

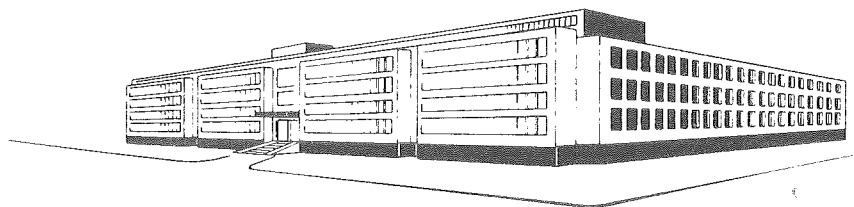
175

Archief

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

STOFOVERDRACHT AAN EEN CONTINU LOPENDE
DRAAD

J.L. DEKKER
AFSTUDEERVERSLAG
januari 1965



Laboratorium voor Technische Natuurkunde
LORENTZWEG
DELFT

STOFOVERDRACHT AAN EEN CONTINU LOPENDE DRAAD.

Afstudeerverslag:

Laboratorium voor
Physische Technologie,
Delft.

J.L. Dekker
Januari 1965.

INHOUD.

	Blz.
<u>Inleiding.</u>	2.
<u>Samenvatting van de resultaten.</u>	4.
<u>Hoofdstuk I: De stofoverdracht naar de draad in het bad.</u>	5.
I.1. Inleiding in de meetmethode.	5.
I.2. Beschrijving van de meetopstelling.	7.
I.3. De metingen.	8.
I.4. De resultaten.	12.
I.5. Foutendiscussie.	16.
Conclusies.	18.
<u>Hoofdstuk II: De meegevoerde vloeistoffilm boven het bad</u>	19.
II.1. De meetmethode.	19.
II.2. De resultaten.	19.
II.3. De theorie.	20.
Conclusies.	22.
<u>Slotconclusies.</u>	23.
<u>Literatuur.</u>	25.
<u>Lijst van Symbolen.</u>	26.
<u>Tabellen en figuren.</u>	

INLEIDING.

Het doel van de proef was het meten van de stofoverdracht naar een draad, die continu, in verticale zin, door een bad loopt; de procesvariabelen zijn daarbij de draadsnelheid, de badhoogte en de diameter van het bad.

Stofoverdracht naar een continu lopende draad is in de praktijk belangrijk in de textielindustrie, waar de te fabriceren draden uit spinbaden worden getrokken. Hiernaast speelt het beschouwde verschijnsel een rol in de metaalindustrie, waar draden vertind of bekleed worden.

In de stationaire toestand kan men de totale stofoverdracht naar de lopende draad onderverdelen in:

1. De overdracht in de grenslaagstroming in het bad.
2. De overdracht in de "vloeistof-kraag", die vanuit het oppervlak wordt meegesleurd.
3. De overdracht in de boven het bad meegevoerde vloeistoffilm.

Het zal duidelijk zijn dat de stofoverdracht ten nauwste samenhangt met de hydrodynamica van respectievelijk de grenslaag, de kraag en de film.

De uitgevoerde proef is te verdelen in metingen aan:

- A. De stofoverdracht in het bad.
 - B. De meegevoerde vloeistoffilm boven het bad.
- A. Met een electrochemische meetmethode aan het systeem kaliumferri- en kaliumferrocyanide werd de stofoverdracht naar de draad in het bad gemeten als functie van de draadsnelheid en van de badhoogte in twee meetvaten van verschillende diameter. Een criterium voor de omslag laminair - turbulent kon worden opgesteld, terwijl uit concentratie metingen aan de uit het bad meegevoerde vloeistof iets kon worden gezegd over de

mate van omzetting in de grenslaag bij de verschillende stromingscondities. Tenslotte is de wederzijdse beïnvloeding nagegaan van twee draden die op kleine onderlinge afstand lopen met gelijke snelheid.

B. Voor enkele vloeistoffen werd het in de film meegevoerde debiet als functie van de draadsnelheid gemeten. Dit gaf een indruk van de invloed die de viscositeit, de oppervlaktespanning en de draadsnelheid hebben op de grootte van het filmdebiet. Deze gegevens kunnen van belang zijn voor de berekening van de stofoverdracht in de film.

SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN.

A.

1. Voor de stofoverdrachtscoëfficiënt k naar een continu door een bad getrokken draad (snelheid v , badhoogte h) geldt voor een bepaalde stof bij constante temperatuur:

$$k = c\sqrt{vh},$$

waarbij de factor c voor het laminaire gebied kleiner is dan voor het turbulente gebied.

2. De omslag van laminair naar turbulent in de grenslaag in het bad treedt op in het Reynolds-gebied

$$\left(\frac{vh}{\nu}\right) = 0,5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5.$$

3. Er treedt al een duidelijk wandeffect op bij een diameterverhouding vat - draad van 100.
4. Een tweede draad, die op korte afstand van de eerste loopt, veroorzaakt een verhoging van de stofoverdracht aan de eerste draad

B.

Voor een bepaalde stof bij constante temperatuur geldt voor de massastroom Φ_m van de boven het bad meegevoerde film: $\Phi_m = \text{const.} \times v$ voor $v > 60$ m/min. Voor lage snelheden ($v < 30$ m/min) is Φ_m meer dan evenredig met de draadsnelheid v , terwijl de invloed van de oppervlaktespanning in dit gebied belangrijker wordt; een kleinere oppervlaktespanning geeft een grotere massastroom.

HOOFDSTUK I.

DE STOFOVERDRACHT NAAR DE DRAAD IN HET BAD.

I.1. Inleiding in de meetmethode.

De methode om stofoverdrachtscoëfficiënten in vloeistoffen met behulp van een redox - systeem te meten is in het Laboratorium voor Fysische Technologie te Delft reeds eerder toegepast door Vogtländer [1].

Wanneer een spanningsverschil ΔE wordt aangelegd tussen twee elektroden, die zich in een waterige oplossing van een elektrolyt bevinden, dan worden de ionen gereduceerd aan de kathode en geoxydeerd aan de anode, zodat er een stroom door de keten gaat lopen die evenredig is met de omzettingssnelheid van de oxydatie- (resp. reductie-) reactie. Door de omzetting aan de elektrode daalt ter plaatse de ionenconcentratie en de ontstane concentratie-gradient zorgt voor nieuwe aanvoer van ionen door diffusie. Er geldt voor de massastroom per eenheid van oppervlak:

$$\Phi_m'' = k(C_o - C_w) = k_r C_w$$

of anders geschreven:

$$\Phi_m'' = \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_r} \right)^{-1} C_o$$

De reactiesnelheidsconstante k_r neemt exponentieel toe met ΔE . Voor voldoende grote k_r geldt: $\Phi_m'' = k C_o$.

De gemeten massastroom is dan onafhankelijk van ΔE . Mits er geen volgreacties optreden kunnen we bij een bekende ionenconcentratie C_o van de vloeistof de stofoverdrachtscoëfficiënt berekenen uit de gemeten "limietstroom" I_{verz} met de betrekking:

$$k = \frac{I_{verz}}{nFAC_o} \cdot$$

We kiezen dan het object, waaraan we de stofoverdracht willen meten, als de electrode waaraan de snelle reactie plaatsvindt. Wel dienen de volgende voorzorgen genomen te worden:

1. Er mag alleen ionentransport door de invloed van de concentratiegradient plaatsvinden. Het transport onder invloed van het elektrische veld dient te worden voorkomen. Hiertoe wordt een overmaat indifferent electrolyt (N_aOH) met veel beweeglijker ionen toegevoegd, waardoor de potentiaal door de gehele oplossing constant is.
2. De omzetting aan de tegenelectrode moet het gebeuren aan de meetelectrode kunnen volgen. Nu is bij het beschouwde systeem de reactiesnelheid van de reactie aan de tegenelectrode lager, terwijl de stofoverdracht waarschijnlijk onder minder gunstige omstandigheden plaatsvindt dan aan de meetelectrode. We dienen dan ook het oppervlak van de tegenelectrode zeer veel groter (hier een factor 100) te maken dan het oppervlak van het meetobject.
3. De ionenconcentratie in het bad dient bekend te zijn en met de tijd constant te blijven. Dit is het geval als aan de meet- en de tegenelectrode een tegengestelde reactie plaatsvindt. In deze proef worden ferri-ionen in ferro-ionen omgezet en omgekeerd.

Vanwege de grote corrosiviteit van de ferri-ferro - oplossing komt als electrode materiaal slechts platina of nikkel in aanmerking. Om de mechanische eisen, die men aan de continu over wielen rondlopende draad moet stellen, is nikkel gekozen.

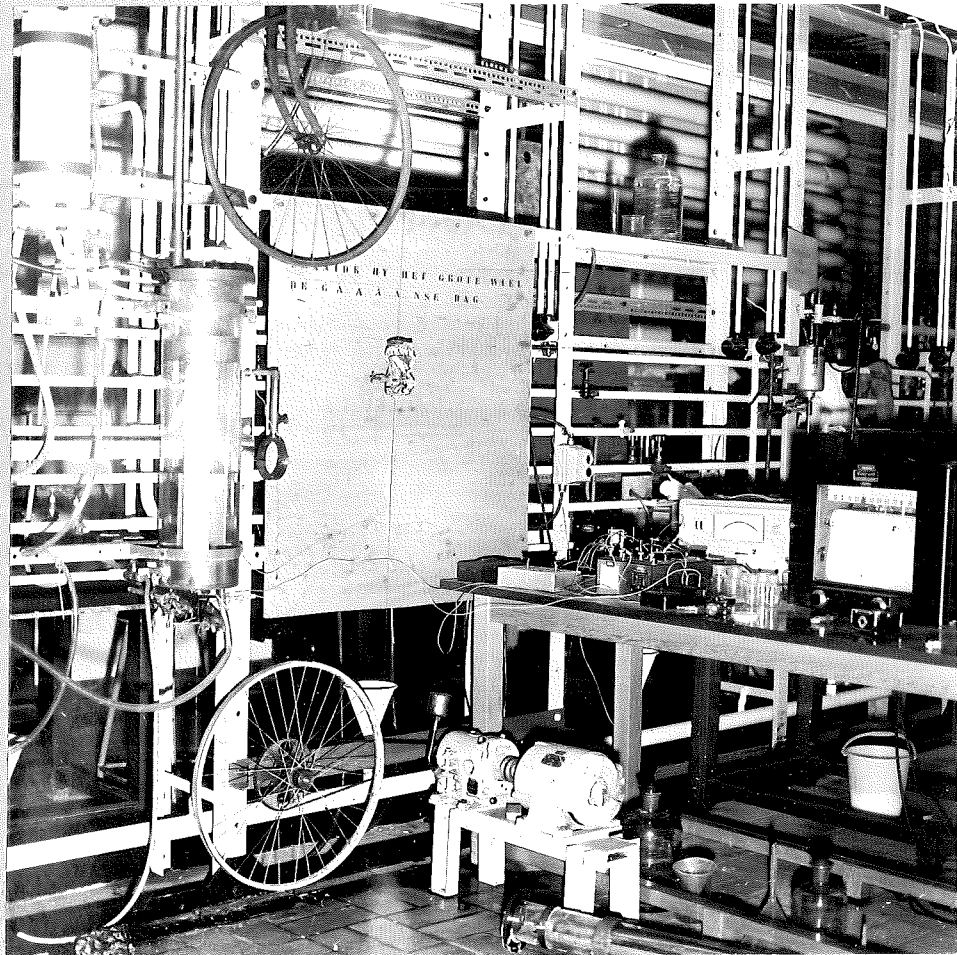
Vorige onderzoekers hadden ongemak van het snel oxyderen van de oplossing, waaraan slechts ten dele kon worden ontkomen door onder een stikstof atmosfeer te werken.

In deze proef werd de oplossing steeds onder vacuum volledig ontlucht, waarna verder onder stikstof atmosfeer werd gewerkt. De oplossing bleek nu wel enkele weken houdbaar. Een bijkomend voordeel van deze werkwijze was, dat er geen luchtbelllen meer aan de elektroden ontstonden, die het electrodepoppervlak ondefinieerbaar maakten.

I.2. Beschrijving van de meetopstelling.

Bij de opzet van de proef lag het al in de bedoeling een groot aantal metingen te verrichten. Daarom is een opstelling (fig. 1) gekozen, die het continu meten van de stofoverdracht als functie van de snelheid mogelijk maakte. Daartoe werden de uiteinden van een nikkeldraad zorgvuldig aan elkaar gepuntlast. De draad wordt dan via twee fietswielen continu door het meetvat gevoerd. Vanwege de corrosiviteit van de oplossing voor metalen is het meetvat volledig in kunststof (perspex en pvc) uitgevoerd. De door de draad meegevoerde film wordt boven in het meetvat door twee glazen buisjes naar de zijwand afgevoerd. Er kan via het voorraadvat uit een stikstofcylinder stikstof in het meetvat gevoerd worden. Langs de wand is een nikkelen tegenelectrode aangebracht met een oppervlak per lengte eenheid gelijk aan 100 maal dat van de meetelectrode. In het midden van het meetvat op de bodem is een nikkelen referentieëlectrode aangebracht, die de potentiaal van de oplossing heeft. Twee tegenover elkaar verend aangebrachte sloopcontacten zorgen voor de verbinding tussen de meetelectrode en de elektronische meetopstelling (fig. 2).

Een met een chemisch bestendige verf bekleed stalen vat fungeert als voorraadvat, dat vacuum gezogen kan worden. De draadsnelheid kan gevarieerd worden door een motor met



De opstelling
foto 1.

toerenvariator, die één der fietswielen aandrijft. De overbrengverhouding is zodanig gekozen, dat voldoende vermogen geleverd wordt voor een regelmatige gang van de draad.

Figuur 2 laat de electronische meetopstelling zien. Op de voltmeter V_1 wordt de spanning ingesteld, waarbij de verzadigingsstroom I_{verz} optreedt. I_{verz} wordt opgetekend op de schrijver, die in feite een spanning over een decadebank (0,1 - 1 Ohm) meet. De benodigde gelijkspanning wordt geleverd door een 6 Volt voedingsapparaat.

Foto 1 toont de gehele meetopstelling.

X . Het doen functioneren van deze meetopstelling stuitte op één grote moeilijkheid: het voortijdig breken van de rondlopende nikkeldraad ($d = 1$ mm). Om vermoeidheidsverschijnselen in de draad zoveel mogelijk te voorkomen wordt de draad over betrekkelijk grote wielen geleid, zodat de buigingshoek klein blijft. Dan is na veel geëxperimenteer een puntlasmethode gekozen om de twee draaduiteinden aan elkaar te bevestigen. De schuin afgevljnde draaduiteinden worden op elkaar gelegd en onder een bepaalde druk met een nauw-begrensde stroom op enkele plaatsen aan elkaar gepuntlast. Tenslotte wordt de gehele draad met inbegrip van de las spanningsvrij gegloeid. Het niet nemen van deze voorzorgen leidt tot catasrofale gevolgen.

I.3. De metingen.

De metingen waren onder te verdelen in:

- A. De meting $I_{verz} = f(v, h, D)$ met de gegeven draad van 1 mm doorsnede.
- B. Een tweetal metingen, die dienden om de onder A. gedane waarnemingen verder verklaarbaar te maken:
 - a. De metingen aan de zichtbaar gemaakte verschijnselen in de grenslaag.
 - b. Concentratieingen aan de boven het bad mee-gevoerde film.

C. Inleidende metingen aan twee op kleine onderlinge afstand lopende draden, die elkaar wederzijds bevoelden.

Aan bovenstaande metingen gingen de volgende 4 proeven vooraf:

- a. De bepaling van de in te stellen spanning tussen de elektroden.
- b. De stofoverdracht als functie van de ferri-ionen concentratie in de vloeistof.
- c. Een onderzoek onder welke omstandigheden alleen de stofoverdracht in de grenslaagstroming werd gemeten.
- d. Het bepalen van de invloed van de viscositeit ν en de diffusiecoëfficiënt D op de stofoverdracht.

ad a) Er werden E - I krommen bij draadsnelheid $v = 0$ (fig. 3) en bij draadsnelheid $v = 50$ m/min (fig. 4) bepaald. Uit de laatste krommen kunnen we zien in hoeverre de reactie aan de elektrode voldoende snel is om de stofoverdracht voor te blijven. We zien uit deze grafiek, dat, hoewel het "plateau" hier minder vlak en minder uitgebreid is, het zeker nog bruikbaar is. Als instelpunt voor de aan te leggen spanning tussen de meetelektrode en de referentieelektrode is tenslotte $E = 800$ mV gekozen.

ad b) Bij constante badhoogte $h = 8$ cm en variabele snelheid (v) = 2 - 120 m/min is gemeten met de ferri-ionen concentraties $C_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}$, $C_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $C_0 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ en $C_0 = 5,0 \cdot 10^{-2}$ kmol/m³. Binnen de meetnauwkeurigheid bleek de stofoverdracht recht evenredig met de concentratie C_0 te zijn.

ad c) Er is nagegaan wat we precies maten, dat wil zeggen of er ook een reactie in de kraag en in de meegevoerde film optrad. We kwamen tot de slotsom, dat slechts het gebeuren in het bad gemeten wordt op grond van:

- 1°. Het afstrijken van de film op verschillende hoogten boven het bad (bij constante badhoogte h) met behulp van een glazen filmafstrijker zoals die in de rayon - industrie gebruikt wordt. Dit gaf geen verschil in de gemeten stofoverdracht.
- 2°. Metingen in twee meetvaten van 75 cm resp. 25 cm hoogte, doch met een zelfde diameter en een constante badhoogte. Hier werd geen verschil in stofoverdracht gemeten.
- 3°. Het meten in een geheel gevuld vat, dus zonder kraag en film. De gevonden stofoverdracht stemde overeen met de uit andere metingen geëxtrapoleerde waarde voor de stofoverdracht in het bad alleen.
- 4°. Bij metingen met tegenelectroden van kleinere hoogte dan de badhoogte bleek dat bij enkele centimeters hoogteverschil alreeds een kleine vermindering van de stofoverdracht optrad.

ad d) Bij een constante badhoogte en een constante snelheid werd in het temperatuur gebied $(T) = 5 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$ de stofoverdracht gemeten om de afhankelijkheid met de viscositeit en de diffusiecoëfficiënt globaal na te kunnen gaan.

Met behulp van bovenstaande gegevens is gemeten:

- A. In een meetvat van diameter 19,0 cm en hoogte 75 cm:
 $I_{\text{verz}} = f(v, h)$. De waarnemingen zijn als $I_{\text{verz}} = f(\sqrt{v})$ bij verschillende hoogten gegeven in figuur 5.
 Elk punt van de grafieken is een gemiddelde van 3 à 5 meetpunten.
 Om de indruk te krijgen van de invloed van de vattendiameter D op de stofoverdracht is $I_{\text{verz}} = f(v, h)$ ook gemeten in een meetvat van diameter 9,2 cm en hoogte 75 cm (fig. 6). Verder is in figuur 7 $I_{\text{verz}} = f(\sqrt{h})$ uitgezet voor een aantal waarden van draadsnelheid v . (vatdiameter $D = 9,2 \text{ cm}$)
- B. a. Bij beschouwing van de grafieken valt op dat de

naast een zeer
 nauwkeurig
 gegeven vermeld?

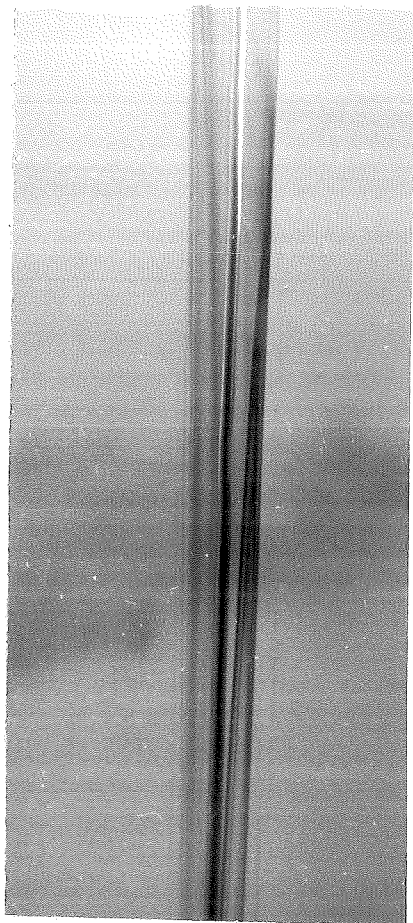
Maakt in 25 cm
 vat met de
 bepaald door
 meten?

uitleg?

uitkomst?

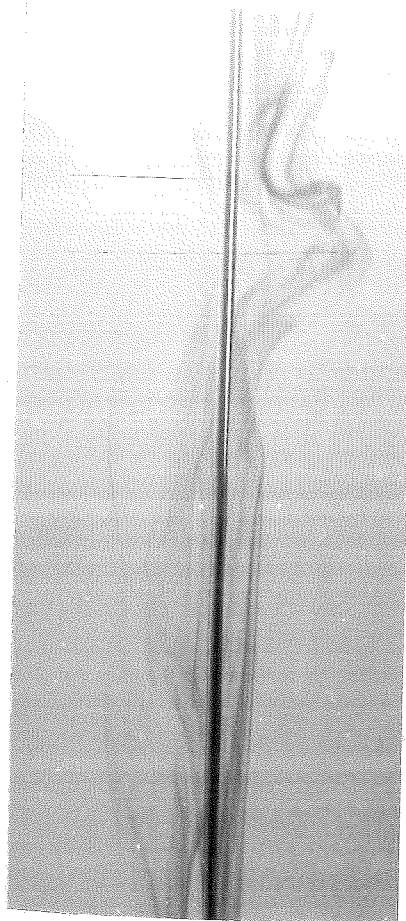
grafiek?

meetvat II?



$V = 10 \text{ m/min}$

foto 2.



$V = 20 \text{ m/min}$

foto 3.



$V = 25 \text{ m/min}$

foto 4.

helling verandert in het gebied tussen $vh = 3,2 \text{ m}^2/\text{min}$ en $vh = 6,4 \text{ m}^2/\text{min}$. Om de oorzaak van dit verschijnsel op te sporen is op 5 cm hoogte in de grenslaag inkt geïnjecteerd. Hierdoor kon het gedrag van de grenslaag zichtbaar gemaakt worden. Er bleek in bovengenoemd snelheidsgebied ($0,5 \cdot 10^5 < \frac{vh}{\nu} < 2,5 \cdot 10^5$) turbulentie in de grenslaag op te treden. De foto's 2, 3 en 4, genomen op constante hoogte $h = 25 \text{ cm}$ bij de opeenvolgende snelheden $v = 10, 20$ en 25 m/min , laten dit zien.

- b. Om iets meer te weten van de mate van omzetting in de grenslaag is een aantal malen de concentratie C_0 van de meegevoerde film als functie van de draadsnelheid gemeten. We geven als voorbeeld:

$$C_0 \text{ (oplossing)} = 2,38 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$$

$$C_0 (v = 15 \text{ m/min}) = 0,85 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$$

$$C_0 (v = 20 \text{ "}) = 1,20 \text{ " "}$$

$$C_0 (v = 35 \text{ "}) = 2,33 \text{ " "}$$

$$C_0 (v = 60 \text{ "}) = 2,31 \text{ " "}$$

$$C_0 (v = 70 \text{ "}) = 2,34 \text{ " "}$$

Bij de badhoogte $h = 12 \text{ cm}$ begint turbulentie op te treden bij $v = 25 \text{ m/min}$. We zien uit bovenstaande gegevens, dat de omzetting in het laminaire gebied vrij groot is, terwijl in het turbulente gebied de omzetting klein is en nagenoeg onafhankelijk van de snelheid.

- c. Voor twee draden, op een onderlinge afstand van 0,5 cm lopend met gelijke snelheid, is de stofoverdracht als functie van de snelheid bij enkele badhoogten gemeten. Er is waargenomen dat de stofoverdracht naar de draden afzonderlijk verschilt van de stofoverdracht naar de enkele draad in het Re - gebied ($\frac{vh}{\nu}$), waarin de wederzijdse beïnvloeding een rol gaat spelen. In figuur 8 is de gemiddelde

stofoverdracht naar één van de twee draden uitgezet als functie van de snelheid voor de badhoogten $h = 8$ cm en $h = 32$ cm; als vergelijking is ook de stofoverdracht naar een niet beïnvloede draad gegeven.

I.4. De resultaten.

A. Stofoverdrachtsberekening in het bad.

We hebben waargenomen:

1. I_{verz} (dus de stofoverdrachtscoëfficiënt k) is recht evenredig met \sqrt{v} en \sqrt{h} (fig. 5,6, en 7).
2. Bij $v = 0$ meten we een constante term $I_{\text{verz}} = 0,14$ mA ($Sh = 22$) per cm badhoogte.

Op grond hiervan komen we tot de conclusie, dat de stofoverdracht in het bad beschreven zou kunnen worden met een betrekking van de vorm:

$$Sh = c_1 + c_2 Re^{0,5} Sc^{0,33},$$

waarin: $Sh = \frac{kh}{D} =$ getal van Sherwood.
 $Re = \frac{vh}{\nu} =$ getal van Reynolds.
 $Sc = \frac{\nu}{D} =$ getal van Schmidt.

Hierbij wordt opgemerkt:

1. In bovenstaande betrekking is de term $Sc^{0,33}$ toegevoegd op grond van het feit dat deze term algemeen voorkomt in stofoverdrachtsberekeningen. Er is nog wel getracht om uitsluitel over de juistheid van deze term te krijgen, doch uit een proef met een oplossing van groter viscositeit was het nog niet mogelijk conclusies te trekken.
2. De invoering van de constante c_1 vindt zijn analogie in de invoering van de term $c Pr^{0,2}$ ($Pr = \frac{\nu}{a} =$ getal van Prandtl) in de warmtetheorie voor dwars aangestroomde cilindres door Kramers. [3] Zouden wij $c_1 = c Sc^{0,2}$ invoeren, waarbij de juistheid van de

term $Sc^{0,2}$ niet bewezen is, dan kunnen we de waarde van constante c berekenen en deze vergelijken met de literatuur, mits we het getal van Sherwood betrekken op de draaddiameter $d = 1$ mm. We vinden $c = 0,51$, terwijl Kramers geeft: $c = 0,42$ [3] en Vogtländer geeft $c = 0,28$ [1].

3. De gemeten constante $c_1 = 22$ per cm badhoogte stemt overeen met de gevonden $\frac{Sh}{Sc^{0,33}}$ voor $Re^{0,5} = 0$ in een grafiek waar:

$$\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re^{0,5}) \text{ is uitgezet.}$$

In de tabellen 1 tm 20 zijn de berekeningen gegeven. In het algemeen wordt dan een grafiek gegeven:

$$\frac{Sh - c_1 Sc^{0,2}}{Sc^{0,33}} = c_2 Re^{0,5}.$$

Deze grafiek is echter achterwege gelaten vanwege de zeer grote opeenhoping van punten langs de twee rechte lijnen voor resp. het laminaire en het turbulente gebied.

Wanneer we de Chilton - Colburn analogie $\frac{1}{2}f = \frac{Sh}{ReSc^{0,33}}$ toepassen, kunnen we de verkregen resultaten vergelijken met de literatuur over impulsoverdracht naar continu lopende cylinders. Sakiadis [5] geeft een berekening voor een laminaire grenslaag (fig. 9) en een berekening voor een turbulente grenslaag, die hijzelf achteraf weer verwerpt. Deze berekening stemt ook inderdaad niet met onze waarnemingen overeen. Kaldenhof [8] berekent de impulsoverdracht naar continu lopende draden. Zijn resultaat is ook in figuur 9 gegeven. Zijn metingen aan dunne draden ($3 \cdot 10^{-6} - 125 \cdot 10^{-6}$ m) liggen in een gebied van $\frac{h}{vd}^2$, dat een factor 10^3 afwijkt van ons meetgebied, zodat de resultaten niet direct vergelijkbaar zijn. Onze resultaten, met de Chilton - Colburn analogie omgerekend, zijn eveneens in figuur 9 uitgezet. We zien, dat de gevonden waarden

berekenen
verschillen?

10

oorszaak
niet laminaire
draad 9
diameter

Kaldenhof
(1959)
Sakiadis
lam. gebied

in het overgangsgebied van laminair naar turbulent enigszins met die van Kaldenhof overeenstemmen.

Opvallend is verder dat de berekeningen van Sakiadis en Kaldenhof voor het laminaire gebied zeer goed overeenstemmen.

B. De invloed van de diameterverhouding meetvat - draad op de stofoverdracht.

In figuur 10 zijn de metingen aan de meetvaten I en II met diameters van 190 mm respectievelijk 92 mm samen uitgezet. Er is wel voor het ferri-ionen concentratieverschil tussen beide metingen gecorrigeerd, doch niet voor het temperatuurverschil. In meetvat I was de temperatuur enkele graden hoger, waardoor bij kleine badhoogte en kleine snelheden de grafieken van meetvat I hoger liggen. Bij groter badhoogte en hogere snelheden wordt het wandeffect belangrijk en gaan de grafieken van meetvat II die van meetvat I snijden. Bij grote badhoogte gaan zelfs de grafieken van meetvat II ongeacht de snelheid geheel boven de grafieken van meetvat I lopen. Dit effect kunnen we natuurlijk ook aflezen uit de waarden van constante c_2 in de tabellen 1 tm 20.

C. De omslag laminair - turbulent van de grenslaag.

Uit de grafieken van figuur 5 en 6 kunnen we uit het gebied waar hellingverandering optreedt (en daarmee de vermoedelijke omslag van laminair naar turbulent) het kritisch Reynolds - getal berekenen: $(Re)_{kr} = 0,5 - 1,1 \cdot 10^5$. Duidelijk turbulent zou dan de grenslaag zijn voor $Re > 2,5 \cdot 10^5$.

Visueel is de omslag onder de volgende omstandigheden waargenomen: $T = 15^\circ\text{C}$, $\nu = 1,140 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$v = 28 \text{ m/min } h = 40 \text{ cm dus } Re = 1,6 \cdot 10^5$$

$$v = 31 \quad " \quad h = 30 \quad " \quad " \quad Re = 1,4 \cdot 10^5$$

$$v = 35 \quad " \quad h = 8 \quad " \quad " \quad Re = 0,4 \cdot 10^5$$

Gefotografeerd is de omslag voor $T = 22,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $\nu = 0,920 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $v = 20 \text{ m/min}$ en $h = 25 \text{ cm}$;
 hieruit volgt: $Re = 0,9 \cdot 10^5$.

Op grond van bovenstaande waarnemingen lijkt het gerechtvaardigd te veronderstellen, dat de grenslaag turbulent wordt in het Reynolds - gebied:

$$(Re) = 0,5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5.$$

Bij warmteoverdrachtsmetingen aan roterende bollen zijn door Kreith, Roberts, Sullivan en Sinha [4] krommen gevonden, die sterk gelijken op onze waargenomen stofoverdrachtskrommen.

Sakiadis [5] geeft de reeds eerder genoemde berekening voor de opbouw van een laminaire en een turbulente grenslaag, die, voor zover het de laminaire grenslaag betreft, wel overeenstemt met hetgeen we visueel waargenomen hebben. Hij geeft echter geen criterium voor de omslag van laminair naar turbulent.

Uit de metingen valt niet duidelijk op te maken in hoeverre de turbulentie op zichzelf bijdraagt tot een grotere stofoverdracht. Vermoedelijk hangt de grootte van het wandeffect nauw samen met het optreden van turbulentie.

D. De wederzijdse beïnvloeding van twee draden.

In grafiek 8 zien we de gemiddelde stofoverdracht naar een draad, die op een afstand van 0,5 cm van een tweede draad loopt, vergeleken met de stofoverdracht naar een niet beïnvloede draad. De ferri-ionen concentratie van de oplossing bij de meting met twee draden was 4% hoger, terwijl de temperatuur $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lager was. Dit compenseert elkaar gedeeltelijk. In feite moeten de grafieken van de meting aan twee draden iets hoger lopen.

*inbedoude
 40 x 10⁵ m/s
 van vloeistof*

We zien dat de grafiek van de gemiddelde stofoverdracht naar één draad bij beïnvloeding door een tweede draad voor een badhoogte $h = 8$ cm al van helling verandert in tegenstelling tot de grafiek van de niet beïnvloede draad. Voor badhoogte $h = 32$ cm resulteert de beïnvloeding al in een stofoverdrachtsvergroting tot 10% bij $v = 100$ m/min, terwijl de grafiek in het turbulente gebied ook niet meer door een rechte voorgesteld kan worden. Het waargenomen effect ontstaat waarschijnlijk doordat twee draden een grotere werveling in het vat geven dan één draad.

I.5. Foutendiscussie.

Er dient vooropgesteld te worden dat de gebruikte meetmethode leidde tot zeer reproduceerbare waarnemingen. De spreiding in de meetpunten na correctie voor temperatuur- en concentratieafwijkingen bedroeg 2%. Dit vindt men ook terug in de spreiding van 1% in de berekende constanten c_2 in het laminaire gebied; zie b.v. de tabellen 1 tm 6 in het snelheidsgebied (v) = 8 - 20 m/min.

De gemaakte fouten in: $\left[\frac{kh}{D} = \text{const.} \left(\frac{vh}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v}{D} \right)^{0,33} \right]$ *precis ??*
 terwijl: $k = \frac{I_{\text{verz}}}{nFAC_0}$ zijn te verdelen in

willekeurige fouten en systematische fouten. De willekeurige fouten voor een gemiddelde meting zijn:

- a. I_{verz} : 1°. Fout in het meten van de door de schrijver opgetekende kromme bedraagt 0,3%.
 2°. Het niet precies ingesteld zijn van spanning E in de $E - I$ "plateau kromme" veroorzaakt door de kleine helling van het plateau een fout van 1%.
- b. concentratie C_0 : De enkele malen per dag gedane analyses vertoonden een spreiding van 1%, dus de waarschijnlijke fout: 1%.

- c. badhoogte h ; De instelfout bedraagt 0,5%. Deze fout komt via \sqrt{h} in de formule terug als een fout van 0,25%
- d. temperatuur T : De fout van 0,1 °C veroorzaakt een fout in de diffusiecoëfficiënt D en in de viscositeit ν . Afgezien van de viscositeitsinvloed op D is de fout in D te verwaarlozen en komt in $\nu^{-0,84}$ tot uiting in een fout van 0,5%.
- e. draadsnelheid: In de instelling van het juiste toeren-
v. tal van het aandrijfwiel wordt een fout van 0,5% gemaakt.

Een fout door een niet rechtlijnige beweging van de draad door het meetvat is niet geconstateerd. De som van de willekeurige fouten bedraagt 3,6%, wat goed overeenstemt met een spreiding in de meetpunten van 2%.

Voor een absolute meting zijn echter de systematische fouten veel belangrijker. Deze bestaan uit:

- a. I_{verz} : De ijking van de schrijver op de buisvoltmeter geeft een fout van 1%.
- b. : De fout door het niet nauwkeurig bekend zijn van de diffusiecoëfficiënt kan wel 10% zijn. Via $D^{0,67}$ resulteert dit in een fout van 6,5%.
- c. oppervlak: Het niet precies bekend zijn van de draaddiameter geeft een fout in het electrodeoppervlak van 2%.
- d. : De berekeningen zijn gebaseerd op de door Vogtländer [1] gebruikte waarden voor de viscositeit, afkomstig uit gegevens over een NaOH - oplossing in Critical Tables. De in deze proef gemeten viscositeiten bleken 5% af te wijken van bovengenoemde waarden. Een spreiding van 2,5% in de eigen waarnemingen deed echter besluiten de getalwaarden van Vogtländer aan te houden. Via $\nu^{-0,84}$ wordt deze fout uiteindelijk 4%.

We zien tenslotte een totale fout van 14%.

Conclusies.

1. Voor de stofoverdracht naar een draad in een bad geldt de betrekking:

$$Sh = c_1 + c_2 Re^{0,5} Sc^{0,33}.$$

Dit betekent voor een bepaalde stof bij constante temperatuur en gegeven concentratie (badhoogte h , draadsnelheid v):

$$k = c\sqrt{vh} \text{ mits } \frac{vh}{\nu} \gg \frac{c_1^2}{c_2^2}.$$

Hierbij geldt: $c_{\text{laminair}} < c_{\text{turbulent}}$.

2. Er treedt in de grenslaag een omslag van laminair naar turbulent op voor $(Re) = 0,5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$.
3. Het wandeffect demonstreert zich in een toename van de stofoverdracht tot 18% bij $v = 120$ m/min en $h = 64$ cm, wanneer de diameterverhouding vat - draad verkleind wordt van 190 naar 90.
4. De wederzijdse beïnvloeding van twee draden leidt tot een vergroting van de gemeten stofoverdracht aan één draad afhankelijk van de badhoogte en van de draadsnelheid.
5. De gebruikte meetmethode werkt zeer plezierig, mits men het mechanisch gebeuren onder de knie heeft. Het is dan mogelijk meetresultaten te verkrijgen met een spreiding van minder dan 2%. Slechts de systematische fout van 14% is voor verbetering vatbaar, hetgeen te bereiken zou zijn door een betere bepaling van de diffusiecoëfficiënt D en de viscositeit ν .
- Het werken onder constante temperatuur met behulp van een thermostaat zou het rekenwerk kunnen bekorten.

HOOFDSTUK II.

DE MEEGEVOERDE VLOEISTOFFILM BOVEN HET BAD.

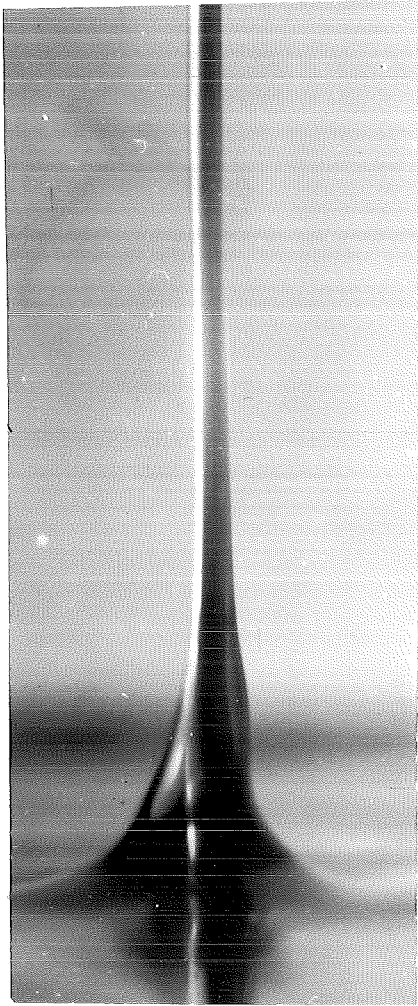
II.1. De meetmethode.

Aan de continu door het meetvat lopende draad werd de massastroom Φ_m van de meegevoerde film als functie van de draadsnelheid v gemeten. Boven in het meetvat, waar de draad door de wand gevoerd wordt, was het mogelijk om met een glazen buisje de film volledig af te nemen en door de zijwand van het meetvat naar buiten te voeren. Hier werd de vloeistof in een bekerglaasje opgevangen en vervolgens gewogen. Een meetbare massastroom werd verkregen in een tijd variërend van 10 minuten voor de laagste draadsnelheid (2 m/min) tot 1 minuut voor de maximum snelheid (80 m/min). Bij hogere snelheden was het niet meer mogelijk de film geheel af te nemen. Een constante omgevingstemperatuur was een vereiste, daar bij kamertemperatuur de viscositeit sterk temperatuurafhankelijk is. Met deze genomen voorzorg was de spreiding in de waarnemingen niet groter dan enkele procenten.

II.2. De resultaten.

Allereerst is de afhankelijkheid van de massastroom Φ_m met de hoogte van het bad h bij constante draadsnelheid v bepaald. Bij de beschouwde stoffen van verschillende viscositeit bleek in het snelheidsinterval (v) = 20 - 80 m/min bij een badhoogte $h > 1 \frac{1}{4}$ cm, Φ_m onafhankelijk van de badhoogte te zijn.

Φ_m als functie van v bij $h = 10$ cm is gemeten voor de stoffen:



$V = 40 \text{ m/min}$

foto 5.



$V = 70 \text{ m/min}$

foto 6.

- a. Water; dynamische viscositeit $\eta = 1,005 \cdot 10^{-3}$ kg/ms.
 oppervlaktespanning $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3}$ N/m.
 temperatuur $T = 20,0$ °C.
- b. Een oplossing van 20 gewichtsprocenten glycerine in water; gemeten viscositeit $\eta = 1,68 \cdot 10^{-3}$ kg/ms.
 $\sigma = 70 \cdot 10^{-3}$ N/m
 $T = 21,0$ °C.
- c. Ethylalcohol; $\eta = 1,200 \cdot 10^{-3}$ kg/ms.
 $\sigma = 22,3 \cdot 10^{-3}$ N/m
 $T = 20,0$ °C.

De niet gemeten fysische constanten zijn gevonden in [7].
 De op twee series waarnemingen berustende grafieken vindt men in figuur 11.

Hieruit kan men zien dat tot draadsnelheid $v = 30$ m/min de oppervlaktespanning een duidelijke rol speelt. De veel kleinere oppervlaktespanning van alcohol komt tot uiting in een relatief grote massastroom Φ_m bij lage draadsnelheid. Voor $v > 60$ m/min zien we dat $\Phi_m = \text{const.} \cdot v$, waarin de constante nog een functie van de viscositeit en de oppervlaktespanning kan zijn afhankelijk van de temperatuur en de beschouwde stof. In dit gebied speelt de oppervlaktespanning geen overheersende rol meer. Vanwege de lage oppervlaktespanning kon voor alcohol voor $v > 40$ m/min de film niet meer geheel afgenomen worden en konden dus geen metingen verricht worden.

Foto's 5 en 6 tonen de meegesleurde kraag aan het vloeistofoppervlak bij draadsnelheden van $v = 40$ m/min respectievelijk $v = 70$ m/min en laten duidelijk de rol van de oppervlaktespanning zien.

II.3. De theorie.

In de literatuur zijn een aantal resultaten van metingen aan een door een vlakke plaat meegesleurde film bekend. Van Rossum [6] geeft in een overzichtsartikel de resultaten van de metingen van verschillende onderzoekers gecombineerd met de waarnemingen van hemzelf.

Men stelt: De filmdikte $\epsilon = f(\rho g, \eta, \sigma, v, \Phi_m)$,

Via dimensieanalyse komt men tot de betrekking in dimensieloze groepen:

$$\epsilon \left(\frac{\rho g}{\eta v} \right)^{\frac{1}{2}} = f \left[\Phi_m \left(\frac{\rho g}{\eta v^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{\sigma}{\eta v} \right].$$

Wil men nu iets meer weten over het snelheidsprofiel in de filmdoorsnede, dan bekijkt men het verband tussen filmdikte ϵ en massastroom Φ_m , dat wil zeggen men onderzoekt:

$$\epsilon \left(\frac{\rho g}{\eta v} \right)^{\frac{1}{2}} = f \left[\Phi_m \left(\frac{\rho g}{\eta v^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right].$$

In de door ons uitgevoerde proef is echter geen filmdikte ϵ gemeten doch massastroom Φ_m als functie van de draadsnelheid v . We bekijken dan:

$$\Phi_m \left(\frac{\rho g}{\eta v^3} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ als functie}$$

van $\frac{\sigma}{\eta v}$ en vergelijken onze resultaten met de waarnemingen van van Rossum verricht aan een olie met hoge viscositeit bij een lage plaatsnelheid terwijl de oppervlaktespanning $\sigma = 32 \cdot 10^{-3}$ N/m is. De vergelijking is gegeven in figuur 12. We zien dat onze punten van het lineaire deel der krommen uit figuur 11 in hetzelfde gebied vallen als de meetpunten van van Rossum. Verder kunnen geen conclusies getrokken worden, omdat er in een volkomen verschillend gebied van $\frac{\sigma}{\eta v}$ gewerkt is.

*In een draad
verschilt van een
plaat*

Conclusies.

1. Voor kleinere snelheden ($v < 30$ m/min) wordt de massastroom van de boven het bad meegevoerde film ^{1/100} sterk bepaald door de grootte van de oppervlakte-spanning.
2. Voor grotere snelheden ($v > 50$ m/min) is voor een bepaalde stof bij bepaalde temperatuur de massastroom van de film recht evenredig met de snelheid ($\Phi_m = \text{const.} \cdot v$).
3. De grenslaag in het bad is al zeer snel in die staat opgebouwd dat de meesleuring boven het bad niet meer beïnvloed wordt door de badhoogte (Φ_m onafhankelijk h voor $h > 4$ cm bij $v < 80$ m/min).
4. De verzamelde gegevens zijn niet voldoende in aantal om een betrekking tussen de bestaande variabelen te geven. De bekende literatuur geeft hier ook geen houvast.

SLOTCONCLUSIES.

A. Met de in deze proef verkregen resultaten moet het volgens mij mogelijk zijn de totale stofoverdracht van bad, kraag en film naar de draad redelijk nauwkeurig te voorspellen.

1. De stofoverdracht in het bad is nauwkeurig bepaald.
2. De kraag, de overgebleven onbekende factor, is bij lage draadsnelheid ($v < 30$ m/min) onbeduidend, terwijl bij hogere snelheden de grenslaag dermate turbulent is, dat een uniforme concentratieverdeling in de doorsnede verondersteld mag worden. Tevens is in dit geval de concentratie in de kraag weinig afwijkend van de oplossing in het bad. De kraag kan bij zeer hoge snelheden waarschijnlijk als een verlengstuk van het bad gezien worden en kan bij de badhoogte worden opgeteld.
3. Uit de grootte van de meegesleurde filmmassaastroom en de bepaalde concentratie van de meegevoerde film moet het mogelijk zijn met behulp van de penetratietheorie de stofoverdracht te berekenen. Hierbij kan nog opgemerkt worden, dat bij lage snelheid de concentratie in de film vlak boven het vloeistofoppervlak al tot nul genaderd is, terwijl bij hoge snelheid analoog als bij de kraag een uniforme concentratieverdeling door de filmdoorsnede mag worden verondersteld.

zodanig

B. Een verdere ontwikkeling in dit onderzoek zou kunnen bestaan uit:

1. Het precies bepalen van het wandeffect door meting van de stofoverdracht als functie van de diameter. Hieruit moet dan door extrapolatie naar oneindig

*ja.
precies bepalen
van wandeffect
diameter*

vak

grote diameter van het bad het effect van de turbulentie van de grenslaag op de stofoverdracht expliciet te bepalen zijn.

- precisiteit*
2
2. De invloed van twee of meer draden op elkaar als functie van de onderlinge afstand.
 3. Een onderzoek naar de invloed van de viscositeit op de stofoverdracht, die tot uiting komt in de term $Sc^{0,33}$. Men dient dan met oplossingen van zeer hoge viscositeit te werken. Het zal wel moeilijk zijn om het redox - systeem homogeen op te lossen in een oplosmiddel van hoge viscositeit.

*labellen C_1 by lage viscositeit
altijd te haal
by grote C_2 viscositeit met vloe*

Literatuur.

1. P.H. Vogtländer, Afstudeer Verslag, afd. Physische Technologie, T.H. Delft. 1962.
2. P.H. Vogtländer en C.A.P. Bakker, Chem Eng Sci 1963
18 583.
3. H. Kramers, Physische Transportverschijnselen I, 1962.
4. Kreith, Roberts, Sullivan en Sinha, Int.J.of Heat and Mass Transf., 1963, 881.
5. B.C. Sakiadis, A.I.Ch.E.Journal 1961, 7 467.
6. J.J. van Rossum, Appl.Sc.Res., 1958, 7 121.
7. C.D. Hodgman, Handbook of Chemistry and Physics, 1963.
8. E.A. Kaldenhof, diss. T.H. Eindhoven 1963.

Lijst van Symbolen.

A	= electrode oppervlak	m^2
C_o	= ferri-ionen concentratie	$kmol/m^3$
D	= diameter van het meetvat	m
	= diffusiecoëfficiënt	m^2/s
E	= electrode potentiaal t.o.v. de nikkelen referentieelectrode in dezelfde oplossing	V
F	= constante van Faraday = $96,5 \cdot 10^6$	Coul/kmol
I_{verz}	= verzadigingsstroom	A
T	= temperatuur	$^{\circ}C$
a	= temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m^2/s
d	= draaddiameter	m
g	= versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
h	= badhoogte	m
k	= stofoverdrachtscoëfficiënt	m/s
k_r	= reactiesnelheidsconstante	m/s
n	= waardigheid	-
v	= draadsnelheid	m/s
Φ_m	= filmmassastroom	kg/m
η	= dynamische viscositeit	kg/ms
ν	= kinematische viscositeit	m^2/s
ϵ	= filmdikte	m
ρ	= dichtheid	kg/m^3
σ	= oppervlaktespanning	N/m

Meetvat I D = 19,0 cm

h = 8 cm

$C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 22,2 °C

$\nu = 1,050 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,738 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,42 \cdot 10^3$

Tabel 1.

v m/min	I_{verz} A	$Re^{0,5}$	Sh	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$	c_2
	* $1,14 \cdot 10^3$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	
2	11,7	0,504	1,80	1,45	2,87
4	16,4	0,713	2,53	2,09	2,93
6	19,2	0,873	2,96	2,48	2,84
8	22,0	1,01	3,39	2,86	2,84
10	24,3	1,13	3,74	3,17	2,82
12	26,6	1,23	4,10	3,49	2,83
15	29,4	1,38	4,53	3,87	2,81
18	31,8	1,51	4,90	4,20	2,78
20	33,7	1,59	5,19	4,46	2,86
25	37,9	1,78	5,84	5,03	2,82
30	41,9	1,95	6,46	5,49	2,81
35	45,4	2,11	7,00	5,97	2,83
40	48,5	2,26	7,47	6,39	2,83
50	53,8	2,52	8,29	7,22	2,86
60	58,8	2,76	9,06	7,90	2,86
70	63,2	2,98	9,78	8,41	2,85
80	67,5	3,19	10,4	9,10	2,85
90	71,7	3,38	11,0	9,67	2,86
100	75,1	3,56	11,6	10,1	2,84
110	78,5	3,74	12,1	10,6	2,84
120	82,1	3,90	12,6	11,1	2,84

* 1,14 = correctiefactor van de weerstandijking.

C₂ const

2.

Meetvat I $D = 19,0 \text{ cm}$ $h = 12 \text{ cm}$ $C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$ $T^0 = 22,0 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1,137 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $D = 0,735 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ $Sc = 1,44 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	15,3	0,616	2,37	1,87	3,04
4	20,7	0,871	3,20	2,61	3,00
6	24,7	1,07	3,82	3,16	2,96
8	27,6	1,23	4,27	3,56	2,89
10	30,8	1,38	4,77	4,00	2,90
12	33,2	1,51	5,14	4,35	2,89
15	36,6	1,69	5,67	4,80	2,84
18	39,7	1,85	6,15	5,22	2,83
20	42,0	1,95	6,50	5,53	2,84
25	46,8	2,18	7,24	6,19	2,84
30	50,9	2,38	7,88	6,75	2,83
35	55,7	2,58	8,62	7,41	2,88
40	59,6	2,75	9,23	7,95	2,89
50	66,0	3,08	10,2	8,83	2,87
60	72,0	3,37	11,1	9,65	2,86
70	77,8	3,64	12,0	10,4	2,87
80	83,0	3,89	12,8	11,2	2,87
90	87,8	4,13	13,6	11,8	2,86
100	92,3	4,35	14,3	12,4	2,86
110	96,6	4,56	15,0	13,0	2,85
120	101,1	4,77	15,6	13,6	2,86

 $c_2 = \text{const}$

Meetvat I $D = 19,0 \text{ cm}$ $h = 16 \text{ cm}$ $C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$ $T = 21,9 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1,514 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $D = 0,733 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ $Sh = 1,44 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	17,8	0,710	2,76	2,14	3,01
4	24,2	1,00	3,75	3,02	3,00
6	28,4	1,23	4,40	3,59	2,92
8	32,5	1,42	5,04	4,15	2,92
10	35,9	1,59	5,57	4,62	2,91
12	38,8	1,74	6,02	5,02	2,88
15	42,8	1,94	6,64	5,57	2,86
18	46,8	2,13	7,17	6,04	2,83
20	49,0	2,25	7,60	6,42	2,86
25	53,9	2,51	8,36	7,09	2,82
30	60,0	2,75	9,31	7,93	2,88
35	65,0	2,97	10,1	8,62	2,90
40	69,3	3,18	10,8	9,20	2,90
50	77,0	3,55	11,9	10,3	2,89
60	84,0	4,02	13,0	11,2	2,79
70	90,4	4,20	14,0	12,1	2,88
80	96,1	4,49	14,9	12,9	2,87
90	102,7	4,76	15,9	13,8	2,89
100	108,3	5,02	16,8	14,6	2,90
110	113,6	5,27	17,6	15,3	2,90
120	118,0	5,50	18,3	15,9	2,89

 $c_2 = \text{const}$

Meetvat I D = 19,0 cm
 h = 20 cm
 $C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2}$ kmol/m³
 T = 22,3 °C

$\nu = 1,048 \cdot 10^{-6}$ m²/s
 $D = 0,740 \cdot 10^{-9}$ m²/s
 $Sc = 1,42 \cdot 10^3$

v m/min	I _{verz} A 1,14 · 10 ³	Re ^{0,5} 10 ⁻²	Sh 10 ⁻³	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10 ⁻²	c ₂
2	20,6	0,798	3,16	2,44	3,05
4	28,1	1,13	4,32	3,46	3,07
6	32,6	1,38	5,01	4,08	2,95
8	37,1	1,60	5,70	4,70	2,94
10	40,0	1,78	6,14	5,09	2,85
12	44,1	1,95	6,77	5,65	2,89
15	49,0	2,18	7,53	6,32	2,90
18	52,2	2,39	8,02	6,76	2,83
20	55,9	2,52	8,59	7,27	2,88
25	62,2	2,82	9,56	8,13	2,88
30	68,2	3,09	10,5	8,95	2,90
35	72,9	3,34	11,2	9,60	2,88
40	77,3	3,57	11,9	10,2	2,86
50	86,4	3,99	13,3	11,4	2,87
60	94,5	4,37	14,5	12,6	2,87
70	101,8	4,76	15,6	13,6	2,85
80	108,5	5,04	16,7	14,5	2,87
90	114,6	5,35	17,6	15,3	2,86
100	120,6	5,64	18,5	16,1	2,86
110	126,2	5,92	19,4	16,9	2,86
120	132,5	6,18	20,3	17,7	2,87

Sc = const.

Meetvat I $D = 19,0 \text{ cm}$ $h = 24 \text{ cm}$ $C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$ $T = 22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1,048 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $D = 0,740 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ $Sc = 1,42 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	22,7	0,874	3,49	2,65	3,03
4	29,9	1,24	4,59	3,63	2,94
6	35,4	1,51	5,44	4,39	2,90
8	40,0	1,75	6,14	5,02	2,87
10	44,7	1,95	6,87	5,66	2,90
12	48,6	2,14	7,46	6,19	2,89
15	53,4	2,39	8,20	6,85	2,86
18	58,2	2,62	8,94	7,51	2,86
20	61,1	2,76	9,39	7,91	2,86
25	68,1	3,09	10,5	8,86	2,87
30	74,3	3,38	11,4	9,71	2,87
35	80,2	3,66	12,3	10,5	2,88
40	85,5	3,91	13,1	11,2	2,88
50	94,5	4,37	14,5	12,5	2,86
60	103,7	4,78	15,9	13,7	2,87
70	110,8	5,17	17,0	14,7	2,84
80	117,8	5,53	18,1	15,7	2,84
90	124,3	5,86	19,1	16,6	2,83
100	131,1	6,18	20,1	17,5	2,83
110	137,4	6,48	21,1	18,4	2,83
120	143,6	6,77	22,1	19,2	2,84

 $c_2 \text{ constant}$

Meetvat I D = 19,0 cm
 h = 32 cm
 $C_0 = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$
 T = 22,4 °C
 $\nu = 1,046 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $D = 0,742 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
 $Sc = 1,41 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh - 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	25,6	1,01	3,92	2,89	2,86
4	34,9	1,43	5,35	4,16	2,91
6	40,2	1,75	6,16	4,88	2,79
8	46,8	2,02	7,17	5,78	2,86
10	51,8	2,26	7,94	6,47	2,86
12	56,0	2,47	8,58	7,04	2,85
15	62,3	2,77	9,54	7,90	2,86
18	67,6	3,03	10,4	8,63	2,85
20	71,1	3,19	10,9	9,10	2,85
25	78,6	3,57	12,0	10,1	2,84
30	85,2	3,91	13,1	11,0	2,82
35	92,4	4,22	14,2	12,0	2,84
40	98,0	4,52	15,0	12,8	2,83
50	107,7	5,05	16,5	14,1	2,79
60	117,3	5,53	18,0	15,4	2,79
70	126,7	5,97	19,4	16,7	2,80
80	133,9	6,39	20,6	17,7	2,77
90	140,4	6,77	21,6	18,6	2,74
100	148,6	7,14	22,8	19,7	2,76
110	155,3	7,49	23,8	20,6	2,75
120	163,4	7,82	25,0	21,7	2,78

constant

Meetvat I D = 19,0 cm

h = 40 cm

$C_0 = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 19,3 °C

$\nu = 1,124 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,682 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,64 \cdot 10^3$

7.

\bar{v} m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	27,1	1,13	4,31	2,90	2,56
4	36,7	1,54	5,84	4,20	2,73
6	44,9	1,89	7,15	5,30	2,81
8	51,0	2,18	8,12	6,13	2,81
10	56,6	2,44	9,01	6,88	2,83
12	61,4	2,67	9,78	7,53	2,82
15	68,2	2,98	10,9	8,45	2,83
18	74,4	3,27	11,8	9,28	2,84
20	78,8	3,44	12,5	9,88	2,87
25	85,8	3,85	13,7	10,8	2,81
30	94,6	4,34	15,1	12,0	2,77
35	102,6	4,56	16,3	13,1	2,87
40	110,2	4,87	17,5	14,1	2,90
50	125,4	5,44	20,0	16,2	2,97
60	137,3	5,96	21,9	17,8	2,98
70	148,0	6,44	23,6	19,2	2,98
80	157,7	6,89	25,1	20,5	2,98
90	169,6	7,31	27,0	22,1	3,03
100	179,3	7,70	28,5	23,4	3,04
110	189,4	8,08	30,2	24,8	3,07
120	197,2	8,44	31,4	25,9	3,06

c_2 Meetvat

Meetvat I D = 19,0 cm

h = 48 cm

$C_0 = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T = 17,9 \text{ }^\circ\text{C}$

$\nu = 1,167 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,656 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,77 \cdot 10^3$

8.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	30,3	1,18	5,01	3,22	2,73
4	40,7	1,66	6,74	4,65	2,81
6	49,1	2,03	8,12	5,80	2,86
8	55,9	2,34	9,25	6,73	2,87
10	61,1	2,62	10,1	7,42	2,83
12	67,6	2,87	11,2	8,33	2,90
15	74,7	3,21	12,4	9,30	2,90
18	81,2	3,51	13,4	10,2	2,90
20	85,0	3,70	14,1	10,7	2,89
25	95,2	4,14	15,8	12,1	2,92
30	106,6	4,54	17,6	13,7	3,01
35	113,9	4,90	18,8	14,7	2,99
40	121,9	5,24	20,2	15,8	3,01
50	138,6	5,85	22,9	18,0	3,08
60	152,7	6,41	25,3	20,0	3,11
70	167,6	6,93	27,7	22,0	3,18
80	180,1	7,40	29,8	23,7	3,20
90	191,4	7,85	31,7	25,3	3,22
100	202,1	8,06	33,4	26,7	3,32
110	214,2	8,68	35,4	28,4	3,27
120	225,1	9,07	37,2	29,9	3,29

mvb. c₂

9.

Meetvat I D = 19,0 cm

h = 64 cm

$C_0 = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 17,0 °C

$\nu = 1,194 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,639 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,87 \cdot 10^3$

v m/min	I _{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	Re ^{0,5} 10^{-2}	Sh. 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c ₂
2	35,4	1,33	6,02	3,65	2,74
4	47,5	1,88	8,07	5,32	2,82
6	56,9	2,31	9,67	6,61	2,87
8	65,1	2,66	11,1	7,74	2,91
10	71,8	2,98	12,2	8,67	2,91
12	77,8	3,26	13,2	9,50	2,91
15	85,8	3,65	14,6	10,6	2,91
18	93,5	3,99	15,9	11,7	2,92
20	99,4	4,21	16,9	12,5	2,96
25	110,3	4,71	18,7	14,0	2,97
30	121,9	5,16	20,7	15,6	3,02
35	132,7	5,57	22,5	17,1	3,06
40	143,3	5,95	24,4	18,5	3,07
50	165,8	6,66	28,2	21,2	3,19
60	183,0	7,29	31,1	24,0	3,29
70	200,7	7,88	34,1	26,4	3,36
80	212,5	8,42	36,1	28,1	3,33
90	227,5	8,93	38,7	30,1	3,37
100	242,1	9,41	41,1	32,2	3,42
110	254,9	9,87	43,3	33,9	3,44
120	268,6	10,3	45,6	35,8	3,47

c₂ verspreiden met v

Meetvat II D= 9,2 cm

h = 2 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 16,8 °C

$\nu = 1,199 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,635 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,89 \cdot 10^3$

10.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	6,0	0,236	1,09	0,840	3,56
4	8,0	0,334	1,45	1,13	3,40
6	9,4	0,408	1,71	1,34	3,53
8	10,6	0,472	1,92	1,52	3,21
10	11,8	0,527	2,14	1,69	3,21
12	12,8	0,578	2,32	1,84	3,18
15	14,3	0,646	2,60	2,06	3,19
18	15,3	0,707	2,78	2,20	3,12
20	16,2	0,746	2,94	2,34	3,13
25	18,0	0,834	3,27	2,60	3,12
30	19,4	0,913	3,52	2,81	3,07
35	20,9	0,981	3,80	3,03	3,08
40	22,6	1,05	4,10	3,28	3,11
50	24,6	1,18	4,47	3,57	3,04
60	26,7	1,29	4,85	3,88	3,00
70	28,9	1,39	5,25	4,20	3,03
80	30,8	1,49	5,59	4,48	3,00
90	33,0	1,58	5,99	4,80	3,07
100	34,4	1,67	6,25	5,01	3,00
110	35,5	1,75	6,45	5,17	2,96
120	37,2	1,83	6,76	5,42	2,97

Meetvat II $D = 9,2 \text{ cm}$

$h = 4 \text{ cm}$

11.

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T_0 = 16,9 \text{ }^\circ\text{C}$

$\nu = 1,196 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,637 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,88 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	8,8	0,334	1,59	1,21	3,62
4	11,6	0,472	2,10	1,62	3,43
6	14,0	0,578	2,53	1,97	3,41
8	15,7	0,668	2,84	2,22	3,33
10	17,5	0,746	3,17	2,48	3,32
12	18,9	0,818	3,42	2,69	3,29
15	20,9	0,914	3,78	2,98	3,26
18	22,7	1,00	4,11	3,25	3,25
20	23,9	1,06	4,33	3,42	3,25
25	26,7	1,18	4,83	3,84	3,25
30	29,2	1,29	5,28	4,20	3,25
35	31,8	1,40	5,76	4,58	3,28
40	34,1	1,49	6,17	4,92	3,30
50	37,8	1,67	6,84	5,46	3,27
60	40,9	1,83	7,40	5,92	3,24
70	43,9	1,98	7,95	6,36	3,22
80	46,7	2,11	8,45	6,77	3,21
90	49,7	2,24	9,00	7,21	3,22
100	52,1	2,36	9,43	7,56	3,20
110	54,5	2,48	9,86	7,91	3,20
120	57,0	2,58	10,3	8,28	3,20

Erasmus

Meetvat II $D = 9,2 \text{ cm}$

$h = 8 \text{ cm}$

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T = 17,3 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1,184 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,645 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,83 \cdot 10^3$

12.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	12,0	0,475	2,14	1,59	3,35
4	16,2	0,671	2,90	2,20	3,28
6	19,3	0,822	3,45	2,66	3,23
8	21,9	0,944	3,91	3,04	3,22
10	24,5	1,11	4,38	3,42	3,09
12	26,5	1,16	4,74	3,71	3,19
15	29,5	1,30	5,27	4,17	3,19
18	32,0	1,34	5,72	4,51	3,36
20	34,0	1,50	6,08	4,80	3,20
25	37,7	1,68	6,74	5,34	3,19
30	41,3	1,84	7,38	5,87	3,19
35	44,9	1,98	8,02	6,40	3,22
40	48,4	2,12	8,65	6,91	3,25
50	53,6	2,37	9,58	7,67	3,23
60	58,5	2,60	10,5	8,38	3,23
70	63,0	2,81	11,3	9,04	3,22
80	66,8	3,00	11,9	9,60	3,20
90	70,9	3,18	12,7	10,2	3,20
100	74,8	3,36	13,4	10,8	3,21
110	78,2	3,52	14,0	11,3	3,20
120	81,1	3,68	14,5	11,7	3,18

c₂ - cont

Meetvat II $D = 9,2 \text{ cm}$

$h = 12 \text{ cm}$

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T = 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$\nu = 1,191 \cdot 10^{-6}$

$D = 0,641 \cdot 10^{-9}$

$Sc = 1,86 \cdot 10^3$

13.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	15,2	0,572	2,73	1,98	3,50
4	20,3	0,820	3,65	2,72	3,32
6	24,2	1,00	4,35	3,29	3,29
8	27,4	1,16	4,93	3,76	3,25
10	30,4	1,30	5,47	4,20	3,24
12	33,3	1,42	5,99	4,62	3,26
15	36,7	1,59	6,60	5,12	3,23
18	39,8	1,74	7,16	5,57	3,21
20	42,1	1,83	7,57	5,91	3,23
25	47,0	2,05	8,45	6,63	3,23
30	51,4	2,24	9,24	7,27	3,24
35	55,8	2,42	10,0	7,92	3,27
40	60,2	2,59	10,8	8,56	3,30
50	66,8	2,90	12,0	9,52	3,29
60	72,7	3,17	13,1	10,4	3,27
70	77,6	3,43	14,0	11,1	3,24
80	82,7	3,66	14,9	11,8	3,23
90	88,1	3,89	15,8	12,6	3,25
100	92,5	4,10	16,6	13,3	3,24
110	97,7	4,30	17,6	14,0	3,27
120	103,7	4,49	18,6	14,9	3,32

c₁ = 0

Meetvat II D = 9,2 cm

14.

h = 16 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2}$ kmol/m³

T = 16,9 °C

$\nu = 1,196 \cdot 10^{-6}$ m²/s

$D = 0,637 \cdot 10^{-9}$ m²/s

Sc = 1,88 · 10³

v m/min	I _{verz} A. 1,14 · 10 ³	Re ^{0,5} 10 ⁻²	Sh 10 ⁻³	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10 ⁻²	c ₂
2	16,6	0,668	3,00	2,17	3,25
4	22,3	0,944	4,04	3,03	3,21
6	26,9	1,16	4,87	3,73	3,22
8	31,0	1,34	5,61	4,35	3,25
10	34,3	1,49	6,21	4,85	3,25
12	38,0	1,64	6,88	5,41	3,30
15	42,0	1,83	7,60	6,01	3,29
18	46,4	2,00	8,40	6,68	3,34
20	48,9	2,11	8,85	7,06	3,34
25	54,6	2,36	9,88	7,92	3,35
30	59,7	2,62	10,8	8,69	3,31
35	64,9	2,79	11,7	9,48	3,39
40	69,6	2,99	12,6	10,2	3,41
50	77,5	3,34	14,0	11,4	3,41
60	84,4	3,71	15,3	12,4	3,35
70	90,6	4,08	16,4	13,4	3,28
80	97,1	4,22	17,6	14,3	3,40
90	103,1	4,48	18,7	15,3	3,40
100	108,7	4,72	19,7	16,1	3,41
110	113,8	4,99	20,6	16,9	3,38
120	119,3	5,25	21,6	17,7	3,37

G₂ correct

Meetvat II $D = 9,2 \text{ cm}$

$h = 20 \text{ cm}$

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T = 18,7 \text{ }^\circ\text{C}$

$\nu = 1,142 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,671 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,70 \cdot 10^3$

15.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	20,2	0,764	3,47	2,50	3,27
4	26,4	1,08	4,54	3,39	3,14
6	31,8	1,32	5,46	4,17	3,15
8	36,0	1,53	6,18	4,77	3,12
10	40,0	1,71	6,87	5,34	3,13
12	43,6	1,87	7,49	5,86	3,13
15	48,1	2,09	8,26	6,51	3,11
18	52,2	2,29	8,97	7,10	3,10
20	55,3	2,44	9,50	7,54	3,09
25	62,1	2,70	10,7	8,52	3,15
30	68,3	2,96	11,7	9,41	3,18
35	73,9	3,21	12,7	10,2	3,18
40	78,9	3,45	13,6	10,9	3,17
50	88,3	3,82	15,2	12,3	3,21
60	96,5	4,18	16,6	13,5	3,22
70	103,9	4,54	17,8	14,5	3,20
80	110,4	4,87	18,7	15,2	3,13
90	117,2	5,14	20,1	16,4	3,19
100	124,3	5,40	21,4	17,4	3,23
110	131,4	5,67	22,6	18,5	3,26
120	137,1	5,92	23,6	19,3	3,26

$c_2 = \text{const}$

Meetvat II D = 9,2 cm

16.

h = 24 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 18,6 °C

$\nu = 1,145 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,669 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,71 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	22,2	0,836	3,83	2,72	3,25
4	29,4	1,18	5,07	3,75	3,17
6	35,5	1,45	6,12	4,63	3,20
8	39,9	1,67	6,88	5,26	3,15
10	44,2	1,87	7,62	5,88	3,15
12	48,2	2,05	8,31	6,46	3,16
15	53,2	2,29	9,17	7,18	3,14
18	58,1	2,51	10,0	7,89	3,14
20	61,5	2,65	10,6	8,38	3,16
25	68,3	2,96	11,8	9,36	3,17
30	75,4	3,24	13,0	10,4	3,21
35	81,6	3,50	14,1	11,3	3,22
40	87,2	3,74	15,0	12,1	3,23
50	98,5	4,18	17,0	13,7	3,28
60	107,7	4,58	18,6	15,0	3,28
70	115,8	4,94	20,0	16,2	3,28
80	123,3	5,29	21,1	17,3	3,27
90	130,5	5,61	22,5	18,3	3,27
100	137,4	5,91	23,7	19,3	3,27
110	146,0	6,20	25,2	20,6	3,32
120	152,8	6,47	26,3	21,5	3,33

Copied

Meetvat II D = 9,2 cm

h = 32 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 18,8 °C

$\nu = 1,138 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,673 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Sc = $1,69 \cdot 10^3$

17.

v m/min	I_{verz} Λ $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	26,1	0,968	4,47	3,10	3,20
4	34,3	1,37	5,88	4,27	3,12
6	40,5	1,68	6,94	5,16	3,08
8	46,8	1,94	8,02	6,06	3,13
10	51,0	2,16	8,74	6,66	3,08
12	56,1	2,37	9,61	7,39	3,12
15	62,1	2,65	10,6	8,25	3,11
18	67,7	2,90	11,6	9,06	3,12
20	71,7	3,06	12,3	9,63	3,14
25	80,2	3,42	13,7	10,8	3,17
30	87,7	3,75	15,0	11,9	3,18
35	96,9	4,05	16,6	13,2	3,27
40	103,3	4,33	17,7	14,2	3,27
50	116,0	4,84	19,9	16,0	3,30
60	126,9	5,30	21,7	17,5	3,31
70	136,9	5,73	23,5	19,0	3,31
80	145,6	6,12	24,9	20,2	3,30
90	154,9	6,50	26,5	21,5	3,32
100	163,4	6,85	27,8	22,8	3,32
110	172,3	7,18	29,5	24,0	3,35
120	181,3	7,50	31,1	25,3	3,38

Handwritten signature

Meetvat II D = 9,2 cm

18.

h = 40 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 18,8 °C

$\nu = 1,138 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,673 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,69 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2'
2	28,5	1,08	4,88	3,28	3,03
4	38,4	1,53	6,58	4,70	3,07
6	45,3	1,88	7,76	5,69	3,03
8	51,5	2,16	8,82	6,58	3,13
10	57,3	2,42	9,82	7,41	3,06
12	63,0	2,65	10,8	8,22	3,10
15	69,9	2,96	12,0	9,21	3,11
18	76,1	3,25	13,0	10,1	3,11
20	80,7	3,42	13,8	10,8	3,14
25	90,6	3,83	15,5	12,2	3,18
30	99,9	4,19	17,1	13,5	3,22
35	108,1	4,53	18,5	14,7	3,25
40	116,1	4,84	19,9	15,8	3,27
50	132,3	5,41	22,7	18,2	3,35
60	146,8	5,93	25,2	20,2	3,41
70	157,0	6,40	26,9	21,7	3,39
80	167,8	6,85	28,7	23,2	3,41
90	177,6	7,26	30,4	24,6	3,39
100	188,3	7,66	32,3	26,2	3,42
110	202,0	8,03	34,6	28,2	3,51
120	211,8	8,38	36,3	29,5	3,52

G. Menthe

Meetvat II D = 9,2 cm

h = 48 cm

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

T = 17,9 °C

$\nu = 1,167 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,656 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$Sc = 1,77 \cdot 10^3$

19.

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	29,8	1,18	5,24	3,35	2,84
4	40,8	1,66	7,17	5,35	3,23
6	48,9	2,03	8,59	6,13	3,02
8	55,5	2,34	9,75	7,08	3,03
10	62,4	2,62	11,0	8,09	3,09
12	68,1	2,87	12,0	8,92	3,11
15	75,9	3,21	13,3	10,0	3,13
18	83,0	3,51	14,6	11,1	3,15
20	89,0	3,70	15,6	12,0	3,23
25	99,9	4,14	17,6	13,5	3,27
30	110,7	4,54	19,5	15,1	3,33
35	121,5	4,90	21,4	16,7	3,40
40	131,4	5,24	23,1	18,1	3,46
50	149,7	5,85	26,3	20,8	3,55
60	168,4	6,41	29,6	23,5	3,66
70	181,0	6,93	31,8	25,3	3,66
80	193,3	7,40	34,0	27,1	3,66
90	202,7	7,84	35,6	28,5	3,63
100	215,6	8,06	37,9	30,3	3,76
110	227,9	8,68	40,1	32,1	3,70
120	239,0	9,07	42,0	33,7	3,72

C₁ waarde

Meetvat II. $D = 9,2 \text{ cm}$

20.

$h = 64 \text{ cm}$

$C_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$

$T = 17,6 \text{ }^\circ\text{C}$

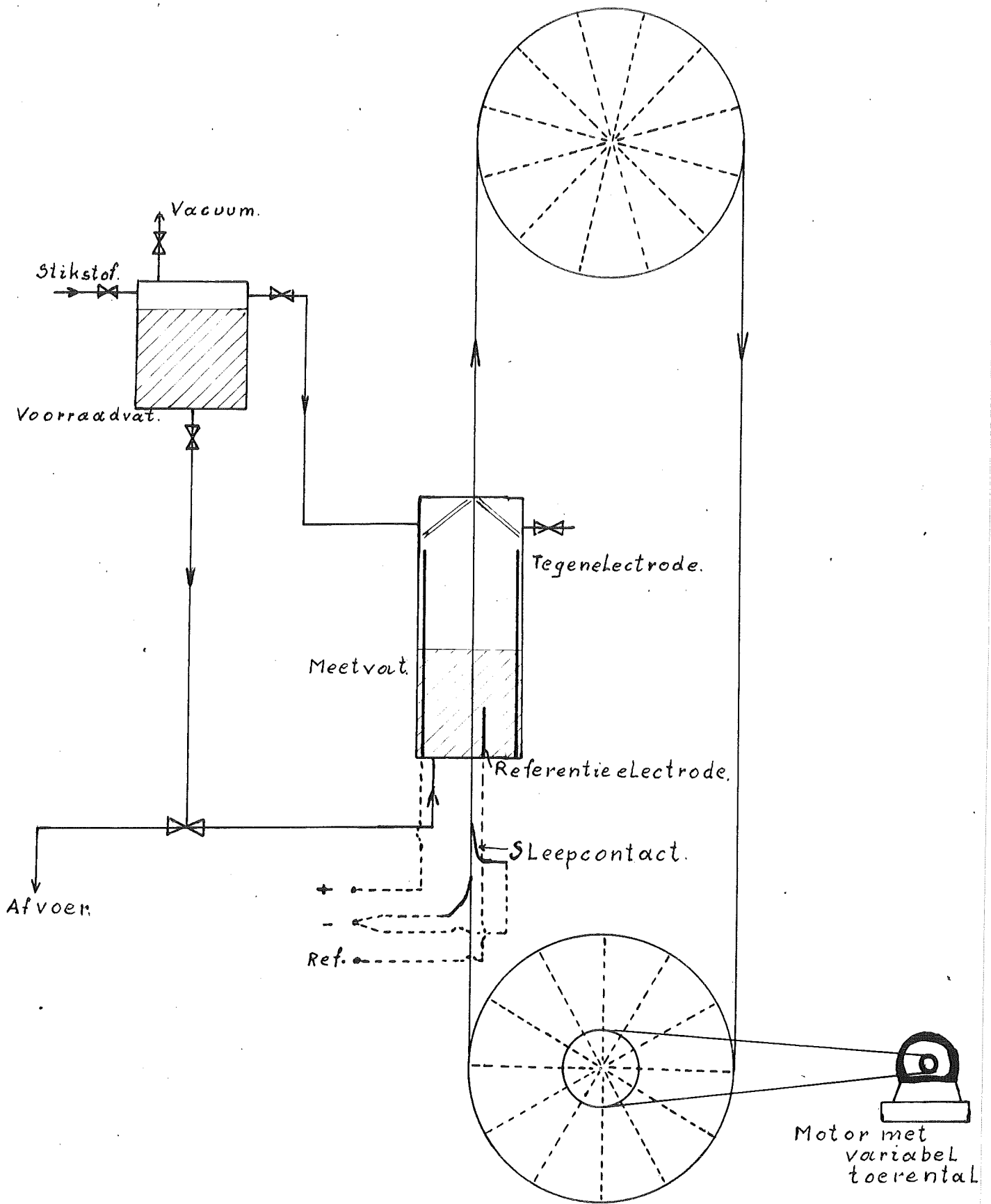
$\nu = 1,177 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 0,651 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

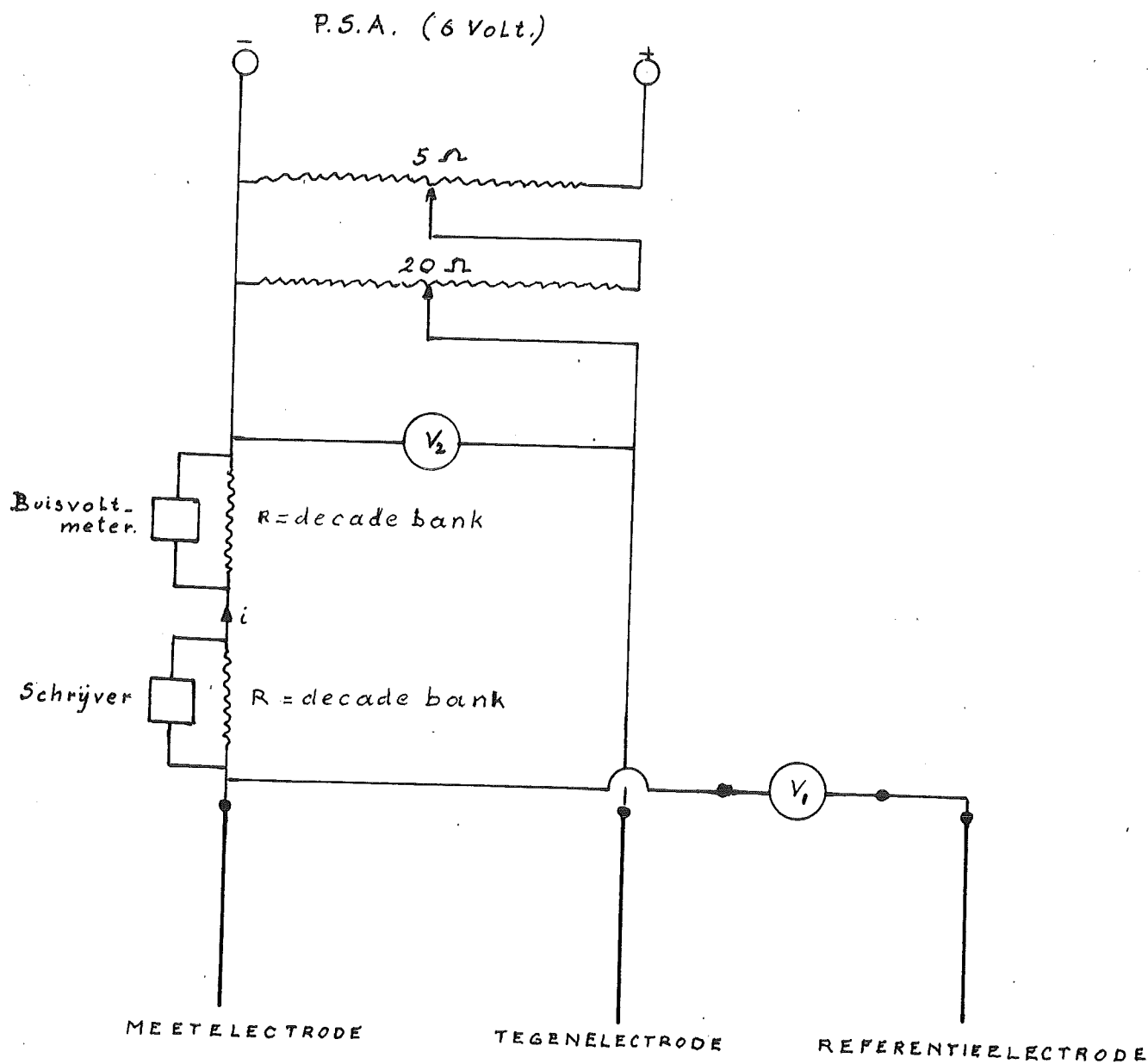
$Sc = 1,80 \cdot 10^3$

v m/min	I_{verz} A $1,14 \cdot 10^3$	$Re^{0,5}$ 10^{-2}	Sh 10^{-3}	$\frac{Sh - c_1}{Sc^{0,33}}$ 10^{-2}	c_2
2	37,7	1,35	6,68	4,19	3,11
4	48,6	1,90	8,61	5,77	3,03
6	58,0	2,33	10,3	7,14	3,06
8	65,6	2,69	11,6	8,25	3,06
10	72,2	3,01	12,8	9,21	3,06
12	79,3	3,30	14,0	10,2	3,11
15	88,0	3,69	15,6	11,5	3,12
18	97,0	4,04	17,2	12,8	3,17
20	103,0	4,26	18,2	13,7	3,22
25	116,5	4,76	20,6	15,7	3,29
30	129,0	5,21	22,8	17,5	3,35
35	142,3	5,63	25,2	19,4	3,45
40	157,9	6,02	28,0	21,7	3,60
50	178,1	6,73	31,5	24,6	3,66
60	196,1	7,37	34,7	27,3	3,71
70	213,4	7,96	37,8	29,8	3,74
80	227,7	8,46	40,3	31,9	3,77
90	243,4	9,03	43,1	34,1	3,78
100	258,7	9,52	45,8	36,4	3,82
110	271,8	9,98	48,1	38,3	3,83
120	283,8	10,4	50,3	40,0	3,84

Quantities

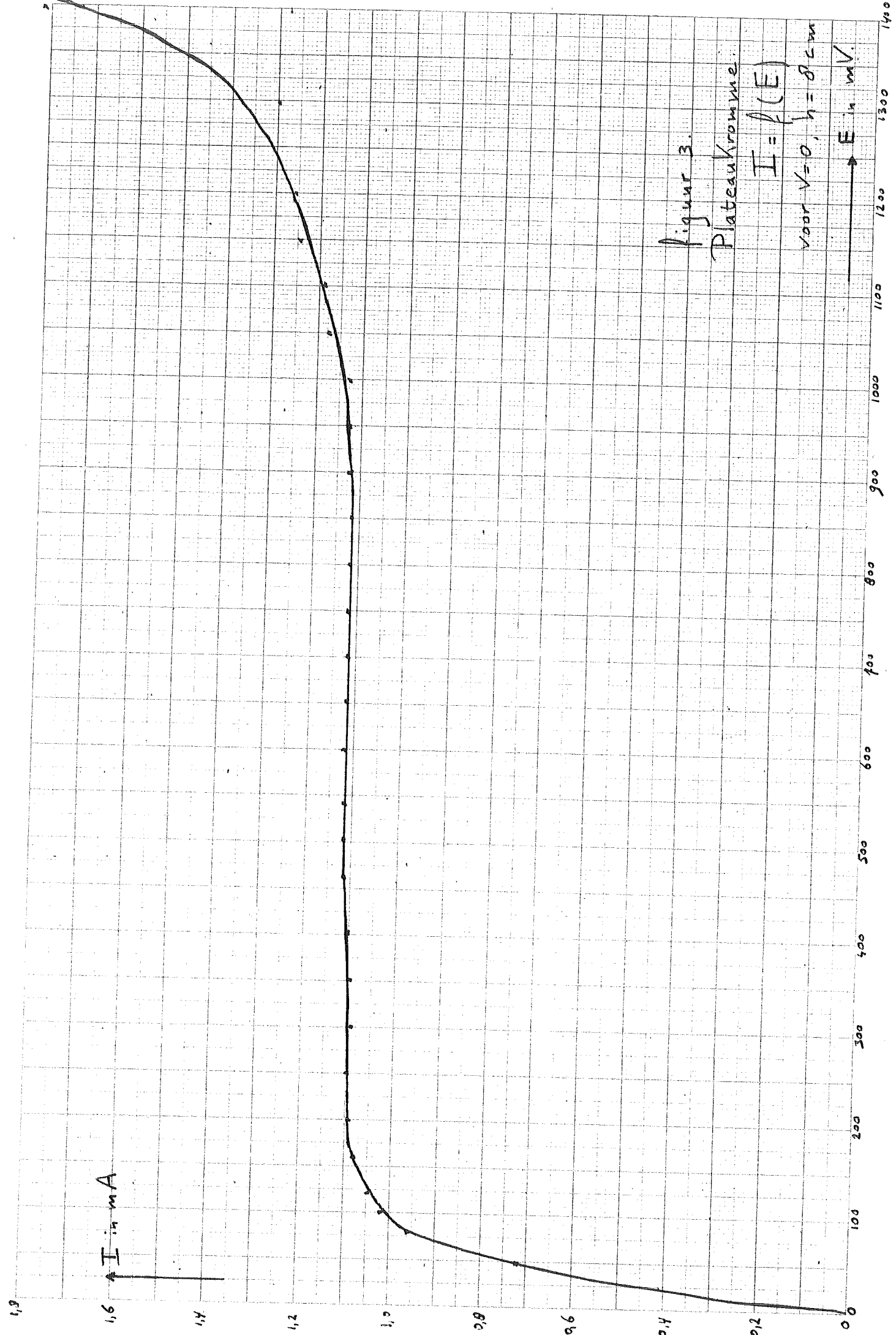


figuur 1.
 DE OPSTELLING.



HET ELECTRONISCHE GEDEELTE VAN DE APPARATUUR.

figuur 2.



Figuur 3.

Plateaukromme.

$$I = f(E)$$

voor $V=0$, $h=8 \text{ cm}$

E in mV.

I in mA

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

100

200

300

400

500

600

700

800

900

1000

1100

1200

1300

1400

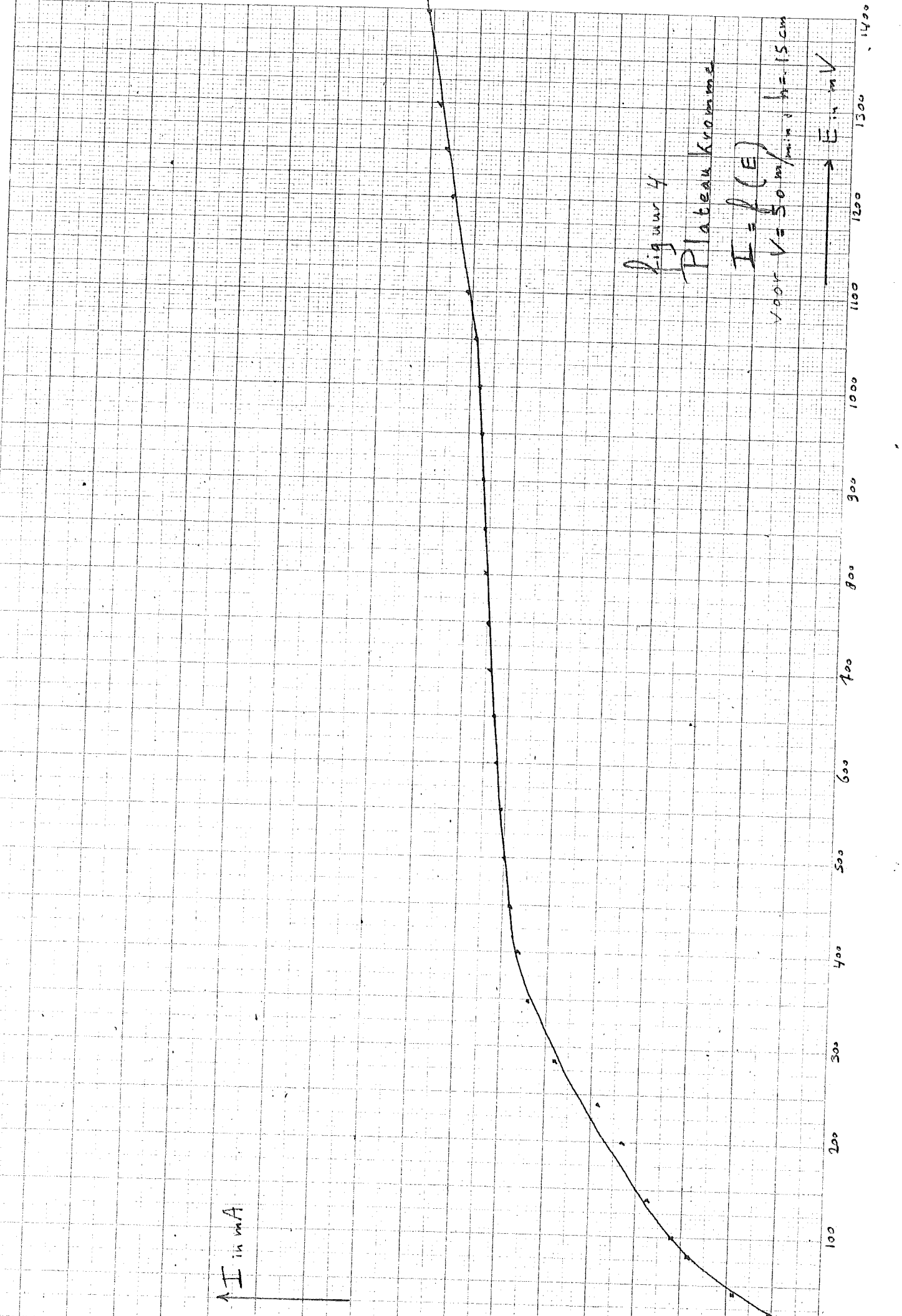
E in mV

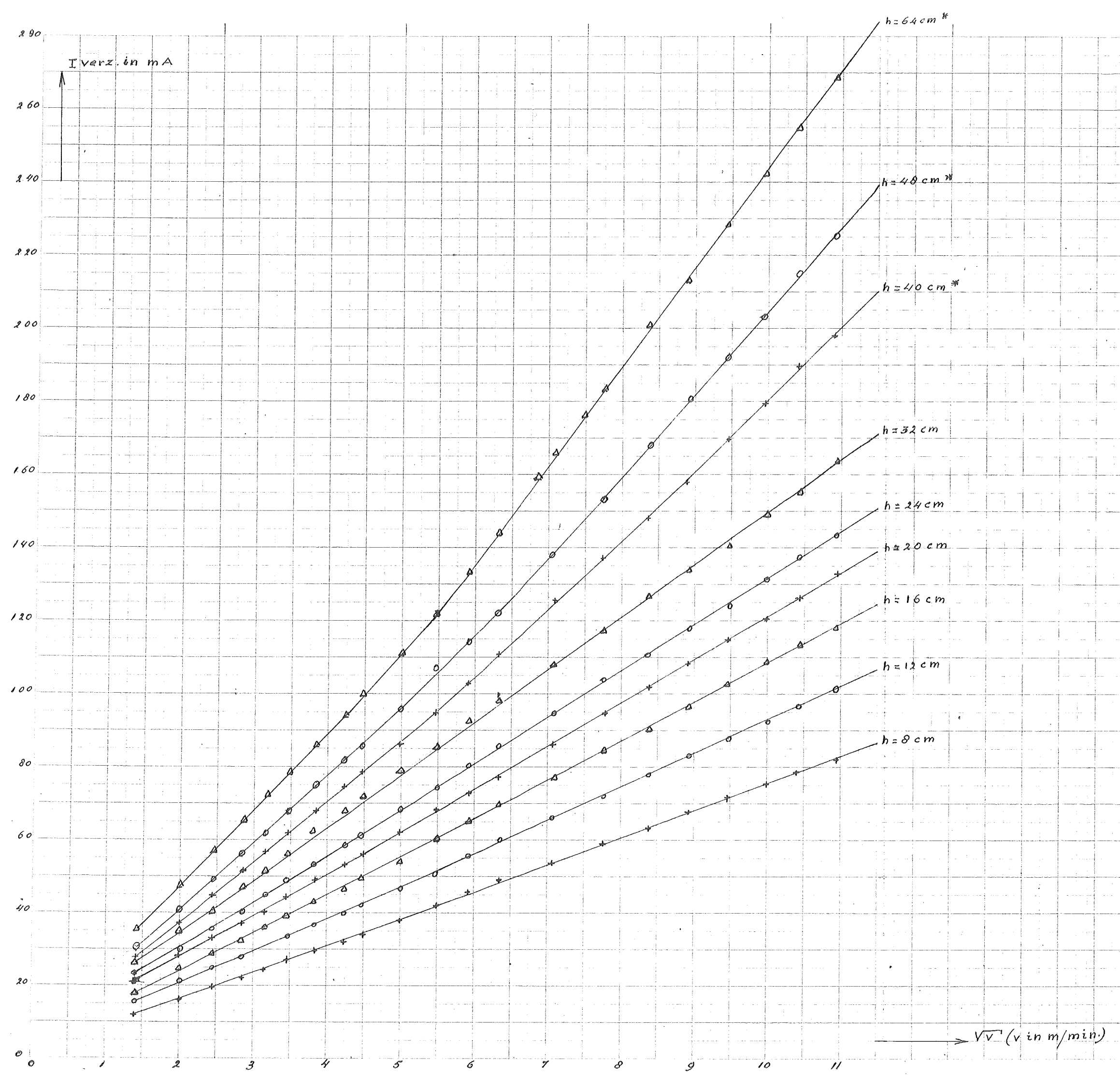
Figuur 4

Plateau Kromme

$$I = f(E)$$

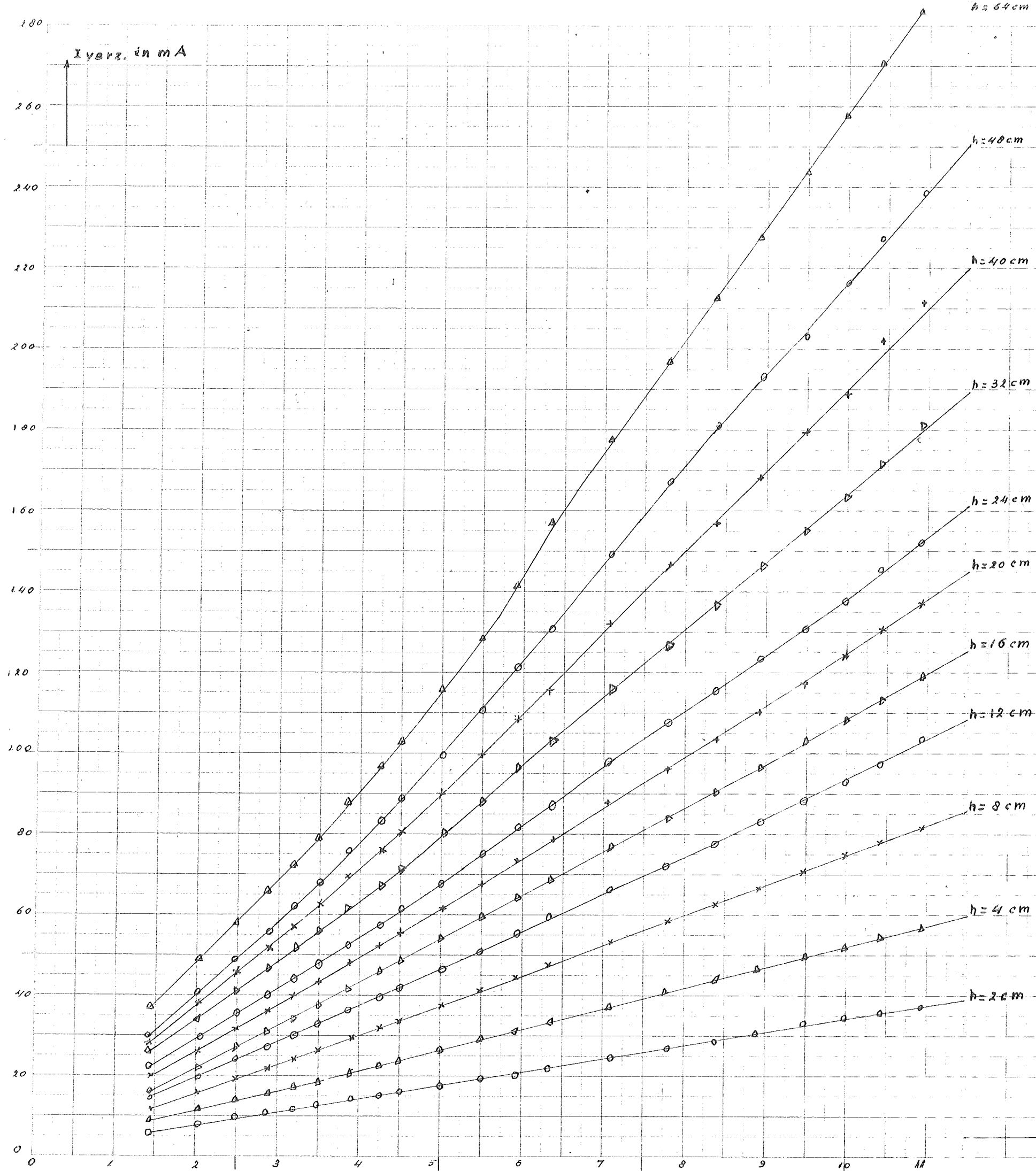
voor $V = 50 \text{ mV/min}$ $h = 15 \text{ cm}$





figuur 5

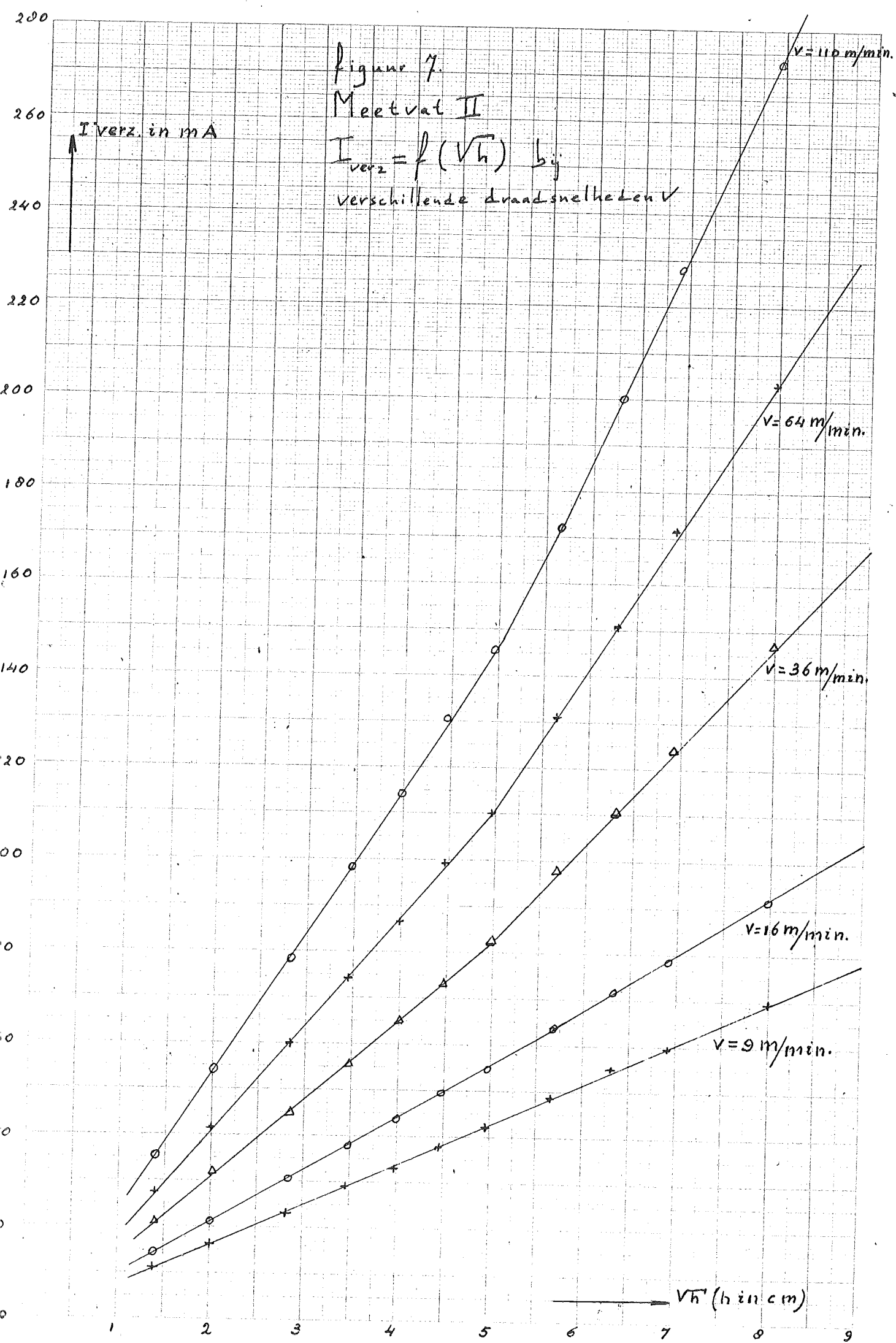
Meetvat I
 diameter 19,0 cm
 hoogte 75 cm
 $I_{verz.} = f(\sqrt{v})$ voor
 verschillende
 badhoogten.
 *afwijkende ferrisieveel aans.

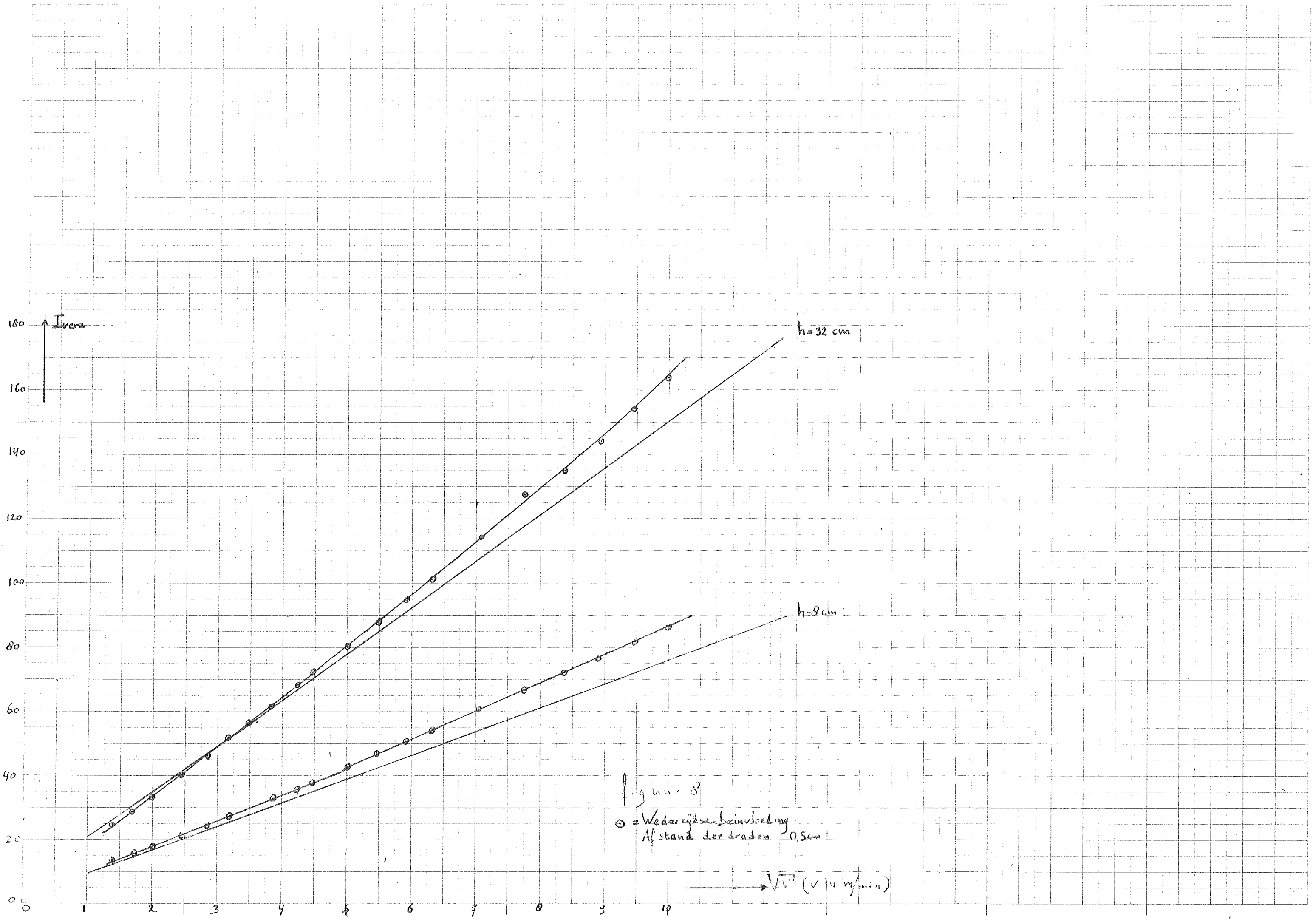


figuur 6.

Meetvat II
 diameter 9,2 cm
 hoogte 75 cm
 $I_{verz} = f(\sqrt{v})$ voor
 Verschillende
 badhoogten.

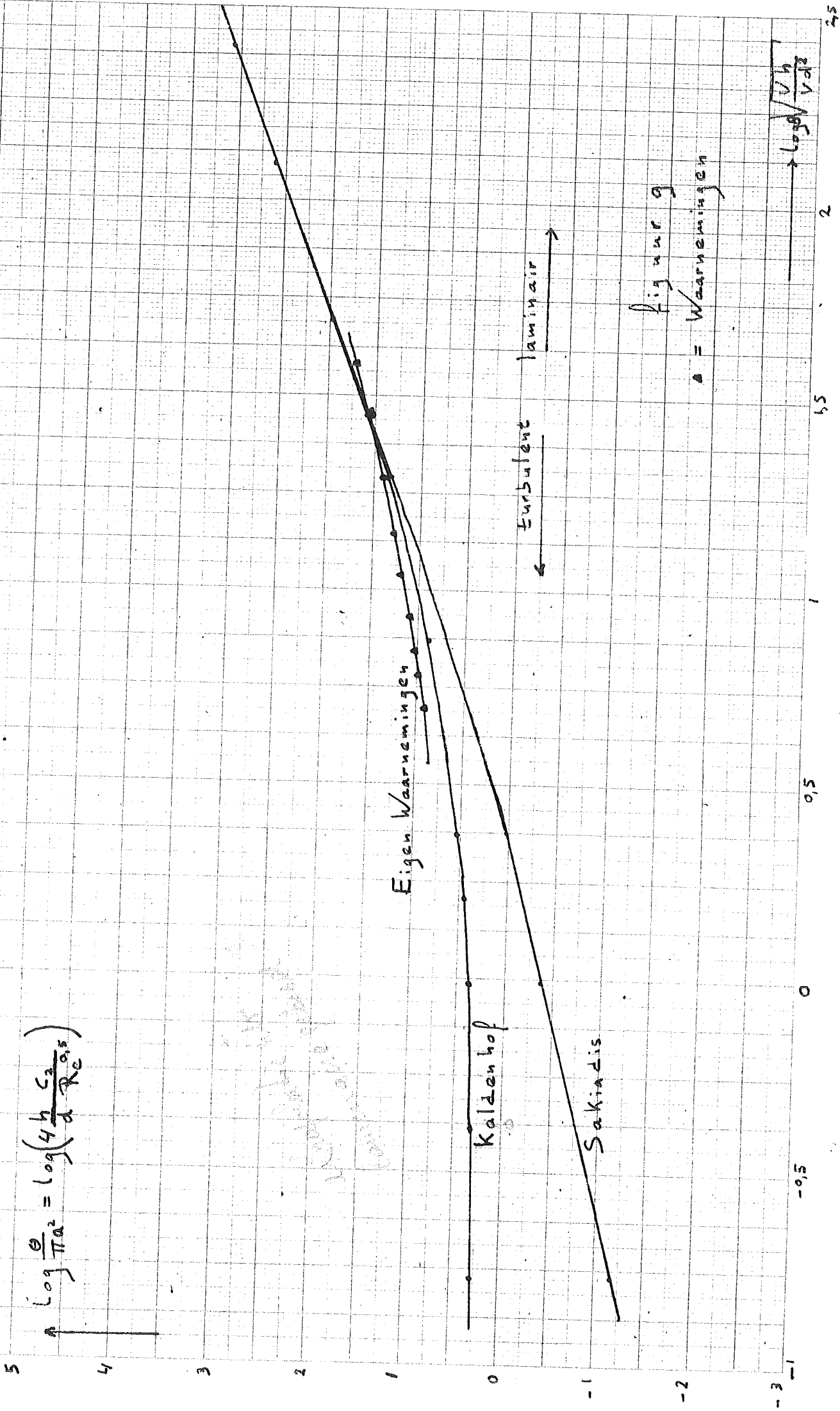
\sqrt{v} (v in m/min.)

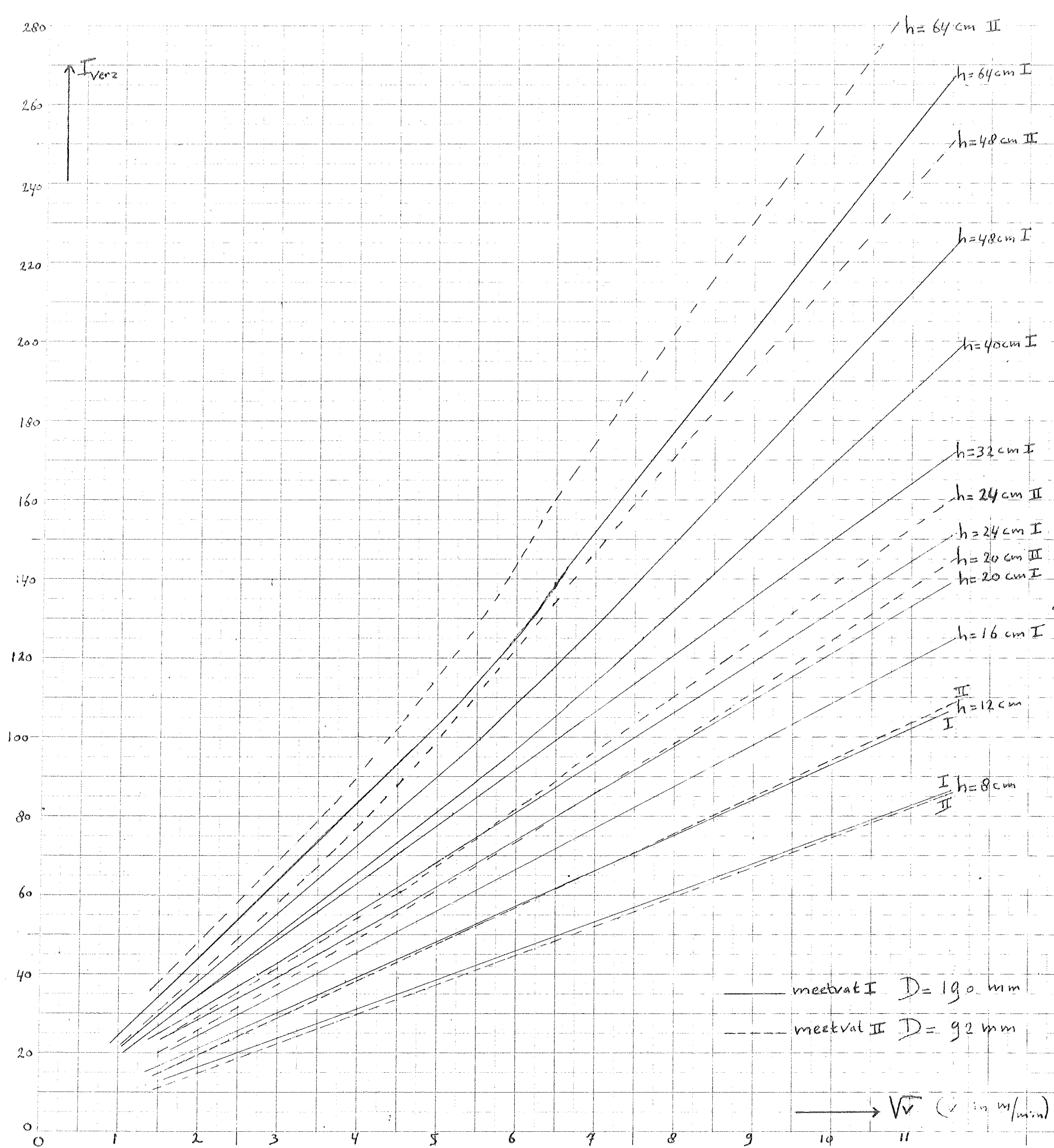




$$\log \frac{\Theta}{\pi a^2} = \log \left(4h \frac{c_2}{d \cdot Re^{0.5}} \right)$$

Handwritten notes: *Handwritten notes*





figuur 10
 De invloed van de
 draadvat-diameterverhouding
 $I_{verz} = f(V_w)$ voor
 Meetvat I
 en
 Meetvat II

Φ_m in gram/min.

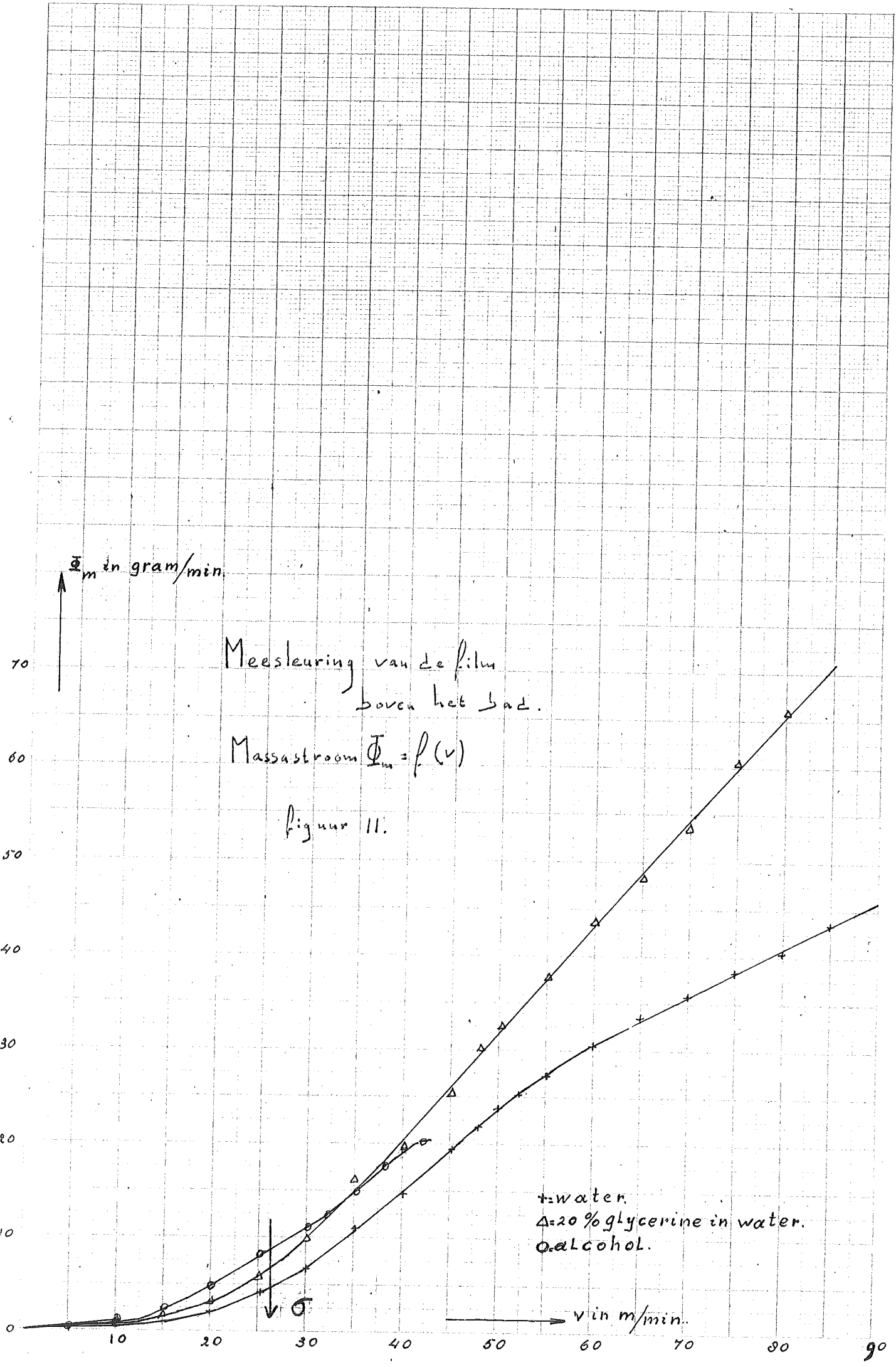
Meesleuring van de film
boven het bad.

Massastroom $\Phi_m = f(v)$

figuur 11.

+ = water.
 Δ = 20% glycerine in water.
o = alcohol.

v in m/min.



70

60

50

40

30

20

10

0

10

20

30

40

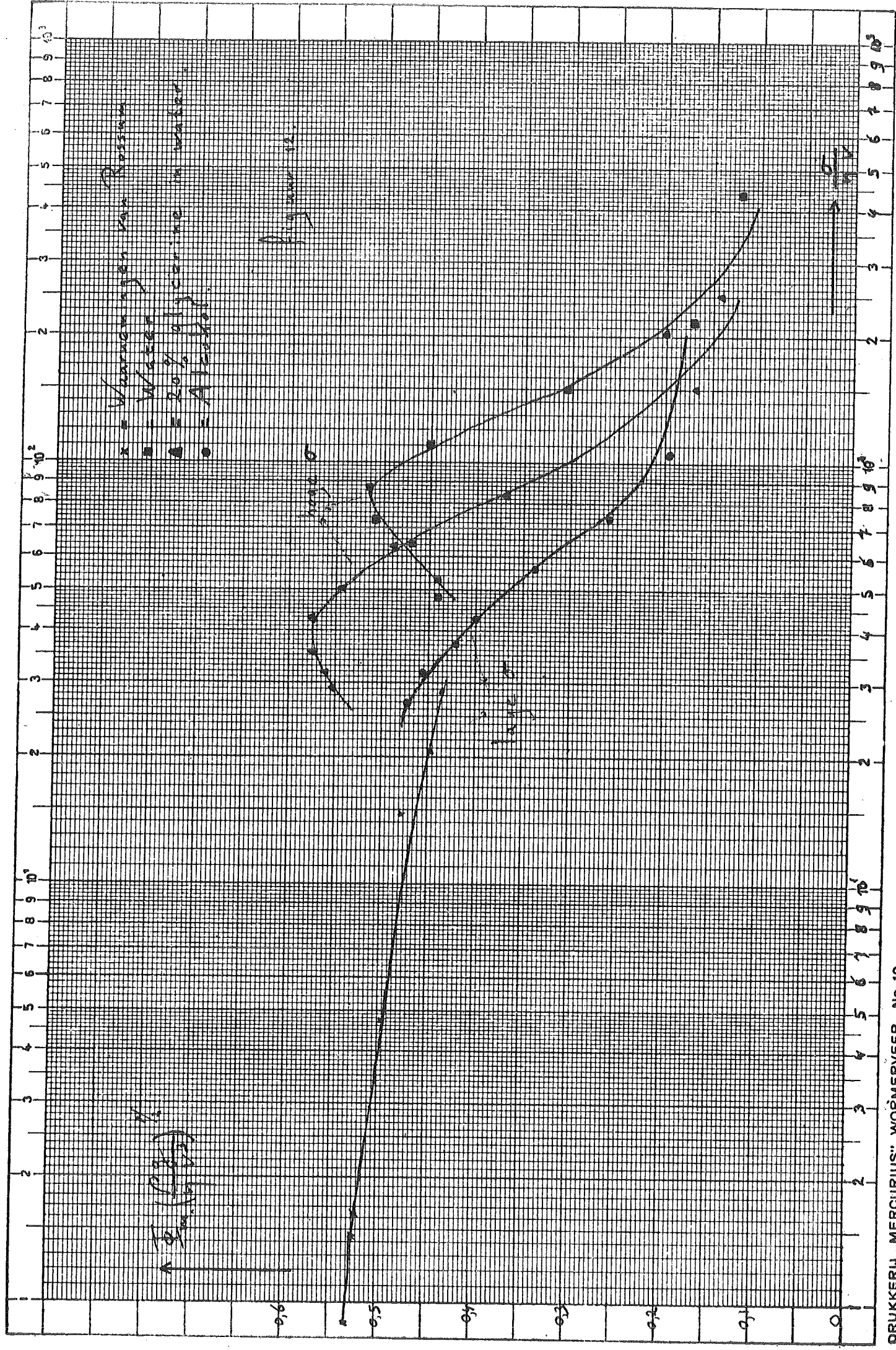
50

60

70

80

90



x = Wormmer
 ■ = Wormer
 ▲ = 20% glycerine in water
 ● = Alkohol

Figuur 12.