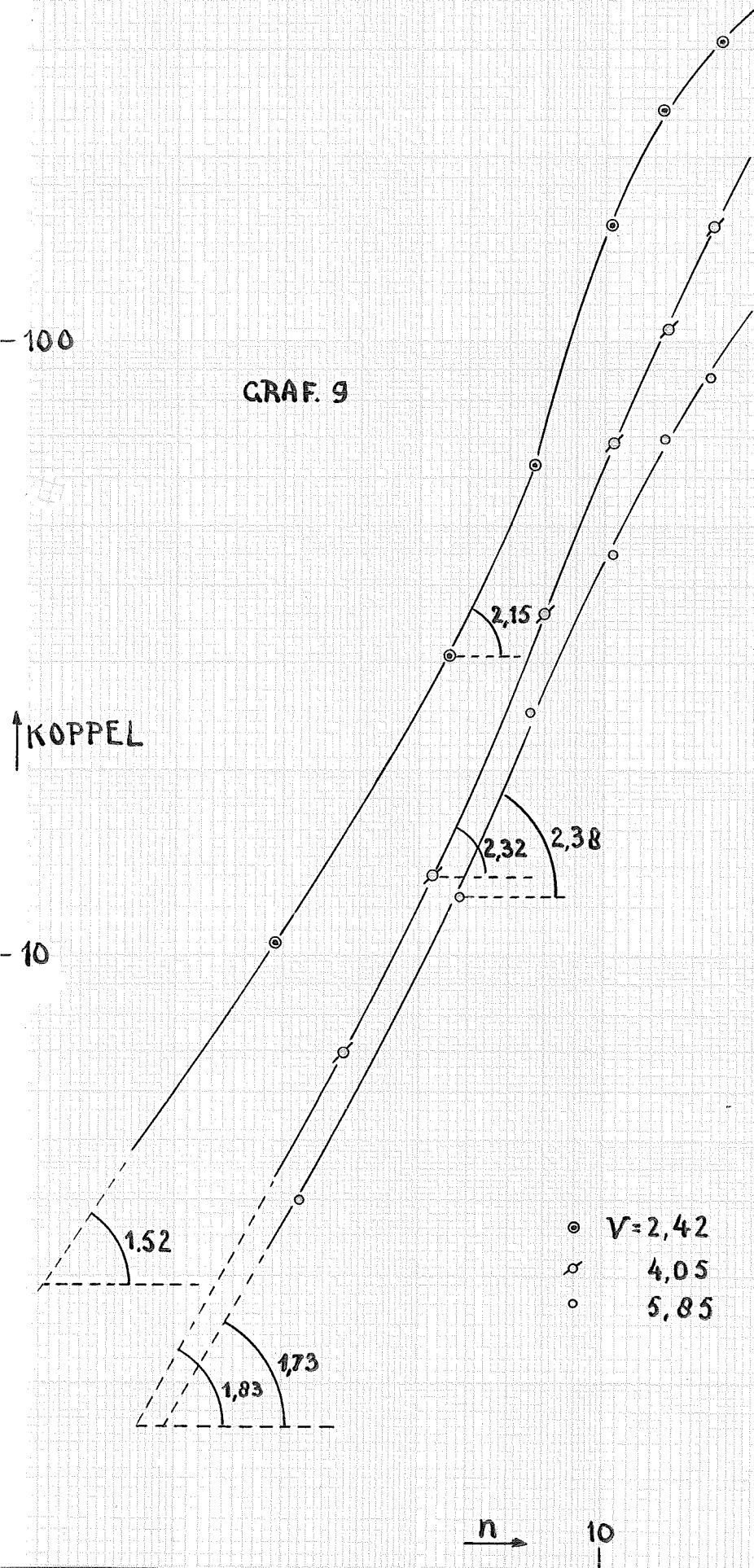
sec

gem

gem



GRAF. 9



Het bleek, dat bij deze nieuwe roerder de ~~tabellen~~ grafieken 6 en 7 als resp. ijk- en correctiegrafieken bruikbaar bleven.

Waarnemingen.

Met de nieuwe roerder werden waarnemingen gedaan met silicagel 210 - 280 en 105 - 150 μ . Tevens werd hier de roerderhoogte gevarieerd. Enkele van vele waarnemingen betr. silicagel 210 - 280 zijn in tabel 8 en grafiek 10 weergegeven.

Conclusies.

1. De verkregen krommen vertonen geen essentiële verschillen met ~~die~~ grafiek 8. Wanneer men grafiek 10 op logaritmisch papier overbrengt blijkt ook hier

$$\text{Koppel} \propto n^{>2}$$

voor tekomen, hetgeen erop wijst dat met de nieuwe roerder geen belangrijke verbetering werd bereikt.

2. Uit grafiek 10 blijkt tevens, dat het hier weinig verschil uitmaakt op welke hoogte men meet: alle punten vallen zeer behoorlijk samen op de krommen 1 en 2.

PROEFNEMINGEN. (3e serie)

Na het voorgaande leek ons de eenige mogelijkheid om waarnemingen te doen zonder daarbij het bed te storen, het toerental drastisch te verlagen.

Apparatuur.

Het bleek het beste de veer-overbrenging, welke bij de eerste en 2e serie werd gebruikt te vervangen door een eenvoudiger mechanisme, waarbij op de roerderstang een klosje werd bevestigd. Op dit klosje werd een draad gewonden, waaraan via 2 katrollen een gewicht kon worden bevestigd. Bij een bepaalde belasting werd het toerental m.b.v. een stopwatch als gemiddelde van ten minste 10 omwentelingen berekend.

De proeven werden met verschillende roedervormen verricht:

- 1e: de schoepenroerder (zie fig. 10)
- 2e: haltervormige roerder met kleine bollen (zie fig 11)
- 3e: idem met grote bollen (fig.12)

De diameter van het klosje bedroeg 2,2 cm, behoudens bij de eerste meting, waar deze 1,9 cm bedroeg.

fig. 12

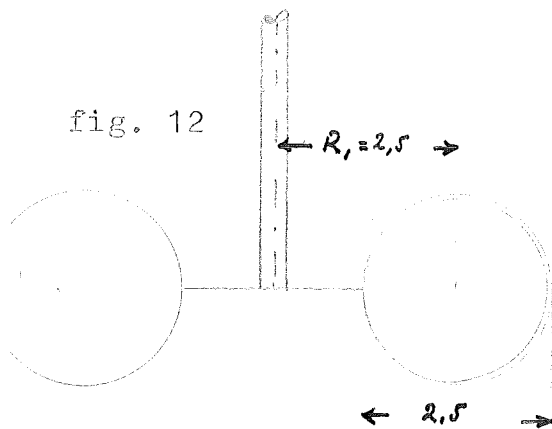
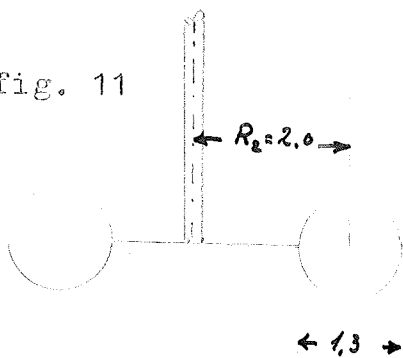


fig. 11



TABEL 8

Silicagel 210 - 280

n toerental p. sec.

A. Roerderhoogte 4 cm

V	n	Afl.	Koppel	Koppel (gec.)	
4,91	10,00	123,0	450	444	
	9,17	115,5	436	430	
	8,17	94,5	353	348	
	7,50	79,0	285	280	
	6,67	66,0	227	223	
	6,00	53,0	170,0	166	
	5,00	37,25	100	97	
	4,17	26,0	50	47	
	3,34	21,0	28	26	
	2,58	18,0	14	12,5	
	3,86	10,00	136,0	535	529
		9,17	125,75	491	485
		8,25	115,0	444	439
7,67		95,0	355	350	
5,83		67,5	234	230	
5,00		50,5	158	155	
4,17		34,5	88	85	
3,33		25,0	46	44	
2,50		20,0	24	22,5	

B. Roerderhoogte 15 cm

V	n	Afl.	Koppel	Koppel (gec.)
4,91	10,00	125,0	488	482
	9,33	120,0	466	460
	8,33	98,0	365	360
	7,50	85,0	310	305
	6,67	70,5	247	243
	6,00	55,0	178	174
	5,17	40,5	114	111
	4,25	30,0	68	65
	3,42	23,5	39	37
	2,50	20,0	24	22,5
	3,86	10,00	135,0	532
9,17		126,0	493	487
8,25		111,0	427	422
7,50		95,0	355	350
6,67		84,0	307	303
5,83		66,5	230	226
5,01		50,5	158	155
4,25		35,5	92	89
3,50		26,75	54	52
2,50		21,0	28	26,5

GRAF. 10

KOPPEL

600

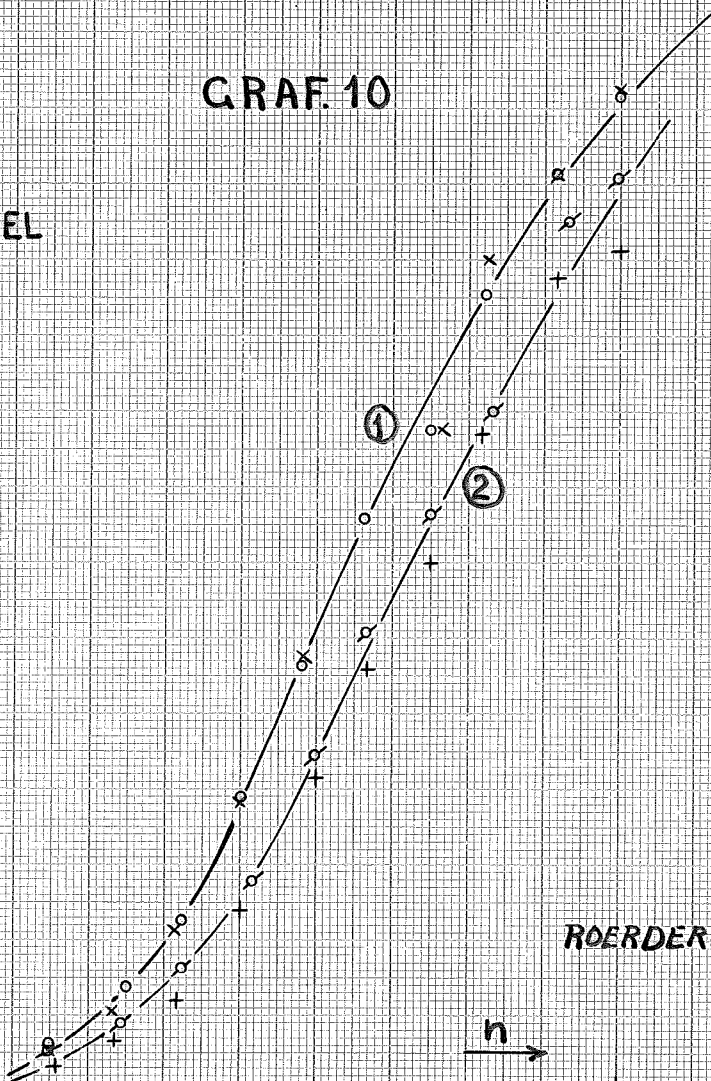
400

200

ROERDERHOOSTE

4	{	x	V=3.86
		+	4.91
15	{	o	3.86
		w	4.91

n



Waarnemingen.

De waarnemingen zijn vervat in de tabellen 9 t/m 18. Hieruit blijkt, dat de metingen betroffen de zandsoorten 150 - 210; 105 - 150; 75 - 105 en een mengsel (1:1 gew. deelen) van de eerste en de laatste soort. Tenslotte werd ter vergelijking silicagel 105 - 150 onderzocht.

Behalve de luchtsnelheid werd ook de roerhoogte gevarieerd.

De tabellen zijn als volgt ingedeeld:

G_0 is het gewicht, dat de roerder juist in beweging brengt, wanneer deze in lucht draait. G_0 werd benaderd door vergelijking van de waarden verkregen door directe waarneming met de waarden verkregen door extrapolatie van de in de tabellen vermelde gegevens naar $G = 0$

Voorts is:

1e kolom: totale belasting

2e kolom: totale belasting - G_0

3e kolom: de in kolom 2 gevonden waarde omgerekend in kracht p. bol of schoep (K); waarbij

$$K = \frac{r}{2R} G$$

4e kolom: waargenomen aantal toeren p. minuut

5e kolom: de uit kolom 4 berekende lineaire snelheid van bol of schoep, volgens:

$$v = \frac{2 \pi n \cdot R}{60}$$

In de grafieken 11 t/m 24 werden de gegevens op verschillende manieren verwerkt, teneinde te trachten een zoo duidelijk mogelijk overzicht van de verschijnselen te geven.

Conclusies.

1. Beschouwing van de lijnen roept de gedachte aan 2 mogelijkheden naar voren:

a. Men kan het eerste gedeelte van de lijnen als recht beschouwen en dus van een "ware viscositeit" spreken, totdat het toerental zoo groot wordt dat storingen gaan optreden doordat de roerder a.h.w. zichzelf beïnvloedt, waardoor de lijnen gaan afbuigen;

b. Er bestaat een zekere analogie met "Non-Newtonian" vloeistoffen, waarbij evenmin als hier een eenvoudige relatie tusschen kracht en snelheid bestaat.

De eerste opvatting is zeer zeker onjuist om de volgende redenen:

1e. de proeven met kleine- en grote bollen zouden eenzelfde waarde voor de viscositeit moeten opleveren, indien onder dezelfde omstandigheden gewerkt wordt. M.a.w. de helling van de

lijnen gedeeld door de bij behorende bolstraal zou b.v. in de beide gevallen van grafiek 13 overeenkomende waarden moeten geven. Hetgeen echter niet opgaat.

2e. Zooals b.v. uit grafiek 21 duidelijk blijkt werden - juist waar het het eerste stuk van de kromme betrof - dikwijls bij een bepaalde waarde van k 2 waarden van v gevonden, die duidelijk uiteen gelegen waren.

3e. Indien de eerste opvatting gegrond ware, zou het voor de hand gelegen hebben, dat de kleine bollen elkander niet zoo gemakkelijk zouden beïnvloeden als de grote. Dit zou een verschuiving van het buigpunt naar rechts met zich mee hebben gebracht, welke echter niet uit de grafieken blijkt.

Dat men evenmin ~~overeenkomst~~ zonder meer over een overeenkomst met "Non-Newtonian" vloeistoffen kan spreken is duidelijk, wanneer men opmerkt, dat het verloop van lijnen op verschillende hoogte gemeten opmerkelijke verschillen vertoont.

Eerste conclusie luidt dus, dat o.i. van eenige analogie met vloeistoffen in dit verband niet gesproken kan worden.

2. Onderin het bed doet een toename van de luchtsnelheid over het geheele toerentrject de roerder gemakkelijker draaien (de krachten nemen af bij toename van de luchtsnelheid).

In hogere regionen wordt dit verschil steeds minder sprekend; de lijnen gaan steeds meer samenvallen (zie graf. 14, 19 en 23). Zelfs kan men constateeren, dat bij hogere toerentallen de kracht toeneemt bij toenemende luchtsnelheid (zie graf. 22 en 24 doorsnede AB). Dit samenvallen kan optreden doordat de beginhelling van lijnen bij kleine luchtsnelheid afneemt; bij grote luchtsnelheid toeneemt. Vergelijking van de onderhavige grafieken met de grafieken 1 t/m 4 leert echter, dat het geenszins zeker is, of men bij eerstgenoemde lijnen reeds met een werkelijk gefluidiseerde toestand te maken heeft, of dat men zich nog in het expansiegebied bevindt. O.i. kan men dus in het algemeen zeggen dat bij ware fluidisatie de helling van de lijnen toeneemt bij toenemende ~~toerent~~ roerderhoogte, en wel temeer, wanneer de luchtsnelheid groot is. In dezelfde volgorde neemt de kromming van de lijnen af.

bovenin het bed

Resumerend kan men dus zeggen, dat onderin het bed de beweging van de roerder door een grote luchtsnelheid begunstigd wordt. Naarmate men hoger komt wordt dit verschijnsel minder duidelijk, terwijl in bepaalde gevallen (hogere toerentallen) een grote luchtsnelheid de beweging van de roerder zelfs belemmert; terwijl de roerder in het algemeen onderin het bed gemakkelijker draait dan bovenin.

Tweede conclusie luidt dan ook, dat het mechanisme boven in het bed sterk verschilt van dat, wat beneden de toestand beheerscht.

3. Naar aanleiding van het bovenstaande rijst onmiddellijk de vraag of de geconstateerde verschijnselen in verband staan:

a. met de hoogte van de laag, welke zich boven de roerder bevindt, dan wel

b. met de afstand tusschen roerder en zeefplaatje (in ons geval nylon-doek).

Op de beantwoording van deze vraag hebben betrekking de tabel 13A met bijbehorende grafiek 15 (onder). Hiermede is aangetoond, dat de laag boven de roerder van weinig belang is vergeleken bij de hoogte boven het gaasje.

Derde conclusie: het mechanisme in een bepaalde laag is slechts weinig afhankelijk van de hoogte van het bed die zich boven die laag bevindt.

De derde conclusie maakte het mogelijk over te gaan tot het nader bestudeeren van hetgeen genoemde verschillen in mechanisme teweeg brengt door het volgende proefje:

Bij een constante luchtsnelheid werd het bed geleidelijk volgestort, waarbij zoo goed mogelijk in het oog werd gehouden, wat zich daarbij afspeelde. Wij meenen dit als volgt te kunnen formuleeren:

Bij zeer kleine bedhoogte behoudt het bed een vrijwel glad oppervlak, dat a.h.w. eenigszins sproeit. Houdt men een deeltje eenige tijd in de gaten, dan blijkt dit weliswaar in beweging te zijn, doch het verplaatst zich hierbij slechts over zeer geringe afstanden vanuit zijn uitgangspositie naar de wand of naar het midden. Wordt het bed hoger dan 1 cm dan worden geleidelijk duidelijker bellen zichtbaar, hetgeen gepaard gaat met een ruimere verplaatsing van de deeltjes die steeds meer in circulatie komen, en ten slotte bij een volgestort bed (ong. 20 cm) een wilde werveling te zien geven, hetgeen gepaard gaat met bel vorming van soms meer dan 1 cm diameter.

Houdt men nu rekening met conclusie 3, dan kan men aannemen, dat deze verschijnselen ook de verschillen tusschen op verschillende hoogte gelegene lagen min of meer karakteriseeren; hetgeen ons bracht tot de volgende hypothesen ter verklaring van de waarnemingen:

1. Onderin het bed is de dispersie van de korrels over de luchtphase goed, terwijl de macrobeweging van de korrels gering is. Vergroting van de luchtsnelheid heeft hier een vergroting van het vrije volume van de deeltjes ten gevolge. Hierdoor wordt de kracht benodigd om een roerder in het bed te doen draaien kleiner.

2. Hoger in het bed vindt geleidelijk meer se-

gregatie plaats (dit is in overeenstemming met de verschillen in drukgradient over AB, BD en CD) waardoor belvorming ontstaat, die een intensieve macrobeweging veroorzaakt. Dit doet het aantal en de intensiteit van de botsingen tusschen roerder en deeltjes toenemen en daarmee de kracht, die benodigd is om de roerder te bewegen. Aan de andere kant neemt hier waarschijnlijk het vrij volume van de korrels niet of slechts weinig toe (zie bl.4) - hoewel gezien de kleine drukgradient in dit gebied de holdup van de lucht is toegenomen.

Ten opzichte van de invloed van de korrelgrootte werden te weinig proeven gedaan om conclusies te trekken. Wel is echter opmerkelijk, dat bij het gemeten zandmengsel de krachten be-
 duidend kleiner zijn dan bij het zand 105 - 150 μ . dat ongeveer een gelijke gemiddelde diameter heeft.

Dankt men zich het bed opgebouwd uit gladde ronde deeltjes i.p.v. de onregelmatig gevormde zanddeeltjes, dan stellen de tabellen 1a, 2a, 3a en 4a ons in staat de aequivalente straal van deze bollen te berekenen. Deze is gelijk aan:
 correctiefactor x veronderstelde D_p .

Men vindt dan voor	d_{aeq}	
zand 75 - 105 μ	= 63 μ .	<i>81 μ</i>
mengsel	= 70	<i>93 μ</i>
zand 105 - 150	= 80	<i>107 μ</i>
150 - 210	= 120	<i>145 μ</i>

In eenzelfde volgorde blijken de krachten, noodig om de roerder met een bepaald toerental te doen draaien, toe te nemen.

*Made sup 40
 $d_s = 0,75$ van gem. zand
 $d = \frac{63 \text{ daag}}{0,75}$*

*Bij grote snelheden wordt kromme
 rechte (Hilde) omdat het
 moment last van zichzelf.*

TABEL 9

Zand 150 - 210
 Schoepenroerder
 Roerderhoogte 39 mm

afmeting
 mm

amb. / sec

V	L	G ₀	mm	amb./sec
3,58	17,2	4,0	319	
20,7	16,7	3,10	0,90	0,28
24,7	20,7	3,85	1,17	0,36
26,7	22,7	4,22	1,66	0,51
28,7	24,7	4,60	1,89	0,58
30,7	26,7	4,97	1,47	0,45
32,7	28,7	5,34	2,78	0,85
34,7	30,7	5,71	2,92	0,90
36,7	32,7	6,08	3,15	0,97
38,7	34,7	6,45	3,50	1,80
40,7	36,7	6,82	9,50	2,92
42,7	38,7	7,20	21,70	6,68
44,7	40,7	7,58	23,30	7,18
46,7	42,7	7,95	30,30	9,35
48,7	44,7	8,32	41,60	12,83
45,7	41,7	7,76	28,20	8,67
43,7	39,7	7,38	23,00	7,08

krachtarm: 1,10 cm

omr. factoren:

$v = 0,308 \times n$

$K = 0,186 \times G$

V	L	G ₀	mm	amb./sec
4,13	17,5	4,0	320	
8,7	4,7	0,87	0,88	0,27
11,7	7,7	1,43	3,20	0,99
13,7	9,7	1,80	3,62	1,15
15,7	11,7	2,18	8,45	2,61
25,7	21,7	4,03	40,00	12,32
26,7	22,7	4,22	42,80	13,20
16,7	12,7	2,36	10,50	3,24
19,7	15,7	2,92	20,00	6,15
17,7	13,7	2,55	12,00	3,70
21,7	17,7	3,29	25,00	7,70
23,7	19,7	3,66	33,40	10,30

V	L	G ₀	mm	amb./sec
4,46	17,6	4,0	321	
6,7	2,7	0,50	0,70	0,22
8,7	4,7	0,87	1,18	0,36
10,7	6,7	1,25	2,14	0,66
12,7	8,7	1,62	10,70	9,25
13,7	9,7	1,80	16,50	10,70
15,7	11,7	2,18	21,40	16,50
17,7	13,7	2,55	32,40	21,40
19,7	15,7	2,92	42,50	32,40
21,7	17,7	3,29	35,00	42,50
20,7	16,7	3,10	23,40	35,00
17,7	13,7	2,55	23,40	7,21

V	L	G ₀	mm	amb./sec
4,91	17,9	4,0	318	
5,7	1,7	0,32	2,66	0,82
7,7	3,7	0,69	5,90	1,82
9,7	5,7	1,00	10,75	3,31
11,7	7,7	1,43	17,70	5,45
13,7	9,7	1,80	25,20	7,76
15,7	11,7	2,18	35,80	11,03

17,7
16,7
13,7

13,7
12,7
9,7

2,55
2,34
1,80

51,70
46,10
30,00

15,92
14,20
9,18

Faint, illegible text, possibly a ledger or list, covering the majority of the page. The text is too light to transcribe accurately.

TABEL 10

Zand 105 - 150

Schoepenroerder

Roerderhoogte 39 mm

V = 2,24	L = 17,3	G ₀ = 2,0	210	
23,7	21,7	3,49	15,40	4,75
25,7	23,7	3,82	23,50	7,25
27,7	25,7	4,13	31,70	9,75
29,7	27,7	4,46	49,70	15,31
14,7	12,7	2,04	5,80	1,79
12,7	10,7	1,74	4,10	1,26
10,7	8,7	1,40	1,70	0,52
20,7	18,7	3,01	7,90	2,44
20,7	18,7	3,01	9,70	2,99
25,7	23,7	3,82	25,80	7,95
27,7	25,7	4,13	37,50	10,55

krachtarm: 0,95 cm

omr. factoren:

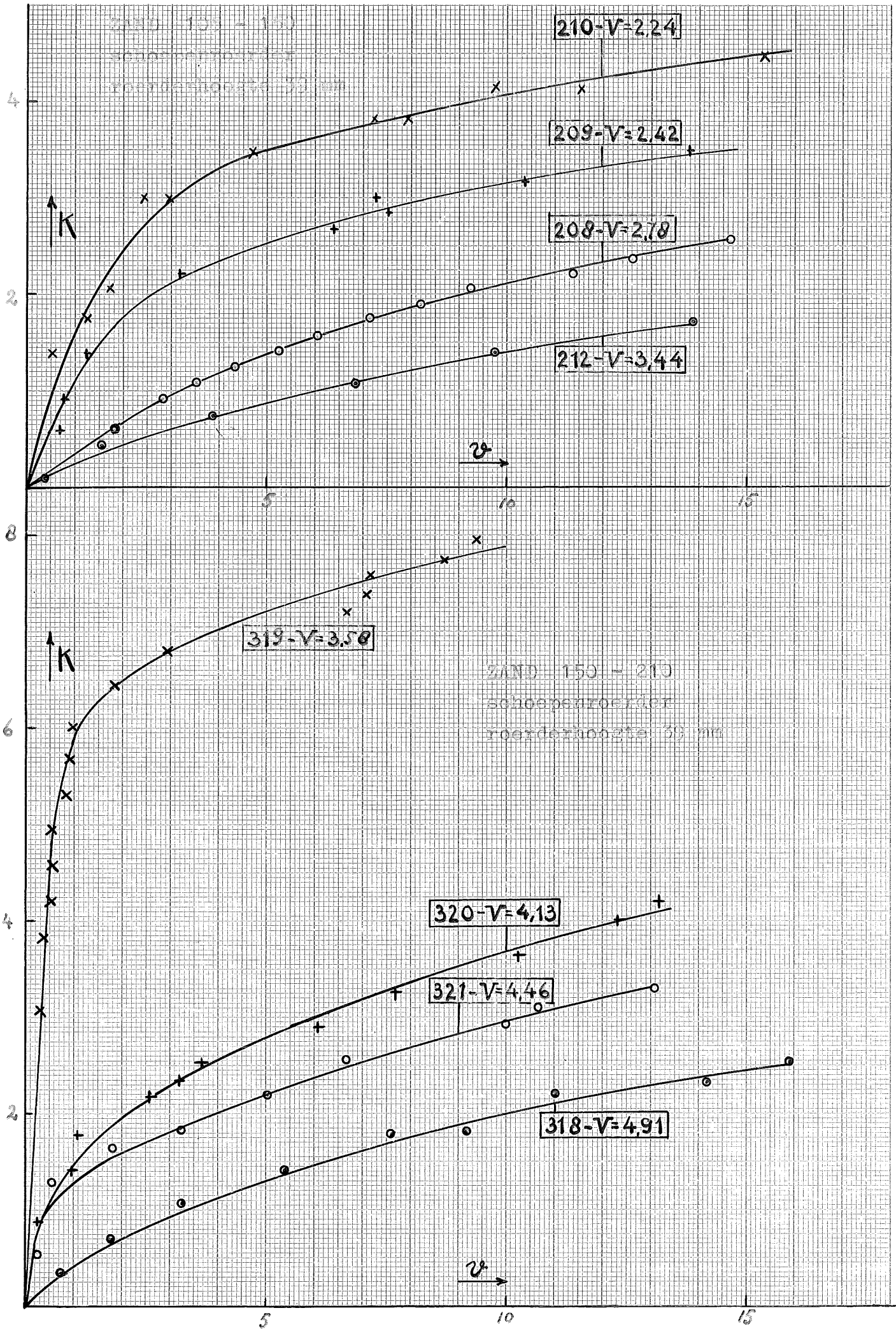
v = 0,308 x n

K = 0,161 x G

V = 2,42	L = 17,3	G ₀ = 2,0	209	
5,7	3,7	0,59	2,30	0,71
7,7	5,7	0,92	2,60	0,80
10,7	8,7	1,40	4,10	1,26
15,7	13,7	2,21	10,40	3,20
20,7	18,7	3,01	30,00	9,25
18,7	16,7	2,69	20,80	6,40
19,7	17,7	2,85	24,40	7,51
21,7	19,7	3,17	33,70	10,38
23,7	21,7	3,49	44,80	13,80

V = 2,78	L = 17,5	G ₀ = 2,0	208	
10,7	8,7	1,40	17,10	5,25
11,7	9,7	1,56	19,60	6,04
12,7	10,7	1,74	23,10	7,11
13,7	11,7	1,88	26,60	8,20
14,7	12,7	2,04	30,00	9,25
15,7	13,7	2,21	36,80	11,35
16,7	14,7	2,37	40,80	12,60
17,7	15,7	2,53	47,50	14,63
12,7	10,7	1,74	23,30	7,17
9,7	7,7	1,24	14,00	4,31
8,7	6,7	1,08	11,40	3,52
7,7	5,7	0,92	9,10	2,81
5,7	3,7	0,59	5,85	1,80

V = 3,44	L = 17,9	G ₀ = 2,0	212	
2,7	0,7	0,11	1,20	0,37
4,7	2,7	0,43	4,90	1,51
6,7	4,7	0,75	12,60	3,88
8,7	6,7	1,08	22,20	6,84
10,7	8,7	1,40	31,60	9,74
12,7	10,7	1,72	45,00	13,88



TABEL 11

Zand 150 - 210

Grote bollen

Roerderhoogte 39 mm

V=3,87	L=17,5	G ₀ =2	504 ₂	
7,7	5,7	1,08	2,1	0,55
10,7	8,7	1,65	2,96	0,775
12,7	10,7	2,03	4,15	1,09
15,7	13,7	2,6	5,8	1,52
17,7	15,7	2,98	6,9	1,81
20,7	18,7	3,55	8,95	2,34
25,7	23,7	4,5	12,7	3,33
30,7	28,7	5,45	17,65	4,62
35,7	33,7	6,40	25,0	6,55
40,7	38,7	7,35	40,0	10,5

krachtarm: 0,95 cm

omrekeningsfactoren:

v = 0,262 x n

K = 0,19 x G

V=6,25	L=18,4	G ₀ =2	500 ₂	
5,7	3,7	0,70	5,56	1,46
10,7	8,7	1,65	13,5	3,54
7,7	5,7	1,08	7,65	2,0
5,7	3,7	0,70	4,5	1,18
15,7	13,7	2,60	24,6	6,45
20,7	18,7	3,55	42,2	11,05

V=4,92	L=17,9	G ₀ =2	503 ₂	
5,7	3,7	0,70	3,65	0,96
7,7	5,7	1,08	5,88	1,54
10,7	8,7	1,65	10,4	2,72
12,7	10,7	2,03	13,6	3,56
15,7	13,7	2,60	20,2	5,40
17,7	15,7	2,98	24,2	6,35
20,7	18,7	3,55	33,2	8,70
22,7	20,7	3,94	40,5	10,61

Roerderhoogte 106 mm

V=3,87	L=17,4	G ₀ ^a =2	504 ₂	
10,7	8,7	1,65	4,55	1,19
7,7	5,7	1,08	1,43	0,37
15,7	13,7	2,60	7,95	2,08
20,7	18,7	3,55	12,05	3,16
25,7	23,7	4,50	17,2	4,50
30,7	28,7	5,45	24,0	6,30
35,7	33,7	6,40	32,6	8,55
40,7	38,7	7,35	41,5	10,78
42,7	40,7	7,75	43,75	11,48

V=4,92	L=17,8	G ₀ ^a =2	503 ₂	
5,7	3,7	0,70	0,68	2,56
10,7	8,7	1,65	6,33	1,66
15,7	13,7	2,60	10,85	2,84
20,7	18,7	3,55	16,8	4,40
25,7	23,7	4,50	23,7	6,21
30,7	28,7	5,45	32,7	8,57
35,7	33,7	6,40	42,75	11,20

$V=6,25$	$L=18,3$	$G_0=2$	500_2^a	
10,7	8,7	1,65	6,9	1,81
7,7	5,7	1,08	4,5	1,18
5,7	3,7	0,70	3,1	0,81
15,7	13,7	2,60	11,2	2,94
20,7	18,7	3,55	17,1	4,48
25,7	23,7	4,50	23,3	6,10
30,7	28,7	5,45	31,2	8,17
35,7	33,7	6,40	40,5	10,60

Roerderhoogte 146 mm

$V=3,87$	$L=17,4$	$G_0=1$	504_2^b	
5,7	4,7	0,89	2,7	0,71
10,7	9,7	1,84	5,42	1,42
15,7	14,7	2,80	8,9	2,33
20,7	19,7	3,74	13,3	3,43
25,7	24,7	4,70	17,95	4,7
30,7	29,7	5,65	24,4	6,40
35,7	34,7	6,60	30,00	7,85
40,7	39,7	7,55	37,5	9,82
45,7	44,7	8,50	43,2	11,31
7,7	6,7	1,27	3,81	1,00

$V=4,92$	$L=17,9$	$G_0=1$	503_2^b	
5,7	4,7	0,89	3,06	0,80
10,7	9,7	1,84	6,32	1,66
15,7	14,7	2,80	10,25	2,69
20,7	19,7	3,74	14,7	3,85
25,7	24,7	4,70	19,5	5,10
30,7	29,7	5,65	26,1	6,85
35,7	34,7	6,60	33,6	8,80
40,7	39,7	7,55	41,2	10,80

$V=6,25$	$L=18,4$	$G_0=1$	500_2^b	
10,7	9,7	1,84	6,44	1,69
5,7	4,7	0,89	3,32	0,87
15,7	14,7	2,80	10,3	2,70
20,7	19,7	3,74	14,3	3,75
25,7	24,7	4,70	19,95	5,23
30,7	29,7	5,65	25,0	6,55
35,7	34,7	6,60	31,6	8,29
40,7	39,7	7,55	38,1	10,00
45,7	44,7	8,50	45,2	11,85

Zand 150 - 210

Kleine bollen

Roerderhoogte 39 mm

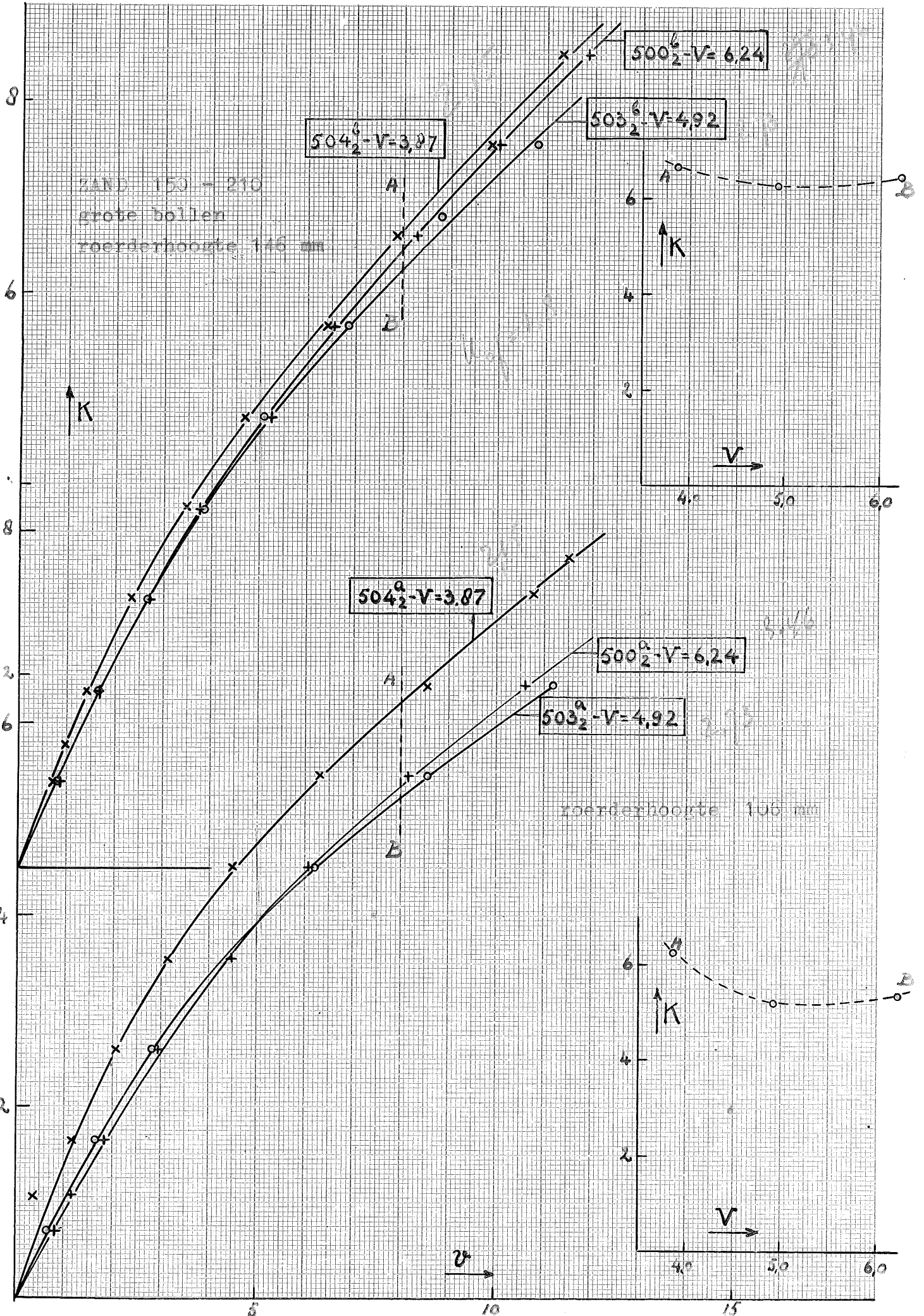
V=6,24	L=18,2	G ₀ =2,5	500 ^I ₂	
4,7	2,2	0,51	24,6	5,17
5,7	3,2	0,77	38,0	7,97
6,2	3,7	0,87	46,0	9,65
5,2	2,7	0,63	31,6	6,64
4,2	1,7	0,41	18,0	3,78
V=4,91	L=17,7	G ₀ =2,5	503 ^I ₂	
5,7	3,2	0,77	31,6	6,64
6,7	4,2	0,99	45,3	9,51
6,2	3,7	0,87	38,2	8,02
5,2	2,7	0,63	24,4	5,12
4,7	2,2	0,51	19,15	4,02
V=3,65	L=17,0	G ₀ =2,5	505 ^I ₂	
10,7	8,2	1,97	14,6	3,06
12,7	10,2	2,45	24,2	5,08
14,7	12,2	2,92	50,0	10,50
13,7	11,2	2,63	33,0	6,93
8,7	6,2	1,49	4,4	0,92

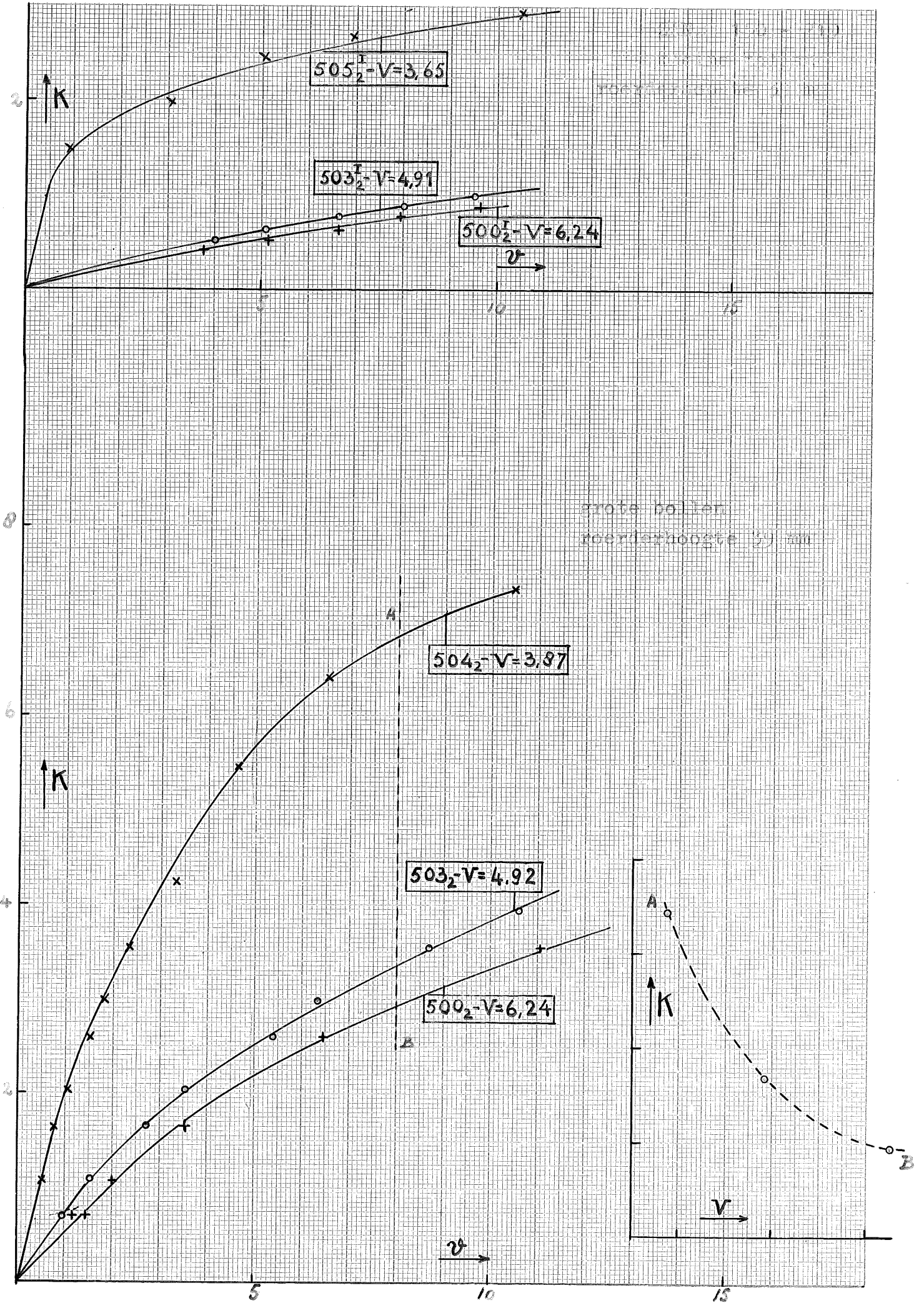
krachtarm: 0,95 cm

Omr. factoren:

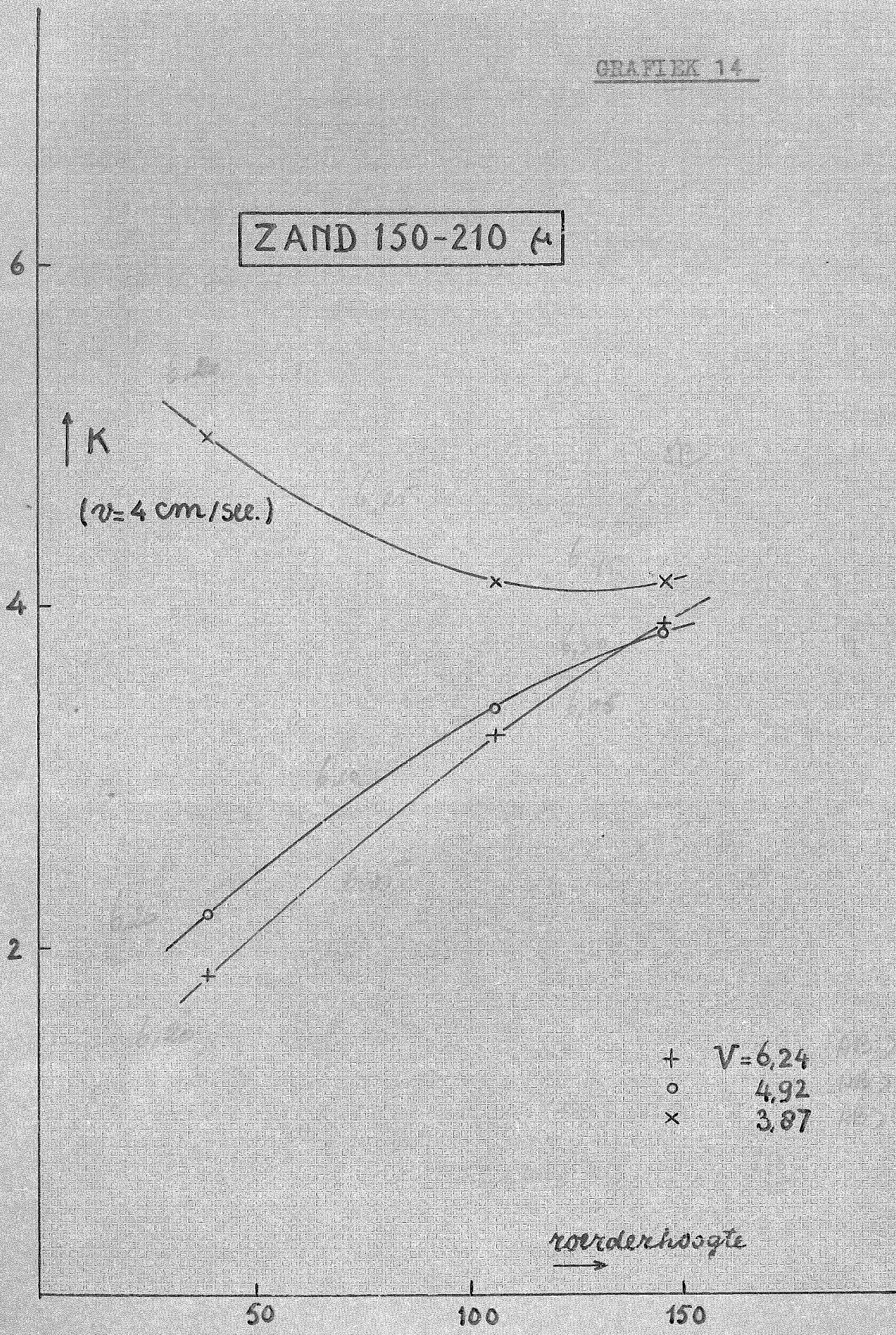
v = 0,21 x n

K = 0,24 x G





ZAND 150-210 μ



Handwritten notes:
V=3.87
V=4.92
V=6.24

TABEL 13

A. zand 150 - 210 (Variatie van bedhoogte)

Grote bollen

Roerderhoogte 39mm

$V=6,24$	$L=7,9$	$G_0=2,5$	500	
15,7	13,2	2,43	32,25	8,45
17,7	15,2	2,39	39,6	10,40
12,7	10,2	1,94	22,2	5,82
10,7	8,2	2,07436	16,7	4,38
7,7	5,2	0,99	9,63	2,52
5,7	3,2	0,61	5,57	1,46

krachtarm: 0,95

Omrek. factoren:

$V=6,24$	$L=13,0$	$G_0=2,5$	500 ₁	
5,7	3,2	0,61	5,56	1,46
			2,34	0,61
10,7	8,2	1,56	14,95	3,92
15,7	13,2	2,43	28,6	7,50
20,7	18,2	3,46	48,5	12,70
7,7	5,2	0,99	8,80	2,30

$v = 0,262 \times n$

$K = 0,19 \times G$

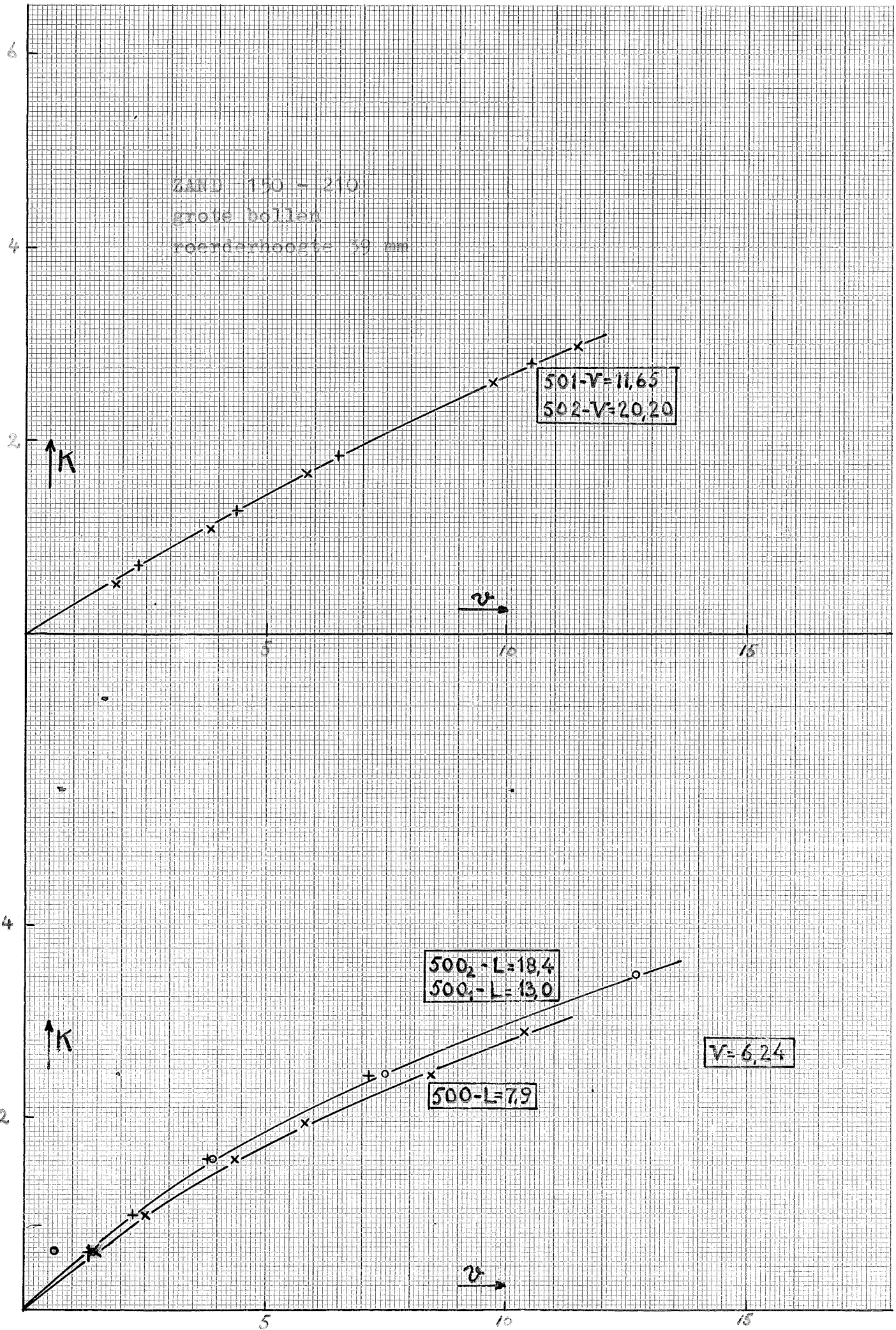
$V=6,24$	$L=18,4$	$G_0=2,5$	500 ₂	
5,7	3,2	0,61	5,12	1,34
7,7	5,2	0,99	8,70	2,28
10,7	8,2	1,56	14,5	3,80
15,7	13,2	2,43	27,25	7,14

B. Zand 150 - 210 (zeer grote lichtsnelheden bij kleine bedhoogte)

Grote bollen

Roerderhoogte 39 mm

TRAPIEK 15



TABEL 14

Zand 105 - 150
 Grote bollen
 Roerderhoogte 39 mm

kracht per gram

V m/sec

$u_{of} = 1.2 \text{ m/sec}$

$V = 2,00 \quad L = 18,5 \quad G_0 = 2,5 \quad 215$

10,7	8,2	1,56	1,20	0,314
20,7	18,2	3,46	3,4	0,89
25,7	23,2	4,41	3,85	1,01
30,7	28,2 28,2	5,36	5,25	1,37
35,7	33,2	6,31	7,50	1,96
40,7	38,2	7,27	10,70	2,80
45,7	43,2	8,22	15,40	4,03
50,7	48,2	9,17	24,20	6,34
55,7	53,2	10,13	49,0	12,81

$F/Dyn/cm^3$

$u_0/u_{of} = 1,67$

krachtarm: 0,95 cm

omrek. factoren:

$v = 0,262 \times n$

$K = 0,19 \times G$

$V = 2,24 \quad L = 18,9 \quad G_0 = 2,5 \quad 216$

10,7	8,2	1,56	2,58	0,68
15,7	13,2	2,43	4,65	1,22
20,7	18,2	3,46	7,00	1,86
25,7	23,2	4,41	11,00	2,89
30,7	28,2	5,36	16,75	4,39
33,7	31,2	5,93	23,60	6,18
35,7	33,2	6,31	32,00	8,38
37,7	35,2	6,69	47,50	12,43
38,7	36,2	6,88	51,00	13,38

$u_0/u_{of} = 1,07$

$V = 2,42 \quad L = 19,0 \quad G_0 = 2,5 \quad 213$

5,7	3,2	0,61	1,44	0,38
10,7	3,2	1,56	3,90	1,02
15,7	13,2	2,43	7,50	1,96
20,7	18,2	3,46	12,65	3,32
25,7	23,2	4,41	21,60	5,66
30,7	28,2	5,36	46,00	12,05
28,7	26,2	4,98	36,80	9,65
23,7	21,2	4,03	17,40	4,56
18,7	16,2	3,09	11,40	2,98
8,7	6,2	1,13	3,06	0,79
29,7	27,2	5,17	42,80	11,20

$u_0/u_{of} = 2,02$

$1/g^k = 9,81 \times 10^8 \text{ N}$
 $= 9,81 \times 10^8 \text{ dynes}$

$V = 2,84 \quad L = 19,3 \quad G_0 = 2,5 \quad 217$

5,7	3,2	0,61	3,70	0,97
7,7	5,2	0,99	5,50	1,44
10,7	8,2	1,56	10,3	2,70
15,7	13,2	2,43	24,60	6,45
18,7	16,2	3,09	46,20	12,10
16,7	14,2	2,70	29,40	7,70
17,7	15,2	2,89	37,4	9,80
15,7	13,2	2,51	26,2	6,37
13,7	11,2	2,13	19,1	5,00

$u_0/u_{of} = 2,36$

V = 3,44	L = 19,6	G ₀ = 2,5	214	
5,7	3,2	0,61	6,25	1,64
7,7	5,2	0,99	10,10	2,54
9,7	7,2	1,37	14,90	3,90
11,7	9,2	1,75	21,00	5,50
13,7	11,2	2,13	29,00	7,60
15,7	13,2	2,51	38,50	10,09

F_{dyn}
 0.60×10^3
0.97
1.34
1.71
2.09
2.46

$$u_0/u_{of} = 2.86$$

Roerderhoogte 91 mm

V = 2,00	L = 18,5	G ₀ = 2,5	215 ^a	
10,7	8,2	1,56	1,60	0,42
15,7	13,2	2,43	3,20	0,84
20,7	18,2	3,46	4,55	1,19
25,7	23,2	4,41	6,85	1,80
30,7	28,2	5,36	9,50	2,49
35,7	33,2	6,31	12,00	3,14
40,7	38,2	7,27	16,40	4,30
45,7	43,2	8,22	23,00	6,03
50,7	48,2	9,17	34,50	9,04
55,7	53,2	10,13	48,50	12,70
53,7	51,2	9,73	45,60	11,95

V = 2,84	L = 19,3	G ₀ = 2,5	217 ^a	
7,7	5,2	0,99	3,75	0,98
10,7	8,2	1,56	6,70	1,76
13,7	11,2	2,13	10,75	2,82
16,7	14,2	2,70	14,60	3,82
19,7	17,2	3,27	21,60	5,66
22,7	20,2	3,84	29,40	7,70
25,7	23,2	4,41	40,00	10,48

V = 2,42	L = 19,0	G ₀ = 2,5	213 ^a	
5,7	3,2	0,61	1,86	0,49
10,7	8,2	1,56	4,43	1,16
12,7	10,2	1,94	6,25	1,64
15,7	13,2	2,43	8,85	2,32
17,7	15,2	2,89	11,50	3,01
20,7	18,2	3,46	15,20	3,96
22,7	20,2	3,84	20,80	5,45
25,7	23,2	4,41	25,00	6,55
27,7	25,2	4,79	33,75	8,83
29,7	27,2	5,17	37,00	9,69
30,7	28,2	5,36	44,80	11,75

V = 3,44	L = 19,6	G ₀ = 2,5	214 ^a	
5,7	3,2	0,61	3,10	0,81
7,7	5,2	0,99	4,80	1,26
10,7	8,2	1,56	8,20	2,15
12,7	10,2	1,94	9,95	2,61
15,7	13,2	2,43	15,00	3,93
17,7	15,2	2,89	17,60	4,61
20,7	18,2	3,46	26,00	6,80
22,7	20,2	3,84	31,00	8,12
25,7	23,2	4,41	39,50	10,36

Roerderhoogte 146 mm

V = 2,00	L = 18,5	G ₀ = 2,5	215 ^b	
12,7	10,2	1,94	2,30	0,60
19,7	17,2	3,27	5,00	1,31
26,7	24,2	4,60	8,00	2,10
32,7	30,2	5,74	11,75	3,08
40,7	38,2	7,27	18,60	4,87
45,7	43,2	8,22	24,80	6,50
50,7	48,2	9,17	32,20	8,44
55,7	53,2	10,13	40,20	10,53

V = 2,42	L = 19,0	G ₀ = 2,5	213 ^b	
12,7	10,2	1,94	5,40	1,41
17,7	15,2	2,89	9,40	2,46
22,7	20,2	3,84	15,80	4,14
27,7	25,2	4,79	22,40	5,87
32,7	30,2	5,74	34,80	9,11
34,7	32,2	6,13	39,00	10,21
36,7	34,2	6,50	42,15	11,05
28,7	26,2	4,98	25,10	6,58

V = 2,84	L = 19,3	G ₀ = 2,5	217 ^b	
11,7	9,2	1,75	5,80	1,52
16,7	14,2	2,70	9,95	2,61
21,7	19,2	3,65	16,20	4,25
26,7	24,2	4,60	24,30	6,37
31,7	29,2	5,55	34,10	8,94
35,7	33,2	6,31	42,25	11,08

V = 3,44	L = 19,6	G ₀ = 2,5	214 ^b	
6,7	4,2	0,80	3,06	0,79
9,7	7,2	1,37	4,95	1,30
12,7	10,2	1,94	7,25	1,90
15,7	13,2	2,43	9,35	2,45
17,7	15,2	2,89	11,50	3,02
20,7	18,2	3,46	14,20	3,69
22,7	20,2	3,84	16,85	4,41
25,7	23,2	4,41	20,80	5,45
27,7	25,2	4,79	23,00	6,04
32,7	30,2	5,74	31,80	8,33
35,7	33,2	6,30	37,20	9,74
38,7	36,2	6,87	42,50	11,13

TABEL 15

Zand 105 - 150

Kleine bollen

Roerderhoogte 39 mm

V	L	G ₀	213 ^I	
2,42	19,2	2,0		
10,7	8,7	2,07	45,00	9,46
12,7	10,7	2,55	68,20	14,32
8,7	6,7	1,59	20,00	4,20
7,7	5,7	1,35	10,50	2,24
8,4	6,4	1,52	14,30	3,00
7,4	5,4	1,27	8,65	1,82
5,4	3,4	0,79	2,20	0,46
5,4	3,4	0,79	2,20	0,46
9,4	7,4	1,76	29,50	6,20

krachtarm: 0,95 cm

omrek. factoren:

v = 0,21 x n

K = 0,24 x G

V	L	G ₀	217 ^I	
2,84	1,94	2,0		
4,4	2,4	0,56	12,90	2,71
5,4	3,4	0,79	21,80	4,58
6,4	4,4	1,04	34,10	7,17
7,4	5,4	1,27	48,50	10,20
7,7	5,7	1,35	56,50	11,87
6,7	4,7	1,11	38,50	8,09
5,7	3,7	0,87	25,00	5,25
6,7	4,7	1,11	38,00	7,98
4,7	2,7	0,63	13,00	2,73
4,2	2,2	0,51	10,20	2,14

V	L	G ₀	214 ^I	
3,44	19,7	2,0		
4,7	2,7	0,63	22,85	4,80
5,7	3,7	0,87	36,60	7,69
6,7	4,7	1,11	53,40	11,21
6,2	4,2	0,99	45,50	9,56
4,2	2,2	0,51	16,50	3,46
3,7	1,7	0,39	13,50	2,84

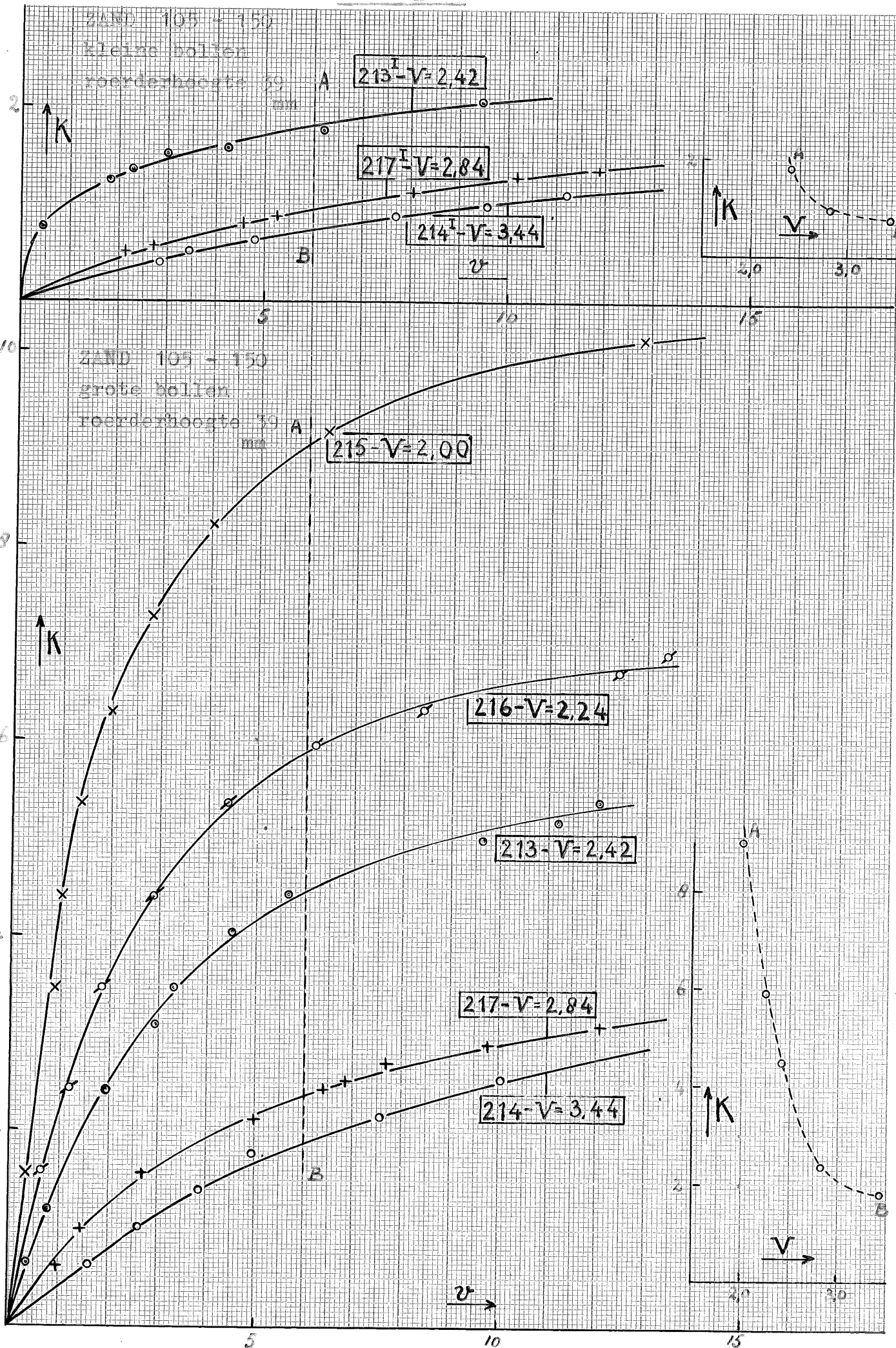
Roerderhoogte 146 mm

V	L	G ₀	213 ^{Ib}	
2,42	19,2	2,0		
10,7	8,7	2,07	60,00	12,60
9,7	7,7	1,82	45,50	9,56
8,7	6,7	1,59	41,50	8,72
7,7	5,7	1,35	32,60	6,85
6,7	4,7	1,11	24,65	5,18
5,7	3,7	0,87	16,15	3,40
4,7	2,7	0,63	12,00	2,52
4,7	2,7	0,63	3,75	0,79

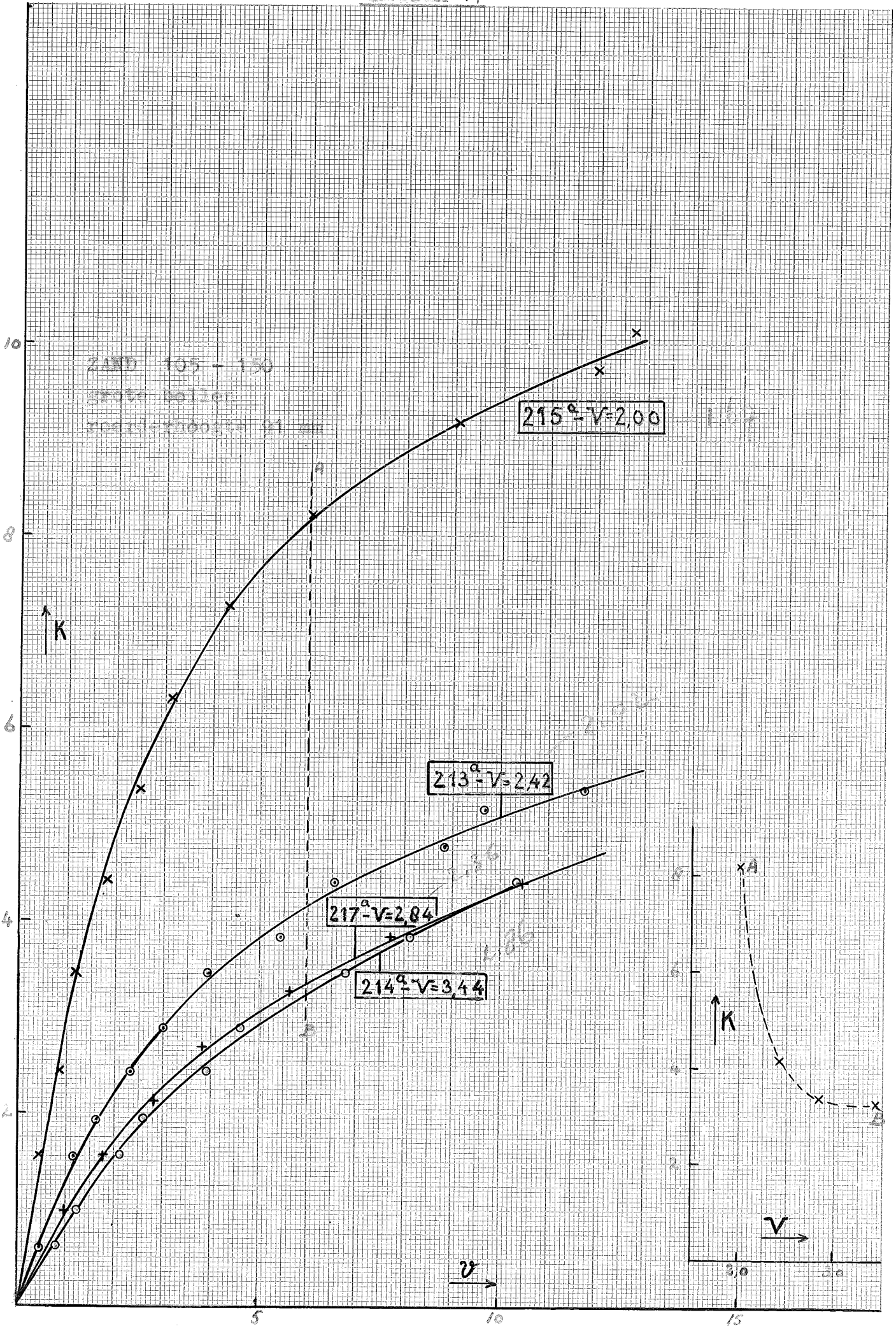
V	L	G ₀	217 ^{Ib}	
2,84	19,4	2,0		
10,7	8,7	2,07	64,00	13,43
9,7	7,7	1,82	53,50	11,22
8,7	6,7	1,59	46,10	9,68
7,7	5,7	1,35	37,00	7,77
6,7	4,7	1,11	28,15	5,90
5,7	3,7	0,87	21,40	4,49
4,7	2,7	0,63	14,65	3,08
3,7	1,7	0,39	8,82	1,85

$V = 3,44$	$L = 19,7$	$G_0 = 2,0$	214^{Ib}	
5,7	3,7	0,87	21,90	4,60
4,7	2,7	0,63	15,90	3,34
3,7	1,7	0,39	9,60	2,02
6,7	4,7	1,11	28,60	6,00
7,7	5,7	1,35	35,40	7,44
8,7	6,7	1,59	44,50	9,35
9,7	7,7	1,83	55,50	11,65
10,7	8,7	2,07	64,25	13,50

GRAFIK 16



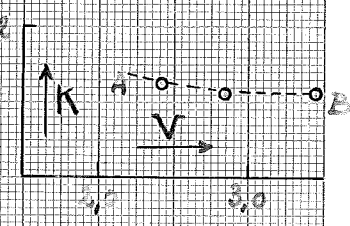
GRAFIK 17



kleine bollen
roerderhoogte 146 mm

$213^{I6} - V = 2,42$

$217^{I6} - V = 2,84$
 $214^{I6} - V = 3,44$



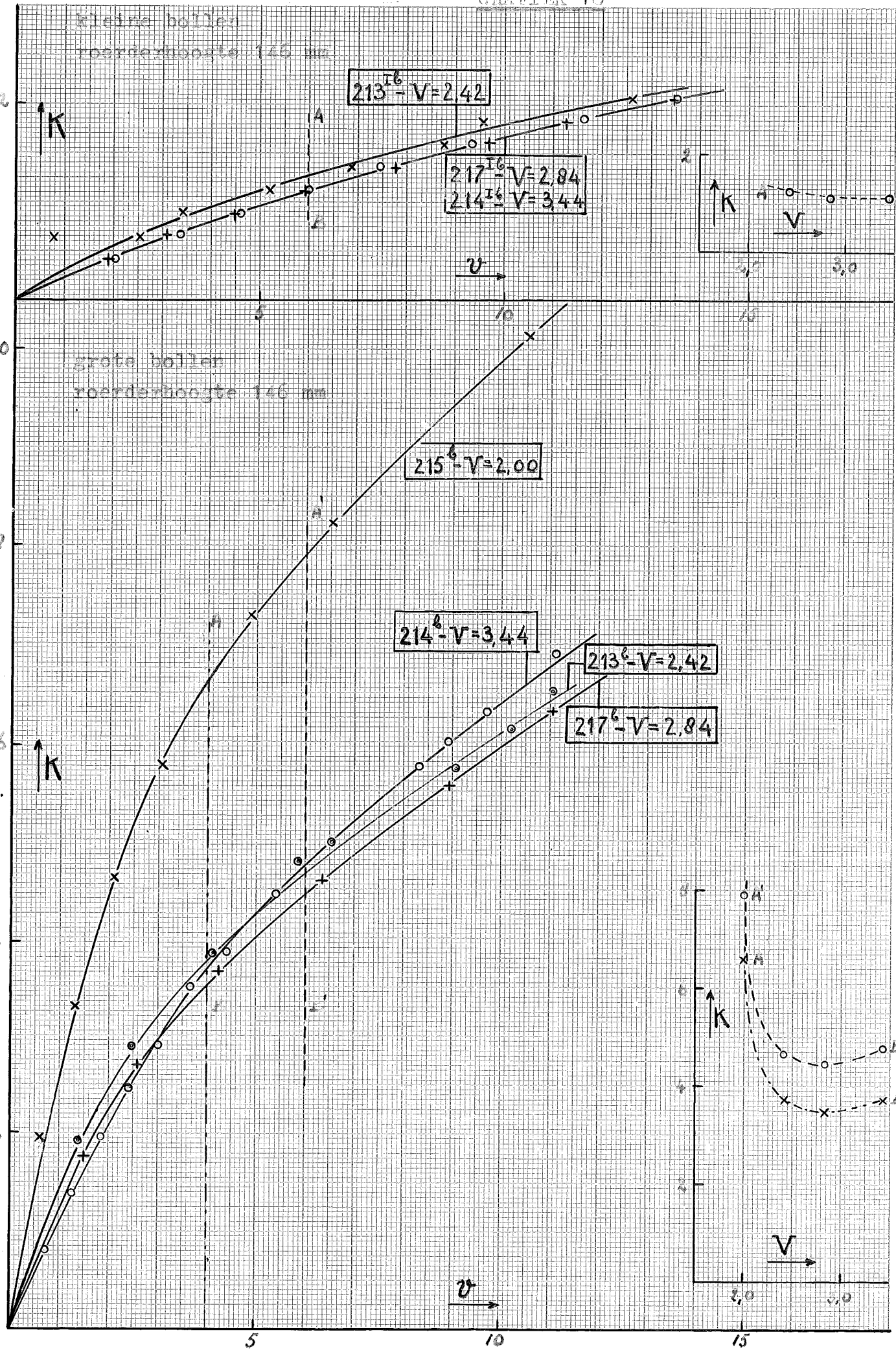
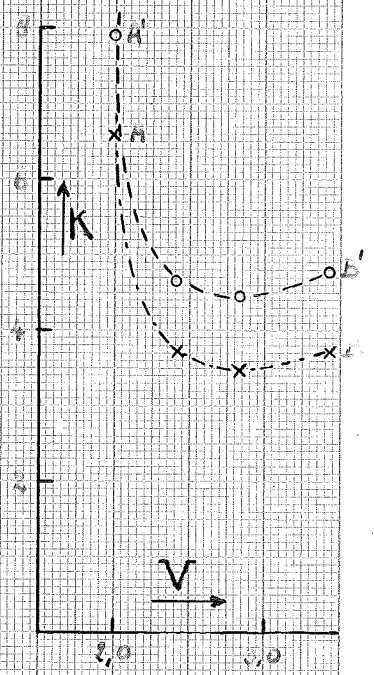
grote bollen
roerderhoogte 146 mm

$215^6 - V = 2,00$

$214^6 - V = 3,44$

$213^6 - V = 2,42$

$217^6 - V = 2,84$



GRAFIEK 19

ZAND 105-150 μ

$\uparrow K (v = 4 \text{ cm/sec})$

6

4

2

- \diamond $V = 3,44$
- \circ 2,84
- \circ 2,42
- \times 2,00

roolderhoogte
 \rightarrow

50

100

150

Handwritten notes:
...
...
...

TABEL 16

Zand 75 - 105

Grote bollen

Roerderhoogte 146 mm

V = 2,00	L = 18,8	G ₀ = 2,0	600 ^b	
5,7	3,7	0,70	3,60	0,94
7,7	5,7	1,08	5,59	1,46
10,7	8,7	1,65	9,06	2,37
12,7	10,7	2,03	11,88	3,11
15,7	13,7	2,60	17,90	4,69
17,7	15,7	2,98	22,60	5,93
20,7	18,7	3,55	30,50	7,99
22,7	20,7	3,94	36,40	9,54
25,7	23,7	4,50	46,50	12,18
30,7	28,7	5,45	66,10	17,30

krachtarm: 0,95 cm

Omrek. factoren:

$$v = 0,262 \times n$$

$$K = 0,19 \times G$$

V = 3,02	L = 19,3	G ₀ = 2,0	601 ^b	
5,7	3,7	0,70	2,56	0,67
10,7	8,7	1,65	10,67	2,80
15,7	13,7	2,60	18,30	4,80
20,7	18,7	3,55	30,30	7,94
25,7	23,7	4,50	45,50	11,90
30,7	28,7	5,45	59,80	15,67
6,7	4,7	0,89	5,77	1,51

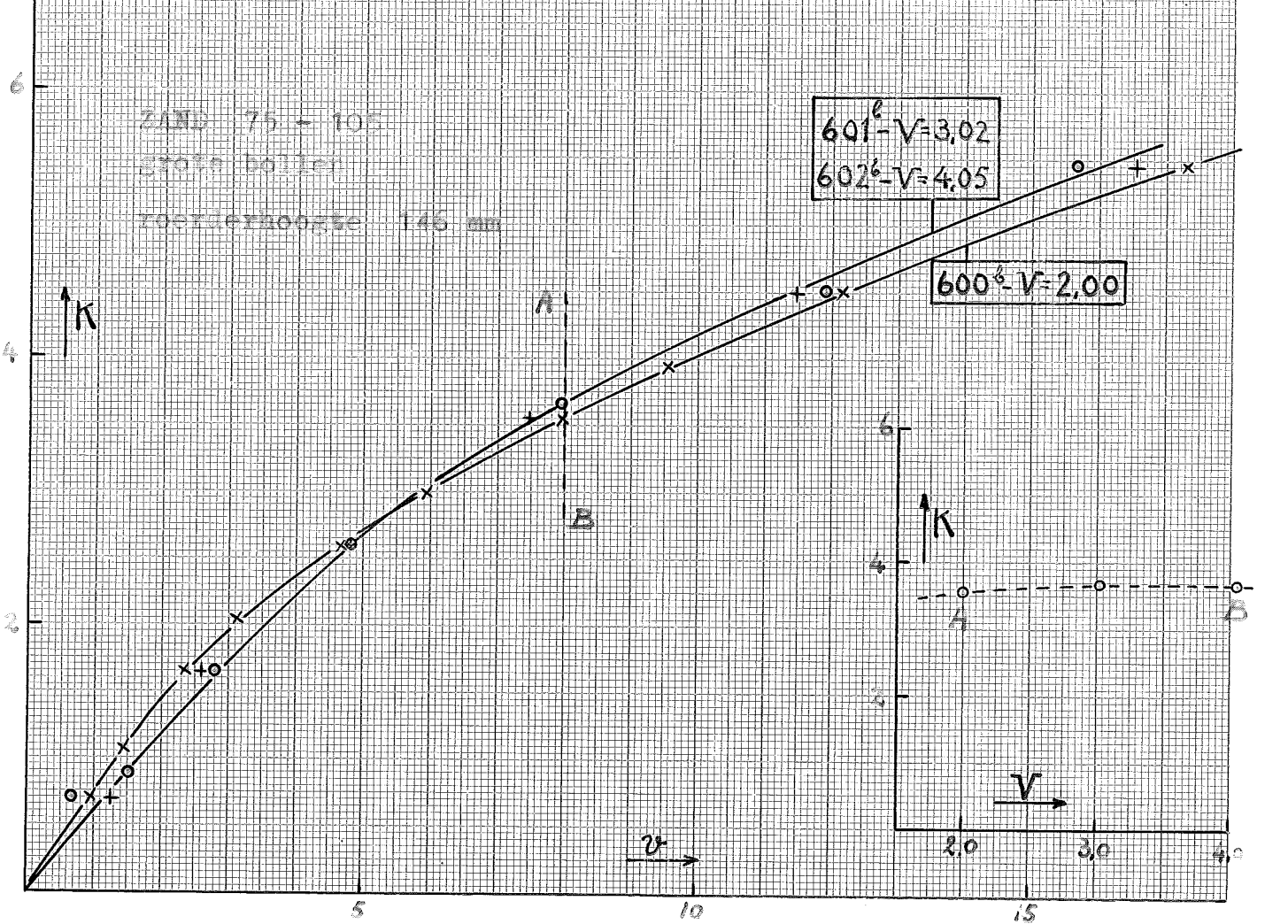
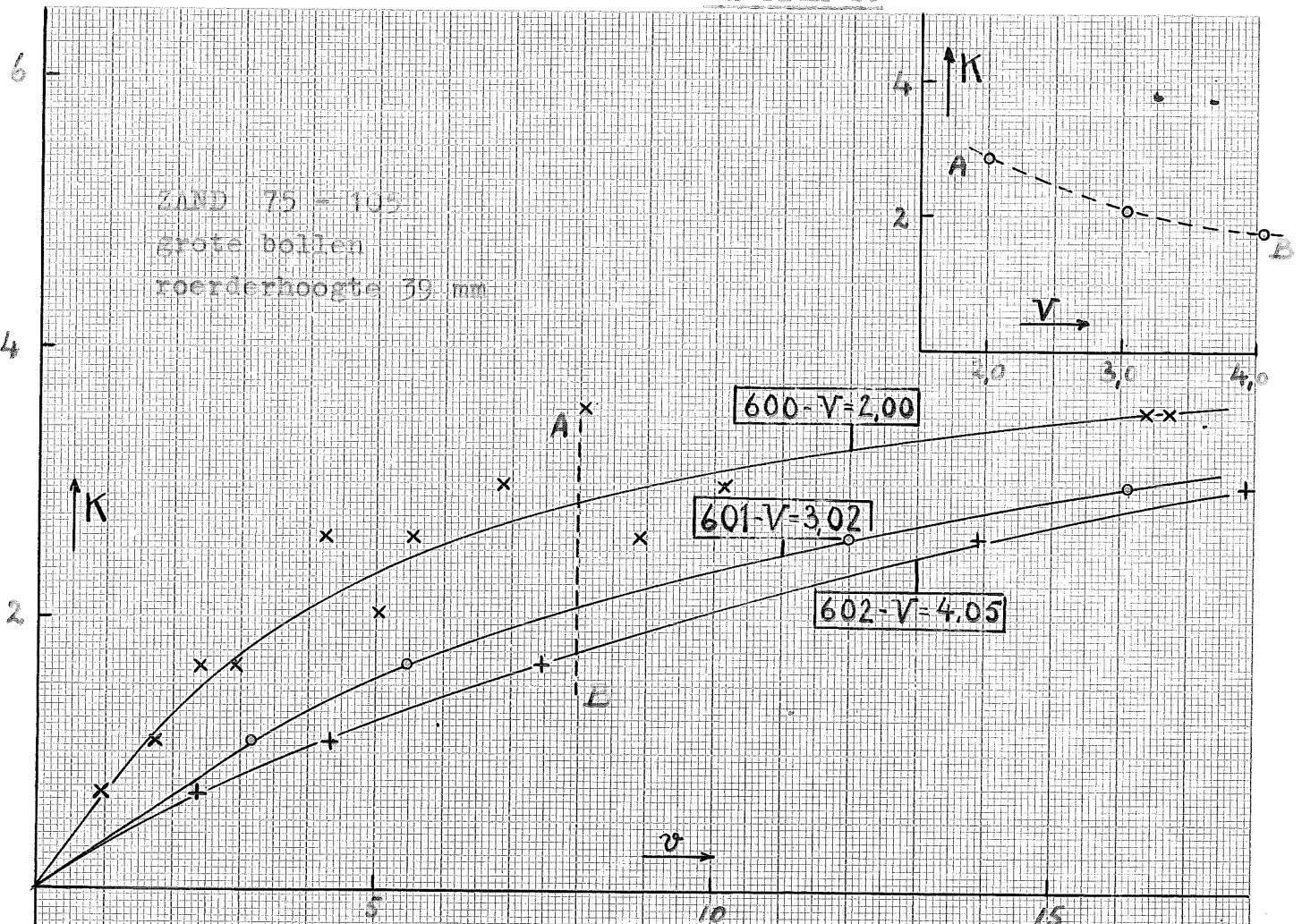
V = 4,05	L = 20,2	G ₀ = 2,0	602 ^b	
5,7	3,7	0,70	4,88	1,28
10,7	8,7	1,65	9,97	2,61
15,7	13,7	2,60	18,40	4,81
20,7	18,7	3,55	28,60	7,49
25,7	23,7	4,50	43,80	11,48
30,7	28,7	5,45	63,20	16,55

Roerderhoogte 39 mm

V = 2,00	L = 19,3	G ₀ = 2,0	600	
5,7	3,7	0,70	3,57	0,93
7,7	5,7	1,08	6,60	1,73
10,7	8,7	1,65	9,15	2,40
15,7	13,7	2,60	21,25	5,57
17,7	15,7	2,98	26,20	6,86
20,7	18,7	3,55	30,60	8,02
			62,50	16,39
12,7	10,7	2,03	19,20	5,03
15,7	13,7	2,60	33,90	8,88
17,7	15,7	2,98	38,70	10,12
20,7	18,7	3,55	63,80	16,71
15,7	13,7	2,60	16,25	4,25
10,7	8,7	1,65	11,15	2,92

V = 3,02	L = 19,3	G ₀ = 2,0	601	
7,7	5,7	1,08	12,10	3,17
10,7	8,7	1,65	20,80	5,45
15,7	13,7	2,60	45,80	12,00
17,7	15,7	2,98	61,50	16,11

V = 4,05	L = 20,0	G ₀ = 2,0	602	
5,7	3,7	0,70	9,06	2,38
7,7	5,7	1,08	16,55	4,34
10,7	8,7	1,65	28,30	7,42
15,7	13,7	2,60	53,00	13,90
17,7	15,7	2,98	68,30	17,89



17
TABEL 17

Zandmengsel 75 - 105 150 - 210 (1:1)

Grote bollen

Roerderhoogte 39 mm

V = 2,84	L = 20,3	G ₀ = 2,5	700	
5,7	3,2	0,61	3,00	0,78
7,7	5,2	0,99	16,30	4,27
10,7	8,2	1,56	28,00	7,34
12,7	10,2	1,94	40,70	10,68
15,7	13,2	2,43	63,00	16,50
6,7	4,2	0,80	11,94	3,13

krachtarm: 0,95

Omrek. factoren:

V = 2,00	L = 20,0	G ₀ = 2,5	701	
7,7	5,2	0,99	2,22	0,58
10,7	8,2	1,56	4,00	1,05
15,7	13,2	2,43	11,90	3,12
20,7	18,2	3,46	34,70	9,10
25,7	23,2	4,41	68,20	17,90
17,7	15,2	2,89	18,40	4,81

v = 0,262 x n

K = 0,19 x G

V = 2,42	L = 20,2	G ₀ = 2,5	702	
10,7	8,2	1,56	16,30	4,27
7,7	5,2	0,99	8,85	2,23
12,7	10,2	1,94	24,30	6,36
15,7	13,2	2,43	44,75	11,72
17,7	15,2	2,89	60,00	15,70

Roerderhoogte 106 mm

V = 2,00	L = 19,6	G ₀ = 2,5	701 ^a	
10,7	8,2	1,56	8,36	2,19
15,7	13,2	2,43	15,60	4,09
20,7	18,2	3,46	31,35	8,20
25,7	23,2	4,41	50,60	13,28
27,7	25,2	4,79	60,20	15,78
6,7	4,2	0,80	3,83	1,01
			1,84	0,48

V = 2,42	L = 19,7	G ₀ = 2,5	702 ^a	
6,7	4,2	0,80	5,42	1,42
10,7	8,2	1,56	11,30	2,96
15,7	13,2	2,43	23,80	6,23
20,7	18,2	3,46	47,10	12,35
25,7	23,2	4,41	69,30	18,15

V = 2,84	L = 19,8	G ₀ = 2,5	700 ^a	
6,7	4,2	0,80	6,52	1,71
			3,14	0,82
10,7	8,2	1,56	13,20	3,46
15,7	13,2	2,60	15,25	4,00
20,7	18,2	3,46	44,30	11,60
22,7	20,2	3,84	54,50	14,30

Reorderhoogte 146 mm

V = 2,00	L = 19,4	G ₀ = 2,0	701 ^b	
6,7	4,7	0,89	3,92	1,03
			2,05	0,54
10,7	8,7	1,65	7,95	2,08
15,7	13,7	2,60	15,25	4,00
20,7	18,7	3,55	27,25	7,15
25,7	23,7	4,50	44,70	11,72
30,7	28,7	5,45	62,50	16,39

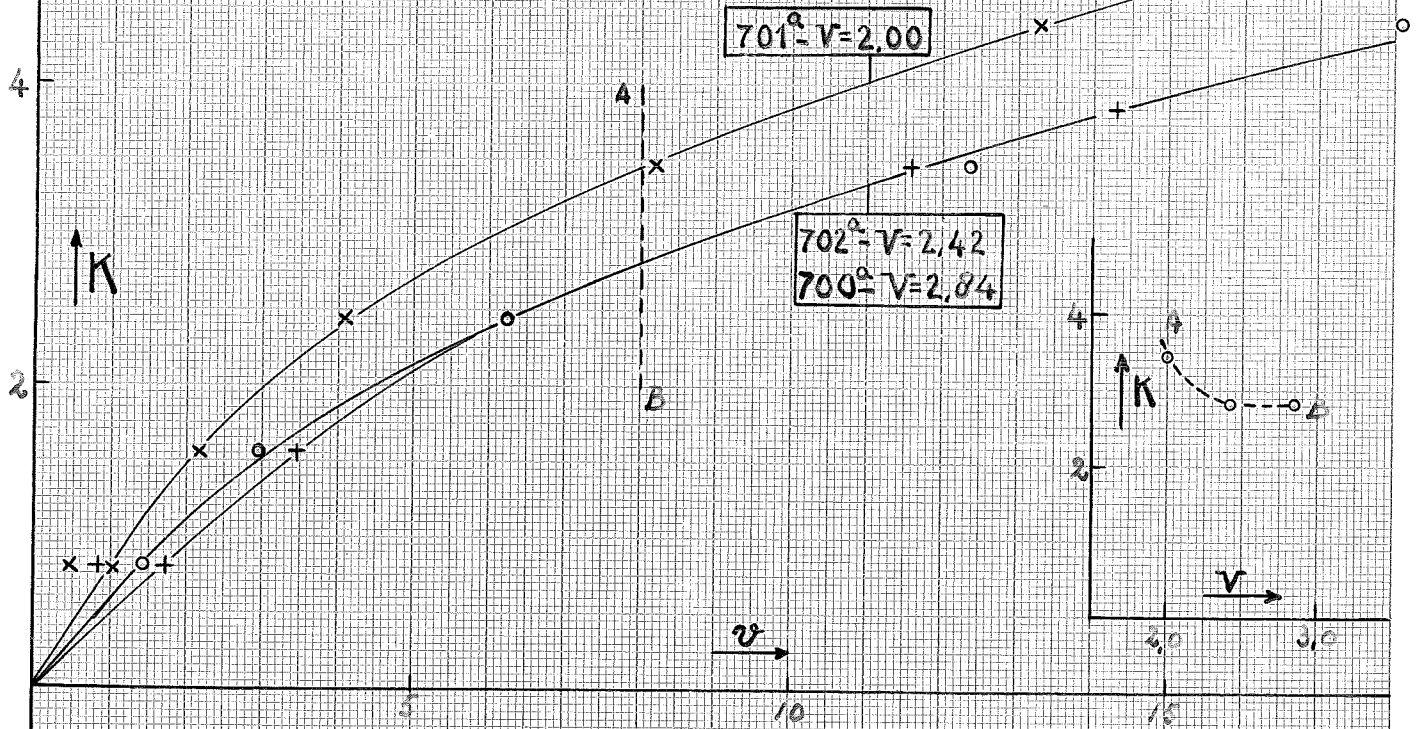
V = 2,42	L = 19,6	G ₀ = 2,0	702 ^b	
6,7	4,7	0,89	3,94	1,01
			2,36	0,62
10,7	8,7	1,65	8,14	2,13
15,7	13,7	2,60	15,00	3,93
20,7	18,7	3,55	23,50	6,16
25,7	23,7	4,50	35,85	9,39
30,7	28,7	5,45	50,90	13,31
35,7	33,7	6,40	64,00	16,79

V = 2,84	L = 19,7	G ₀ = 2,0	700 ^b	
6,7	4,7	0,89	4,55	1,19
10,7	8,7	1,65	8,30	2,18
15,7	13,7	2,60	14,00	3,66
20,7	18,7	3,55	21,90	5,74
25,7	23,7	4,50	33,60	8,80
30,7	28,7	5,45	48,60	12,48
35,7	33,7	6,40	58,80	15,40

SANMINGSOL 75 - 105 + 150 - 210
 grote bollen
 roerderhoogte 106 mm

K

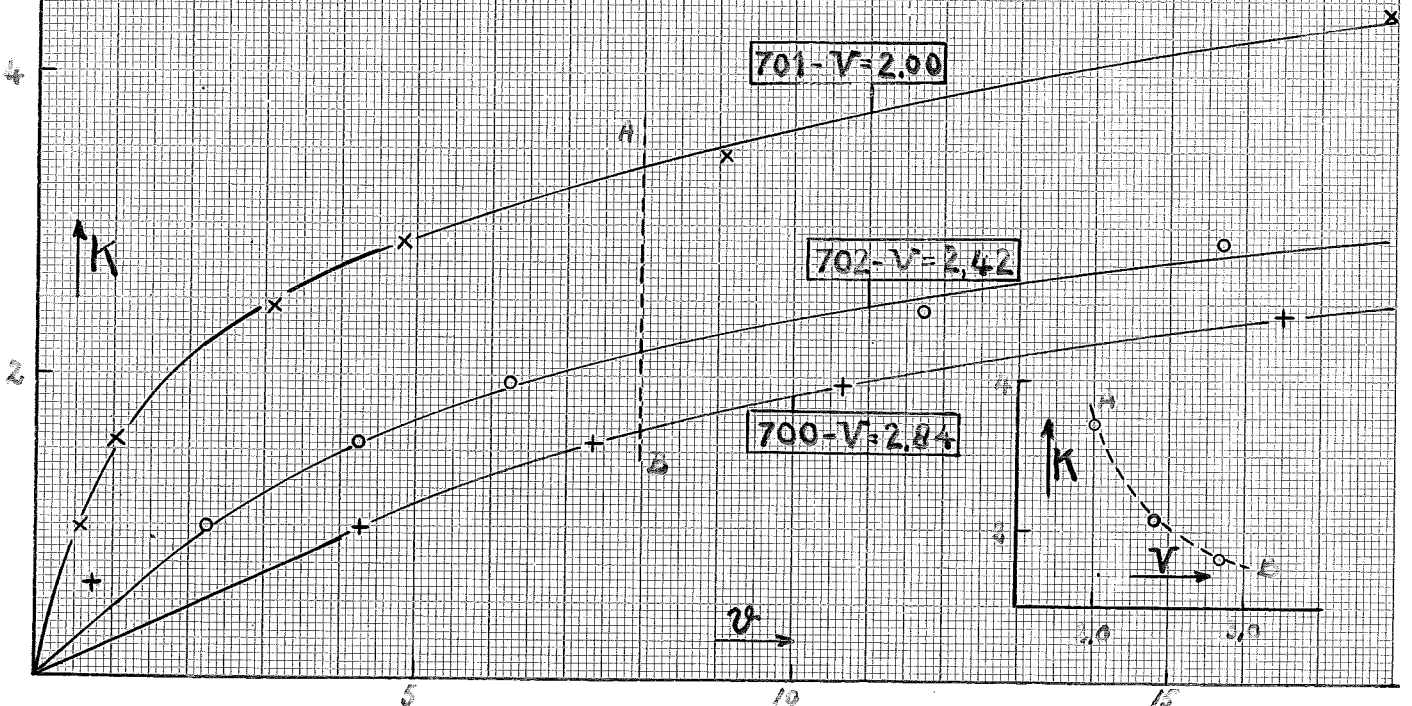
v

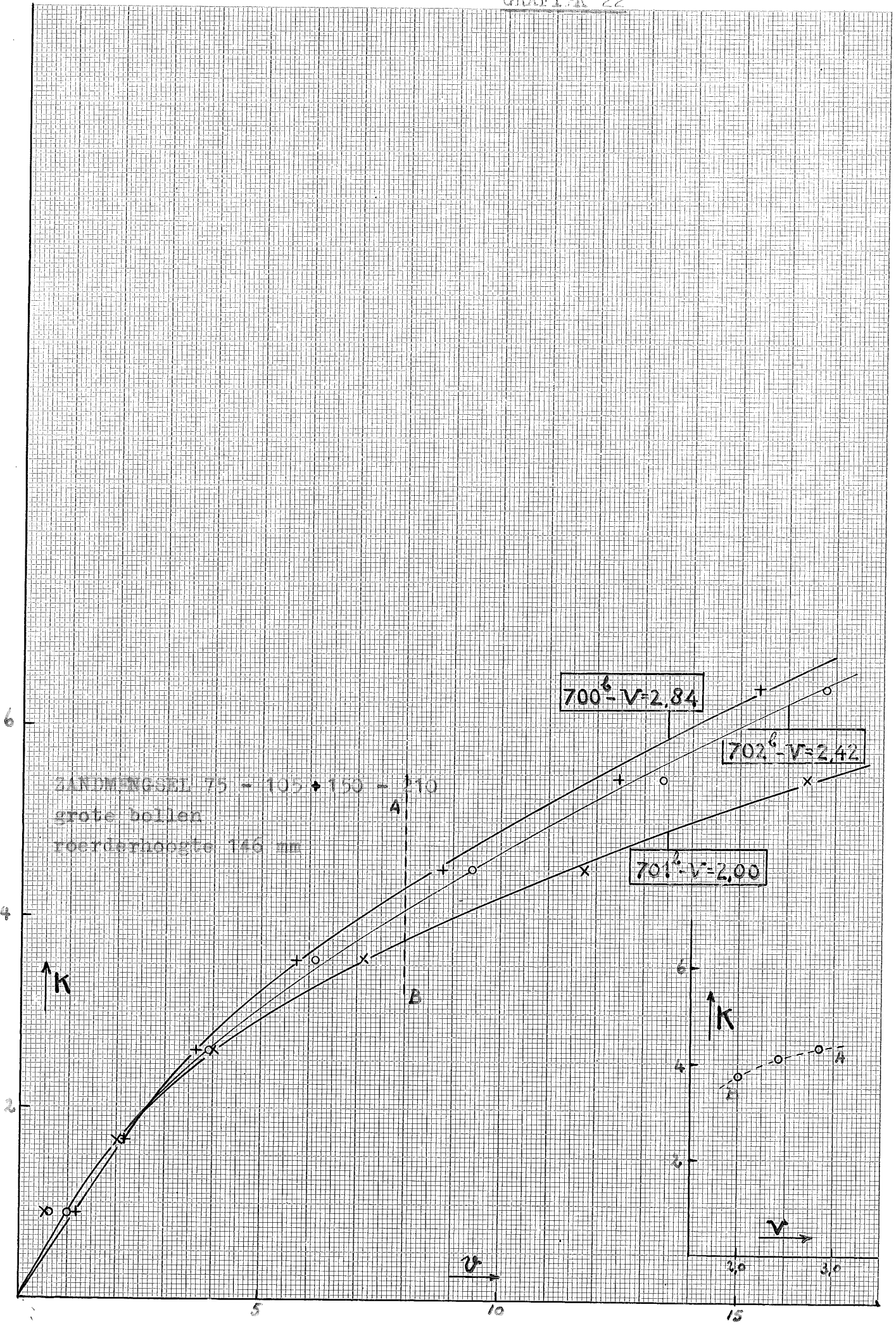


Roerderhoogte 59 mm

K

v





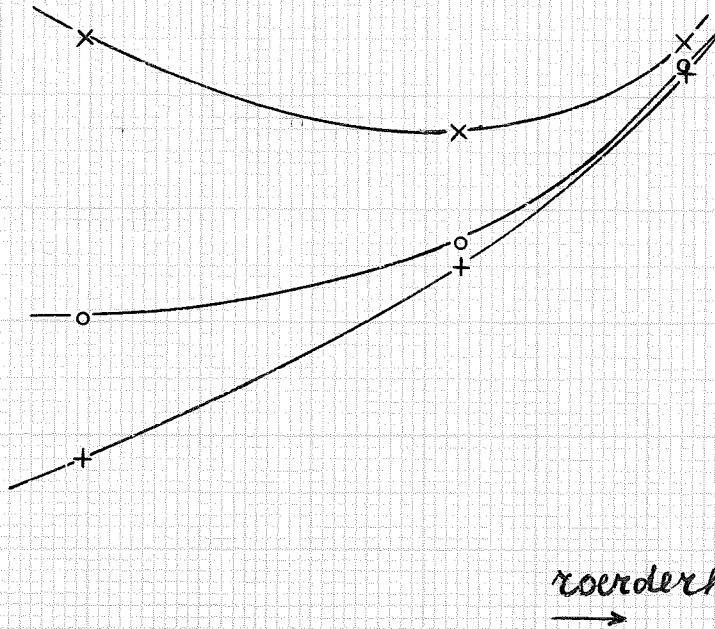
MENCSEL

6

↑ K (v = 4 cm/sec.)

4

2



- + V = 2,84
- o 2,42
- x 2,00

ronderhoogte
→

50

100

150

Silicagel 105 - 150

Grote bollen

Roerderhoogte 10,6 cm

V = 1,16	L = 13,3	G ₀ = 2,0	400	
10,7	8,7	1,65	1,00	0,262
15,7	13,7	2,60	2,33	0,61
20,7	18,7	3,55	3,10	0,81
25,7	23,7	4,50	5,45	1,43
30,7	28,7	5,45	11,54	3,02
32,7	30,7	5,84	15,30	4,00
33,7	32,7	6,02	17,50	4,60
34,7	32,7	6,21	23,25	6,10
35,7	33,7	6,40	35,60	9,32
V = 1,50	L = 14,2	G ₀ = 2,0	401	
5,7	3,7	0,70	3,40	0,89
10,7	8,7	1,65	27,70	7,25
12,7	10,7	2,03	54,00	14,20
11,7	9,7	1,84	39,20	10,28
9,7	7,7	1,46	17,00	4,45
6,7	4,7	0,89	5,40	1,43
V = 1,82	L = 14,2	G ₀ = 2,0	402	
5,7	3,7	0,70	6,10	1,60
4,7	2,7	0,51	4,20	1,10
7,7	5,7	1,08	12,40	3,25
9,7	7,7	1,46	28,25	7,42
11,7	9,7	1,84	40,54	10,60
V = 2,13	L = 14,3	G ₀ = 2,0	403	
11,7	9,7	1,84	37,00	9,70
12,7	10,7	2,03	44,75	11,75
9,7	7,7	1,46	23,10	6,05
7,7	5,7	1,08	13,00	3,41
5,7	3,7	0,70	6,80	1,78
V = 2,42	L = 14,4	G ₀ = 2,0	404	
5,7	3,7	0,70	6,80	1,78
7,7	5,7	1,08	13,00	3,41
9,7	7,7	1,46	20,30	5,32
11,7	9,7	1,84	33,15	8,68
12,7	10,7	2,03	39,80	10,40
V = 6,24	L = 14,8	G ₀ = 2,0	405	
12,7	10,7	2,03	23,80	6,23
17,7	15,7	2,98	40,00	10,50
8,7	6,7	1,27	13,50	3,53
5,7	3,7	0,70	7,85	2,06

krachtarm: 0,95 cm

Omrek. factoren:

v = 0,262 x n

K = 0,19 x G

Roerderhoogte 7,6 cm

V	L	G ₀	400 ^a	
1,16	13,4	2,0		
10,7	8,7	1,65	1,25	0,33
15,7	13,7	2,60	2,38	0,62
20,7	18,7	3,55	3,00	0,78
25,7	23,7	4,50	4,13	1,08
30,7	28,7	5,45	7,00	1,83
32,7	30,7	5,85	7,44	1,95
34,7	32,7	6,20	9,60	2,52
35,2	33,2	6,30	60,00	15,72

V	L	G ₀	401 ^a	
1,50	14,0	2,0		
5,7	3,7	0,70	2,80	0,73
4,7	2,7	0,51	2,10	0,55
10,7	8,7	1,65	31,00	8,13
11,7	9,7	1,84	42,25	11,07
8,7	6,7	1,27	10,50	2,75

V	L	G ₀	404 ^a	
2,42	14,2	2,0		
5,7	3,7	0,70	6,60	1,73
2,7	0,7	0,13	3,20	3,38 0,84
10,7	3,7	1,65	53,50	14,01
8,7	6,7	1,27	30,00	7,85
7,7	5,7	1,08	20,70	5,43

V	L	G ₀	405 ^a	
6,24	14,7	2,0		
10,7	8,7	1,65	21,80	5,71
15,7	13,7	2,60	45,50	11,91
12,7	10,7	2,03	30,60	8,02
7,7	5,7	1,08	11,60	3,04
5,7	3,7	0,70	6,65	1,74

