

WARMTEOVERDRACHT NAAR EEN LAMINAIRE STROMING
IN PUPEN MET VERSCHILLENDE GEOMETRIE EN KON-
STANTE WANDTEMPERATUUR

R.W. H. ALBLAS
AFSTUDEERVERSLAG
januari 1969

T E C H N I S C H E H O G E S C H O O L D E L F T

Laboratorium voor Fysische Technologie

"WARMTEOVERDRACHT NAAR EEN LAMINAIRE STROMING
IN PIJPEN MET VERSCHILLENDE GEOMETRIE EN
KONSTANTE WANDTEMPERATUUR"

Afstudeerverslag
R.W.H. Alblas (T)
januari 1969

<u>INHOUD</u>	<u>blz.</u>
I Samenvatting	3
II Theorie	4
III De meetopstelling	8
IV De meetprocedure	17
V Meetresultaten	19
VI Konklusies	49
VII Aanbevelingen	50
VIII Appendix: Isotherme drukmetingen	51
IX Symbolenlijst	56
X Literatuur	58

Grafieken

HOOFDSTUK I

Samenvatting

Warmteoverdracht naar een laminaire stroming in een pijp met konstante wandtemperatuur is van belang voor het dimensioneren van warmtewisselaars in de polymeerindustrie. In de polymeerindustrie heeft men veelvuldig te maken met viskeuze polymeersmelten of polymeeroplossingen. In dit onderzoek is de warmteoverdracht naar een laminaire stroming van een Newtonse vloeistof in een ronde en een rechthoekige pijp met konstante wandtemperatuur bekeken.

In Hoofdstuk II worden theoretische oplossingen besproken. De experimenteel gevonden oplossingen worden in Hoofdstuk V vergeleken met de theoretische waarden uit Hoofdstuk II. De experimentele waarden wijken vooral van de theoretische af door de temperatuursafhankelijkheid van de viscositeit.

HOOFDSTUK II

Theorie

Wat betreft theoretische oplossingen van de warmteoverdracht naar een hydrodynamisch ingestelde laminaire stroming van een vloeistof met konstante stofeigenschappen in een ronde pijp met konstante wandtemperatuur zij verwezen naar lit. [1], [2], [3] en [7].

Ook voor pijpen met rechthoekige doorsneden zijn voor een dergelijke stroming theoretische oplossingen bekend. Voor het vinden van de oplossing wordt uitgegaan van de energievergelijking:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{v_z}{a} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

Waarin T = temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)

x, y, z = richtingscoördinaten

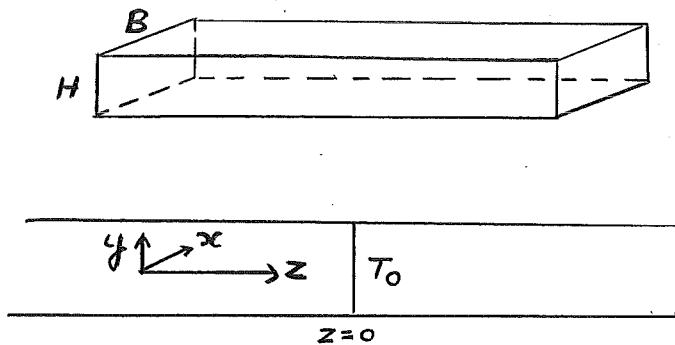
v_z = snelheid in de z -richting (m/sec)

$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ = temperatuursvereffenigingscoëfficiënt (m^2/sec)

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

c_p = soortelijke warmte ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

ρ = soortelijke massa (kg/m^3)



figuur 1

Bij vergelijking (1) zijn de volgende veronderstellingen gemaakt:

- 1) stationaire toestand
- 2) geen sekundaire stromen ($v_x = v_y = 0$)
- 3) geleiding in de z -richting is te verwaarlozen t.o.v. de konvektie
- 4) het medium is incompressibel
- 5) er treedt geen viskeuze dissipatie op.

Randvoorwaarden voor vergelijking (1) zijn:

$$T = T_0 \text{ voor } z = 0 \text{ en } \begin{cases} -\frac{1}{2} B < x < +\frac{1}{2} B \\ -\frac{1}{2} H < y < +\frac{1}{2} H \end{cases}$$

$$T = T_w \text{ voor } z \geq 0 \text{ en } \begin{cases} x = \pm \frac{1}{2} B \\ y = \pm \frac{1}{2} H \end{cases}$$

Analytisch is deze differentiaalvergelijking niet op te lossen, reden waarom men gebruik maakt van numerieke oplossingsmethoden, waarvoor de hulp van een digitale computer onontbeerlijk is.

In de praktijk is men geïnteresseerd in de warmteoverdrachtscoëfficiënt α en het Nusselt-getal dat wij als volgt definieren:

$$Nu \equiv \frac{\alpha H}{\lambda} \quad (\text{rechthoekige doorsneden}) \text{ en}$$

$$Nu \equiv \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (\text{cirkelvormige doorsneden})$$

De plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt α is als volgt gedefinieerd:

$$\alpha = \frac{\phi_w''}{T_w - \langle T \rangle} \quad (2)$$

Hierin is ϕ_w'' = warmtestroomdichtheid (W/m^2)

$\langle T \rangle$ = transportgemiddelde temperatuur, gedefinieerd als:

$$T = \frac{\int_{-\frac{1}{2}H}^{+\frac{1}{2}H} \int_{-\frac{1}{2}B}^{+\frac{1}{2}B} v_z T \cdot dx \cdot dy}{\int_{-\frac{1}{2}H}^{+\frac{1}{2}H} \int_{-\frac{1}{2}B}^{+\frac{1}{2}B} v_z \cdot dx \cdot dy}$$

Men is veelal geïnteresseerd in een gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt $\langle \alpha \rangle$ en een gemiddeld Nusseltgetal $\langle Nu \rangle = \frac{\langle \alpha \rangle H}{\lambda}$

De gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt als volgt gedefinieerd:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha \, dz \quad (3)$$

Hierin is L de lengte van de buis (m).

Een andere grootheid die van belang is, is de gemiddelde relatieve temperatuurvereffening, gedefinieerd als:

$$\Delta \langle \theta \rangle = \frac{T_w - \langle T_e \rangle}{T_w - T_o} \quad (4)$$

T_w is hierbij de konstante wandtemperatuur van de buis en $\langle T_e \rangle$ de gemiddelde eindtemperatuur die de door de pijp stromende vloeistof heeft verkregen.

Het Nusselt-getal blijkt een eenduidige funktie te zijn van het Graetz-getal (Gz), gedefinieerd als $Gz = \frac{\phi_v}{aL}$.

Hierin is ϕ_v = vloeistofdebiet (m^3/sec).

Met behulp van de eerder genoemde numerieke methoden bepaalden Montgomery en Wibulwas [4] theoretische Nu-Gz-verbanden voor verschillende pijpen met rechthoekige doorsneden.

Karakteristiek voor dergelijke pijpen is de H/B-verhouding (zie figuur 1).

Het door Montgomery en Wibulwas berekende verband voor een H/B-verhouding van 0,250 is weergegeven in tabel I op blz. 7

TABEL I

Meetbuis met rechthoekig profiel ($H/B = 0,250$)

Theoretische waarden voor Nu en $\langle Nu \rangle$ als functie van Gz , berekend via de numerieke methode door Montgomery en Wibulwas.

Gz	$\langle Nu \rangle$	Nu
14,7	3,22	2,94
29,4	3,47	2,97
44,2	3,72	3,03
58,8	3,91	3,10
88,2	4,28	3,25
117,7	4,61	3,38
147,0	4,92	3,51
176,5	5,16	3,64
205,9	5,39	3,77
235,0	5,61	3,83
264,2	5,78	3,96
294,0	5,96	4,08

III

De meetapparatuur

De metingen werden verricht met een apparatuur zoals schematisch in figuur 2 is weergegeven. Vanuit voorraadvat 1 wordt olie (Shell Nassa 89) d.m.v. een tandradpomp via afsluiter K2 of K3 naar de meetsektie gepompt. De tandradpomp draait steeds bij één konstant toerental. Het debiet door de meetsektie wordt geregeld door een zekere hoeveelheid olie via afsluiter K1 door een "by-pass" te retourneren in vat 1. Afsluiter K2 wordt gebruikt voor hoge debieten ($40 < Gz < 250$), K3 voor lage debieten ($10 < Gz < 40$). Door middel van een in voorraadvat 1 geplaatste lintroerder wordt bereikt dat de olie die naar de meetsektie stroomt een nagenoeg uniforme temperatuur heeft. Met behulp van een precisie-manometer P kan worden gecontroleerd of het door de tandradpomp geleverde debiet konstant is. Dit is dus tevens een controle op het debiet dat de meetsektie doorstroomt. Aan het begin van de meetsektie bevindt zich een multifluxmenger MF1, die ervoor dient om eventuele temperatuurgradiënten op te heffen. Na deze multifluxmenger gepasseerd te zijn komt de olie via een buisje van kunststof in de eigenlijke meetbuis. Bij de experimenten werden een tweetal meetbuizen gebruikt, één met cirkelvormig profiel, en één met rechthoekig profiel (zie appendix). Na de meetbuis gepasseerd te zijn komt de olie in een tweede multifluxmenger MF2 waarin wederom een volledige menging van de olie plaatsvindt. Hierna stroomt de olie in een voorraadvat 2. Rondom de meetbuis is een gesloten watermantel aangebracht, waar water doorheen stroomt van uniforme temperatuur. Het water wordt door middel van een centrifugaalpomp de watermantel binnengepompt. Na het verlaten van de watermantel stroomt het water naar een thermostaatbak. Deze thermostaatbak dient er voor te zorgen dat het water een konstante temperatuur verkrijgt. De zuigzijde van de centrifugaalpomp is verbonden met de thermostaatbak. De meetbuis zal op deze wijze een konstante wandtemperatuur verkrijgen. Er zal een klein temperatuurverschil bestaan tussen het instromende en uitstromende water (ca $0,2 - 0,4^{\circ}\text{C}$). Dit is een gevolg van het feit dat het water bij het doorstromen van de watermantel warmte afgeeft naar de omgeving. Indien er olie door de meetbuis stroomt die een lagere temperatuur bezit dan de wand van de meet-

buis, zal er in principe een axiaal temperatuurgradiënt in de wand van de meetbuis optreden. In het begin van de meetbuis is nl. het inwendige Nu-getal zó hoog, dat de warmteweerstand aan de buitenzijde van de meetbuis niet te verwaarlozen is. Door de goede axiale geleiding in de meetbuizen werd echter toch een uniforme wandtemperatuur verkregen. Bij vroegere experimenten werd dit ook inderdaad gekonstateerd door de temperatuur op verschillende plaatsen op de wand van de meetbuis te meten. (De meetbuis met cirkelvormig profiel was gemaakt van koper, de meetbuis met rechthoekig profiel van staal). De verbinding tussen de multifluxmenger MF1 en de meetbuis is gemaakt van p.v.c. Op deze wijze wordt bereikt dat de temperatuursprong van onverwarmde naar verwarmde buiswand zo plotseling mogelijk optreedt. Indien geen warmte-isolerende stof zou zijn aangebracht wordt de effectieve lengte van de meetbuis groter.

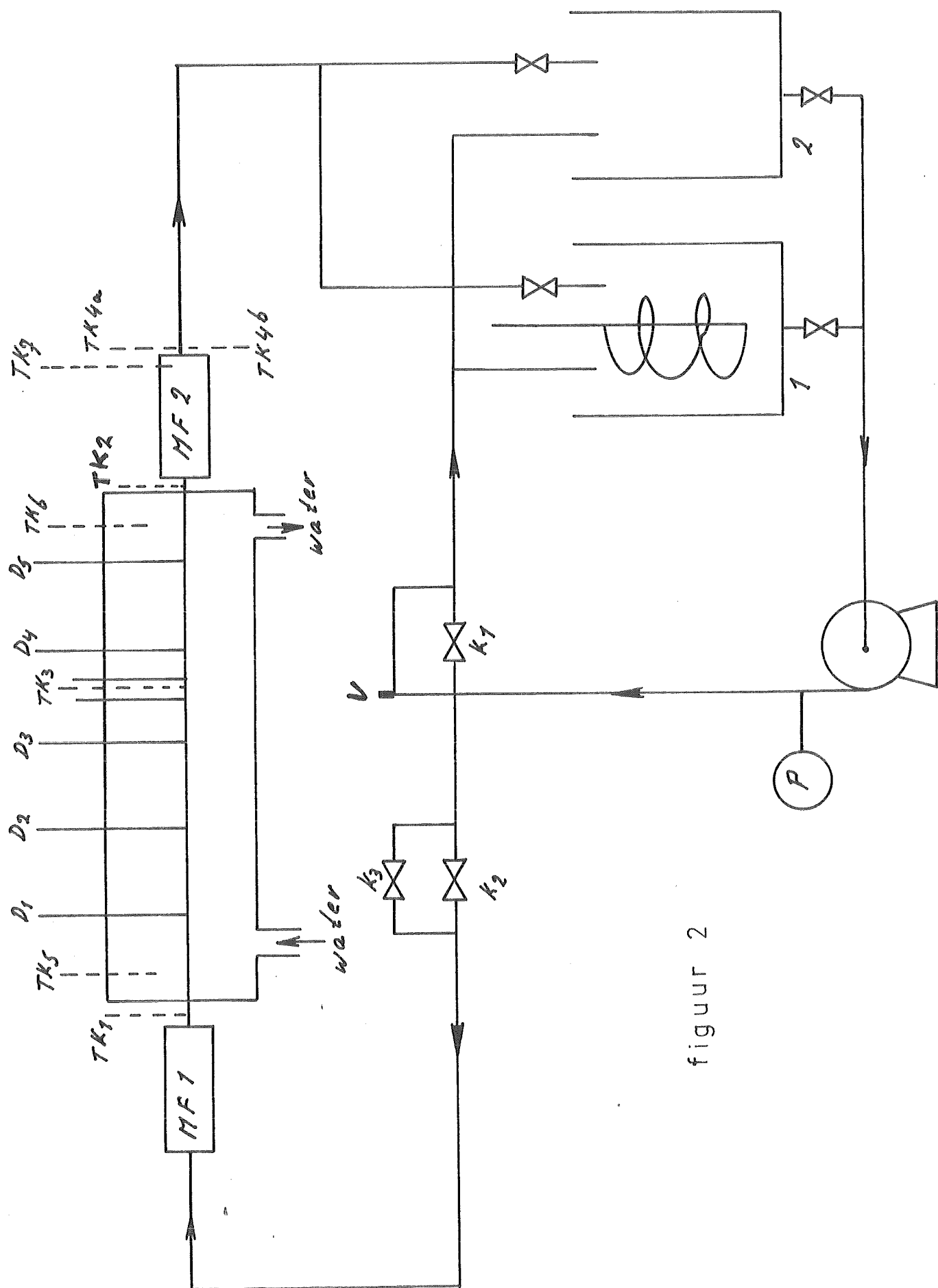
In de apparatuur zijn acht thermokoppels ingebouwd (chromel-allumel). De spanningsafgifte werd bepaald door middel van een kompensatorbank. Ook kon de spanningsafgifte worden geregistreerd op een recorder. Voor de metingen zelf was de nauwkeurigheid van de recorder te klein, maar wel bleek wanneer de toestand ongeveer stationair was geworden en wanneer er dus kon worden begonnen met meten. Met thermokoppel TK1 wordt de temperatuur T_0 na de multifluxmenger MF1 bepaald. Met thermokoppel TK2 wordt de harttemperatuur T_h gemeten aan het eind van de meetbuis. Dit wordt bereikt door in de flens vóór de multifluxmenger MF2 een "zeefje" in te bouwen, waarin zich de warme las van thermokoppel TK2 bevindt. Door middel van dit zeefje wordt thermokoppel TK2 op zijn plaats gehouden (zie figuur 3). Thermokoppel TK3 dient om de wandtemperatuur T_w van de meetbuis te bepalen. De constructie van de watermantel brengt met zich mee dat moeilijk gebruik kan worden gemaakt van zgn. "plakthermokoppels", die op de wand van de meetbuis bevestigd kunnen worden. De warme las van thermokoppel TK3 bevindt zich in de punt van een staaf die door de wand van de watermantel steekt, en die vastgeschroefd kan worden in een op de meetbuis gelast buisje (zie figuur 4).

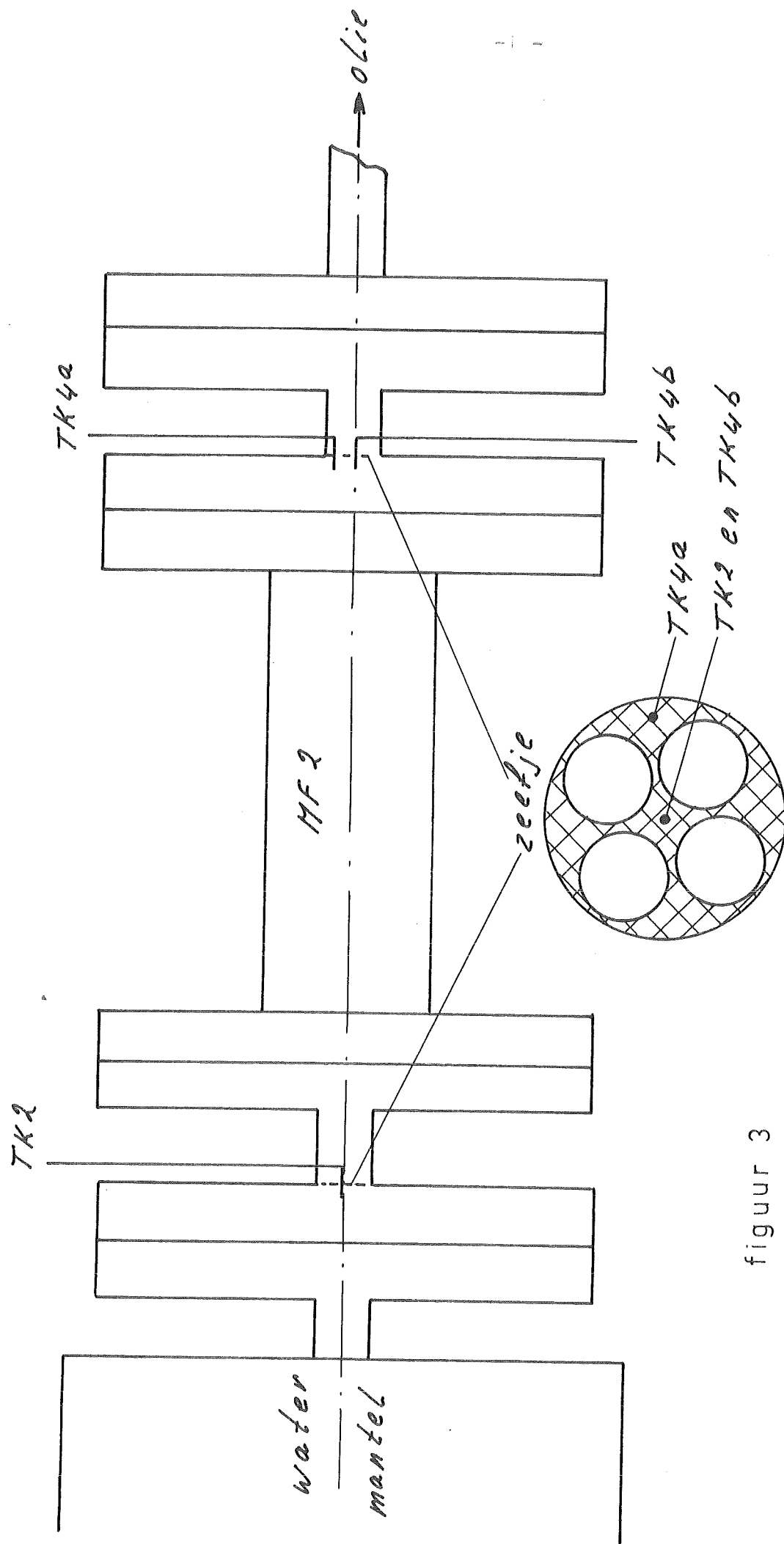
De punt van de staaf en aldus ook de warme las van thermokoppel TK3 bevinden zich enige millimeters boven de stromende olie, in een omgeving van stilstaande olie. Deze stilstaande olie bezit de temperatuur van de meetbuiswand. Bij de gedane metingen werd steeds gekonstateerd dat het verschil in temperatuur tussen het water in de watermantel en TK3 ca. $0,1 - 0,3^{\circ}\text{C}$ bedroeg; een zelfde tendens is eerder waargenomen bij proeven waarbij gebruik werd gemaakt van plakthermokoppels op de meetbuiswand. De thermokoppels TK4a en TK4b bevinden zich aan het eind van multifluxmenger MF2 en dienen om de gemiddelde eindtemperatuur $\langle T_e \rangle$ te bepalen die de olie heeft gekregen na het doorlopen van de meetbuis. De warme lassen van TK4a en TK4b bevinden zich resp. op 20mm van de wand en in het midden van een op het eind van de multifluxmenger geplaatst buisje (zie figuur 3).

Bij het doorstromen van multifluxmenger MF2 zal de olie warmte afgeven aan de omgeving. De mate van warmteafgifte is afhankelijk van de temperatuur van de olie en van de omgevingstemperatuur. Naarmate het oliedebiet kleiner wordt, speelt het warmteverlies relatief een meer belangrijke rol.

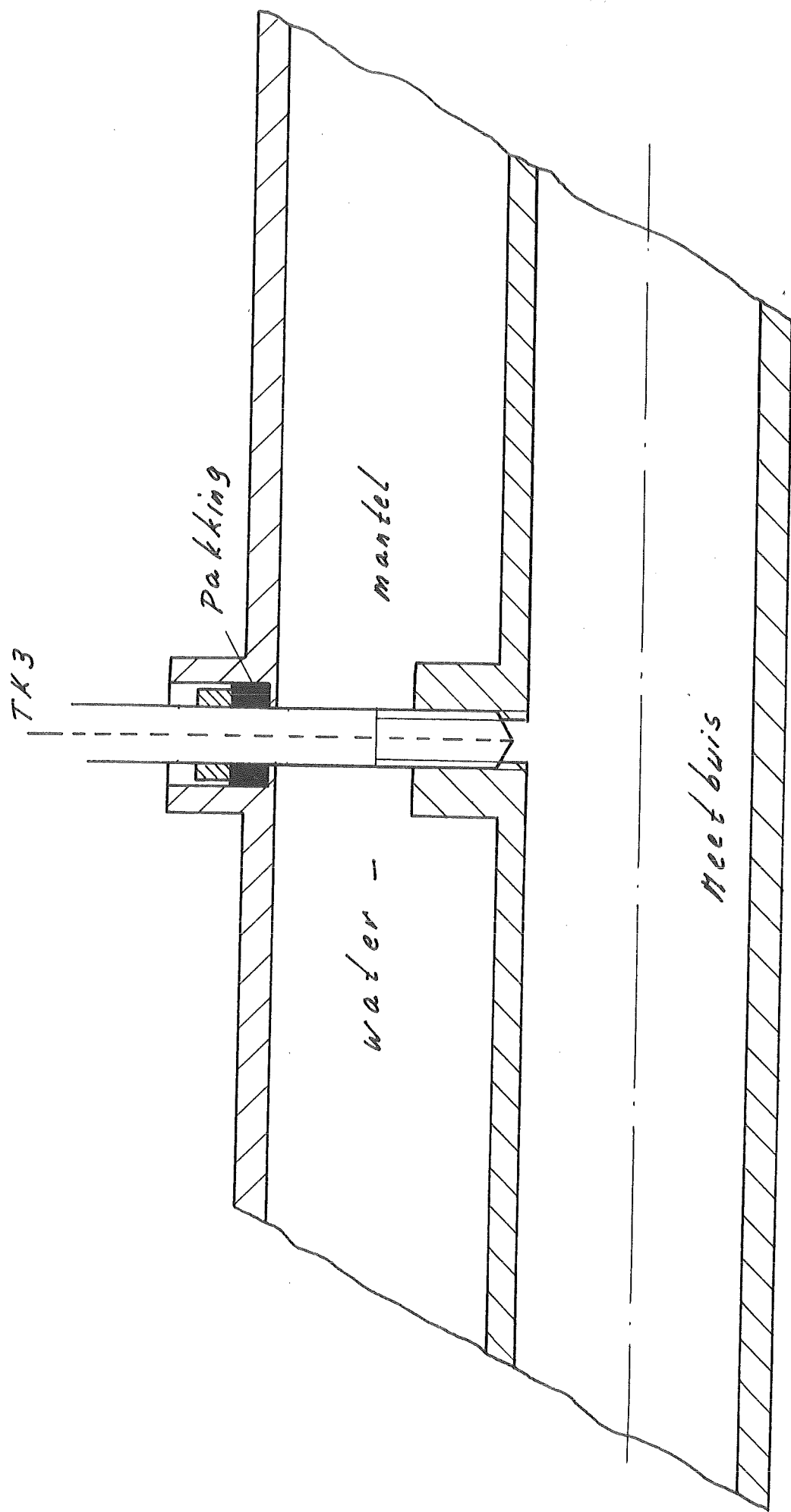
Gekonstateerd is, dat voor $Gz > 100$ de warmteafgifte te verwaarlozen is. Bij lagere Gz -getallen wordt het warmteverlies, dat in dat geval relatief belangrijker is, tegengegaan met behulp van de volgende constructie: Rond de multifluxmenger MF2 bevindt zich een isolerende laag glaswol, met daarin op tweederde van de lengte van MF2 (gerekend vanaf het instroompunt) de warme las van thermokoppel TK7. Rond deze isolatie is gelijkmatig een stroomvoerende draad gewonden, die middels een gelijkspanningstrafo gestookt kan worden. Rond deze elektrische verwarmingsdraad bevindt zich weer een isolerende laag glaswol (zie figuur 5). De warmteproductie in de draad wordt nu zodanig geregeld dat het thermokoppel TK7 een temperatuur aanwijst die ca. $1-0,5^{\circ}\text{C}$ beneden de aanwijzingen van TK4a en TK4b ligt. Op deze manier wordt bereikt dat er minimale warmteafgifte van de olie in de multifluxmenger MF2 naar de buitenlucht plaatsvindt. Tevens kan worden nagegaan of er geen opwarming van de multifluxmenger optreedt. In dat geval zal nl. de aanwijzing van TK4a hoger moeten zijn dan die van TK4b. Met behulp van de thermokoppels TK5 en TK6 wordt de temperatuur van het instromende resp. uitstromende water in de watermantel gemeten.

Op de meetbuis bevinden zich een vijftal drukaansluitingen D1, D2, D3, D4 en D5 (zie figuur 2). De drukaansluitingen bestaan uit metalen buisjes die door de wand van de watermantel steken en die aansluiten op de meetbuis. De metalen buisjes zijn door middel van kunststofslangetjes verbonden met scheidingsvaatjes, waarin zich bovenin olie bevindt (Shell Nassa 89), en onderin kwik (zie figuur 6). Indien er olie door de meetbuis stroomt zal er aldus via de drukaansluiting druk worden uitgeoefend op het kwik, en zal dit gaan stijgen in de stijgbuis die op elk scheidingsvaatje is gemonteerd.

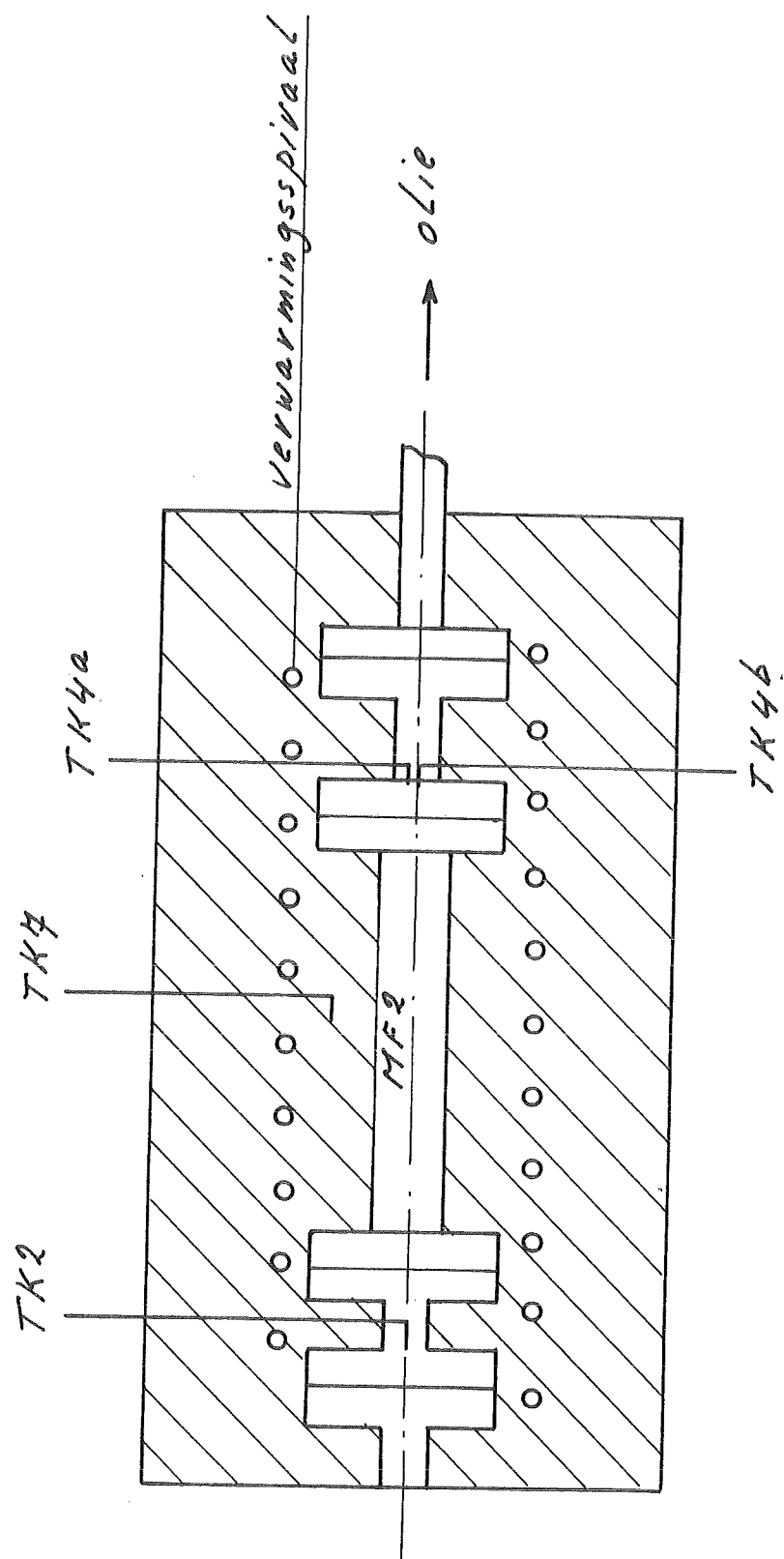




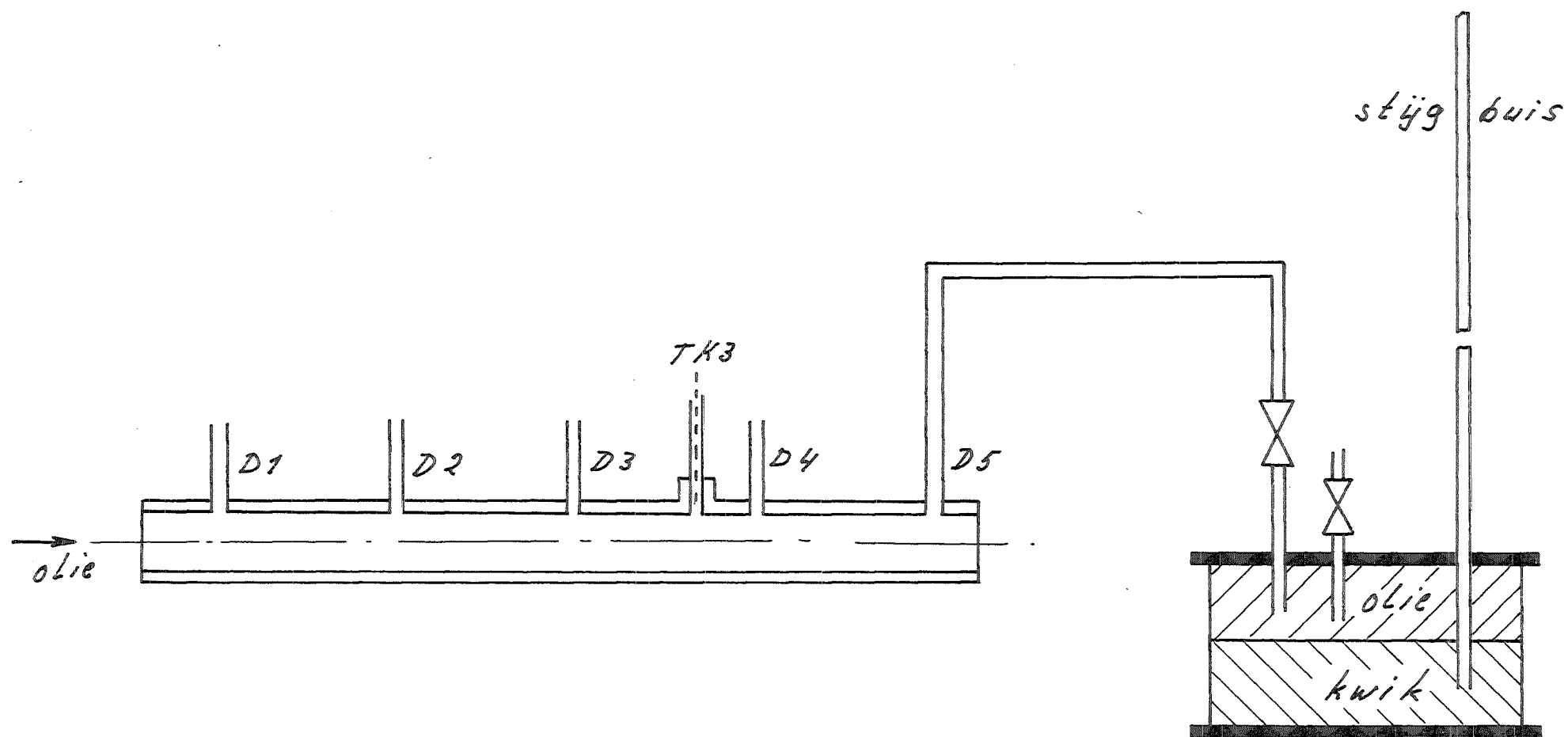
figuur 3



figuur 4



figuur 5



figuur 6

IV

Meetprocedure

Voor het begin van een meting wordt de olie in voorraadvat 1 opgewarmd tot een temperatuur die enige graden boven de omgevings-temperatuur ligt. Dit gebeurt met behulp van een elektrische straalkachel. Met behulp van de lintroerder wordt een uniforme temperatuur in vat 1 bereikt.

De thermostaatbak, en aldus ook het water in de watermantel, worden ongeveer op de gewenste temperatuur gebracht door opwarming met verwarmingsspiralen. De koude lassen van de thermokoppels bevinden zich in thermosflessen. Deze thermosflessen worden met ijs en gedestilleerd water gevuld.

Nadat de olie in voorraadvat 1 op de gewenste temperatuur is gekomen, wordt de lintroerder stilgezet om opwarming door viskeuze dissipatie te vermijden. Door manipuleren met de afsluiters K1 en K2 of K3 kan het gewenste oliedebiet door de meetsektie worden ingesteld. Door aflezing op de recorder wordt nu eerst bepaald of TK1 een konstante temperatuur aanwijst. Indien deze konstante temperatuur bereikt is, wordt de verwarming in de thermostaatbak zó geregeld, dat TK3 een gewenste konstante waarde zal gaan aanwijzen. Hierna wordt zo lang gewacht tot de thermokoppels TK2, TK4a en TK4b konstante temperaturen aanwijzen. De verwarmingsmantel rond MF2 wordt steeds zodanig gestookt, dat de aanwijzing van TK7 $0,5 - 1^{\circ}\text{C}$ onder die van TK4a en TK4b ligt. Indien de aanwijzing op de recorder van een thermokoppel konstant is, wordt de spanningsafgifte bepaald, door middel van een kompensatorbank. Na ca. 20 - 30min. wordt dit weer gedaan. Deze procedure wordt zo lang voortgezet tot de spanningsafgifte inderdaad konstant wordt. Een temperatuurverschil van $0,1^{\circ}\text{C}$ na 20 - 30min. werd aanvaardbaar geacht om te kunnen konkluderen dat de betreffende temperatuur konstant was. De stand van de kwikniveau's in de stijgbuizen wordt regelmatig genoteerd. Veelal zal nog geen konstant niveau bereikt zijn aan het eind van de meting, maar wel werd gekonstateerd dat de afname of toename van alle niveau's op den duur konstant werd. Gedurende een meting wordt enige keren de hoeveelheid olie die per tijdseenheid in voorraadvat 2 stroomt gemeten. De olie wordt gedurende een bepaald, gemeten tijdsinterval opgevangen in een bekerglas en hierna gewogen. Nadat een proef beëindigd is, wordt alle in vat 2

gestroomde olie naar vat 1 verpompt, waarna wederom een meting gedaan kan worden. De duur van één meting bedraagt ca 1 uur (bij $Gz = 150$), tot $2 \frac{1}{2}$ uur (bij $Gz = 20$)

HOOFDSTUK V

Meetresultaten.

V-1 Meetbuis met cirkelvormig profiel

V-A. Het gemiddeld Nusselt-getal als functie van Gz ; het gemiddeld Nusselt-getal als functie van de groep $\frac{aL}{D^2}$; de relatieve gemiddelde temperatuur $\Delta \langle v \rangle$ als functie $\langle v \rangle D^2$ van $\frac{aL}{\langle v \rangle R^2}$.

Gegevens omtrent deze korrelaties staan vermeld in tabel II en de grafieken 1, 2 en 3. Het gemiddeld Nusselt-getal is berekend door integratie van een warmtebalans over een stukje dz van de totale buislengte L :

$$\langle Nu \rangle = \frac{\phi_m}{\pi a \rho L} \ln \left[\frac{T_w - T_o}{T_w - \langle T \rangle_e} \right] \quad (5)$$

Het Graetz-getal volgt uit:

$$Gz = \frac{\phi_v}{aL} = \frac{\phi_m}{\rho a L} \quad (6)$$

De waarden voor c_p (J/kg), a (m²/sec) en ρ (kg/m³) zijn vervat in de grafieken 25, 26 en 27. Deze drie grootheden zijn temperatuurafhankelijk. De waarde voor λ is 0,156 W/m °C. De viscositeit η (N.sec/m²) is sterk temperatuurafhankelijk; Het verband tussen de viscositeit en de temperatuur is gegeven in de grafieken 28 en 29. De warmteoverdrachtsmetingen werden verricht bij slechts één temperatuurverschil ($T_w - T_o = 15^\circ\text{C}$).

De gemiddelde Reynolds-getallen bij de metingen varieerden tussen 0,025 en 0,14. De waarden voor $\langle Nu \rangle$, $\Delta \langle v \rangle$ en Δv_h sluiten aan bij eerder gevonden waarden door Fierens [7]. De afwijking van de eerder gevonden waarden bedraagt ca. 10%, een bedrag dat gelijk is aan de meetnauwkeurigheid.

TABEL II Warmteoverdrachtsmetingen bij $T_w - T_o = 15^\circ\text{C}$.

Meetbuis met cirkelvormig profiel.

proef no.	ϕ_m $\times 10^{-3}$	$T_w - T_o$ $^\circ\text{C}$	$T_w - \langle T \rangle_e$ $^\circ\text{C}$	$T_w - T_h$ $^\circ\text{C}$	$\frac{aL}{\langle v \rangle R^2}$ $\times 10^{-2}$	$\frac{aL}{\langle v \rangle D^2}$ $\times 10^{-3}$	$\Delta \langle \theta \rangle$	$\Delta \psi_h$	Gz	$\langle Nu \rangle$
1	15,77	14,6	11,6	14,5	2,08	5,21	0,794	0,993	150,9	11,10
2	14,33	14,1	10,9	14,0	2,27	5,67	0,773	0,993	138,6	11,23
3	11,55	14,9	11,1	14,6	2,84	7,11	0,746	0,993	110,5	10,30
4	9,87	14,7	10,4	14,6	3,32	8,30	0,709	0,993	94,6	10,35
5	9,17	15,1	10,9	14,7	3,58	8,96	0,719	0,987	87,7	9,19
6	5,57	14,8	9,5	14,2	5,88	14,70	0,641	0,953	53,4	7,56
7	4,50	15,0	9,0	13,7	7,29	18,22	0,599	0,913	43,1	7,04
8	2,80	14,9	7,4	11,5	11,67	29,17	0,498	0,772	26,9	5,98
9	1,83	14,7	5,7	8,7	17,86	44,64	0,388	0,592	17,6	5,31

V-B₂ Het plaatselijk Nusselt-getal als functie van het Graetz-getal.

Het plaatselijk Nusselt-getal is te berekenen uitgaande van een warmtebalans over een buissegment van lengte dz.

Uit deze warmtebalans volgt:

$$Nu = - \frac{d \ln \Delta^{29}}{d\left(\frac{az}{\langle v \rangle R^2}\right)} \quad (7)$$

De op deze wijze gevonden plaatselijke Nusselt-getallen liggen boven de theoretisch voorspelde waarden, evenals dit met het gemiddeld Nusselt-getal het geval is.

Voor de berekening van de plaatselijke Nusselt-getallen wordt een analoge methode gebruikt als die beschreven op pag. 35

De resultaten worden gegeven in tabel III en grafiek 4.

TABEL III

Het plaatselijk Nu-getal als functie van Gz.

Meetbuis met cirkelvormig profiel; $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$.

$$\text{Nu} = - \frac{d \ln \Delta \langle v \rangle}{d \left(\frac{aL}{\langle v \rangle R^2} \right)} .$$

Nu	Gz
6,25	138,6
5,97	110,5
5,74	94,6
5,63	87,7
4,76	53,4
4,36	43,1

V-C. De invloed van de temperatuurafhankelijkheid van de viskositeit op het gemiddeld Nusselt-getal.

In analogie met de door Fierens [7] gevonden resultaten worden een tweetal korrelaties bekeken, t.w.:

$$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{theoretisch}}} = a \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^b, \text{ en}$$

$$\frac{\langle \text{Nu} \rangle}{G_z^{1/3}} = a \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^b ;$$

(de laatste korrelatie geldt alleen voor Graetz-getallen > 30).

Gegevens hieromtrent zijn verzameld in de tabellen IV en V, alsmede de grafieken 5 en 6. Omdat slechts warmte-overdrachtsmetingen bij één temperatuurverschil ($T_w - T_o = 15^\circ\text{C}$) werden verricht, is het zeer speculatief aan deze metingen vergaande konklusies te verbinden. De gegevens werden met de door Fierens gevonden resultaten in twee grafieken verwerkt.

Vergelijking van de eigen waarnemingen met die van Fierens geven als resultaat dat deze onderling binnen redelijke grenzen met elkaar overeen stemmen. Evenals bij Fierens werd een grote spreiding in de waarnemingen geconstateerd.

TABEL IV

Het verband $\frac{\langle Nu \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle Nu \rangle_{\text{theoretisch}}} = a \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^b$

Meetbuis met cirkelvormig profiel.

Gz	$\langle Nu \rangle_{\text{ge-meten}}$	$\langle Nu \rangle_{\text{theo-retisch}}$	$\frac{\langle Nu \rangle_{\text{gem.}}}{\langle Nu \rangle_{\text{th.}}}$	$\frac{\log \langle Nu \rangle_{\text{gem.}}}{\log \langle Nu \rangle_{\text{th.}}}$	T_{OC}^w	$\frac{\eta_w}{N_{\text{sec}}^2}$	$\langle T \rangle_{\text{OC}}$	$\frac{\langle \eta \rangle}{N_{\text{sec}}^2}$	$\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$	$\log \frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$
150,9	11,10	8,8	1,26	0,1004	36,2	1,35	23,1	5,45	4,03	0,6053
138,6	11,23	8,5	1,31	0,1173	37,5	1,20	25,0	4,20	3,50	0,5441
110,5	10,30	7,9	1,31	0,1173	36,3	1,35	23,3	5,30	3,92	0,5944
94,6	10,35	7,5	1,38	0,1399	36,3	1,35	23,8	4,90	3,64	0,5611
87,7	9,19	7,3	1,26	0,1004	36,3	1,35	23,3	5,30	3,92	0,5944
53,4	7,56	6,35	1,19	0,0755	36,3	1,35	24,2	4,70	3,48	0,5416
43,1	7,04	6,0	1,17	0,0682	36,45	1,33	24,5	4,50	3,39	0,5302
26,9	5,98	5,3	1,13	0,0531	36,5	1,33	25,4	3,95	2,97	0,4728
17,6	5,31	4,8	1,10	0,0414	36,5	1,33	26,3	3,55	2,67	0,4265

TABEL IV

Het verband $\frac{\langle Nu \rangle_{gem.}}{Gz^{1/3}} = a \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^b$

Meetbuis met cirkelvormig profiel.

Gz	$\langle Nu \rangle$ ge- meten	$Gz^{1/3}$	$\frac{\langle Nu \rangle_{gem.}}{Gz^{1/3}}$	$\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$	$\log \frac{\langle Nu \rangle_{gem.}}{Gz^{1/3}}$	$\log \frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$
150,9	11,10	5,32	2,09	4,03	0,3201	0,6053
138,6	11,23	5,18	2,16	3,50	0,3345	0,5441
110,5	10,30	4,80	2,14	3,92	0,3304	0,5944
94,6	10,35	4,55	2,27	3,64	0,3560	0,5611
87,7	9,19	4,55	2,06	3,92	0,3139	0,5944
53,4	7,56	3,77	2,01	3,48	0,3032	0,5416
43,1	7,04	3,51	2,01	3,39	0,3032	0,5302

V=D. Een korrelatie voor het plaatselijk en het gemiddelde Nusselt-getal met de dimensieloze groep,

$$\xi = \frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\phi_v \eta_w}.$$

In analogie met Fierens [7] werd het volgende verband bekeken:

$$\frac{Nu_{\text{gemeten}}}{Nu_{\text{theoretisch}}} = f \left[\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v} \right].$$

Teneinde tot deze korrelatie te komen wordt eerst het verband tussen de dimensieloze groep,

$$\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v} \text{ en } Gz \text{ bepaald (zie tabel VI en grafiek 7).}$$

Voor de gevolgde procedure bij de berekening van de dimensieloze groep en het bijbehorend Gz-getal zij verwezen naar Fierens [7]. De gemeten, plaatselijke Nusselt-getallen, de theoretische plaatselijke Nusselt-getallen en de dimensieloze groep zijn aan elkaar gekoppeld via

$$\frac{Nu_{\text{gem.}}}{Nu_{\text{theor.}}} = \left(\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v} \right)^a \quad (\text{zie tabel VII en grafiek 8}).$$

De faktor $\frac{128}{\pi}$ is ingevoerd, opdat voor $\frac{Nu_{\text{gem}}}{Nu_{\text{th}}} = 1$, de dimensieloze groep ook de waarde 1 zal krijgen, gezien het feit dat voor isotherme stroming geldt:

$$\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v} = \frac{128}{\pi}.$$

In het geval van isotherme stroming zal gelden $\frac{Nu_{\text{gem.}}}{Nu_{\text{th.}}} = 1$.

Ook voor het gemiddelde Nusselt-getal zijn de gemeten waarden en de theoretische waarden gekoppeld via:

$$\frac{\langle Nu \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle Nu \rangle_{\text{theoret.}}} = \left(\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v} \right)^a \quad (\text{zie tabel VIII en grafiek 9})$$

Het verband tussen de dimensielloze groep $\xi = \frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\eta_w \phi_v}$ en Gz blijkt afhankelijk te zijn van het temperatuurverschil $\Delta T = T_w - T_o$, waarbij de metingen werden verricht.

Deze konklusie kan worden gemaakt indien het $\xi - Gz$ verband (grafiek 7) vergeleken wordt met het $\xi - Gz$ verband dat door Fierens is gevonden bij $\Delta T = 30^\circ \text{C}$.

Het is waarschijnlijk dat er een verband bestaat tussen ξ en Gz , met de dimensielloze groep $\frac{1}{\eta_w} \frac{d\eta_w}{dT} \Delta T$ als parameter. Omdat bij de ronde meetbuis bij één temperatuurverschil ΔT is gewerkt, is de afhankelijkheid van deze parameter niet te onderzoeken.

In de praktijk zal men geïnteresseerd zijn in de totale drukval Δp over een warmtewisselaarpijp. Het lijkt daarom zinvol het verband na te gaan tussen $\langle \xi \rangle$ en Gz met de groep $\frac{1}{\eta_w} \frac{d\eta_w}{dT} \Delta T$ als parameter, waarbij $\langle \xi \rangle = \frac{1}{Gz} \int_0^{Gz} \xi d(Gz)$.

Het verband tussen $\langle \xi \rangle$ en Gz is weergegeven in grafiek 10. De hierin gegeven punten van $\langle \xi \rangle$ zijn verkregen door bij de bijbehorende waarden van Gz het oppervlak onder de $\xi - Gz$ grafiek (grafiek 7) te bepalen door planimetrering.

TABEL VI

Het verband tussen $\frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\eta_w \phi_v}$ en Gz

Meetbuis met cirkelvormig profiel $\Delta T = 15^\circ\text{C}$

Gz	$\frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\eta_w \phi_v}$
793	113,7
729	103,7
580	109,4
498	86,9
461	111,1
377	104,8
347	93,8
281	95,6
276	96,4
242	99,6
236	74,8
226	90,7
222	87,5
220	95,7
185	94,7
177	90,3
170	84,4
152	70,3

Gz	$\frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\eta_w \phi_v}$
141	83,8
141	81,3
135	85,8
134	82,5
116	72,2
108	78,3
108	77,6
92,3	71,1
85,6	79,9
69,1	74,5
67,3	67,4
65,4	73,1
52,8	65,6
43,9	52,6
43,2	65,0
32,9	66,8
28,2	56,3
21,8	66,6

TABEL VII

De correlatie voor het plaatselijk Nu-getal $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$

$\frac{\text{Nu}_{\text{gemeten}}}{\text{Nu}_{\text{theoretisch}}}$ als functie van $\frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$

Gz	Nu ge- meten	Nu theo- retisch	$\frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$	$\frac{\log D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$	$\frac{\text{Nu}_{\text{gem.}}}{\text{Nu}_{\text{theor.}}}$	$\frac{\log \text{Nu}_{\text{gem.}}}{\log \text{Nu}_{\text{theor.}}}$
138,6	6,25	5,85	1,97	0,2945	1,07	0,0286
110,5	5,97	5,5	1,88	0,2742	1,08	0,0346
94,6	5,74	5,3	1,84	0,2648	1,08	0,0342
87,7	5,63	5,1	1,79	0,2529	1,10	0,0426
53,4	4,76	4,55	1,61	0,2068	1,05	0,0199
43,1	4,36	4,25	1,54	0,1875	1,02	0,0099

TABEL VIII

De correlatie voor het gemiddelde Nu-getal.

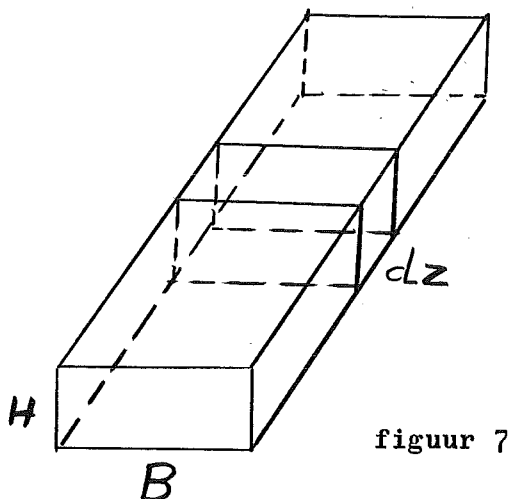
$$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{theoretisch}}} \quad \text{als functie van} \quad \frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$$

Gz	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{ge-meten}}$	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{theo-retisch}}$	$\frac{D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$	$\frac{\log D^4 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{\frac{\eta_w \phi_v}{128/\pi}}$	$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$	$\frac{\log \langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}}{\log \langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$
138,6	11,23	8,6	1,97	0,2945	1,31	0,1173
110,5	10,30	8,0	1,88	0,2742	1,29	0,1106
94,6	10,35	7,6	1,84	0,2648	1,36	0,1335
87,7	9,19	7,4	1,79	0,2529	1,24	0,0934
53,4	7,56	6,4	1,61	0,2068	1,18	0,0719
43,1	7,04	6,0	1,54	0,1875	1,17	0,0682

V - 2. Meetbuis met rechthoekig profiel

V-2-A. Het gemiddeld Nusselt-getal als functie van Gz.

We kunnen uit onze experimenten een gemiddeld Nusselt-getal berekenen door uit te gaan van een warmtebalans over een volume-elementje BHdz.



figuur 7

$$(T_w - \langle T \rangle) \alpha \cdot 2(B+H)dz = \phi_m c_p d\langle T \rangle.$$

$$\frac{1}{L} \int_0^L \alpha dz = - \int_{T_o}^{\langle T_e \rangle} \frac{\phi_m c_p}{2L(B+H)} \frac{d(T_w - \langle T \rangle)}{(T_w - \langle T \rangle)}.$$

$$\alpha = \frac{\phi_m c_p}{2L(B+H)} \ln \left(\frac{T_w - T_o}{T_w - \langle T_e \rangle} \right).$$

$$\langle Nu \rangle = \frac{\langle \alpha \rangle H}{\lambda} = \frac{\phi_m c_p}{2\lambda L} \left(\frac{H}{B+H} \right) \ln \left(\frac{T_w - T_o}{T_w - \langle T_e \rangle} \right) \text{ of}$$

$$\langle Nu \rangle = \frac{\phi_m c_p}{2\lambda L} \left(\frac{H/B}{1+H/B} \right) \ln \left(\frac{T_w - T_o}{T_w - \langle T_e \rangle} \right), \quad (8)$$

Door nu ϕ_m , T_w , T_o en $\langle T_e \rangle$ te meten is het gemiddelde Nusselt-getal te bepalen.

Er werden warmteoverdrachtsmetingen verricht bij twee waarden van $\Delta T = (T_w - T_o)$, resp. $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ en $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. Voor beide temperatuurverschillen werd het verband tussen het gemiddelde Nusselt-getal en het Graetz-getal bepaald. Evenals bij de metingen, verricht aan de meetbuis met cirkelvormig profiel, worden ook hier hogere waarden gemeten dan theoretisch voorspeld (zie tabellen IX en X en grafiek 11).

Bij lagere Gz-getallen wijken de experimenteel gevonden waarden meer af van de theoretische waarden dan bij hoge Gz-getallen het geval was. Het is mogelijk dat bij lage Gz-getallen vrije konvektie optreedt.

TABEL IX Warmteoverdrachtsmetingen $T_w - T_o = 15^\circ\text{C}$

Meetbuis met rechthoekig profiel.

proef no.	ϕ_m $\times 10^{+3}$ kg/sec	$T_w - T_o$ $^\circ\text{C}$	$T_w - \langle T_s \rangle$ $^\circ\text{C}$	$\frac{aL}{\phi_v}$ $\times 10^{+3}$	$\Delta \langle v \rangle$	Gz	$\langle Nu \rangle$
1	26,35	15,5	12,15	3,97	0,782	252	6,78
2	21,43	15,1	11,5	4,87	0,762	205	6,04
3	18,13	15,3	11,2	5,78	0,733	173	5,92
4	13,31	15,0	10,0	7,94	0,667	126	5,55
5	11,37	15,4	9,6	9,17	0,624	109	5,57
6	9,27	15,55	9,1	11,50	0,587	87	5,02
7	8,08	15,2	8,3	13,00	0,547	77	5,06
8	6,30	16,05	7,8	16,88	0,486	60	4,71
9	4,43	14,2	5,4	23,80	0,380	42	4,44
10	3,16	15,3	4,3	33,33	0,281	30	4,14
11	2,25	15,25	2,6	45,40	0,171	22	4,24

TABEL ~~X~~ Warmteoverdrachtsmetingen $T_w - T_o = 30^{\circ}\text{C}$

Meetbuis met rechthoekig profiel.

proef no.	ϕ_m $\times 10^3$ kg/sec	$T_w - T_o$ $^{\circ}\text{C}$	$T_w - \langle T_e \rangle$ $^{\circ}\text{C}$	$\frac{aL}{\phi_v}$ $\times 10^3$	$\Delta \langle v \rangle$	Gz	$\langle \text{Nu} \rangle$
1	21,4	30,15	22,95	0,491	0,761	204	6,00
2	17,8	29,4	21,35	0,585	0,728	171	5,91
3	14,3	30,15	20,3	0,724	0,673	138	5,96
4	10,9	30,2	19,5	0,833	0,646	120	5,69
5	9,65	30,3	17,95	1,077	0,593	93	5,28
6	7,62	30,4	16,2	1,351	0,533	74	5,04
7	6,57	30,1	14,95	1,588	0,498	63	4,78
8	4,53	30,6	11,8	2,276	0,386	44	4,54
9	3,17	30,2	8,2	3,224	0,274	31	4,40
10	2,08	30,35	4,0	5,000	0,132	20	4,42

V-2-B. Het plaatselijk Nusselt-getal als functie van Gz.

Het plaatselijk Nusselt-getal kan berekend worden door uit de relatieve temperatuur-vereffening

Ook hier wordt uitgegaan van een warmtebalans over een volume-elementje BHz van de buis:

$$\frac{d\langle T \rangle}{T_w - \langle T \rangle} = \frac{\alpha 2(B+H)}{\phi_m c_p} dz$$

$$- \frac{d\left(\frac{T_w - \langle T \rangle}{T_w - T_o}\right)}{\frac{T_w - \langle T \rangle}{T_w - T_o}} = \frac{\alpha 2(B+H)}{\phi_m c_p} dz$$

$$-d \ln \Delta \langle v \rangle = \frac{\alpha H}{\lambda} \frac{2(B+H)\lambda}{\phi_m c_p H} dz.$$

$$Nu \equiv \frac{\alpha H}{\lambda} = - \frac{H/B}{2(1+H/B)} \frac{d \ln \Delta \langle v \rangle}{d\left(\frac{Bz}{\phi_v}\right)} \quad (9)$$

Voor de bepaling van Nu wordt de volgende methode gebruikt:

Met behulp van een computer wordt het verband tussen $\ln \Delta \langle v \rangle$ en $\left(\frac{Bz}{\phi_v}\right)$ zo goed mogelijk bepaald.

Dit gebeurt door middel van de methode van de "kleinste kwadraten".

Het verband wordt geacht een derde-graads-curve te zijn van de gedaante $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, waarbij $y = \ln \Delta \langle v \rangle$ en $x = \left(\frac{Bz}{\phi_v}\right)$.

a, b, c en d zijn konstanten.

De gewenste waarde voor Nu volgt nu uit:

$$Nu = - \frac{H/B}{2(1+H/B)} (b + 2cx + 3dx^2)$$

De gevonden waarden voor Nu zijn gegeven in tabel XI en grafiek 12.

TABEL XI

Meetbuis met rechthoekig profiel ($H/B = 0,274$)

Verband tussen Nu en Gz

$$Nu = -1,09 \frac{d \ln \Delta}{d \left(\frac{aL}{\phi_v} \right)}$$

$T_w - T_o = 15^\circ C$	
Nu	Gz
4,73	205
4,61	173
4,36	126
4,23	109
4,01	87
3,89	77
3,66	60
3,50	42

$T_w - T_o = 30^\circ C$	
Nu	Gz
4,36	171
4,28	138
4,22	120
4,11	93
4,01	74
3,94	63
3,86	44

V-2-C. De invloed van de temperatuurafhankelijkheid van de viskositeit op het gemiddeld Nusselt-getal.

Om het gemiddeld Nusselt-getal te korreleren aan de verhouding $\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$ is uitgegaan van het verband:

$$\frac{\langle Nu \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle Nu \rangle_{\text{theoretisch}}} = \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^a$$

(zie tabel XII en grafiek 13).

In grafiek 13 geeft de gestippelde lijn, die op fysische gronden door het punt (0,0) is getrokken de beste aansluiting bij de meetresultaten. De konstante a is gelijk aan 0,13. Fierens [7] vond dezelfde korrelatie voor zijn metingen in een ronde buis!

TABEL **XII**

Meetbuis met rechthoekig profiel

Het verband $\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gemeten}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{theoretisch}}} = \left(\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w} \right)^b$

Gz	$T_w - T_o$	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}$	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}$	$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$	$\log \frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$	η_w	$\langle \eta \rangle$	$\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$	$\log \frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$
252	15,5	6,78	5,6	1,21	0,0828	0,85	3,00	3,53	0,5478
205	15,1	6,04	5,4	1,12	0,0492	0,91	3,20	3,52	0,5465
173	15,3	5,92	5,2	1,14	0,0569	0,92	3,20	3,48	0,5416
126	15,0	5,55	4,7	1,18	0,0719	1,60	6,20	3,88	0,5888
109	15,4	5,57	4,5	1,24	0,0934	0,98	3,20	3,27	0,5145
87	15,55	5,02	4,3	1,17	0,0682	1,57	5,80	3,70	0,5682
77	15,2	5,06	4,15	1,22	0,0864	1,08	3,35	3,20	0,5051
60	16,05	4,71	3,9	1,21	0,0828	1,45	4,90	3,72	0,5705
42	14,2	4,44	3,65	1,21	0,0828	1,67	4,65	3,06	0,4857
30	15,3	4,14	3,4	1,22	0,0864	1,53	4,05	2,65	0,4232
22	15,25	4,24	3,25	1,30	0,1139	1,27	2,90	2,28	0,3571
204	30,15	6,00	5,15	1,16	0,0645	0,39	3,25	8,34	0,9212
171	29,4	5,91	5,05	1,29	0,1106	0,355	2,50	7,04	0,8476
138	30,15	5,96	4,80	1,24	0,0934	0,33	2,25	6,83	0,8344
120	30,2	5,69	4,60	1,24	0,0934	0,44	3,55	7,60	0,8808
93	30,3	5,28	4,35	1,21	0,0828	0,30	1,80	6,00	0,7782
74	30,4	5,04	4,10	1,23	0,0899	0,31	1,75	5,64	0,7513
63	30,1	4,78	3,95	1,21	0,0828	0,44	2,55	5,78	0,7619
44	30,6	4,54	3,70	1,23	0,0899	0,41	2,00	4,83	0,6839
31	30,2	4,40	3,45	1,28	0,1072	0,415	1,70	4,10	0,6128
20	30,35	4,42	3,25	1,36	0,1335	0,43	1,55	3,60	0,5563

V-2-D. Een korrelatie voor het plaatselijk en het gemiddelde Nusselt-getal met de dimensieloze groep:

$$\zeta = \frac{BH^3 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{12 \eta_w \phi_v} M_o.$$

Er is getracht de Nusselt-getallen te korreleren aan de dimensieloze groep:

$$\frac{BH^3 \left(- \frac{dp}{dz} \right)}{12 \eta_w \phi_v} M_o$$

Dit is gedaan om de volgende redenen. Bij warmte-overdracht naar een vloeistof waarvan de viscositeit temperatuur-afhankelijk is, verandert het snelheidsprofiel ten opzichte van isotherme stroming. de warmte-overdracht zal vooral van invloed zijn op de snelheidsgradiënt aan de wand. Deze snelheidsgradiënt aan de wand heeft op zijn beurt weer een grote invloed op de warmte-overdracht. Dit is duidelijk, wanneer we de Lévêque-oplossing beschouwen, die voor het thermische inloopgebied geldt: [5]

$$Nu = 0,539 \left(\frac{SH^3}{az} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Hierin is S de helling van het snelheidsprofiel in de thermische grenslaag en dus de snelheidsgradiënt aan de wand; Dit verband geldt strikt genomen zolang de thermische grenslaag kleiner is dan de afstand waarover de snelheidsverdeling lineair beschouwd mag worden. De snelheidsgradiënt S is voor rechthoekige pijpen plaatsafhankelijk. Omdat de geometrie van de meetbuis ($H/B = 0,274$) die van evenwijdige platen benadert, kunnen we voor het isotherme geval de gradiënt S benaderen door de snelheidsgradiënt aan de wand van twee evenwijdige platen.

Indien we nu het geval beschouwen van twee evenwijdige platen, geldt voor de snelheidsgradiënt S aan de wand:

$$S = \frac{\tau_w}{\eta_w} = \frac{H \left(- \frac{dp}{dz} \right)}{2 \eta_w} \quad (11)$$

Invullen van (11) in (10) geeft:

$$\text{Nu} = 0,539 \left(\frac{H \left(-\frac{dp}{dz} \right) H^3}{2 \eta_w a z} \right)^{\frac{1}{3}} =$$

$$0,539 \left(\frac{\phi_v}{a z} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H^4 \left(-\frac{dp}{dz} \right)}{2 \eta_w \phi_v} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Het theoretische Nusselt-getal voor het inloopgebied (isotherme stroming) kan uit (10) worden gevonden en kan worden geschreven als:

$$\text{Nu}_{\text{th.}} = \text{konstante} \times \text{Gz}^{\frac{1}{3}} =$$

$$\text{konstante} \times \left(\frac{\phi_v}{a z} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Het verband tussen $\text{Nu}_{\text{gemeten}}$ en $\text{Nu}_{\text{theoretisch}}$ zal in dit geval als volgt te beschrijven zijn:

$$\frac{\text{Nu}_{\text{gem.}}}{\text{Nu}_{\text{th.}}} = f(A) \frac{H^4 \left(-\frac{dp}{dz} \right)}{\eta_w \phi_v} \quad (12)$$

waarin A een konstante is.

Voor een isotherme stroming door pijpen met rechthoekige doorsneden geldt het volgende verband tussen debiet en drukval:

$$\phi_v = \frac{B H^3 \left(-\frac{dp}{dz} \right)}{12 \eta} M_0 \quad [6]$$

Hierin is M_0 , die een funktie is van de verhouding H/B , de zgn. doorstroomcoëfficiënt. Deze coëfficiënt geeft de verhouding aan tussen het debiet door een pijp met rechthoekige doorsnede met afmetingen H en B, en het debiet per breedte B door twee evenwijdige platen met onderlinge afstand H, bij dezelfde drukval per lengte-eenheid. $M_0 = 0,82$ voor een H/B -verhouding van 0,274. Uit fysische overwegingen volgt, dat

$$\frac{\text{Nu}_{\text{gem.}}}{\text{Nu}_{\text{th.}}} = 1 \quad \text{als} \quad \phi_v = \frac{B H^3 \left(-\frac{dp}{dz} \right)}{12 \eta} M_0 \quad (13)$$

("isotherme stroming")

Invullen van (13) in (12) levert voor de konstante A: $A = \frac{BM_0}{12H}$.
We trachten daarom het gemeten Nusselt-getal als volgt te
korreleren:

$$\frac{Nu_{gem.}}{Nu_{th.}} = f\left(\frac{BH^3\left(-\frac{dp}{dz}\right)}{12\eta_w \phi_v} M_0\right) = f(\zeta)$$

Ook voor het gemiddelde Nusselt-getal $\langle Nu \rangle$ verwachten we een
dergelijke relatie:

$$\frac{\langle Nu \rangle_{gem.}}{\langle Nu \rangle_{th.}} = f\left(\frac{BH^3\left(-\frac{dp}{dz}\right)}{12\eta_w \phi_v} M_0\right) = f(\zeta)$$

Teneinde deze relaties te vinden is het verband tussen de dimen-
sieloze groep ζ , en Gz bepaald voor twee temperatuurverschillen
(zie grafiek 14 en de tabellen XIII en XIV).

Uit deze grafiek is te zien dat het verband tussen ζ en Gz afhanke-
lijk is van het temperatuurverschil $\Delta T = T_w - T_0$. Een zo goed
mogelijk verband tussen ζ en Gz is bepaald door bij beide waarden
van $T_w - T_0$ een zo goed mogelijk aansluitende lijn door de meet-
punten te konstrueren (Methode van de kleinste kwadraten). Voor
 $Gz = 0$ zal $\zeta = 1$ moeten zijn. Teneinde aan deze voorwaarde te kunnen
voldoen worden de beide curves voor $Gz < 25$ aangepast; de best aan-
sluitende lijn voldeed niet aan de voorwaarde $\zeta = 1$ voor $Gz = 0$.
In grafiek 15 is het verband weergegeven tussen $\langle \zeta \rangle$ en Gz , waarbij,

$$\langle \zeta \rangle = \frac{1}{Gz} \int_0^{Gz} \zeta d(Gz).$$

Als dimensieloze parameter is in de grafiek ingevoerd:

$$\frac{1}{\eta_w} \frac{d\eta_w}{dT} \Delta T.$$

In grafiek 15 is tevens het verband tussen $\frac{\langle \xi \rangle}{128/\pi}$ en Gz weerge-
geven. De grootheid $\langle \xi \rangle$ is gedeeld door $128/\pi$ om deze grootheid
te kunnen vergelijken met de waarden voor $\langle \zeta \rangle$.

Het verband tussen $\frac{Nu_{gem.}}{Nu_{th.}}$ als funktie van ζ en $\frac{\langle Nu \rangle_{gem.}}{\langle Nu \rangle_{th.}}$ als funktie van ζ is gegeven in de tabellen XV, XVI, XVII en XVIII, alsmede de grafieken 16 en 17.

TABEL XIII

Het verband tussen de dimensieloze groep $\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$ en Gz
 $(T_w - T_o) = 15^\circ C$

Gz	$\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$
1305	2,51
1061	2,03
889	2,22
651	2,26
648	2,55
562	2,22
511	2,11
448	2,48
431	2,04
415	2,24
396	1,98
337	2,12
313	2,36
309	1,55
309	2,08
285	1,98
272	2,00
251	1,95
249	1,75
218	2,66
216	1,81
211	2,04
208	2,30
191	1,84
180	1,71

Gz	$\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$
154	2,23
154	1,72
143	1,96
134	1,74
125	1,83
113	1,83
107	1,68
105	1,84
99	1,67
93	1,83
75	1,43
74	1,58
69	1,95
55	1,63
51	1,50
49	1,45
37	1,11
36	1,42
27	1,31

TABEL XIV

Het verband tussen de dimensieloze groep, $\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$ en Gz

$(T_w - T_o) = 30^\circ C.$

Gz	$\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$
1050	3,98
711	3,20
620	3,00
508	2,93
478	2,88
380	1,92
344	2,93
338	2,81
324	2,12
299	2,48
231	2,54
251	2,53
227	2,39
226	2,32

Gz	$\frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12 \eta_w \phi_v} M_o$
198	2,31
184	1,62
171	2,37
157	2,03
153	2,49
148	2,06
122	2,47
114	2,16
109	1,78
104	2,19
91	1,45
77	1,56
73	2,18
54	1,20

Gz	Nu _{gem.}	Nu _{th}	ζ	log ζ	$\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}}$	$\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}}$
205	4,73	3,8	1,94	0,2878	1,25	0,0969
173	4,61	3,6	1,87	0,2718	1,28	0,1072
126	4,36	3,45	1,76	0,2455	1,27	0,1038
109	4,23	3,35	1,72	0,2355	1,26	0,1004
87	4,01	3,2	1,66	0,2201	1,25	0,0969
77	3,89	3,15	1,62	0,2095	1,24	0,0934
60	3,66	3,1	1,56	0,1931	1,19	0,0755
42	3,55	3,0	1,50	0,1761	1,16	0,0645

Tabel XV

Meetbus met rechthoekig profiel. De correlatie voor het plaatselijk

Nusselt-getal: $T_w - T_o = 15^\circ C$

$$\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}} \text{ als functie van } \zeta = \frac{BH^3 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right)}{12 \eta_w \phi_v} M_o$$

Gz	Nu _{gem}	Nu _{th}	ζ	log ζ	$\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}}$	log $\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}}$
171	4,36	3,6	2,17	0,3365	1,21	0,0828
138	4,28	3,5	2,05	0,3118	1,22	0,0864
120	4,22	3,4	1,98	0,2967	1,24	0,0934
93	4,11	3,25	1,86	0,2695	1,26	0,1004
74	4,01	3,15	1,79	0,2529	1,27	0,1038
63	3,94	3,1	1,72	0,2355	1,27	0,1038
44	3,86	3,0	1,60	0,2041	1,25	0,0969

Tabel XVI

Meetbuis met rechthoekig profiel. De correlatie voor het plaatselijk
Nusselt-getal : $T_w - T_o = 30^\circ C$

$$\frac{Nu_{gem}}{Nu_{th}} \text{ als functie van } \zeta = \frac{BH^3 \left(-\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)}{12 \eta_u \phi_v} Mo$$

Gz	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}$	$\langle \text{Nu} \rangle$	ζ	$\log \zeta$	$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th}}}$	$\log \frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th}}}$
252	6,78	5,6	2,02	0,3054	1,21	0,0828
205	6,04	5,3	1,94	0,2878	1,14	0,0569
173	5,92	5,1	1,87	0,2718	1,16	0,0645
126	5,55	4,65	1,76	0,2455	1,19	0,0755
109	5,57	4,5	1,72	0,2355	1,24	0,0934
87	5,02	4,25	1,66	0,2201	1,18	0,0719
77	5,06	4,15	1,62	0,2095	1,22	0,0864
60	4,71	3,9	1,56	0,1931	1,21	0,0828
42	4,44	3,65	1,50	0,1761	1,22	0,0864
30	4,14	3,4	1,41	0,1492	1,22	0,0864
22	4,24	3,25	1,34	0,1271	1,30	0,1139

Tabel XVII

Meetbuis met rechthoekig profiel. De correlatie voor het gemiddelde Nusselt-getal $T_w - T_o = 15^\circ \text{C}$

$$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th}}} \text{ als functie van } \zeta = \frac{\text{BH}^3 \left(- \frac{\Delta p}{\Delta z} \right) \text{ Mo}}{12 \eta_u \phi_v}$$

TABEL XVIII

Meetbuis met rechthoekig profiel.

De korrelatie voor het gemiddelde Nusselt-getal: $T_w - T_o = 30^\circ\text{C}$.

$$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}} \text{ als functie van } \zeta = \frac{\text{BH}^3 \left(- \frac{\Delta E}{\Delta z} \right)}{12 \eta_w \phi_v} M_o$$

Gz	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}$	$\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}$	ζ	$\log \zeta$	$\frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$	$\log \frac{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{gem.}}}{\langle \text{Nu} \rangle_{\text{th.}}}$
204	6,00	5,3	2,28	0,3579	1,13	0,0531
171	5,91	5,1	2,17	0,3365	1,16	0,0645
138	5,96	4,8	2,05	0,3118	1,24	0,0934
120	5,69	4,6	1,98	0,2967	1,24	0,0934
93	5,28	4,35	1,86	0,2695	1,21	0,0828
74	5,04	4,2	1,79	0,2529	1,20	0,0792
63	4,78	3,95	1,72	0,2355	1,21	0,0828
44	4,54	3,65	1,60	0,2041	1,25	0,0969
31	4,44	3,4	1,47	0,1673	1,30	0,1139
20	4,42	3,25	1,35	0,1303	1,36	0,1335

HOOFDSTUK VI

Konklusies

Zowel voor de meetbuis met cirkelvormig profiel als voor de meetbuis met rechthoekig profiel blijken de gemeten plaatselijk en gemiddelde Nusselt-getallen boven de theoretische waarde te liggen. De empirische korrektiefactor van Sieder en Tate [8] blijkt redelijk te voldoen. Sieder en Tate vonden voor de korrektiefactor $\frac{\langle \eta \rangle}{\eta_w}$ een waarde van 0,14. Bij de uitgevoerde metingen werd voor beide meetbuizen een waarde van 0,13 gevonden. Tussen de dimensieloze getallen ξ en ζ enerzijds, en het plaatselijk Gz-getal anderzijds, bestaat geen eenduidig verband. Het verband is naar alle waarschijnlijkheid (d.m.v. $\frac{1}{\eta_w} \frac{d\eta_w}{dT} \Delta T$). Een duidelijke korrelatie tussen het theoretische Nusselt-getal en de dimensieloze getallen ξ en ζ is niet te geven.

HOOFDSTUK VII

Aanbevelingen

A. Apparatuur

De konstruktie van de watermantel is in de praktijk slecht bruikbaar. Door een gesloten watermantel te gebruiken wordt bereikt dat het water zeer snel door de watermantel gepompt kan worden waardoor de temperatuur van de wand van de meetbuis beter konstant gehouden kan worden. Eventuele calamiteiten worden echter te laat ontdekt. Doordat bijv. bij een lek in de meetbuis een volledige demontage van de buis moet plaatsvinden, werd veel tijd verloren. Het verdient aanbeveling in het vervolg een open waterbak te nemen.

B. Drukmetingen.

De resultaten, voortvloeiend uit de drukmetingen zijn onbevredigend. Er treedt een zeer grote spreiding in de metingen op. De reactie van het systeem op een drukverandering in de meetbuis is zeer langzaam. Getracht moet worden de scheidingsvaatjes met kwik en olie zo dicht mogelijk bij de drukaansluitingen te plaatsen. Ook zal gezocht moeten worden naar een nauwkeuriger methode. Vooral bij lage debieten wordt de gemaakte relatieve fout groot, omdat de drukken dan laag zijn. Het gebruik van een lichtere vloeistof dan kwik (bijv. water) is bij kleine debieten noodzakelijk.

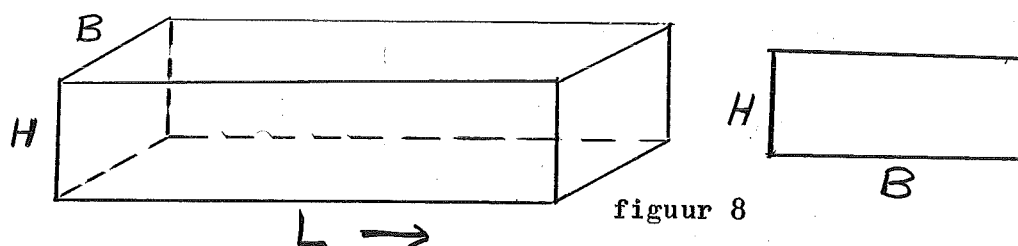
C. Te verrichten metingen

Teneinde het verband tussen de dimensieloze groepen ξ en ζ enerzijds, en het Graetz-getal anderzijds, te bepalen moeten er metingen bij meerdere temperatuurniveau's worden verricht. Dit is mede van belang om een inzicht te krijgen in de rol die de dimensieloze parameter

$$\frac{1}{\eta_w} \frac{d\eta_w}{dT} \Delta T \text{ speelt.}$$

Appendix

Bij de metingen werden een tweetal meetbuizen gebruikt, één met cirkelvormig profiel en één met rechthoekig profiel. Beide buizen werden in de lengterichting horizontaal gemonteerd. De buis met rechthoekig profiel was zodanig gemonteerd, dat de lange zijde B zich horizontaal bevond. De korte zijde H was aldus vertikaal gericht (zie onderstaande figuur).



Teneinde bij de meetbuis met cirkelvormig profiel de diameter D, en bij de andere meetbuis de afmeting H te bepalen, werden isotherme drukmetingen uitgevoerd. Bij deze isotherme drukmetingen had de door de meetbuis stromende olie precies dezelfde temperatuur als het door de watermantel stromende water. Door aflezing van het kwik-niveau in de stijgbuizen kon het verband tussen Δp (drukval) en L (lengte) worden gevonden.

Resultaten:

A Meetbuis met cirkelvormig profiel.

Berekening van de buisdiameter D geschiedde via de formule van Hagen-Poiseuille:

$$\Delta p = \frac{128}{\pi} \frac{\eta L \phi_v}{D^4}$$

Omwerking van deze formule geeft:

$$D^4 = \frac{128}{\pi} \frac{\eta}{\rho} \frac{L}{-\Delta p} \phi_m$$

Hierbij is: D = inwendige diameter van de meetbuis [m]

η = viscositeit [N.sec/m²]

L = lengte [m]

ϕ_m = debiet [kg/sec]

ρ = dichtheid [kg/m³]

Δp = drukval [N/m²]

Er werden vier isotherme drukmetingen verricht bij verschillende temperaturen en olie-debiten. Het verband tussen Δp en L is weergegeven in *grafieken* 18,19,20,21.

Verdere gegevens zijn verwerkt in tabel XIX

Bij verdere berekeningen werd voor D de waarde $12,9 \times 10^{-3} \text{ m}$ gebruikt.

B Meetbuis met rechthoekig profiel.

Vóór de montage van de meetbuis werden de afmetingen H en B bepaald met een schuifmaat. Dit gaf als resultaat: $H = 6,8 \text{ mm}$ en $B = 26,6 \text{ mm}$. Bij de nadien uitgevoerde isotherme drukmetingen werd gebruik gemaakt van de relatie:

$$\phi_v = \frac{1}{12} \frac{-\Delta p \cdot B \cdot H^3 M_o}{\eta L} \quad (\text{zie lit. [6]})$$

Omwerking van deze relatie geeft:

$$BH^3 M_o = \frac{12 \phi_m \eta L}{\rho \cdot -\Delta p}$$

Hierin is:

B = grootste karakteristieke lengte-eenheid $\left[\begin{smallmatrix} \text{m} \end{smallmatrix} \right]$

H = kleinste karakteristieke lengte-eenheid $\left[\begin{smallmatrix} \text{m} \end{smallmatrix} \right]$

M_o = doorstroomcoëfficiënt.

Deze grootheid M_o geeft de faktor aan waarmee het debiet afwijkt van dat door een smalle spleet met dezelfde kleinste afmeting.

Voor een rechthoek geldt $M_o = 1 - 0,63 H/B$

ϕ_m = debiet kg/sec

η = viscositeit $\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$

ρ = dichtheid kg/m^3

$-\Delta p$ = drukval N/m^2

In totaal werden drie isotherme drukmetingen uitgevoerd. Het gevonden verband tussen Δp en L is weergegeven in *grafieken* 22,23 en 24.

Voor verdere gegevens zie tabel XX

Indien aangenomen wordt dat de met de meetschuif gemeten grootheid B ($26,6 \times 10^{-3} \text{ m}$) juist is, volgt uit de drie gemeten waarden van

$BH^3 M_0$ een gemiddelde waarde van $7,4 \times 10^{-3}$ voor H. Deze waarden voor H en B zijn bij de verdere berekeningen gebruikt. Het vinden van een hogere waarde voor H dan aanvankelijk gemeten was, is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat er uitbuiging optreedt. De hydrodynamica in de buis zal weinig veranderen. De hogere waarde voor H geeft een verhoging van 6% voor de waarde van $\langle Nu \rangle$, berekend via de formule:

$$\langle Nu \rangle = \frac{\phi_m}{2\rho aL} \left(\frac{H/B}{1+H/B} \right) \ln \left(\frac{T_w - T_o}{T_w - \langle T_e \rangle} \right).$$

TABEL ~~XIX~~ Isotherme drukmetingen.

a. Meetbuis met cirkelvormig profiel.

	Meting no.			
	1	2	3	4
Δp (N/m ²)	41583,4	39717,4	66640,0	132613,6
L (m)	$72,5 \cdot 10^{-2}$	$87,5 \cdot 10^{-2}$	1,00	1,00
η (N.sec/m ²)	4,60	5,70	6,25	6,05
ϕ_m (kg/sec)	$5,98 \cdot 10^{-3}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$13,3 \cdot 10^{-3}$
ρ (kg/m ³)	921	922	921	921
D ⁴ (m ⁴)	$2,76 \cdot 10^{-8}$	$2,76 \cdot 10^{-8}$	$2,68 \cdot 10^{-8}$	$2,76 \cdot 10^{-8}$
T (°C)	22,4	20,8	21,9	22,1
Gz	57	36	60	140
D (m)	$12,9 \cdot 10^{-3}$	$12,9 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$	$12,9 \cdot 10^{-3}$

TABEL ~~XX~~ Isotherme drukmetingen.

b. Meetbuis met rechthoekig profiel.

		Meting no.		
		1	2	3
Δp	(N/m ²)	88525,8	54529,2	39584,2
L	(m)	1,00	1,00	1,00
η	(N·sec/m ²)	4,80	4,80	4,26
ϕ_m	(kg/sec)	12,266·10 ⁻³	7,633·10 ⁻³	6,292·10 ⁻³
ρ	(kg/m ³)	919	919	919
T	(°C)	23,75	23,7	24,55
Gz		117	73	60
BH ³ M _o		8,68·10 ⁻⁹	8,77·10 ⁻⁹	8,84·10 ⁻⁹
B	(m)	26,6·10 ⁻³	26,6·10 ⁻³	26,6·10 ⁻³
H	(m)	7,3·10 ⁻³	7,4·10 ⁻³	7,4·10 ⁻³
M _o		0,83	0,83	0,83

HOOFDSTUK IX

SYMBOLENLIJST

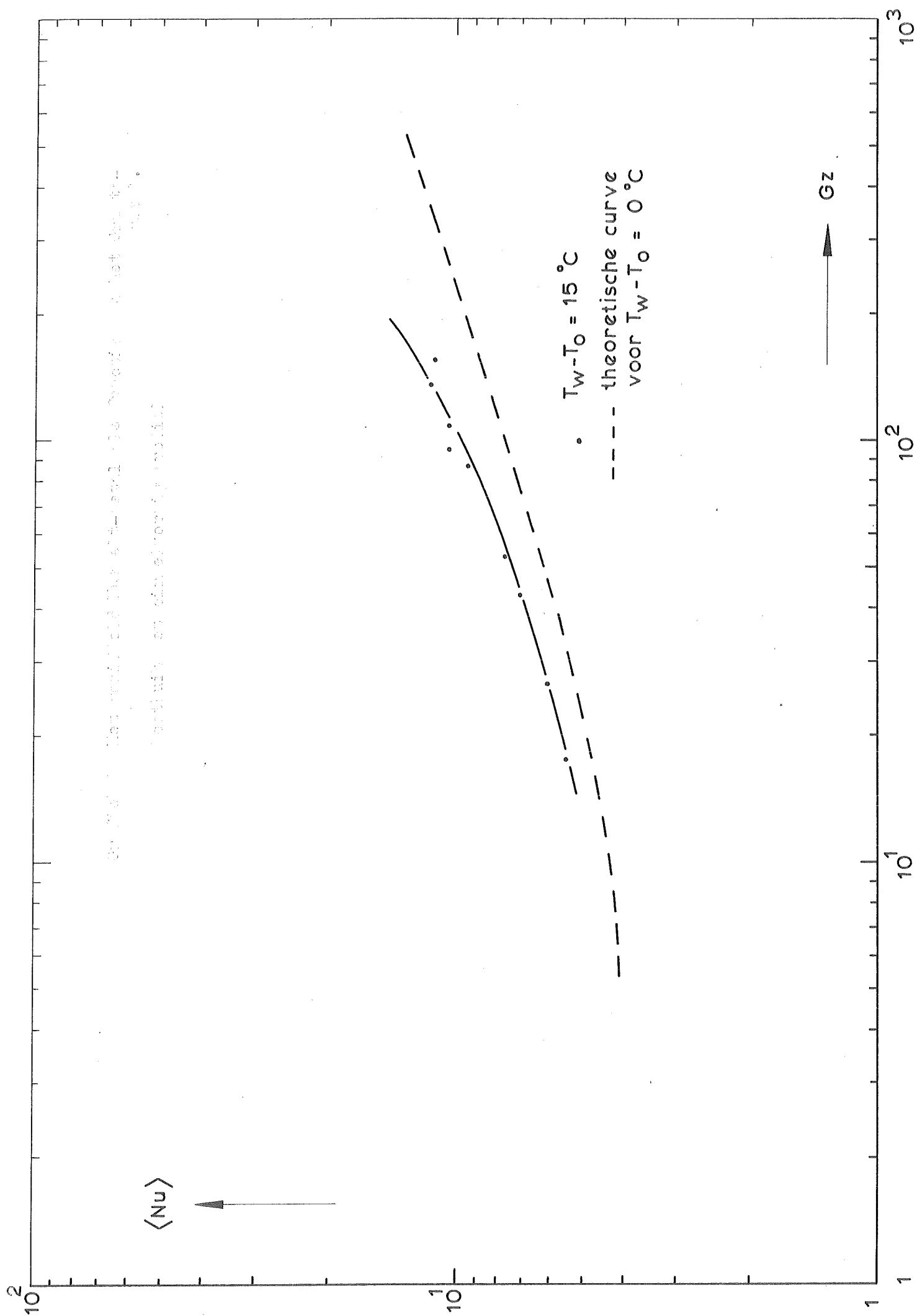
A	constante
a	temperatuurvereffiningscoëfficiënt (m^2/sec)
a	constante
B	grootste karakteristieke afmeting van de meetbuis met recht-hoekig profiel (m)
b	constante
c _p	soortelijke warmte ($J/kg^{\circ}C$)
D	diameter (m)
Gz	getal van Graetz
H	Kleinste karakteristieke afmeting van de meetbuis met recht-hoekig profiel (m)
L	lengte van de meetbuis (m)
M _o	doorstroomcoëfficiënt
Nu	getal van Nusselt
<Nu>	gemiddeld Nusselt-getal
<Nu> _{gem}	gemeten gemiddeld Nusselt-getal
<Nu> _{th}	theoretisch gemiddeld Nusselt-getal
Nu _{gem}	gemeten plaatselijk Nusselt-getal
Nu _{th}	theoretisch plaatselijk Nusselt-getal
p	druk (N/m^2)
R	straal van de meetbuis met cirkelvormig profiel
s	helling van het snelheidsprofiel in de thermische grenslaag
T	temperatuur ($^{\circ}C$ of $^{\circ}K$)
T _o	temperatuur op plaats $z = 0$ ($^{\circ}C$ of $^{\circ}K$)
T _w	wandtemperatuur ($^{\circ}C$ of $^{\circ}K$)
<T>	transportgemiddelde temperatuur ($^{\circ}C$ of $^{\circ}K$)
<T _e >	transportgemiddelde eindtemperatuur ($^{\circ}C$ of $^{\circ}K$)
V _x	snelheid in de x-richting (m/sec)
V _y	snelheid in de y-richting (m/sec)
V _z	snelheid in de z-richting (m/sec)
x	richtingscoëfficiënt x-richting (m)
y	richtingscoëfficiënt y-richting (m)
z	richtingscoëfficiënt z-richting (m)

α	warmteoverdrachtscoëfficiënt ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
$\langle \alpha \rangle$	gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
Δp	verandering in de druk (N/m^2)
Δz	lengteverschil in de z-richting (m)
$\Delta \theta$	gemiddelde relatieve temperatuurvereffening
$\Delta \theta_h$	relatieve harttemperatuurvereffening
ζ	dimensieloze groep $(\zeta = \frac{BH^3(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{12\eta_w \phi_v} M_o)$
$\langle \zeta \rangle$	dimensieloze groep $(\langle \zeta \rangle = \frac{1}{Gz} \int_0^{Gz} \zeta d(Gz))$
η	viscositeit (N sec/m^2)
η_w	viscositeit aan de wand (N.sec/m^2)
$\langle \eta \rangle$	gemiddelde viscositeit bij een temperatuur $\langle T \rangle = \frac{T_o + \langle T_e \rangle}{2} \quad (\text{N.sec/m}^2)$
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
ξ	dimensieloze groep $(\xi = \frac{D^4(-\frac{\Delta p}{\Delta z})}{\eta_w \phi_v})$
$\langle \xi \rangle$	dimensieloze groep $(\langle \xi \rangle = \frac{1}{Gz} \int_0^{Gz} \xi d(Gz))$
ρ	soortelijke massa (kg/m^3)
ϕ_m	massadebiet (kg/sec)
ϕ_v	volumedebiet (m^3/sec)
ϕ_w''	warmtestroomdichtheid ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

HOOFDSTUK X

LITERATUURLIJST

- [1] W.M. Kays; Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York (1966), blz. 102 e.v.
- [2] J. Schenk; Fysische Transportverschijnselen II, kollegediktaat (1966)
- [3] E.R.G. Eckert, R.M. Drake; Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill New York (1959), blz. 167 e.v.
- [4] S.R. Montgomery, P. Wibuswas; Proc. Third Int. Heat Transfer Conf. , August 7-12, 1968, Chicago. Volume I, blz. 104-113.
- [5] M. L        ; Ann. Mines (12) 13 (1928), blz. 276 e.v.
- [6] W.J. Beek, D.B. Holmes; Aspecten van de polymeerverwerking, b.o.-kollege (1964-1965)
- [7] R.H.E. Fierens, afstudeerverslag - Laboratorium voor Fysische Technologie, T.H.-Delft, juni 1968
- [8] E.N. Sieder, G.E. Tate; Ind. Engng Chem. 28 1429 (1936)



10²

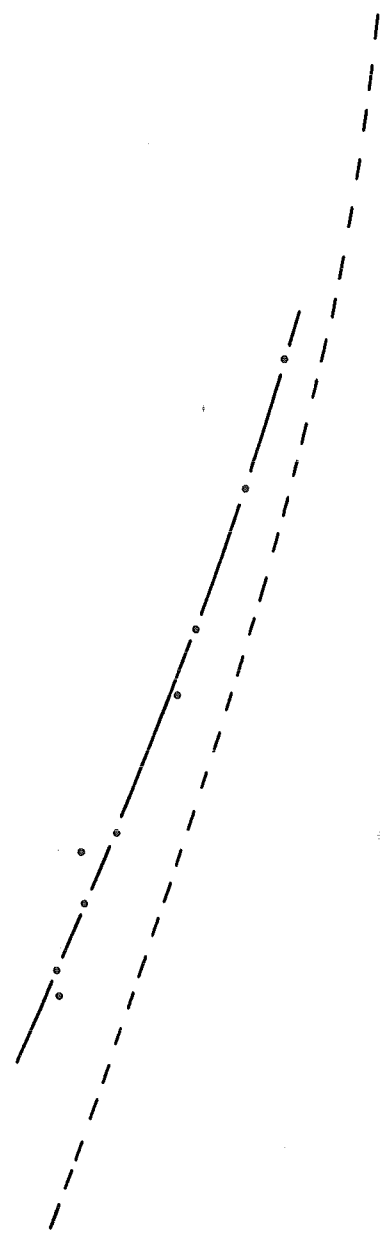
$\langle Nu \rangle$

$\frac{\langle v \rangle D^2}{\alpha L}$

De tabel geeft de berekende en gemiddelde Nusselt getallen weer. $\langle v \rangle$ is de gemiddelde snelheid in m/sec.

De tabel geeft de berekende en gemiddelde Nusselt getallen weer.

$T_W - T_0 = 15^\circ \text{C}$
----- theoretische curve
voor $T_W - T_0 = 0^\circ \text{C}$



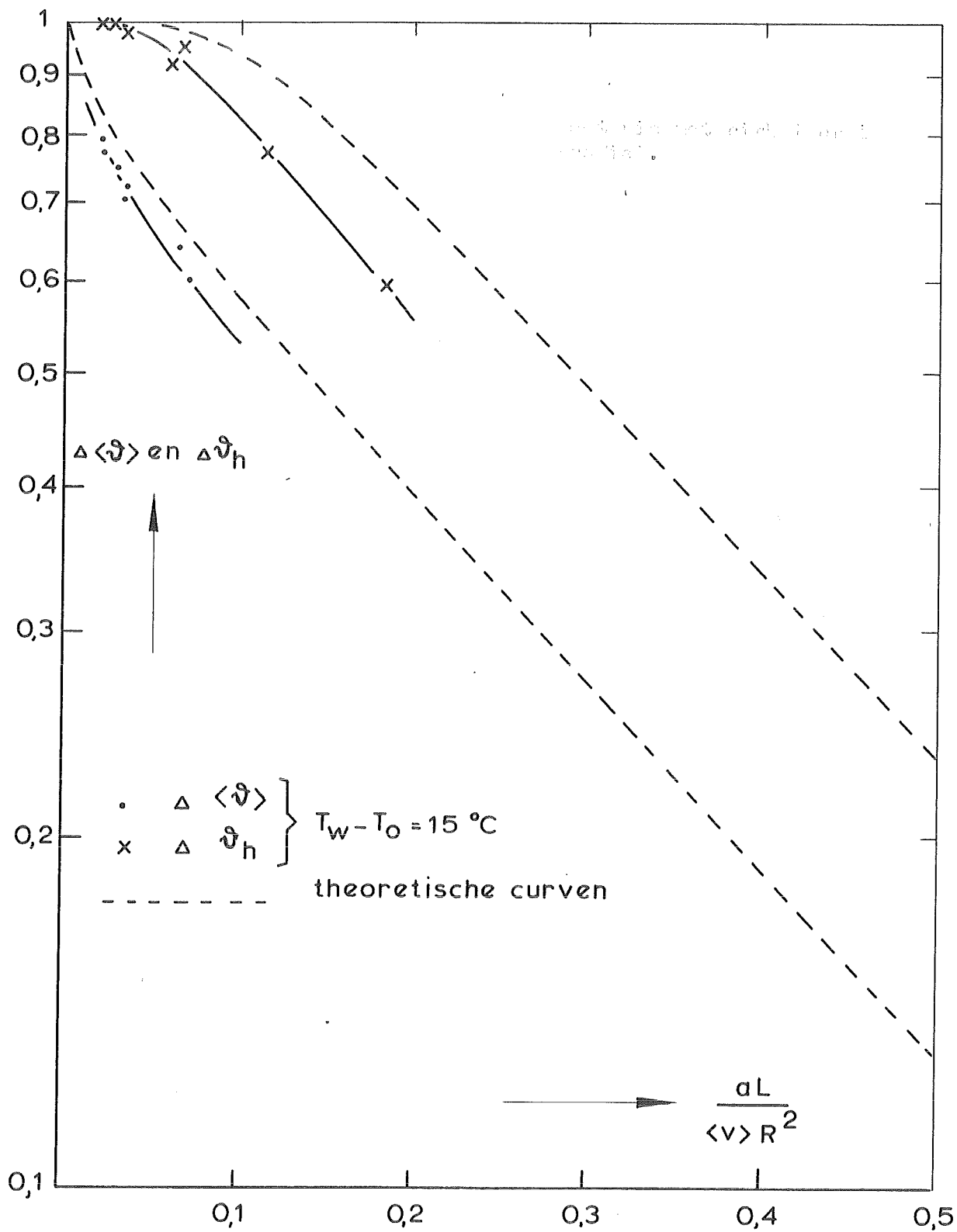
$\frac{\alpha L}{\langle v \rangle D^2}$

10⁻³

10⁻²

10⁻¹

1



op fig. 4 de verhouding $\frac{aL}{\langle v \rangle R^2}$ op de x- as en de verhouding $\frac{\Delta \langle \vartheta \rangle}{T_W - T_0}$ op de y- as. De theoretische curven zijn getrokken uit de vergelijkingen (1) en (2).

N_u

Metode: Het is de bedoeling de waarde van N_u te bepalen voor een gegeven Gz .

MEETBUIS MET CIRKELVORMIG PROFIEL. $T_w - T_o = 15^\circ C$

--- THEORETISCHE OPLOSSING

Gz

1

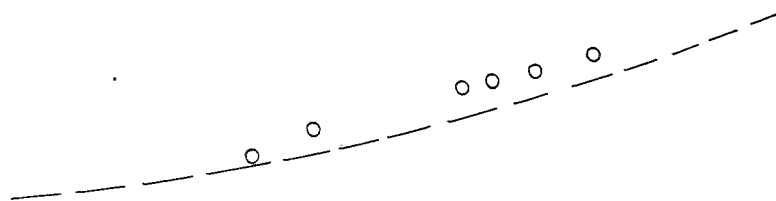
10^1

10^2

10^3

10^1

10^2



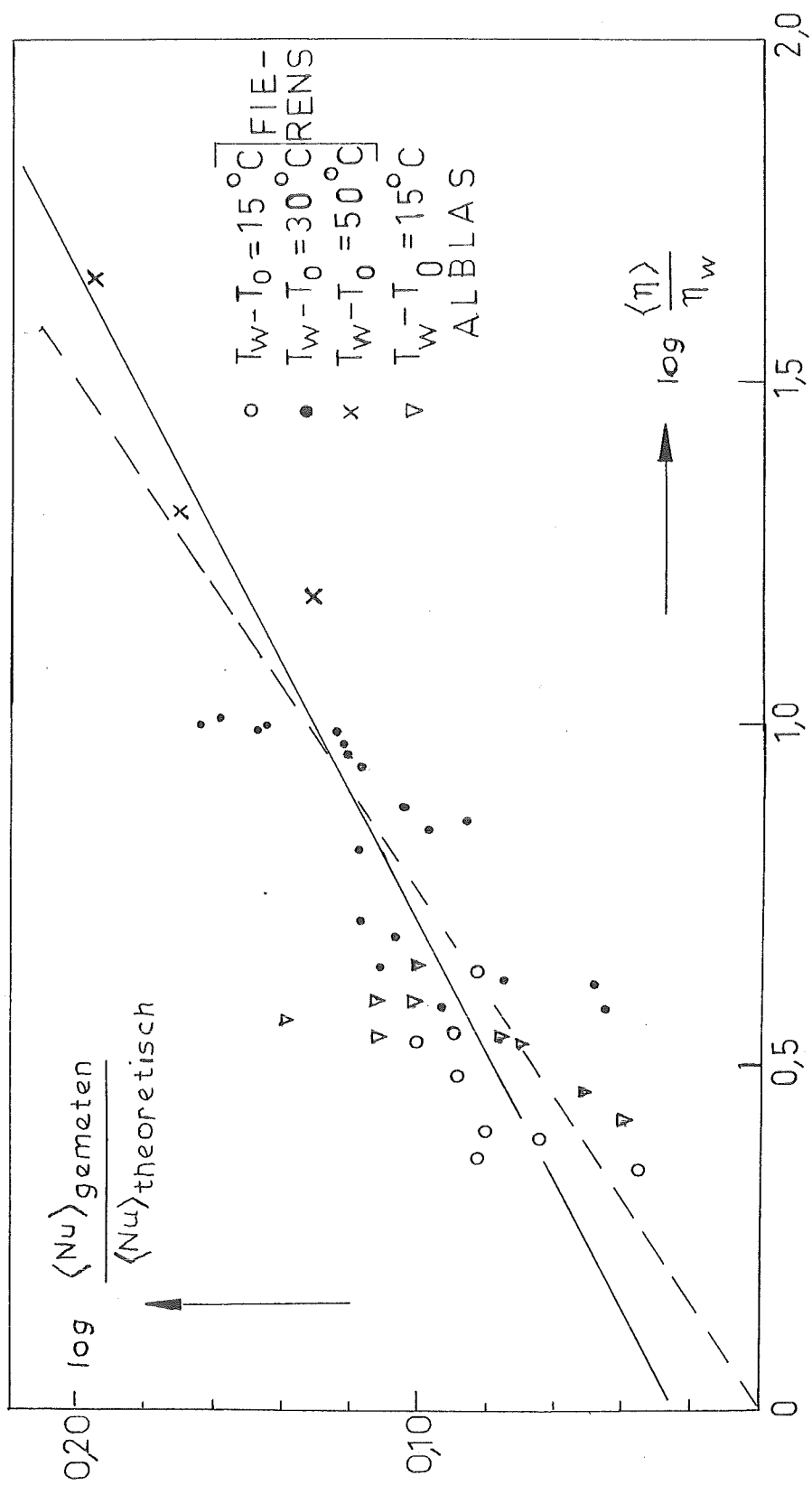


Fig. 5. Comparison of experimental and theoretical results.

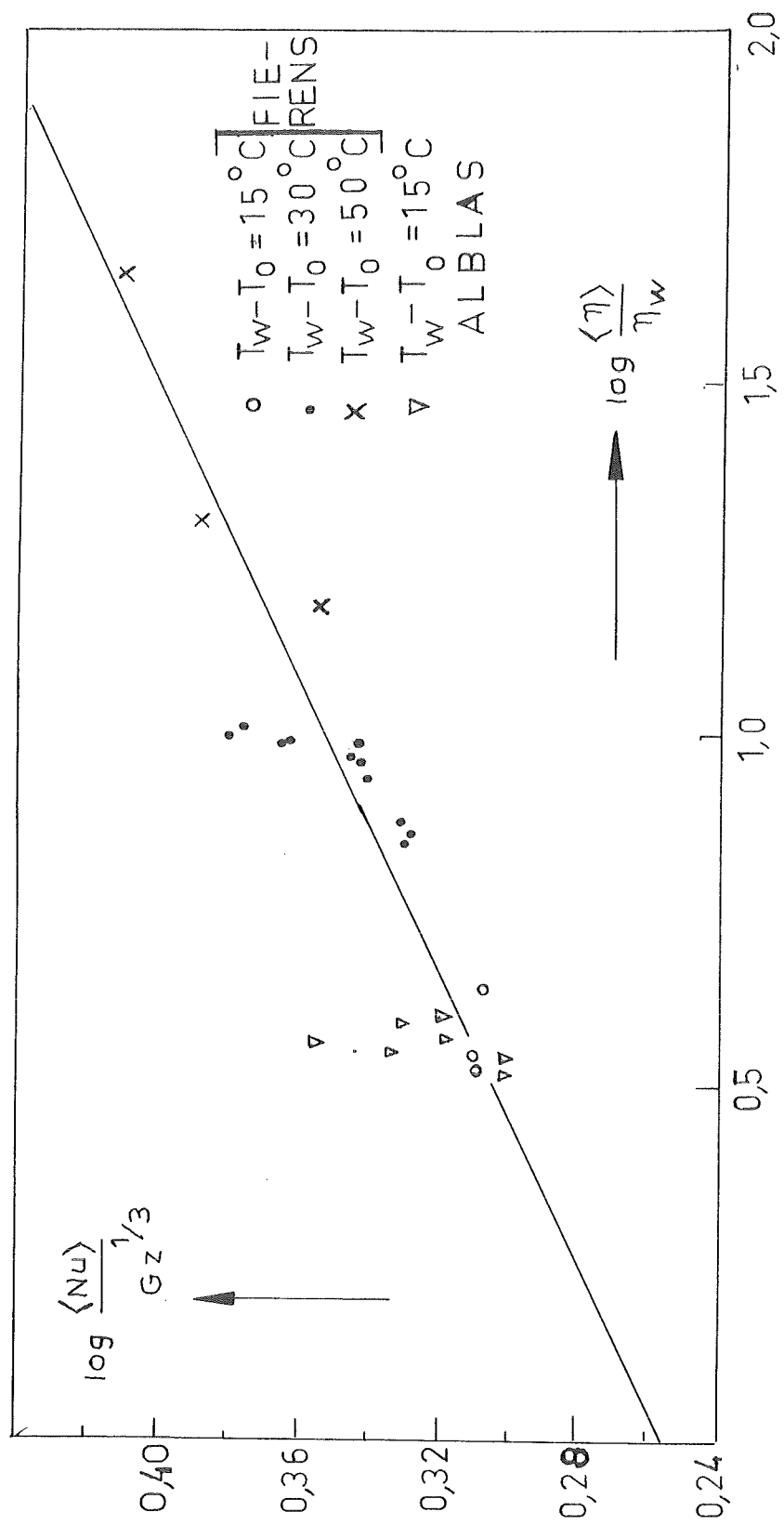
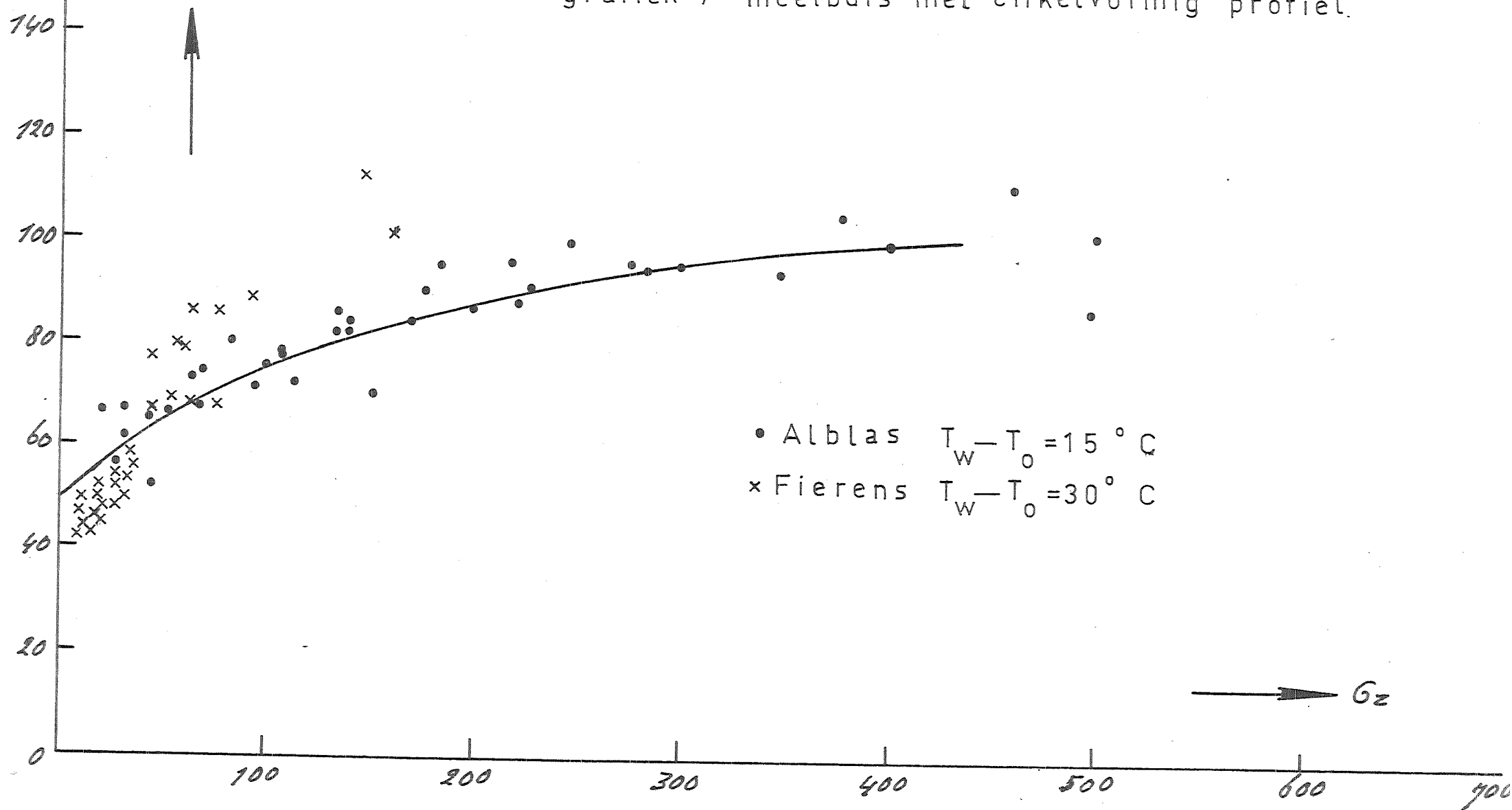


Fig. 1. The time-averaged Nusselt number.

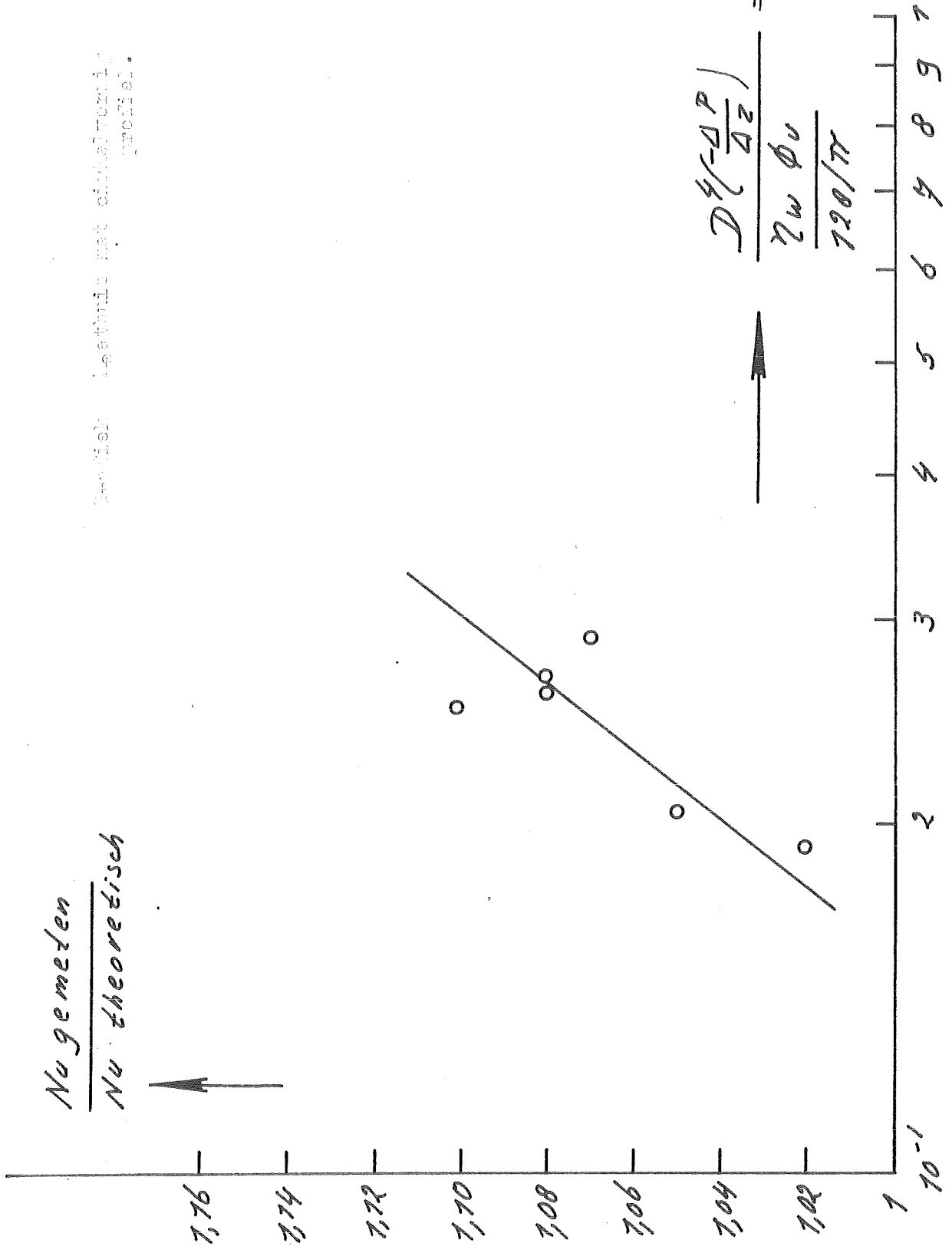
$$\frac{D^4 \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)}{2w \phi_v} = \xi$$

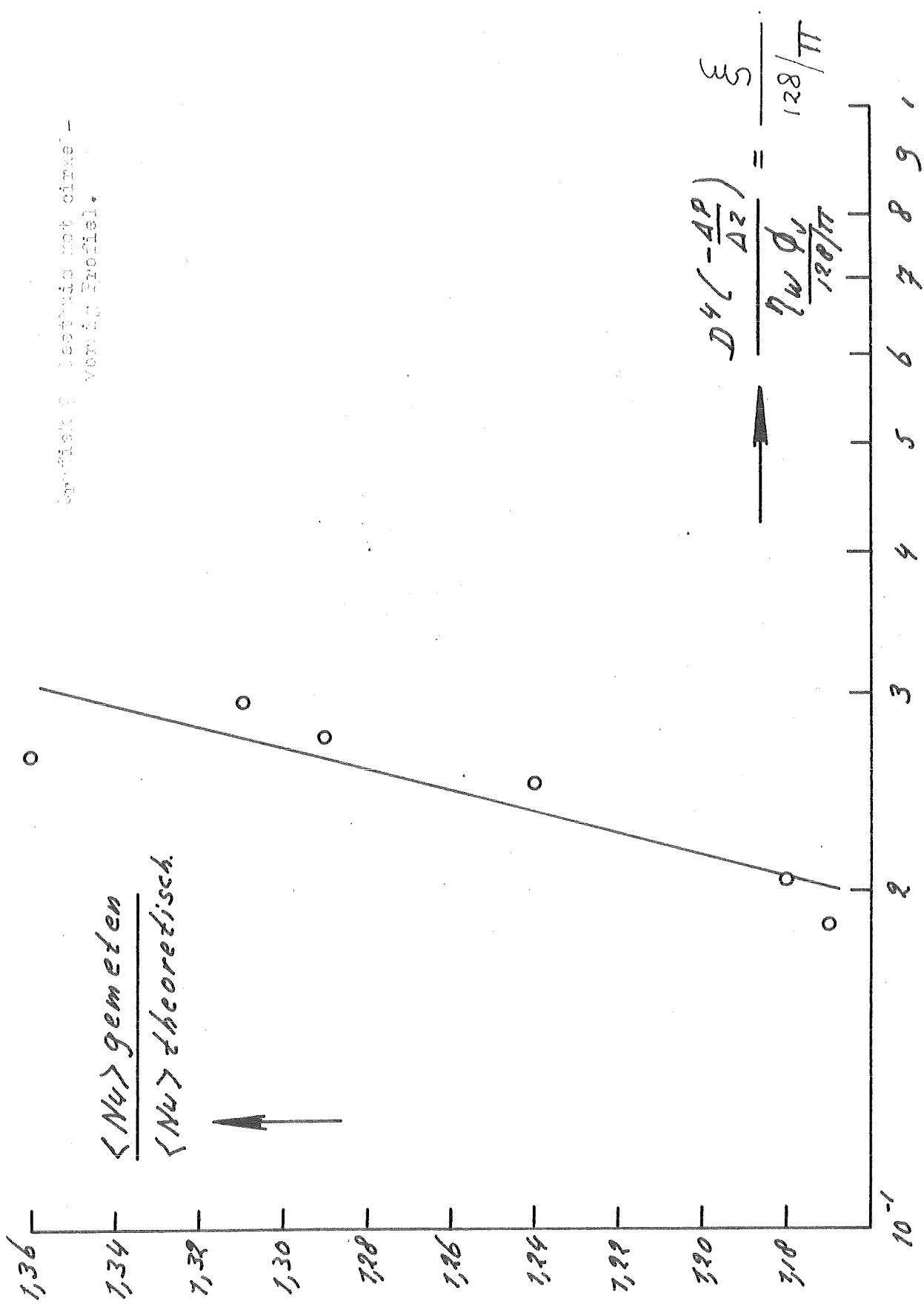
grafiek 7 meetbuis met cirkelvormig profiel.



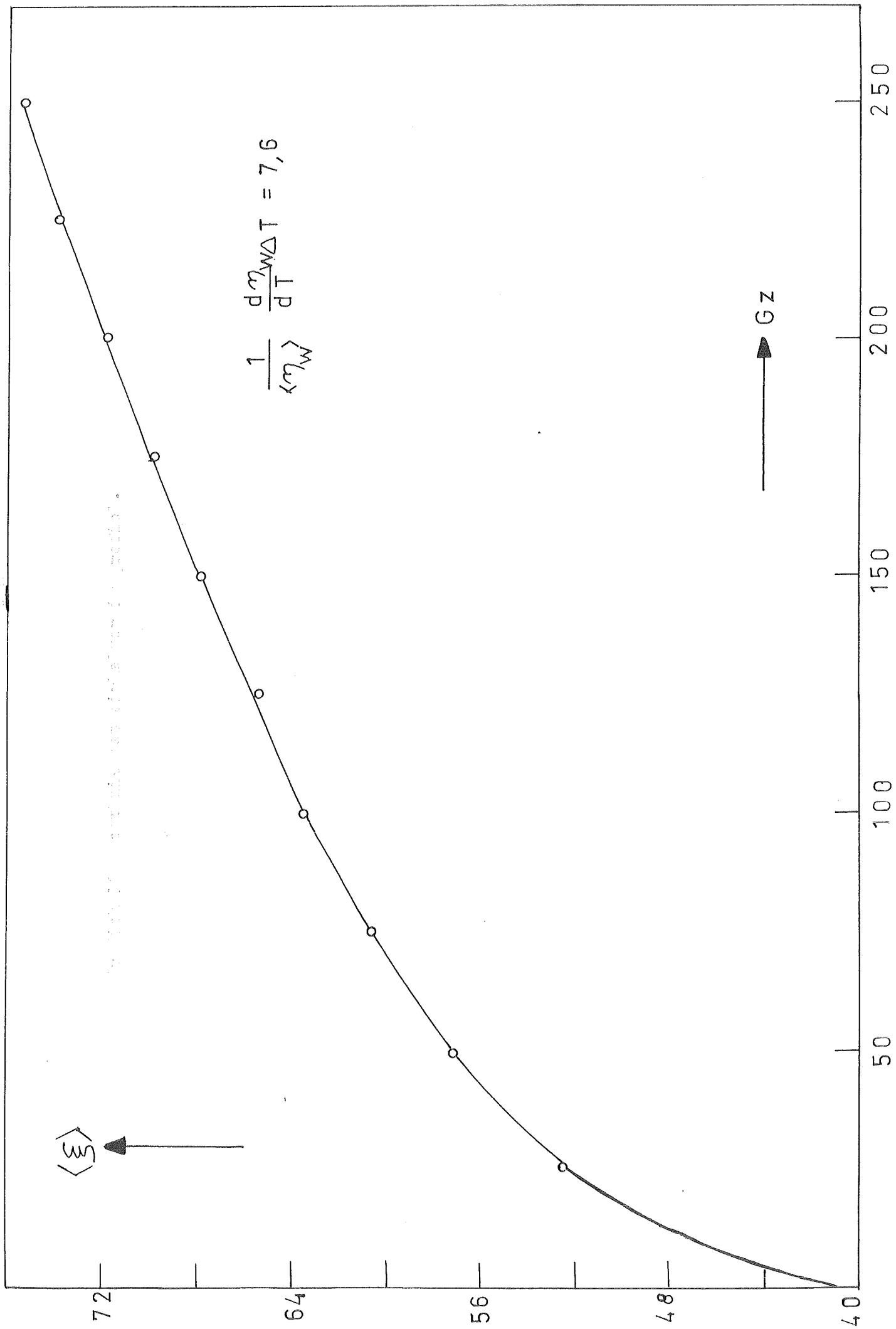
$\frac{Nu_{gemeten}}{Nu_{theoretisch}}$

profiel: leethuis met oorseltoorn
profiel.





Graphisch: Bestimmung des "circumferential" Profils.



Stapfel II Het goudhoudt Russelt etal als
 profle van het Grachtetel.

-- Theoretische oplossing $\Delta T = 0$

Profiel met rechtehoekig profiel.

□ $T_w - T_0 = 30^\circ C$

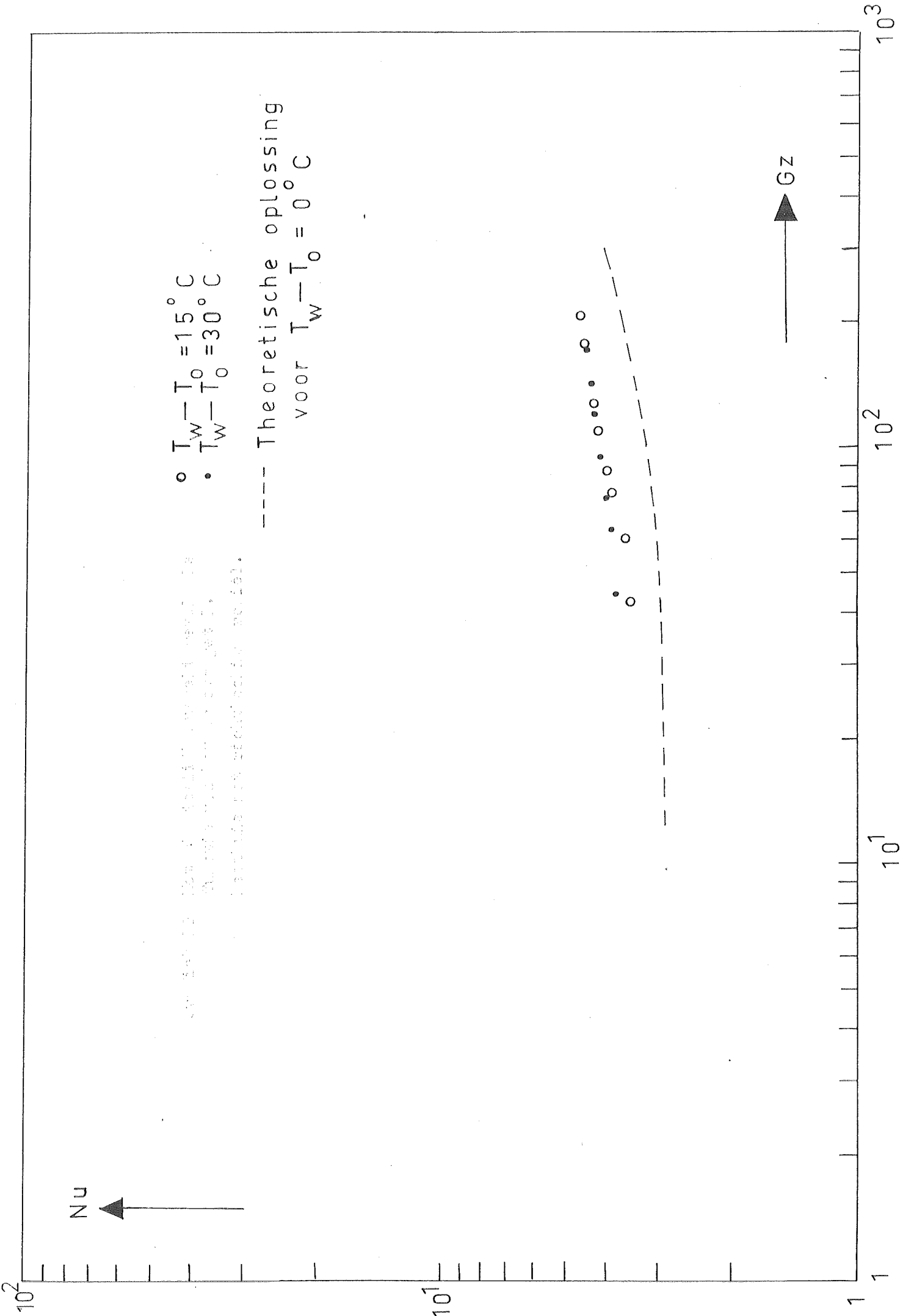
○ $T_w - T_0 = 15^\circ C$

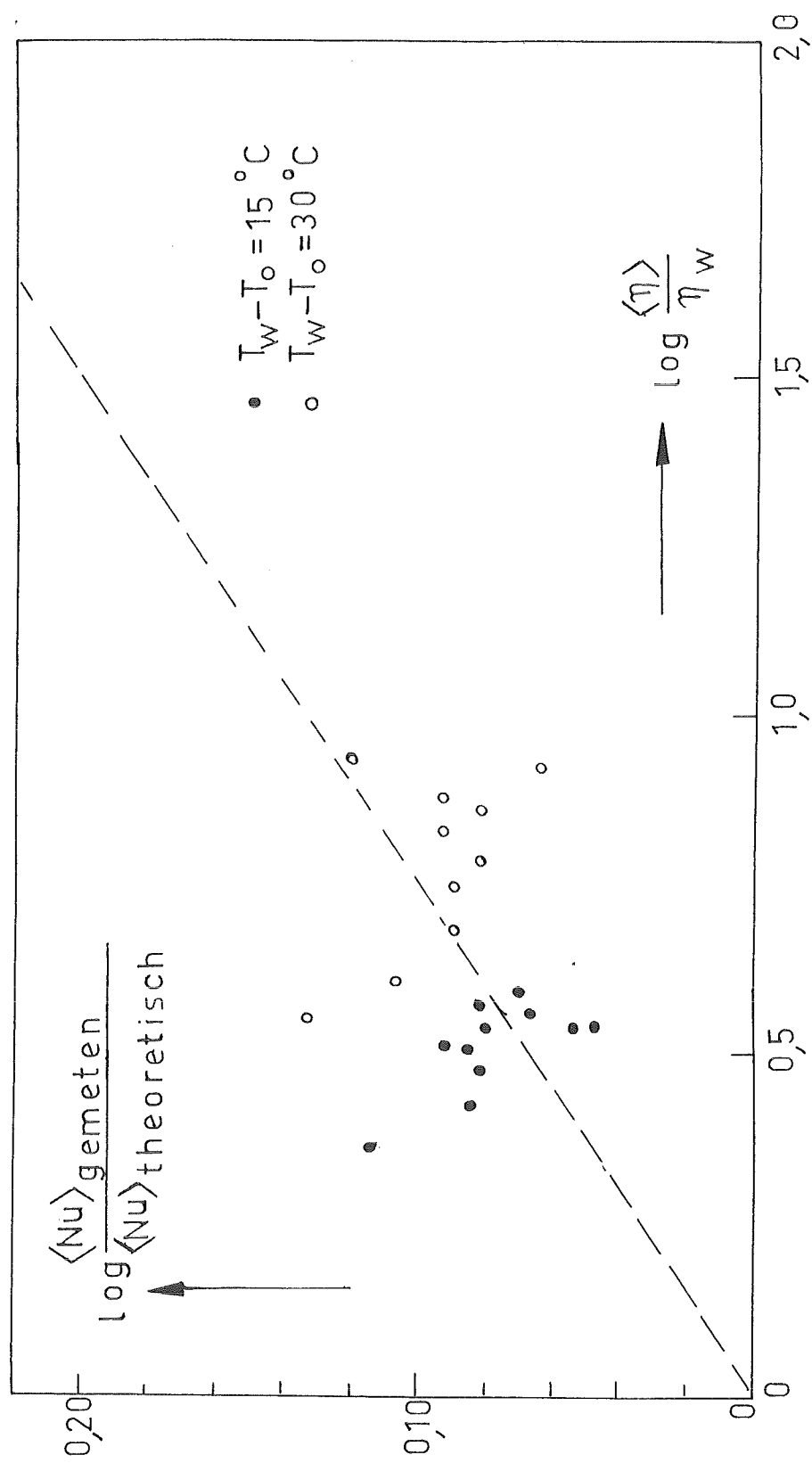
$\langle Nu \rangle$



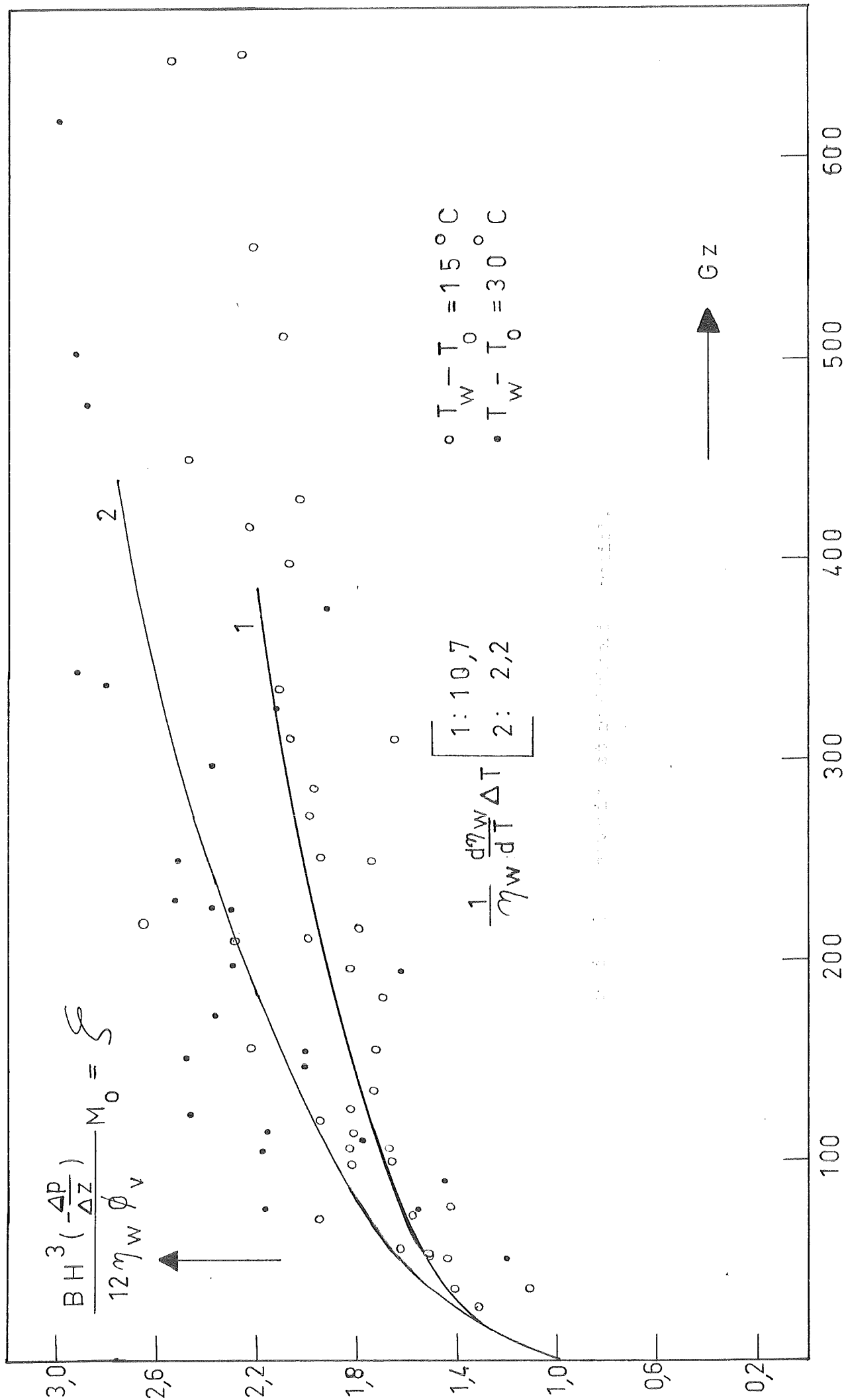
Gz

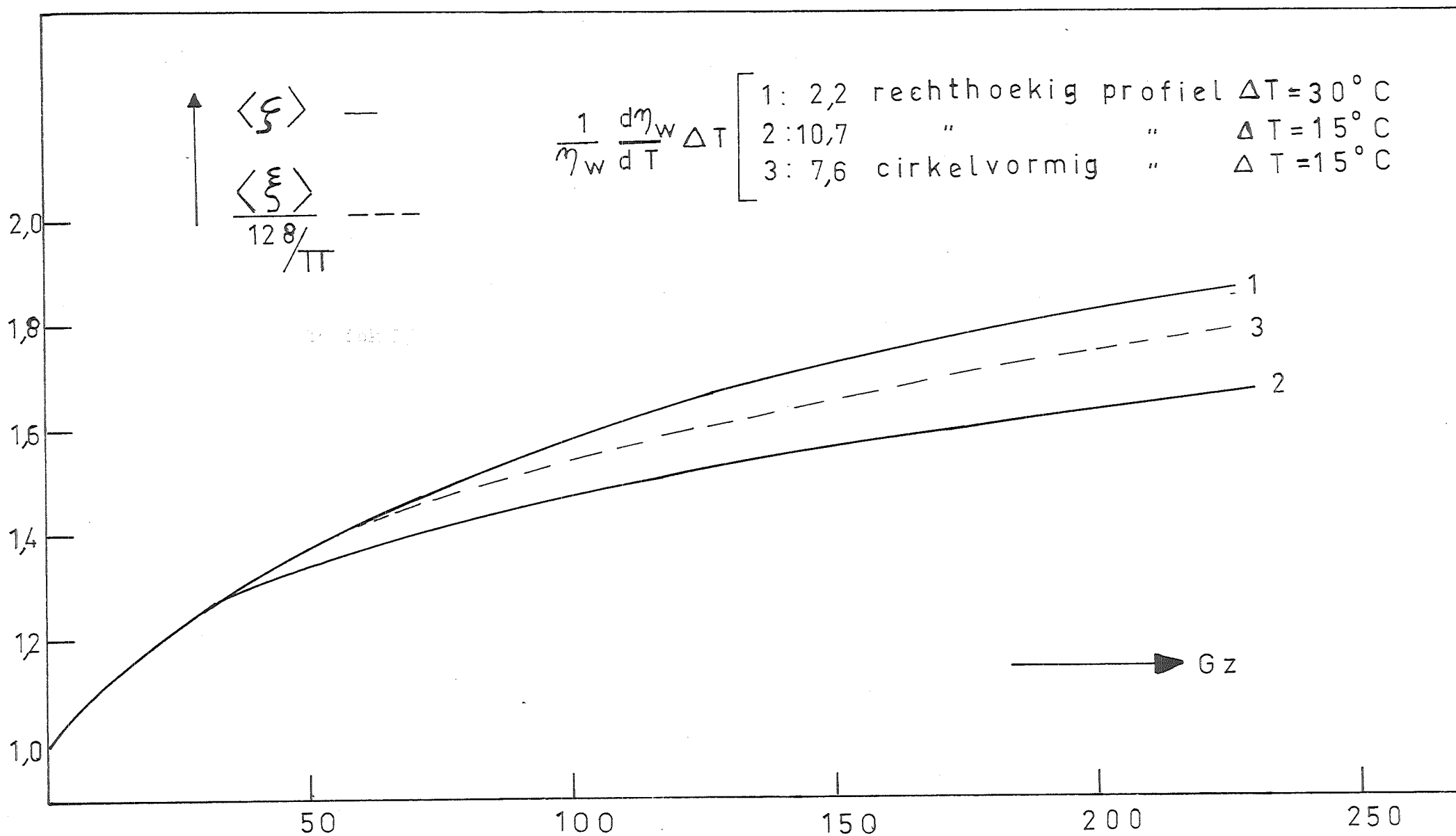


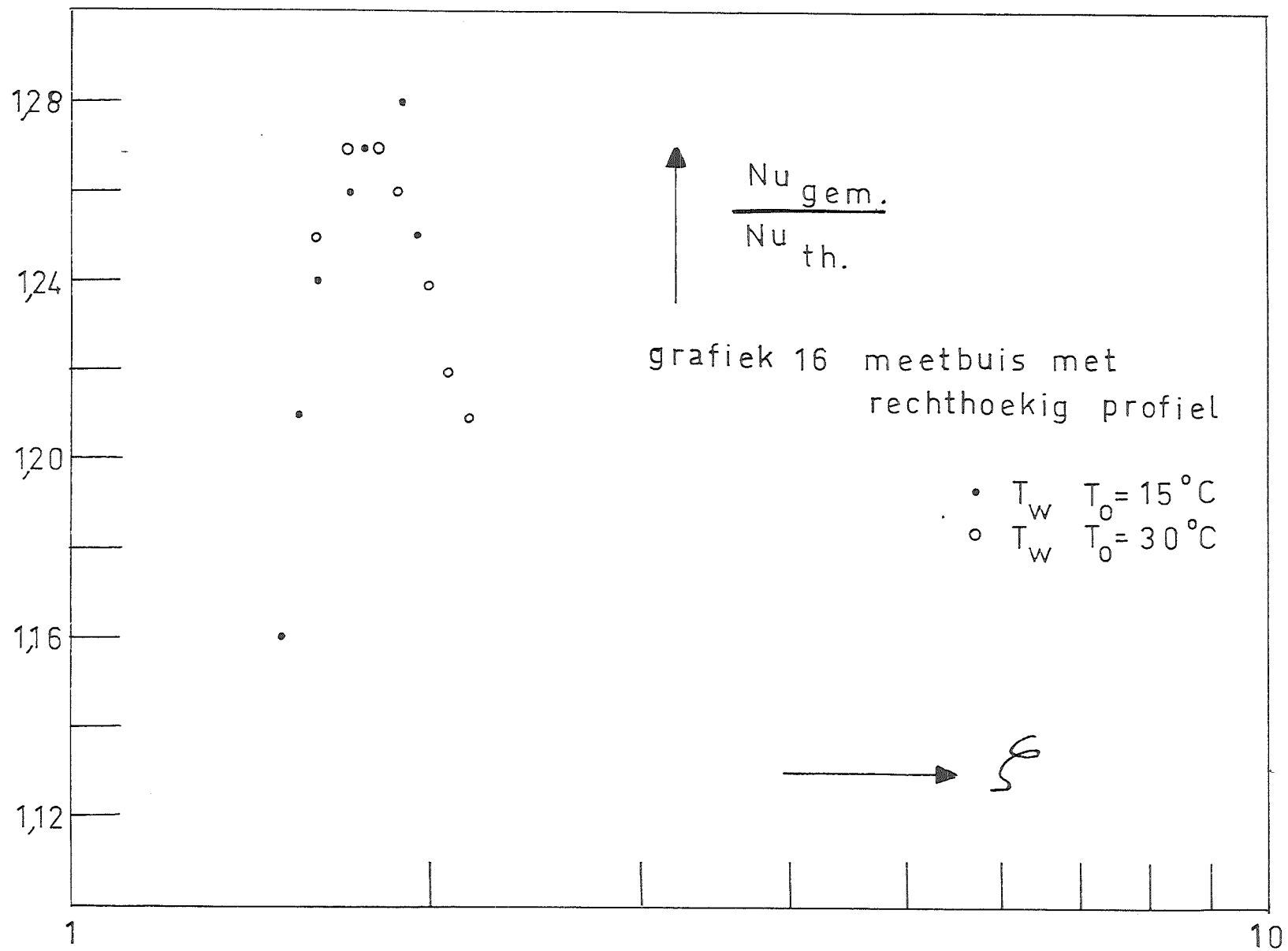


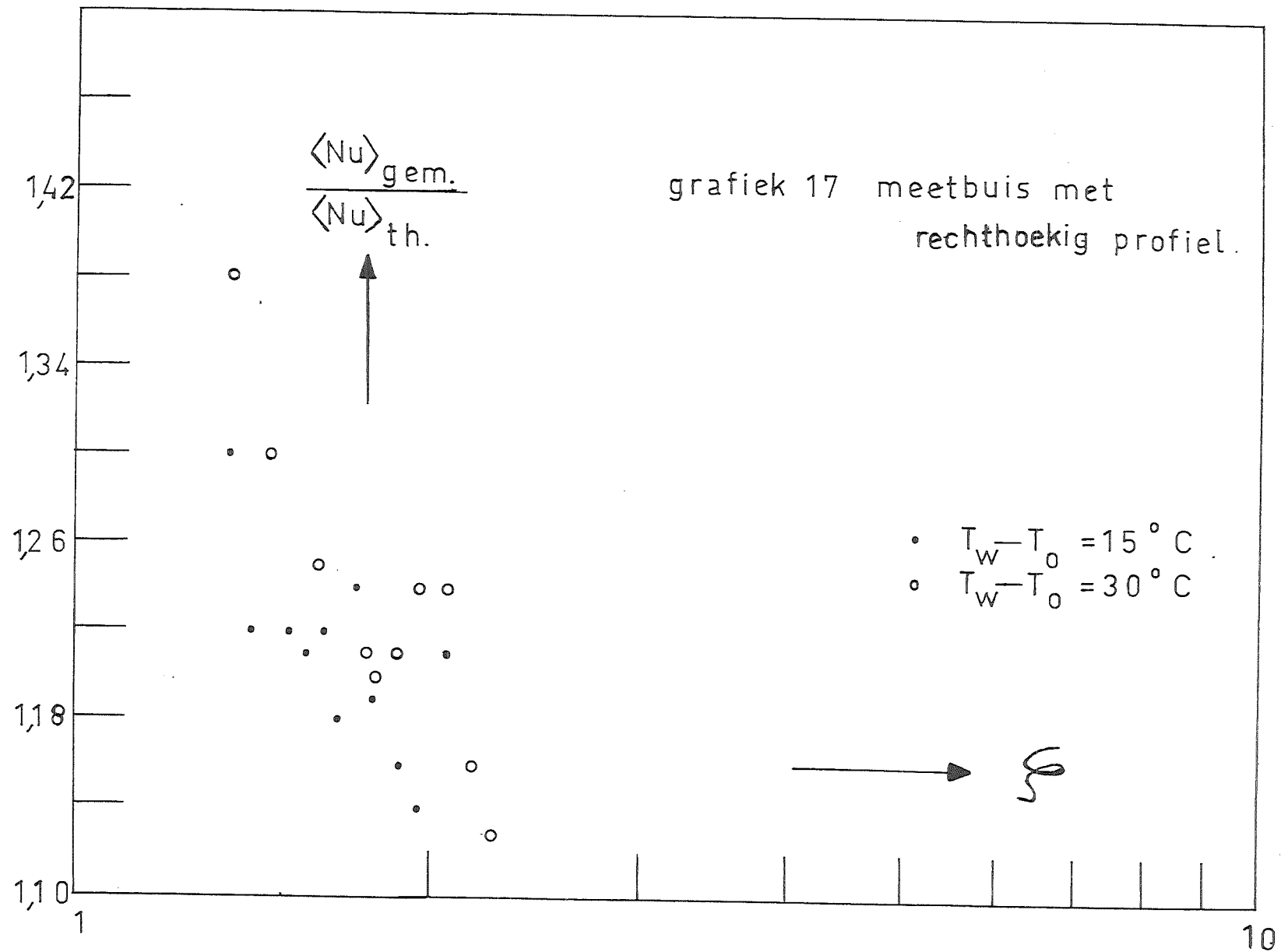


grafiek 13 meetbuis met rechthoekig profiel.







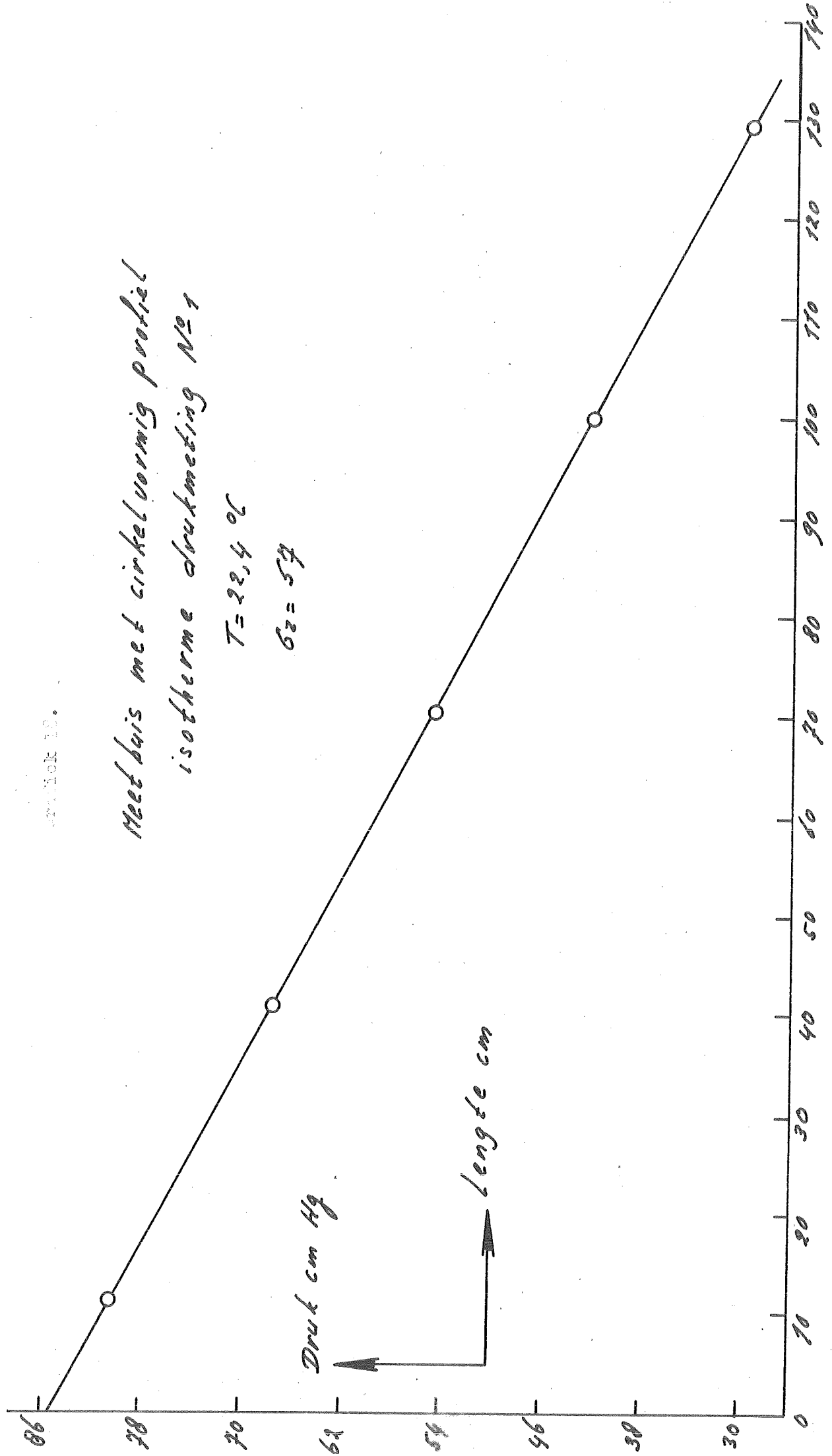


opdracht 10.

Meetbuis met cirkelvormig profiel
isotherme drukmeting №1

$T = 22,4^{\circ}\text{C}$

$\sigma_2 = 57$

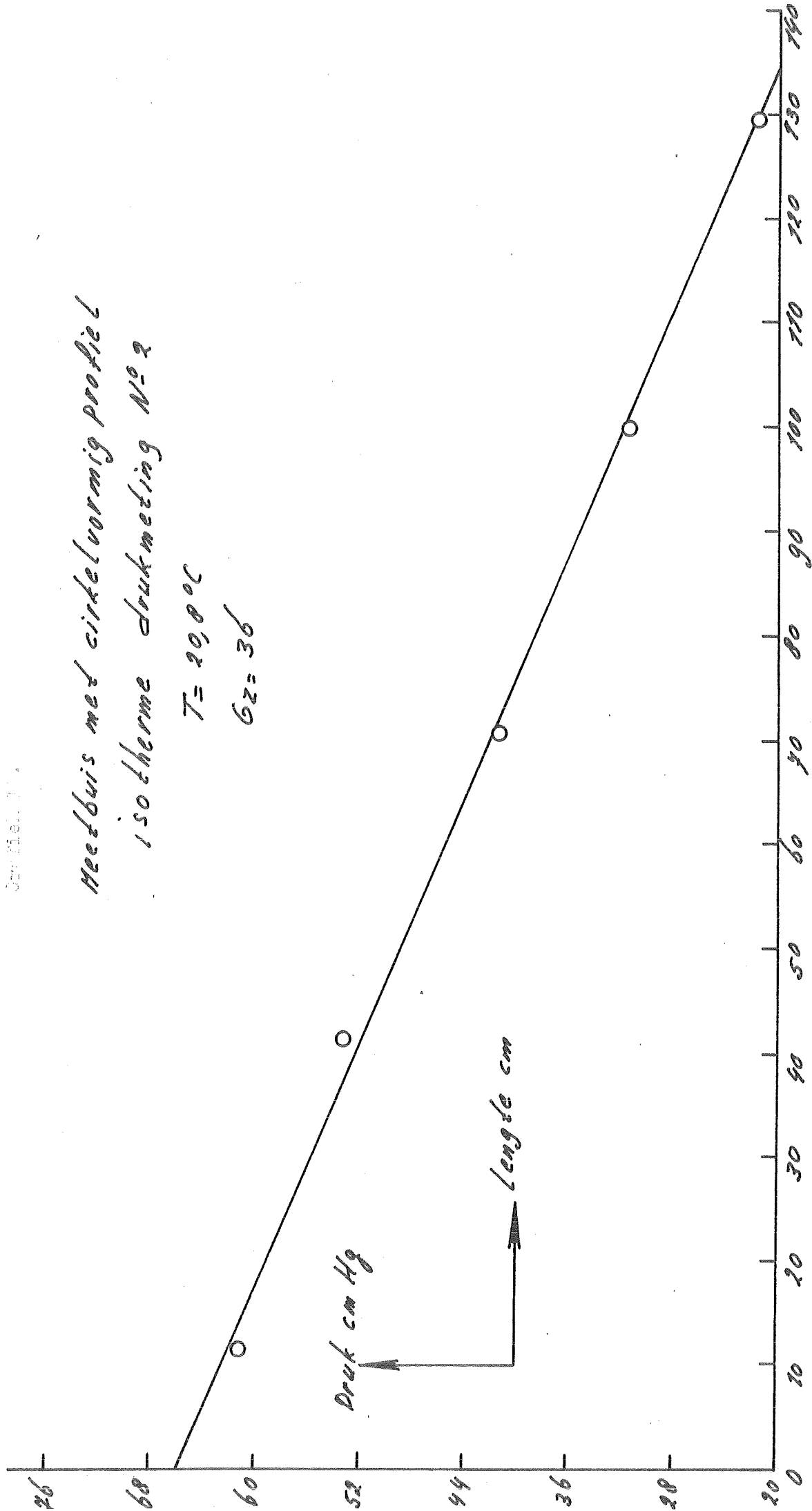


Onderwerp: ...

Heetbuis met cirkelvormig profiel
isotherme drukmeting N^o 2

$T = 20,0^{\circ}\text{C}$

$Gz = 36$



Op Blad 20.

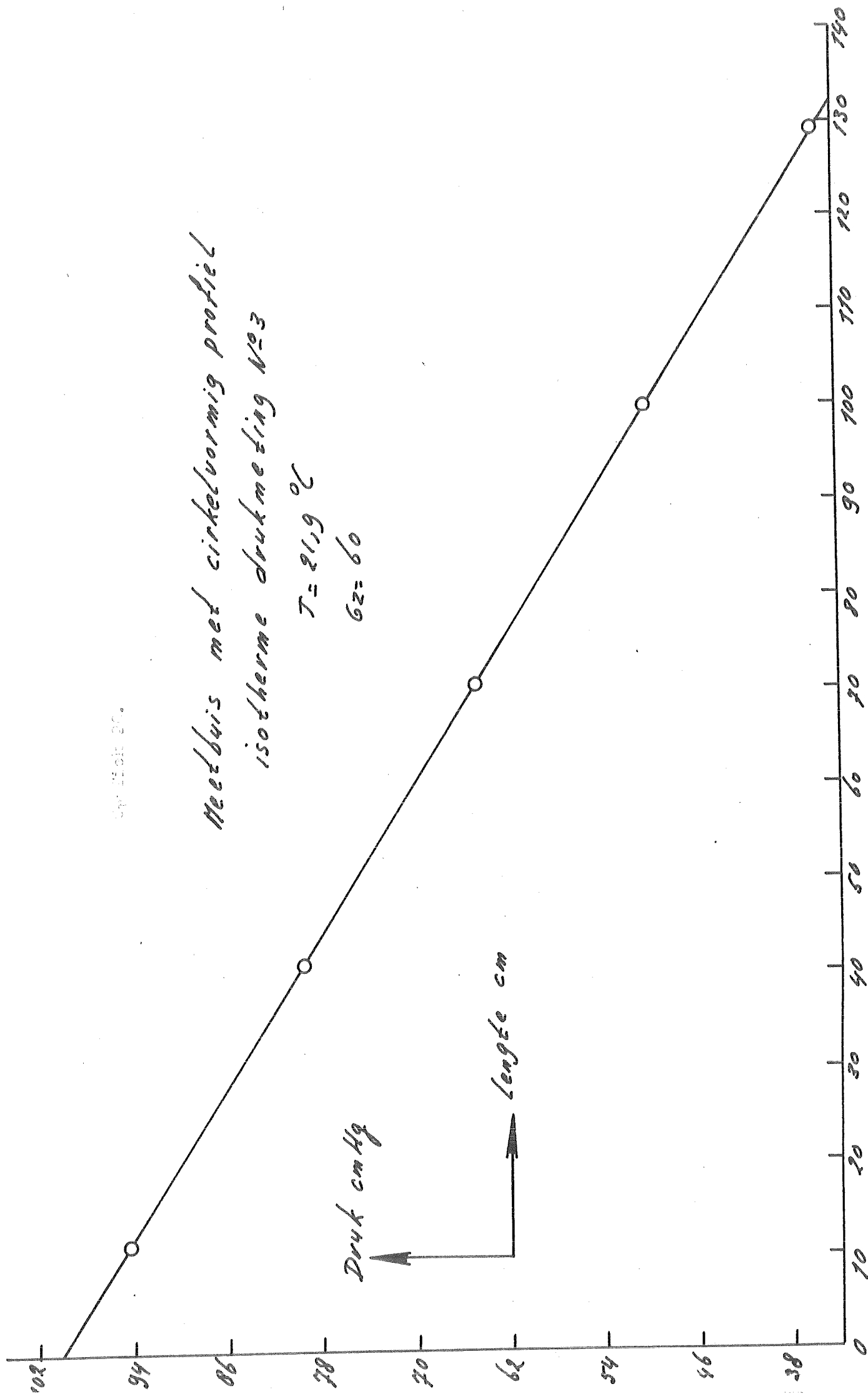
Meetbuis met cirkelvormig profiel
isotherme drukmeting N^o 3

$T = 21,9^{\circ}\text{C}$

$GZ = 60$

Druk cm Hg

Length cm

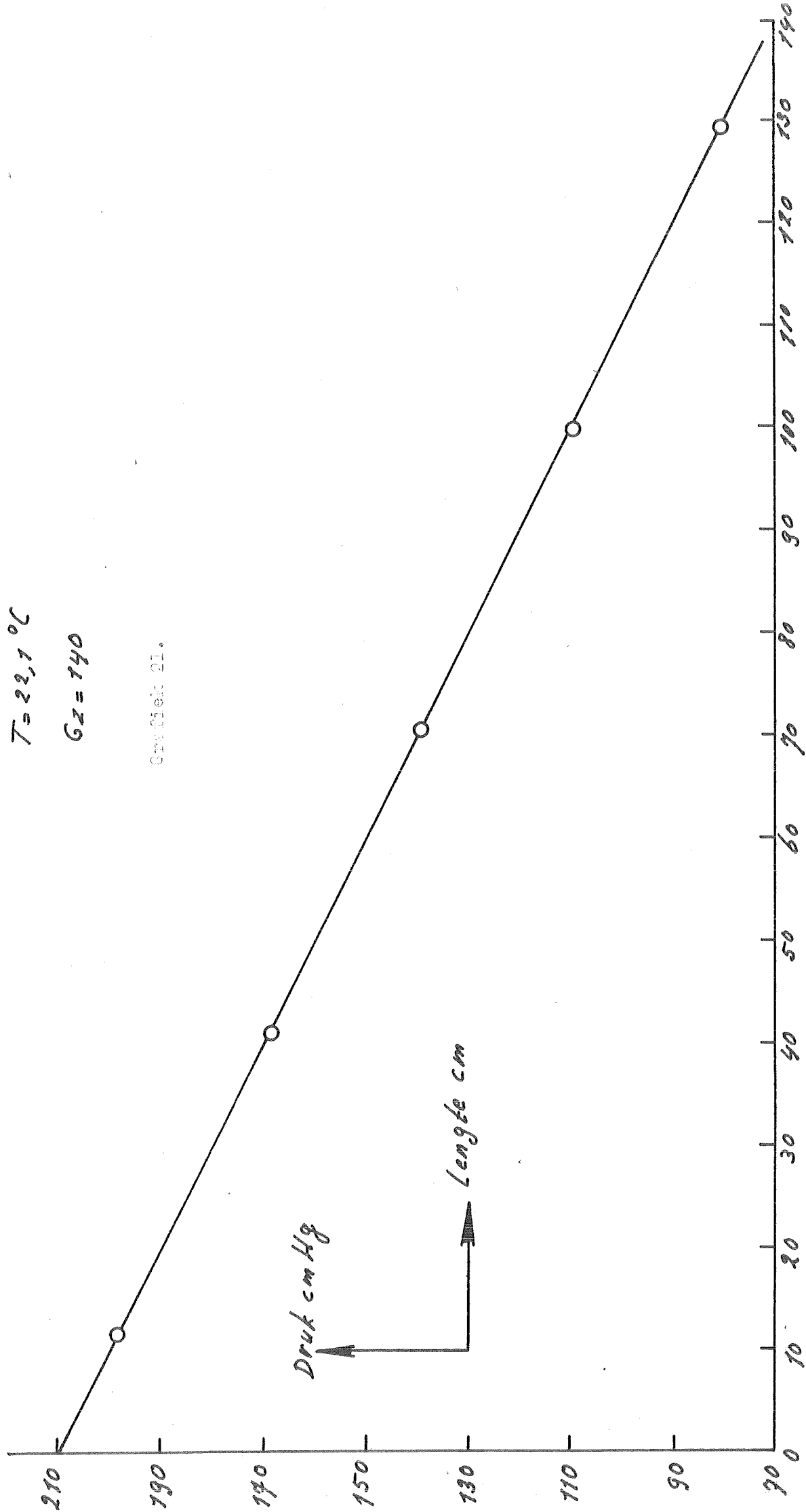


Meetbuis met cirkelvormig profiel
isotherme drukmeting N^o 4

$T = 22,1^{\circ}\text{C}$

$G_z = 140$

Gradiënt 21.



Meefuis met rechthoekig profiel
isotherme drukmeting no 1

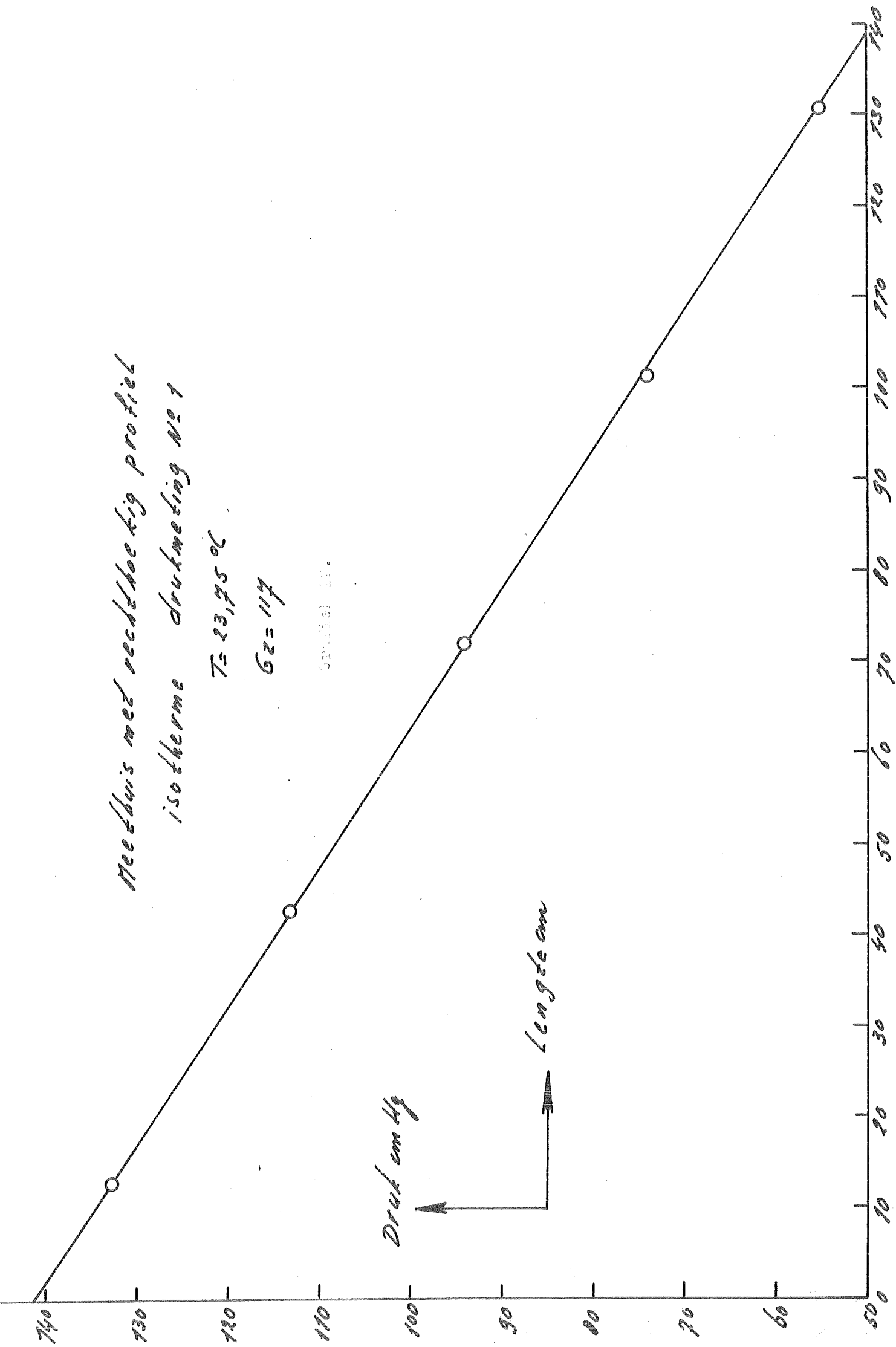
$T = 23,75^{\circ}\text{C}$

$G_2 = 117$

Gravim. III.

Druk cm Hg

Lengte cm

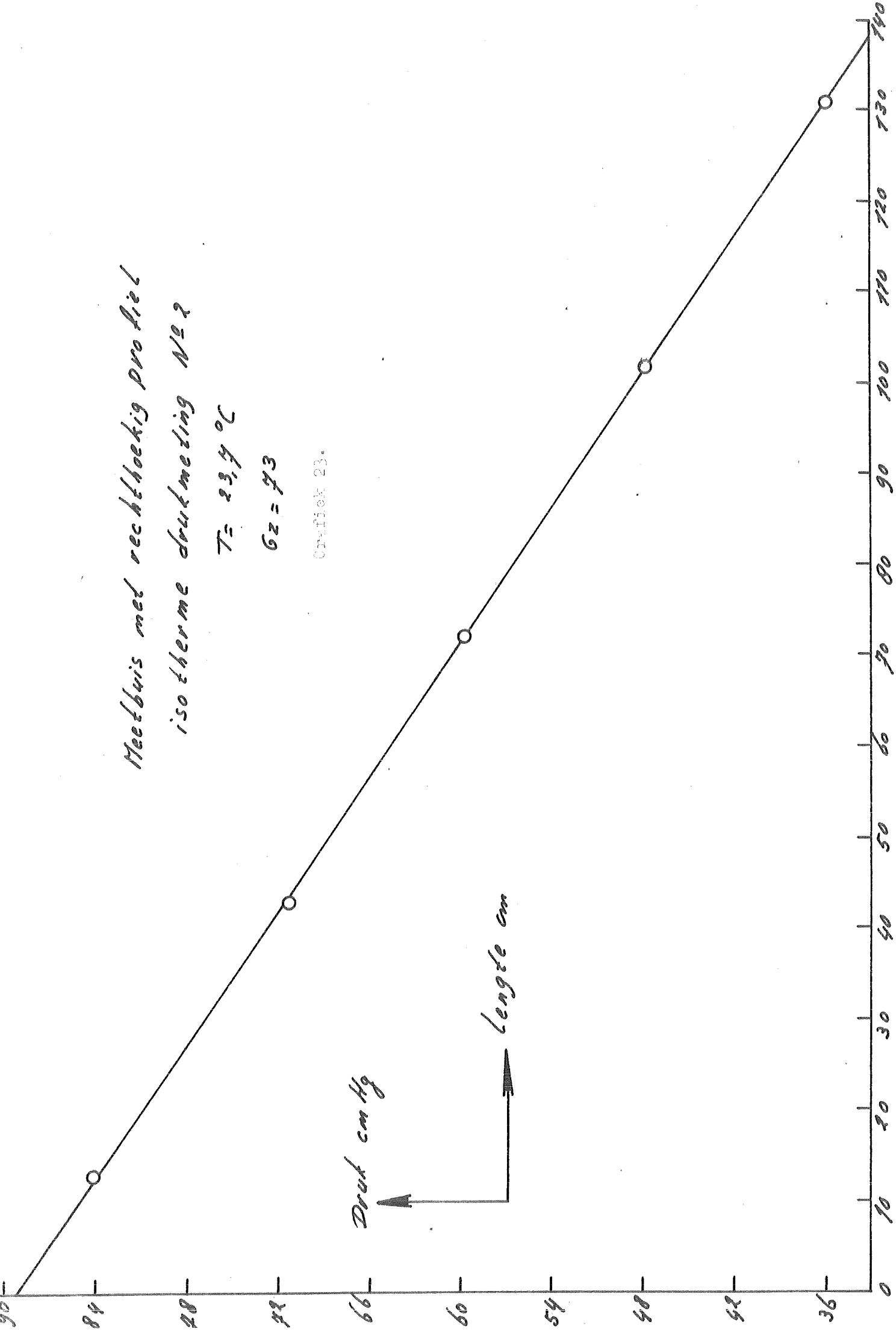


Meetbuis met rechthoekig profiel
isotherme drukmeting N^o 2

$T = 23,4^{\circ}\text{C}$

$G_z = 73$

Orfidek 23.

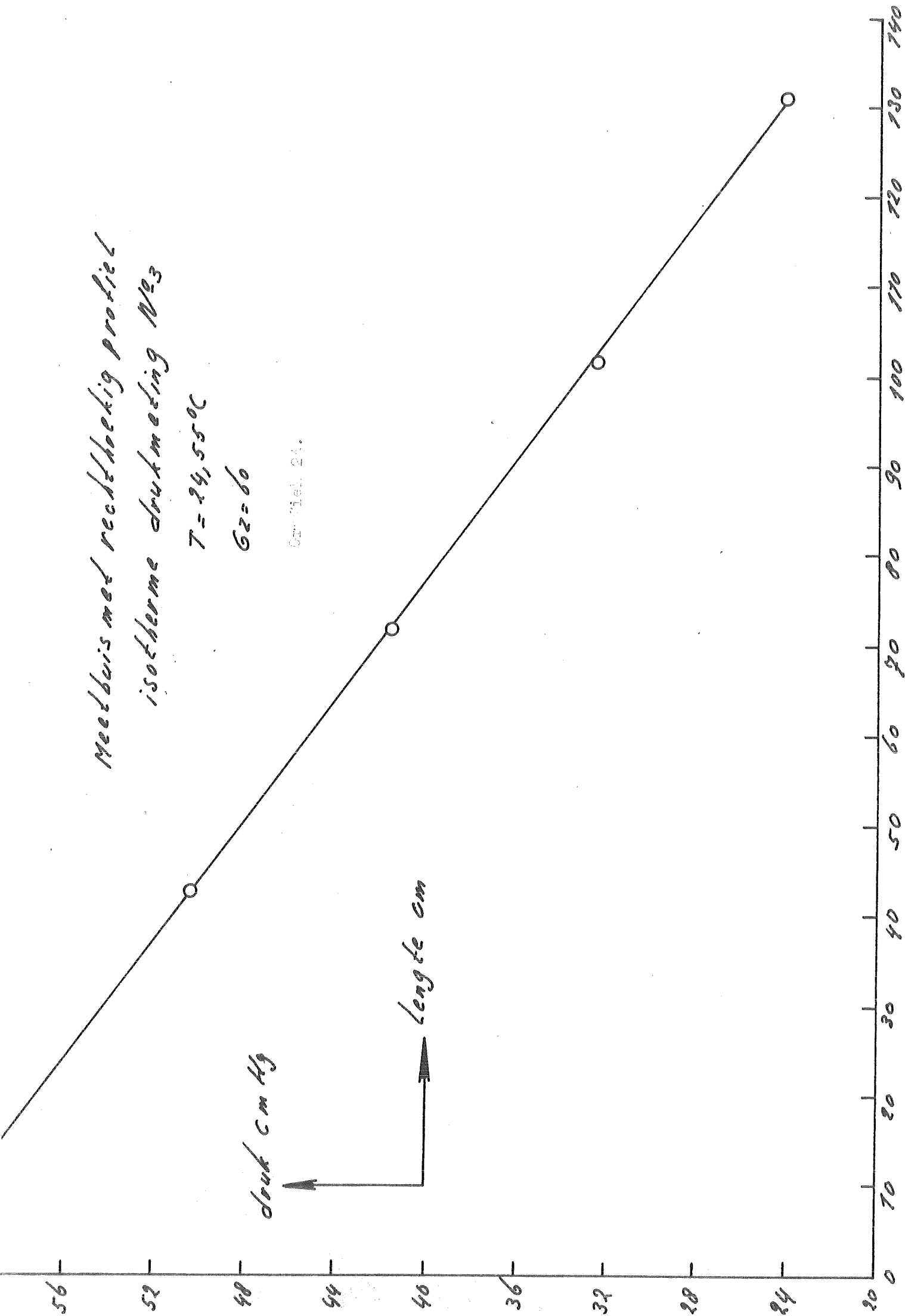


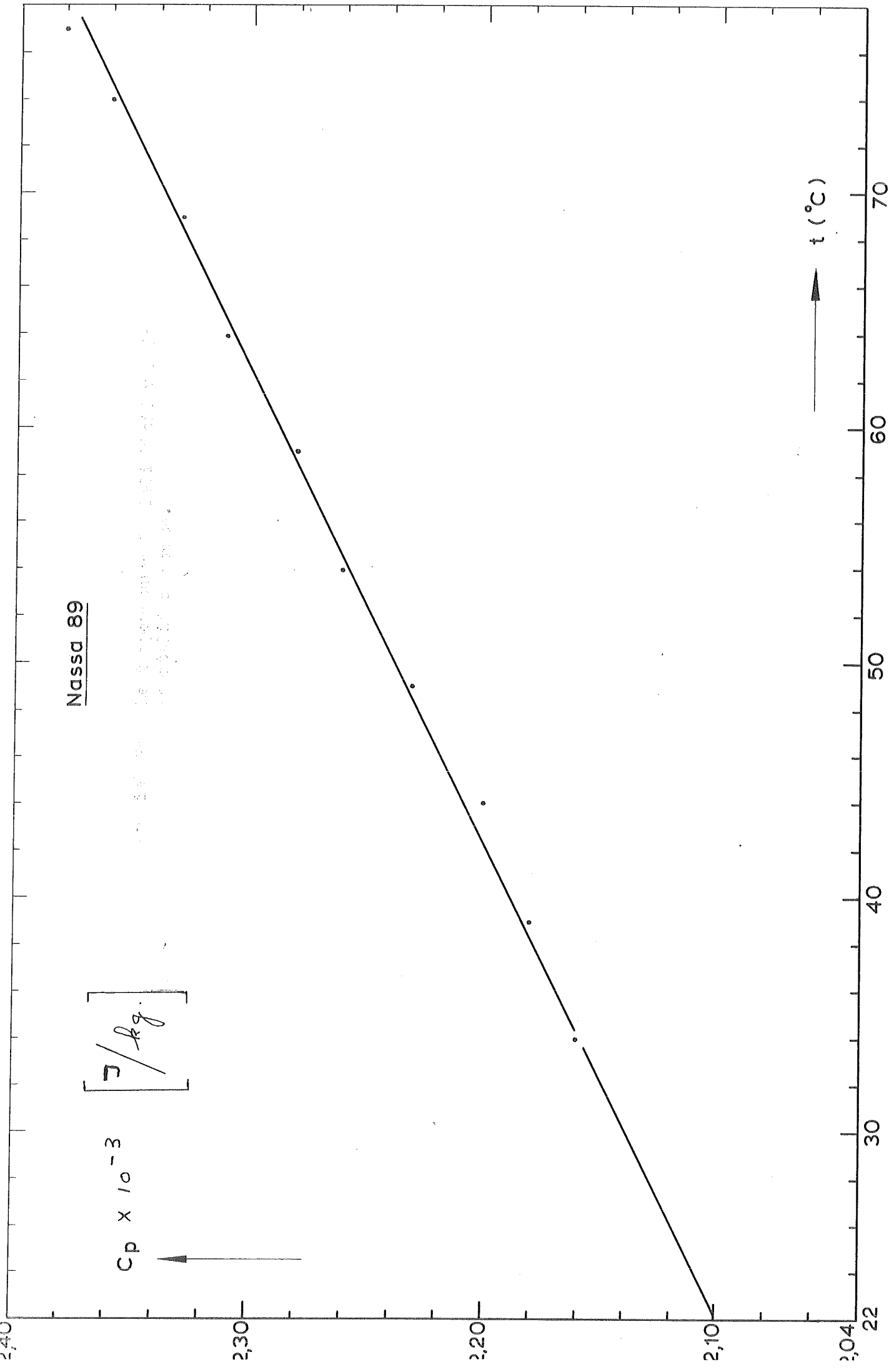
Needle with rectilinear profile
isotherm drawing No. 3

$T = 24,55^{\circ}\text{C}$

$G_2 = 60$

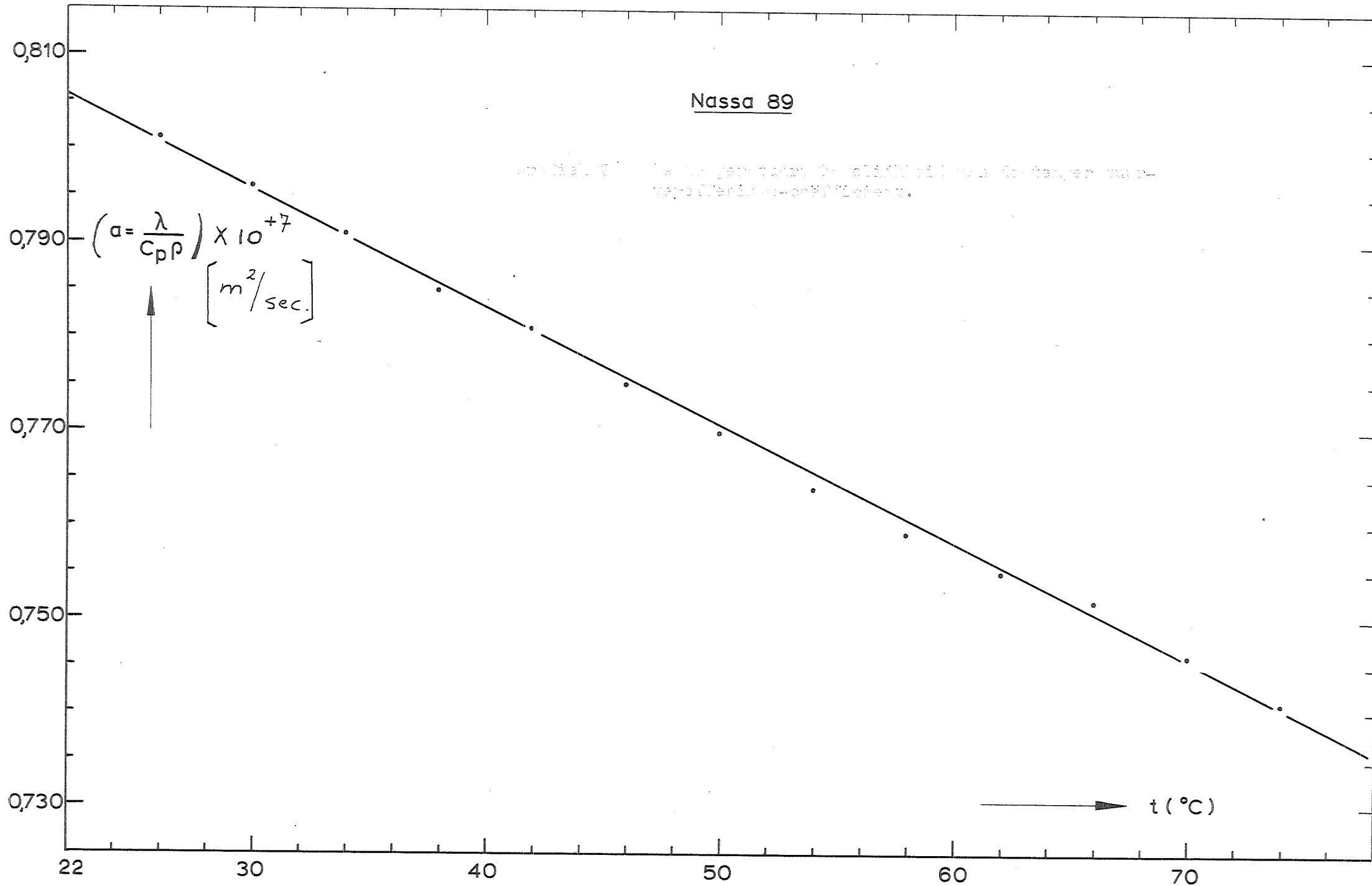
Griffel 24.

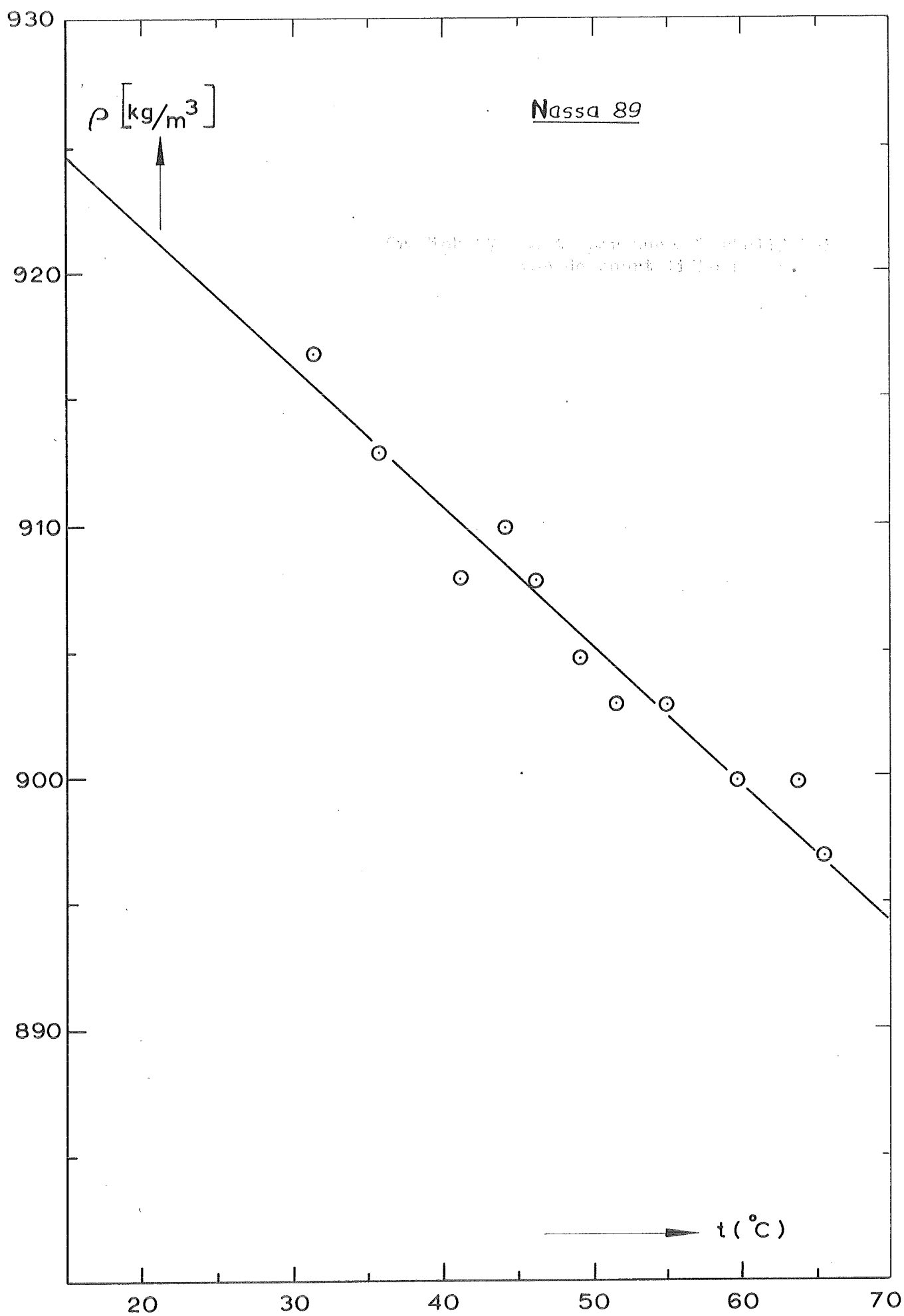


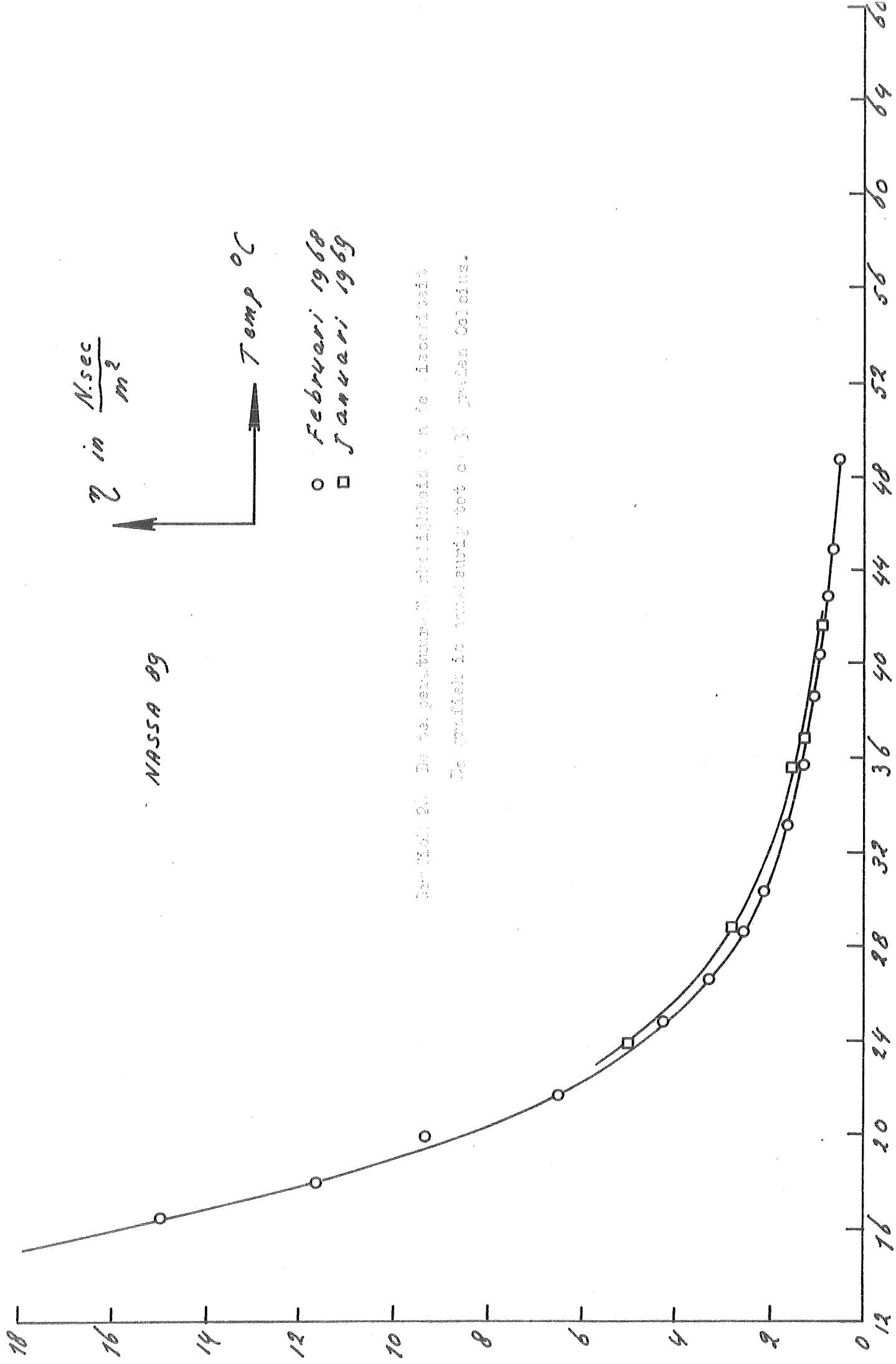


Nassa 89

Graph 1: Temperature dependence of the solidification enthalpy and
vaporization enthalpy.







Gr. 20. De temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit.
De grafiek is aanvullend tot op. 18. grafiek Celcius.

NASSA 89

η in $\frac{\text{N. sec}}{\text{m}^2}$

Temp. °C

○ Februari 1968
□ Januari 1969

Grafiek 20 De temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit
boven 30 graden Celsius.

