

*revisie 26.*

# TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

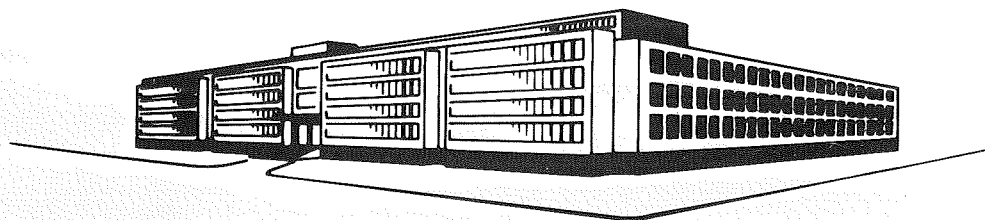
Laboratorium voor Fysische Technologie

DE INVLOED VAN DE GROOTTE VAN DE INLOOPLENGTE OP DE LOKALE  
WARMTE-OVERDRACHT AAN DE WAND VAN EEN GEROERD VAT.

H.H. BOSWINKEL

Afstudeerverslag

april 1969



**LABORATORIUM VOOR TECHNISCHE NATUURKUNDE**

**LORENTZWEG**

**DELFT**

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

Laboratorium voor Fysische Technologie

DE INVLOED VAN DE GROOTTE VAN DE INLOOPLENGTE  
OP DE LOKALE WARMTE-OVERDRACHT AAN DE WAND VAN  
EEN GEROERD VAT.

Afstudeerverslag

H.H. Boswinkel

april 1969

### Samenvatting

De inlooptlengte van de warmtestroommeters, zoals die door Fokkelman en Enthoven zijn gebruikt, is experimenteel gevarieerd, teneinde de invloed hiervan op de lokale warmte-overdracht te bepalen.

Het gebruikte vat heeft een vlakke bodem, 4 keerschotten en is afgesloten met een vlak deksel. De diameter,  $D$ , van het vat, 0,291m, is gelijk aan zijn hoogte.

Het vat is geheel gevuld met water en wordt geroerd door een Rushton-turbineroerder. Een deel van de vatwand boven de roerder bestaat uit 7, in de stroomrichting tegen elkaar aangeleggen, warmtestroommeters, die onafhankelijk van elkaar zijn te gebruiken.

Het midden van een warmtestroommeter noemen we de meetplaats. Door één of meer van de 7 warmtestroommeters te gebruiken, kunnen we dus de inlooptlengte (d.i. het verwarmde deel van de vatwand vóór de meetplaats) en ook de meetplaats zelf variëren.

De afhankelijkheid tussen lokale warmteoverdracht, de inlooptlengte en de meetplaats wordt, voor een groot deel van de vatwand, beschreven door een bekende functie van  $l/D$  en  $h/D$ . Hierin is  $l$  de inlooptlengte en  $h$  de afstand tussen de meetplaats en het vlak door de roerder.

Door in de energievergelijking voor de vloeistof aan de wand een geschikte snelheidsverdeling te substitueren, kan bovengenoemde afhankelijkheid berekend worden. De overeenkomst tussen de gemeten en de berekende waarden is goed.

*dit is  
geen  
samenvatting*

<u>Inhoudsopgave</u>	<u>blz.</u>
Samenvatting	1
Inhoudsopgave	2
Lijst van gebruikte symbolen	3
I Inleiding	4
II Het verband tussen het Nusselt-getal, de inloopt- lengte en de plaats aan de wand.	5
III Meetopstelling en procedure	9
a) De meetopstelling	9
b) Meetprocedure	11
IV Verwerking en discussie van de meetgegevens	12
a) Het Nusselt-getal als functie van de inlooptlengte	12
b) Het quotiënt van het Nusselt-getal bij geheel, en dat bij gedeeltelijk gestookte wand	13
c) Het quotiënt van de Nusselt-getallen als functie van de fraktie gestookte wand	14
V Konklusie	15
Literatuurverwijzingen	16
Appendix I	17

<u>Lijst van gebruikte symbolen</u>		<u>dimensies</u>
a	temperatuurvereffeningscoefficient	$m^2/s$
Ai	Airy-functie	-
ap	aanstroompunt, nulpunt voor h	m
c	$1,65 \cdot 10^{-5} \cdot Re^{1,8}/a$	$s/m^2$
$c_a, c_b$	constanten	-, -
D	vatdiameter	m
d	roerderdiameter	m
dt	afstand tot vatwand van de thermokoppels	m
h	afstand tot het vlak door roerder, afstand tot het aanstroompunt	m
l	inlooplengte, afstand waarover vat verwarmd is vanaf het midden van de warmtestroommeter	m
n	toerental	1/s
Nu	Nusselt-getal $\frac{\alpha D}{\lambda}$	-
Pr	Prandtl-getal $\frac{\nu}{a}$	-
$R_{1,2}$	afstand middellijn vat tot thermokoppels	m
Re	Reynolds-getal $\frac{nd^2}{\nu}$	-
$R_w$	straal van het vat	m
r	afstand tot middellijn vat	m
$T_{1,2}$	temperaturen op plaats $R_1, R_2$	$^{\circ}C$
$T^*$	gereduceerde temperaturen $T^* = T - T_b$	$^{\circ}C$
$T_b$	"bulk" temperatuur	$^{\circ}C$
$T_w$	wandtemperatuur	$^{\circ}C$
$v_h$	snelheid van de vloeistof in axiale richting	m/s
x	h - l	m
y	afstand vanaf vatwand in de vloeistof	m
$\alpha$	warmte-overdrachtscoefficient	$W/m, ^{\circ}C$
$\eta, \eta_w$	dynamische viskositeit resp. in bulk, aan wand	$Ns/m^2$
$\lambda_{rk}$	warmtegeleidingscoefficient van roodkoper	$W/m^{\circ}C$
$\nu$	kinematische viskositeit in "bulk"	$m^2/s$
$\xi$	$-\frac{1}{2} D \ln(1 - 2h/D)$	m
$\phi_w$	warmtestroomdichtheid	$W/m^2$

## I Inleiding

De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de wand van een geroerd vat verschilt van plaats tot plaats. Hierdoor kan ook de wandtemperatuur plaatselijk verschillen. Omdat deze temperatuurverschillen van belang zijn bij temperatuur-gevoelige processen, is het gewenst de plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt te onderzoeken.

Fokkelman [1] en Enthoven [2] hebben, met door Akse e.a. [3] ontwikkelde warmtestroommeters de plaatsafhankelijkheid voor een bepaalde vatgeometrie bepaald (zie figuur 1a en blz. 18). De wijze van meten is beschreven in het afstudeerverslag van Fokkelman.

Dit onderzoek vloeit voort uit het gebruik van de warmtestroommeters. Zie voor een schets van deze meters fig. 2 (blz.20 ).

Bij het gebruik van deze meters wordt slechts een gedeelte van de vatwand verhit, terwijl wij deze situatie willen vergelijken met de praktijk, waarbij de gehele wand wordt gestookt. De over de wandgeïntegreerde plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënten zullen moeten overeenstemmen met de rechtstreeks gemeten, gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt.

Nu kan men zich voorstellen dat de warmtestroommeter, via de langstromende vloeistof "merkt" dat slechts een deel van de wand gestookt wordt. Is men nu in staat een steeds groter deel van de wand, bovenstrooms, te verwarmen, dan blijkt uit de verandering van de gemeten waarde of, en zo ja, hoe lang de meter deze invloed "merkt".

We hebben dan bepaald hoe groot de "thermische inlooptengte" van de warmtestroommeter zou moeten zijn. Tevens is dan de mogelijkheid tot correctie van de gemeten waarde geopend, indien een meter met een kleinere inlooptengte wordt gebruikt.

In een, geheel met water gevuld, vat (fig.1, blz.18,19 ) met de gebruikelijke geometrie, wordt de thermische inlooptengte gemeten. De vatdiameter is 0,291m. De meetopstelling staat beschreven in hoofdstuk III en de verwerking van de meetgegevens in de hoofdstukken IV en V. In hoofdstuk II wordt het gezochte verband berekend.

II. Het verband tussen het Nusselt-getal, inlooptengte en plaats aan de wand.

2/D  
Het blijkt noodzakelijk het stromingspatroon in het vat te bekijken om  $Nu = f(l, D/h)$  te vinden\*.

Voncken [4] heeft voor de door ons gebruikte vatgeometrie, (zie fig. 1a, blz. 18) het volgende beeld gegeven:

Van de turbineroeder stroomt de vloeistof in een zich weinig verbredende straal naar de vatwand. Hier splitst de vloeistofstraal zich in tweeën en stroomt vervolgens, door de keerschotten gedwongen, in axiale richting langs de vatwand. Deze stroming bepaalt de warmte-overdracht.

Het aanstroompunt van de vatwand is het begin van de hydrodynamische grenslaag. We onderscheiden ook een thermische grenslaag. De thermische grenslaag is dunner dan de hydrodynamische als  $Pr > 1$ . Voor water,  $Pr \approx 7$ , is de verhouding van de grenslagen  $\approx 0,5$ . De opbouw van de thermische grenslaag begint echter niet bij het aanstroompunt, maar bij het verhitte deel van de vatwand (zie fig. 3, blz. 21). Is de dikte hiervan, op de meetplaats, kleiner dan de overeenkomstige dikte zou zijn bij geheel gestookte wand, dan meten we een te grote waarde voor de warmte-overdracht. Dit is het inlooptengte effect.

Broek [5] heeft getracht een theoretische afleiding te geven voor de warmteoverdracht, ook bij niet geheel gestookte wand. Hij kon echter niet over een juiste snelheidsverdeling in de grenslaag beschikken. We trachten nu de inmiddels door Verbeek [6] experimenteel gevonden snelheidsverdeling,

$$v_x = 1,65 \cdot 10^{-5} \left(1 - \frac{2h}{D}\right) \cdot y \cdot Re^{1,8} \quad [m/s] \quad (1)$$

in de berekening van Broek te verwerken.

Omdat de thermische grenslaag ongeveer de helft van de hydrodynamische is, is een lineaire benadering van de snelheidsverdeling aannemelijk. Deze veronderstelling wordt gesteund door het feit dat de Re-afhanke-lijkheid van de warmteoverdracht, zoals die door vorige onderzoekers is gevonden, overeenkomt met de theorie die van een ge-lineariseerde snelheidsverdeling uitgaat.

-----  
\* De symbolen zijn verklaard op blz. 3.

De energievergelijking voor de thermische grenslaag luidt:

$$a \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} = v_h \frac{\partial T^*}{\partial h}, \quad (2)$$

waarin  $T^* = T - T_b$

met de randvoorwaarden:

$$\begin{aligned} y = 0 & \quad h \geq x & \quad T^* = T_w^* \\ y = \infty & \quad h \geq x & \quad T^* = 0 \\ y > 0 & \quad h = x & \quad T^* = 0 \end{aligned}$$

Substitutie van (1) en van,

$$\xi = -\frac{1}{2} D \ln \left(1 - \frac{2h}{D}\right) \quad (3)$$

in (2) geeft:

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} = c y \frac{\partial T^*}{\partial \xi} \quad (4)$$

$$\text{waarin } c = 1,65 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Re}^{1,8} / a \quad (5)$$

De randvoorwaarden worden nu:

$$\begin{aligned} y = 0 & \quad \xi \geq -D/2 \ln \left(1 - \frac{2x}{D}\right), \quad T^* = T_w^* \\ y = \infty & \quad \xi \geq -D/2 \ln \left(1 - \frac{2x}{D}\right), \quad T^* = 0 \\ y > 0 & \quad \xi = -D/2 \ln \left(1 - \frac{2x}{D}\right), \quad T^* = 0 \end{aligned}$$

De energievergelijking in deze vorm is volgens Broek oplosbaar.

De temperatuurgradient aan de wand wordt dan:

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{T_w^* \cdot c^{1/3} \text{Ai}'(0) \cdot \sqrt{3} \cdot \Gamma(1/3)}{2\pi \cdot \text{Ai}(0) \cdot (\xi + D/2 \cdot \ln(1 - 2x/D))^{1/3}} \quad (6)$$

Substitutie van (3) en (5) in (6) geeft met,

$$\alpha = -\frac{\lambda}{T_w^*} \left. \frac{\partial T^*}{\partial y} \right|_{y=0}$$

na enig omwerken:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha D}{\lambda} = 0,59 \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{1/3} \left( \ln \frac{1-2x/D}{1-2h/D} \right)^{-1/3} \quad (7)$$

We hebben hier het Nusselt-getal als functie van de plaats,  $h$ , en van de inlooptegte,  $(h-x)$ , verkregen. We voorzien Nu van de index, 1, zijnde het verwarmde deel van de vatwand.



We vervangen ook  $x$  door  $x = (h-1)$ :

$$Nu_1 = 0,59 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \left( \ln \frac{1-2(h-1)/D}{1-2h/D} \right)^{-1/3} \quad (7a)$$

Voor  $h \rightarrow D/2$  gaat  $Nu_1 \rightarrow 0$  wat te verwachten is op basis van de gevonden snelheidsverdeling (1). In de limiet  $l \rightarrow 0$ , d.w.z. voor een warmtestroommeter zonder inlooptlengte geldt  $Nu_1 \rightarrow \infty$ , wat ook theoretisch te verwachten is.

Een redelijk snel convergerende reeksontwikkeling is mogelijk voor  $h < D/4$ :

$$Nu_1 = 0,59 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left\{ \frac{l}{D} (1+2h/D) + O(2h/D)^3 + O(2l/D)^3 \right\}^{-1/3}.$$

Beschouwen we, in overeenstemming met de proefomstandigheden van vorige onderzoekers, een meter met konstante inlooptlengte ( $l/D = \text{konstant}$ ) en verwaarlozen we hogere orde termen, dan verkrijgen we voor  $Nu_1$  bij konstante  $l/D$ -verhouding:

$$\left\{ Nu_1 \right\}_{l/D} = 0,59 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \left\{ \text{konstante} + \text{konstante } h/D \right\}^{-1/3}, \quad (7b)$$

met als eis  $h < D/4$ . De konstanten liggen tussen 0 en 1.

Voor een geheel verwarmde wand, dus voor  $l = h$  of voor  $x = 0$ , krijgen we uit verg. (7a) de al door Verbeek gevonden betrekking:

$$Nu_h = 0,59 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \left( \ln \frac{1}{1-2h/D} \right)^{-1/3} \quad (7c)$$

In het quotiënt  $Nu_1/Nu_h$  vinden we een correctie voor de metingen met een te kleine inlooptlengte,

$$\frac{Nu_1}{Nu_h} = \left\{ \frac{-\ln(1-2h/D)}{\ln(1-2(h-1)/D) - \ln(1-2h/D)} \right\}^{1/3} \quad (8)$$

De grenswaarden  $l = 0, h$  geven, zoals te verwachten is:

$$\begin{aligned} l = 0, & \quad \frac{Nu_1}{Nu_h} = \infty, \\ l = h, & \quad \frac{Nu_1}{Nu_h} = 1, \end{aligned} \quad (8a)$$

Reeksontwikkeling van de logaritmen in (8) en uitdelen leidt voor elke  $D/h$  tot:

$$\frac{Nu_1}{Nu_h} = \left\{ \frac{h}{l} \left( 1 - \frac{h-1}{D} \right) \right\}^{1/3} \quad (9)$$

Zie ook appendix I (blz.17)

De deling is afgebroken na de kwadratische termen.

In eerste benadering blijkt dat  $\frac{Nu_l}{Nu_h}$  bepaald wordt door:

$$\frac{Nu_l}{Nu_h} = \left(\frac{h}{l}\right)^{1/3} \quad (9a)$$

Bij deze benadering moet bedacht worden dat in alle proefomstandigheden geldt:

$$0,8 < \left(1 - \frac{h-1}{D}\right)^{1/3} < 1, \text{ waarbij de ondergrens alleen in de}$$

extreme situatie:  $h = D/2$  en  $l = 0$  wordt bereikt.

De grenswaarden (8a) blijven ook in deze benadering geldig.

### III Meetopstelling en procedure

#### a. de meetopstelling

In een blokschema (fig. 4, blz. 22) maken we onderscheid tussen aandrijving, vat met meetblok, verwarming, koeling, registratie en verwerking.

De aandrijving bestaat uit motor, variator en een tachometer. Het vat is gemaakt van perspex, met uitzondering van het koperen meetblok.

Het meetblok bestaat uit 7 warmtestroommeters. Warmtelek, onderling en naar buiten, wordt voorkomen door teflon- en asbest-isolaties. De meters hebben de vorm van een kwart cirkelring met een dikte van ongeveer 2 cm. De binnenstraal is dan de vatstraal (fig. 1a en 1b, blz. 18 en 19).

Door in een meter op twee plaatsen ( $R_1$  en  $R_2$ ) de temperaturen ( $T_1$  en  $T_2$ ) te meten, krijgen we voldoende gegevens om samen met de "bulk"-temperatuur de warmteoverdrachtscoëfficiënt te berekenen uit:

$$\alpha = \frac{\phi_w''}{T_w - T_b} \quad (10)$$

De temperatuur  $T_w$  vinden we uit de temperatuurverdeling in de warmtestroommeter:

$$T_w = T_2 - (T_1 - T_2) \frac{\ln R_2 / R_w}{\ln R_1 / R_2} \quad (11)$$

De warmtestroomdichtheid volgt uit de temperatuurgradiënt:

$$\phi_w'' = \frac{\lambda}{R_w} \frac{(T_1 - T_2)}{\ln R_1 / R_2} \quad (12)$$

Substitutie van (11) en (12) in (10) geeft dan:

$$\alpha = \frac{\lambda}{R_w} \frac{1}{\ln R_1 / R_2} \frac{(T_1 - T_2)}{(T_2 - T_b) - (T_1 - T_2) \frac{\ln R_2 / R_w}{\ln R_1 / R_2}}$$

en ook:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = \frac{ca(T_1 - T_2)}{(T_2 - T_b) - (T_1 - T_2)cb} \quad (13)$$

waarin  $ca$  en  $cb$  per warmtestroommeter, (w.s.m.) konstanten zijn.

*glas?*

In tabel I is de plaats van de w.s.m. ten opzichte van het roer-  
dervlak aangegeven.

De temperatuurmeting in de w.s.m. geschiedt met 14 chromel-alumel  
thermokoppels. De koude lassen hiervan zitten, in olie, in een  
thermostaatbad. De afgegeven thermospanningen worden op een recor-  
der geregistreerd. Tabel I geeft tevens de plaats van de warme  
lassen ten opzichte van de vatwand. De "bulk"-temperatuur wordt met  
een kwikthermometer gemeten.

*smelten*

?

Zeven variacs zorgen via thermocoaxkabels voor een regelbare ver-  
warming van de w.s.m.. In dit circuit zijn ampèremeters opgenomen.  
De aansluitingen van de thermocoaxkabels worden met perslucht ge-  
koeld.

De door de w.s.m. aan het vat toegevoerde warmte wordt in een uit-  
wendig circuit afgevoerd.

Het koelcircuit bestaat o.a. uit een expansiekoelmachine, warmte-  
wisselaar en een flowmeter.

Bij het koelen wordt er zorg voor gedragen dat de gemiddelde ver-  
blijftijd van het water in het vat zeker 20x de circulatietijd is,  
zodat geen <sup>de</sup>verstoring van de circulatiestroom is te verwaarlozen.

TABEL I

Afmetingen van het meetblok

w.s.m. nr.	h in cm.	thermokoppel nr.	dt in cm
1	13.83	1	5.92
		2	1.76
2	11.63	3	5.92
		4	2.00
3	9.48	5	5.96
		6	1.98
4	7.28	7	5.87
		8	2.01
5	5.07	9	5.90
		10	2.02
6	2.72	11	5.90
		12	2.01
7	0.18	13	5.90
		14	2.01

### 3b. Meetprocedure

Nadat het gewenste toerental is ingesteld, worden achtereenvolgens de persluchtkoeling en het gewenste aantal w.s.m. ingeschakeld. Door middel van de koeling wordt de "bulk"-temperatuur konstant gehouden. Na ongeveer 15 minuten is een stationaire toestand bereikt en kan gecontroleerd worden of de wandtemperaturen van de gestookte w.s.m. gelijk zijn. De hiervoor nodige bewerkingen, volgens verg.(11) worden op een boekhoudmachine uitgevoerd. Zijn de wandtemperaturen gelijk, dan verzorgt de TR4 de verdere verwerking.

Gekonstateerd is, dat de ijkgrafieken van de thermokoppels in de tijd, onderling verschuiven, de helling  $24,422 \text{ }^{\circ}\text{C/mV}$  bleef echter konstant. Deze translatie wordt verwerkt door dagelijks de thermokoppels voor één temperatuur te ijken.

IV Verwerking en discussie van de meetgegevens

4a. Het Nusselt-getal als functie van de inlooplengte

Op grond van de door Enthoven en Fokkelman gevonden relatie:

$$Nu = 0,64 Re^{2/3} Pr^{1/3} (D/h)^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad (14)$$

wordt de volgens verg. (13) berekende Nusselt <sup>waarde</sup> verwerkt tot de groep:

$$Nu / (Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9}) \quad (15)$$

De variabelen  $D/h$  en  $l$  of  $l/D$  treden hierbij als parameters op. In de figuren 5 t/m 9 is de groep (15) uitgezet tegen  $l$ , de inlooplengte, met  $D/h$  als parameter. We zien hier een enorme spreiding, (tot 30%) optreden. Het blijkt echter mogelijk, direkt na elkaar gemeten waarden te korreleren. Er ontstaan zodoende lijnenbundels. Een foutenschatting voor verg. (13) geeft met een aangenomen fout in  $T_1$  en  $T_2$  van  $0,2^\circ C$  en in  $T_b$  van  $0,3^\circ C$ , 15% variatie in de berekende Nu-waarden, (bij de heersende temperaturen).

De fout in  $T_w$  bedraagt ongeveer 2%. Hiermee is de spreiding niet verklaard. Bedacht moet echter worden dat:

- 1) De fout in  $T_w$ , via de instelling van de verschillende w.s.m., doorwerkt op het al of niet ingesteld zijn van de thermische grenslaag.
- 2) De fout in de temperatuurmetingen mogelijk groter is dan  $0,2^\circ C$ . Dit kan dan verklaard worden door een mogelijke drift in de thermokoppelaanwijzingen tijdens de meetseries, of door het optreden van verschillende thermo e.m.k.'s op de aansluitingen, bij verschillende omgevingstemperaturen.

Op grond van het bovenstaande beschouwen we de spreiding in de hellingshoeken als toevallig en kunnen we gemiddelde waarden van de hoeken bepalen. Zie de fig. 5 t/m 9, blz. 23 t/m 27 .

De afhankelijkheid van de inlooplengte is nu bepaald. De absolute waarde van de groep  $Nu / (Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9})$  is mogelijk niet juist. Hierdoor vervalt de mogelijkheid van een vergelijking tussen de gemeten waarden:

$$Nu / Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} = \left\{ f(D/h) \right\}_{l/D} \quad \text{en de vergelijking (7b):}$$

$$\left\{ Nu_l \right\}_{l/D} = 0,59 Re^{0,6} Pr^{1/3} \left\{ \text{konstante} + \text{konstante } h/D \right\}^{-1/3} \quad (7b)$$

met als eis  $h < D/4$ .

De invloed van  $D/h$  op  $Nu$  is echter reeds onderzocht door Fokkelman, die zijn metingen in overeenstemming met (7b) als volgt kon korreleren:

$$Nu = 0,64 Re^{2/3} Pr^{1/3} (h/D)^{-1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad (15)$$

met als eis  $D/h < 12$ .

De verschillen in de Re-exponenten tussen (7b) en (15) worden veroorzaakt door de gebruikte, experimenteel gevonden, snelheidsverdeling (1). De invloed die de temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit op  $Nu$  heeft is theoretisch niet onderzocht, door Enthoven, echter wel gekonstateerd. In het geldige definitiegebied,  $4 < D/h < 12$ , moet nu nog het verschil in de konstanten uit (7b) en (15) worden verklaard. Dit verschil is mogelijk te wijten aan de interpretatie van de meetgegevens in dit gebied, zodat de theorie niet in tegenpraak hoeft te zijn met de metingen.

4b. Het quotiënt van het Nusselt-getal bij geheel en dat bij gedeeltelijk gestookte wand.

In de figuren 10 t/m 14 op blz. 28 t/m 32 is het, uit de meetwaarden berekende, quotiënt van het Nusselt-getal bij geheel en gedeeltelijk gestookte wand uitgezet tegen  $1/D$ .

*beide gemidd.*

Voordat we deze meetwaarden kunnen vergelijken met de theoretische waarden (verg. (8)), moeten we rekening houden met de uitgebreidheid van het aanstroompunt (zie fig. 3, blz. 21). Voor deze uitgebreidheid nemen we  $h = 0,07 D$ , wat voor ons vat overeenkomt met 2 cm. vatwand. Derhalve is in plaats van (8) in de figuren 10 t/m 14 uitgezet:

$$\frac{Nu_l}{Nu_h} = \left\{ \frac{-\ln(1,14 - 2h/D)}{\ln(1,14 - 2(h-1)/D) - \ln(1,14 - 2h/D)} \right\}^{1/3} \quad (8b)$$

Voor de uitgebreidheid van het aanstroompunt vonden Fokkelman, Enthoven en Verbeek  $h = (0,06 \text{ à } 0,08)D$ , hetgeen goed met onze waarde overeenkomt.

Uit de figuren 10 t/m 14 blijkt dat er voor  $1/D > 0,1$ , een goede overeenkomst bestaat tussen de gemeten en berekende waarden. De afwijking voor  $1/D < 0,1$  wordt begrijpelijk als we bedenken dat de metingen in dit gebied waar de  $Nu$ 's hoog zijn, onnauwkeurig worden omdat het verschil tussen de wand en de "bulk"-temperatuur dan te klein wordt.

De doorsnijingen in de figuren 12, 13, 14 tussen de theoretisch gevonden curve en die welke de meetpunten verbindt, worden veroorzaakt door de meetfouten en de onzekerheid die bestaat over de uitgebreidheid van het aanstroompunt.

4c. Het quotiënt van de Nusselt-getallen als functie van de fraktie gestookte wand

De, voor de uitgebreidheid van het aanstroompunt gekorrigeerde verg. (9a):

$$\frac{Nu_l}{Nu_h} = \left(\frac{l}{h-0,07D}\right)^{-1/3} \quad (9b)$$

is in figuur 15 (blz. 33) te samen met de meetwaarden uitgezet. De meetwaarden zijn voor  $l/h > 0,2$  als volgt te korreleren:

$$\frac{Nu_l}{Nu_h} = 0,5 \left\{ 1 + \left(\frac{l}{h}\right)^{-1/3} \right\} \quad (9c)$$

Voor  $l/h > 0,2$  wijken 2 punten meer dan 10% van de gemiddelde meetwaarden af. De afwijking voor het punt met  $h/D = 0.476$  wordt mogelijk verklaard door de waarde van

$\left(1 - \frac{h-l}{D}\right)^{1/3} = 0.82$ , dus grote  $h/D$  en kleine  $l/D$ , waarbij de  $D/h$ -afhankelijkheid volgens de theorie niet te verwaarlozen is.

Voor het punt met  $h/D = 0.174$  moet de fout gezocht worden in de middeling van de hellingshoeken van fig. 9 (blz. 27).

Het ad 4b betogde over de nauwkeurigheid t.a.v. de theorie behoudt ook hier zijn waarde.

De afwijkingen tussen theorie en meetwaarden zijn voor  $l/h > 0.2$  kleiner dan 10%.

Een warmtestroommeter, met een inlooptengete  $l$ , geeft rechtstreeks het gewenste Nusselt-getal, tot op 10% nauwkeurig, als  $h < \frac{l}{0.45}$ , zie figuur 15.

*duidelijker de verg.*

*welbeck*

*kleine l 70.75 h!*



V. Konklusie

In figuur 15, (blz. 33) bleek dat, onafhankelijk van de waarde van h/D, voor  $l/h > 0,2$  geldt:

$$\frac{Nu_l}{Nu_h} = 0,5 \left\{ 1 + \left(\frac{l}{h}\right)^{-1/3} \right\} = 0,5 \left\{ 1 + \left(\frac{l}{h - 0,07D}\right)^{-1/3} \right\} \quad (9c)$$

In de praktijk zal men met warmtestroommeters werken, die een gegeven inloopte hebben, dus men werkt bij  $D/l = \text{konstant}$ . Zo vond Fokkelman met zijn warmtestroommeter,

$$(D/l = \frac{29.4}{1.65} = 17.8):$$

$$\left\{ Nu_l = 0.64 Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} (D/h)^{1/3} \right\}_{D/l = \text{konstant}} \quad (15)$$

voor  $D/h < 12$

Wil men op grond van dit werk korrigeren voor de te kleine inloopte bij zijn experimenten (dus uit  $Nu_l$  de  $Nu_h$  bepalen), dan gaat dit als volgt:

$$Nu_h = \frac{0.64 Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} (D/h)^{1/3}}{0,5 \left\{ 1 + \left(\frac{h}{D} \cdot \frac{D}{l}\right)^{1/3} \right\}} \rightarrow \left\{ 1 + \left(\frac{h - 0,07D}{D} \cdot \frac{D}{l}\right)^{1/3} \right\}$$

Dit geeft met  $D/l = 17.8$  (Fokkelman):

$$Nu_h = 1,28 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta/\eta_w)^{1/9} \cdot \frac{(D/h)^{1/3}}{1 + 2,62(D/h)^{-1/3}}$$

Korrekties in de metingen van vorige onderzoekers hebben we niet aangebracht, omdat de oorspronkelijke metingen (fig. 5 t/m 9, blz. 23 t/m 27), waarop ook fig. 15 berust, een enorme spreiding te zien geven.

Het verdient daarom aanbeveling de meetnauwkeurigheid op te voeren, omdat dit de, vooral in de gebieden  $D/h < 4$ ,  $l/h < 0,2$  bestaande onzekerheid kan opheffen.

De meetnauwkeurigheid wordt verhoogd door:

- a) rechtstreekse meting van de wandtemperatuur
- b) een onderzoek in te stellen naar het gedrag van thermokoppels.

Hiernaast verdient het aanbeveling in een groot vat warmteoverdracht te meten met een w.s.m. met een kleine inloopte. Behalve dat dan  $l/h < 0,2$  eenvoudig bereikt wordt, kan ook de diameterafhankelijkheid nogmaals getoetst worden.

*conclusie? zie vgl (7a) op blz 7*

*naam dan wel op metingen v. F.?*

*mv local h/l*

Literatuurverwijzing

- [1] Fokkelman, Ph.A.M.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft, juni 1967.
- [2] Enthoven, K.D.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft, juni 1968.
- [3] Akse, H., Beek, W.J., van Berkel, F.C.A.A. en De Graauw, J.;  
De Ing. 78 (1966) ch 88-95;  
Chem.Eng. Sci. 22 (1967) 135-146
- [4] Voncken, R.M.; Circulatiestroming en menging in geroerde vaten, dissertatie Delft, 1966.
- [5] Broek, R.C.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft, juni 1968.
- [6] Verbeek, E.P.G.M.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft, januari 1969.

Appendix I

Reeksontwikkeling van  $\frac{Nu_1}{Nu_h} = \left\{ \frac{-\ln(1-2h/D)}{\ln(1-2(h-1)/D) - \ln(1-2h/D)} \right\}^{1/3}$

Voor  $-1 < y \leq 1$  geldt:

$\ln(1-y) = -y - \frac{1}{2} y^2 - \frac{1}{3} y^3 - \dots$  (17)

verg. (17) toegepast op de teller geeft:

teller =  $2h/D + \frac{1}{2}(2h/D)^2 + \frac{1}{3}(2h/D)^3 + \dots$

de noemer wordt:

noemer =  $-2(h-1)/D - 1/2(2(h-1)/D)^2 - 1/3(2(h-1)/D)^3 \dots + 2h/D + 1/2(2h/D)^2 + 1/3(2h/D)^3 + \dots$

=  $2\left(\frac{h-h+1}{D}\right) + 1/2\left\{(2h/D)^2 - (2(h-1)/D)^2\right\} + 1/3\left\{(2h/D)^3 - (2(h-1)/D)^3\right\} + \dots$

=  $\frac{21}{D} + 1/2\left(\frac{2h-2(h-1)}{D}\right) \cdot \left(\frac{2h+2(h-1)}{D}\right) + 1/3\left(\frac{2h}{D} - \frac{2(h-1)}{D}\right)\left(\frac{2h}{D}\right)^2 + \frac{2h \cdot 21}{D^2} + \left(\frac{2(h-1)}{D}\right)^2 + \dots$

=  $\frac{21}{D} \left\{ 1 + 1/2 \cdot \frac{2h}{D} \left(1 + 1 - \frac{1}{h}\right) + 1/3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 \left(1 + \frac{1}{h} + \left(1 - \frac{1}{h}\right)^2\right) + \dots \right\}$

=  $21/D \left\{ 1 + \frac{2h}{D} - \frac{1}{D} + \dots \right\}$

breuk =  $\frac{D}{21} \cdot \frac{2h}{D} \cdot \frac{1 + 1/2 \cdot 2h/D + 1/3(2h/D)^2 + \dots}{1 + 2h/D - 1/D + \dots}$

=  $\frac{h}{1} \cdot (1 - h/D + 1/D + \dots)$

of bij benadering:

breuk =  $\frac{h}{1} \left(1 - \frac{h-1}{D}\right)$

$\frac{Nu_1}{Nu_h} = \left\{ \frac{h}{1} \left(1 - \frac{h-1}{D}\right) \right\}^{1/3}$

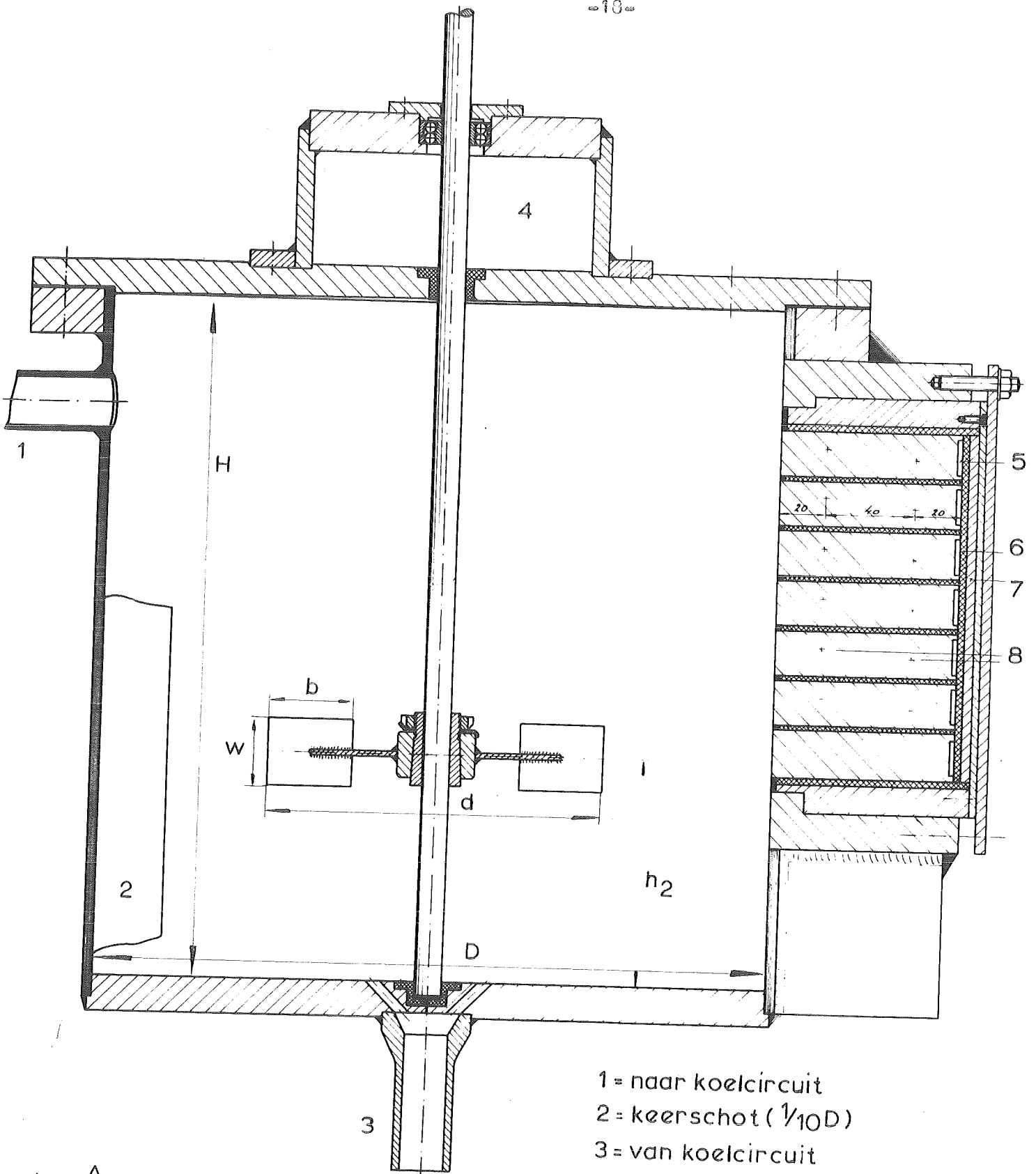


Fig. 1<sup>A</sup> Schets van vat + meetblok

$D = H = 0.291 \text{ m}$

$h_2 = \frac{1}{3} D$        $w = \frac{1}{5} d$

$d = \frac{1}{3} D$        $b = \frac{1}{4} d$

- 1 = naar koelcircuit
- 2 = keerschot ( $\frac{1}{10}D$ )
- 3 = van koelcircuit
- 4 = lucht slot
- 5 = ruimte thermocoaxkabel
- 6 = teflon
- 7 = asbest
- 8 = plaats thermokoppels

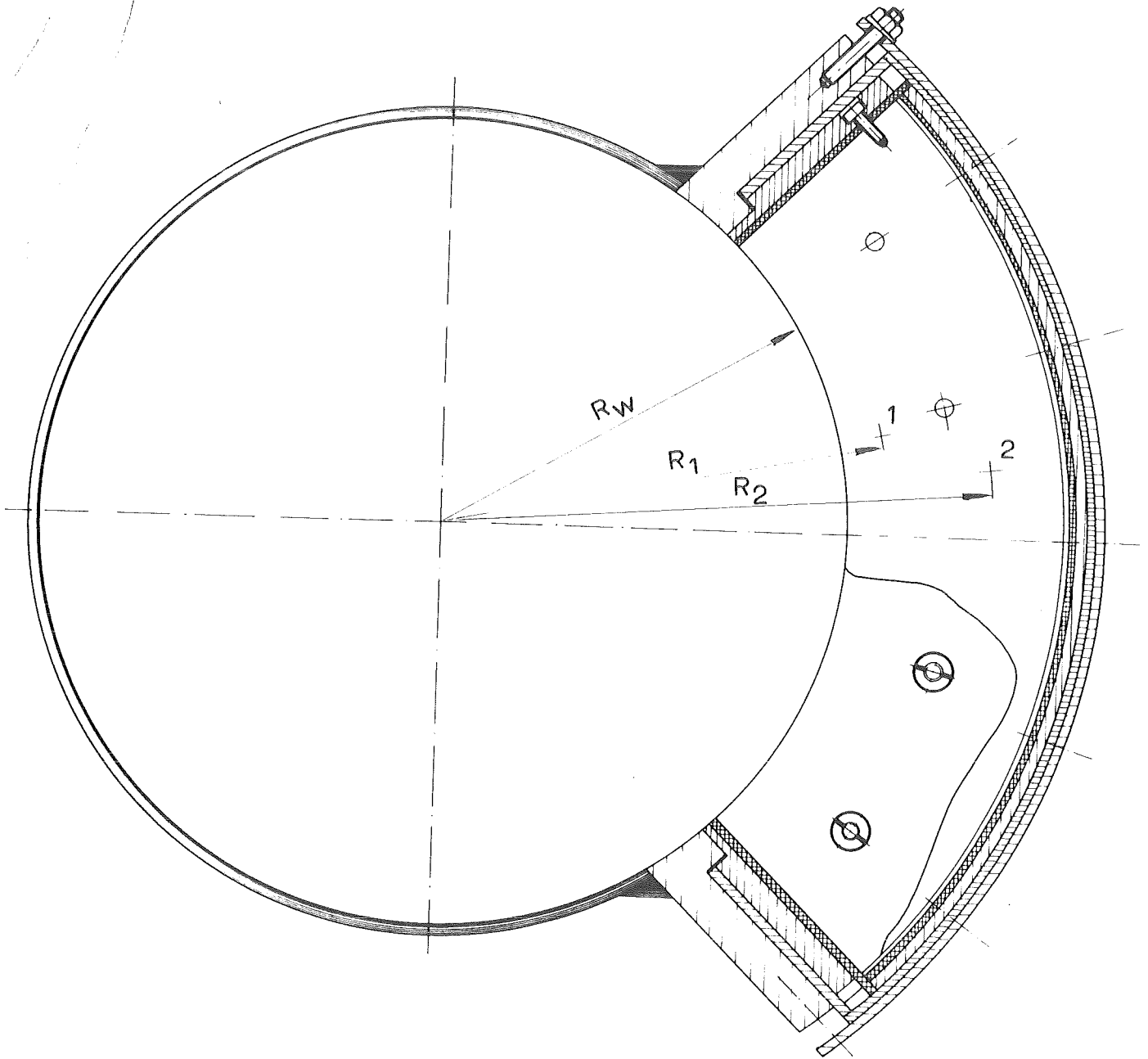


Fig. 1<sup>B</sup>. Bovenaanzicht vat + meetblok.  
zie fig. 1<sup>A</sup>.

$$R_W = \frac{1}{2} D \quad 1; 2 = \text{plaats thermokoppels}$$

$$R_{1;2} = R_W + d_t \text{ (zie tabel 1)}$$

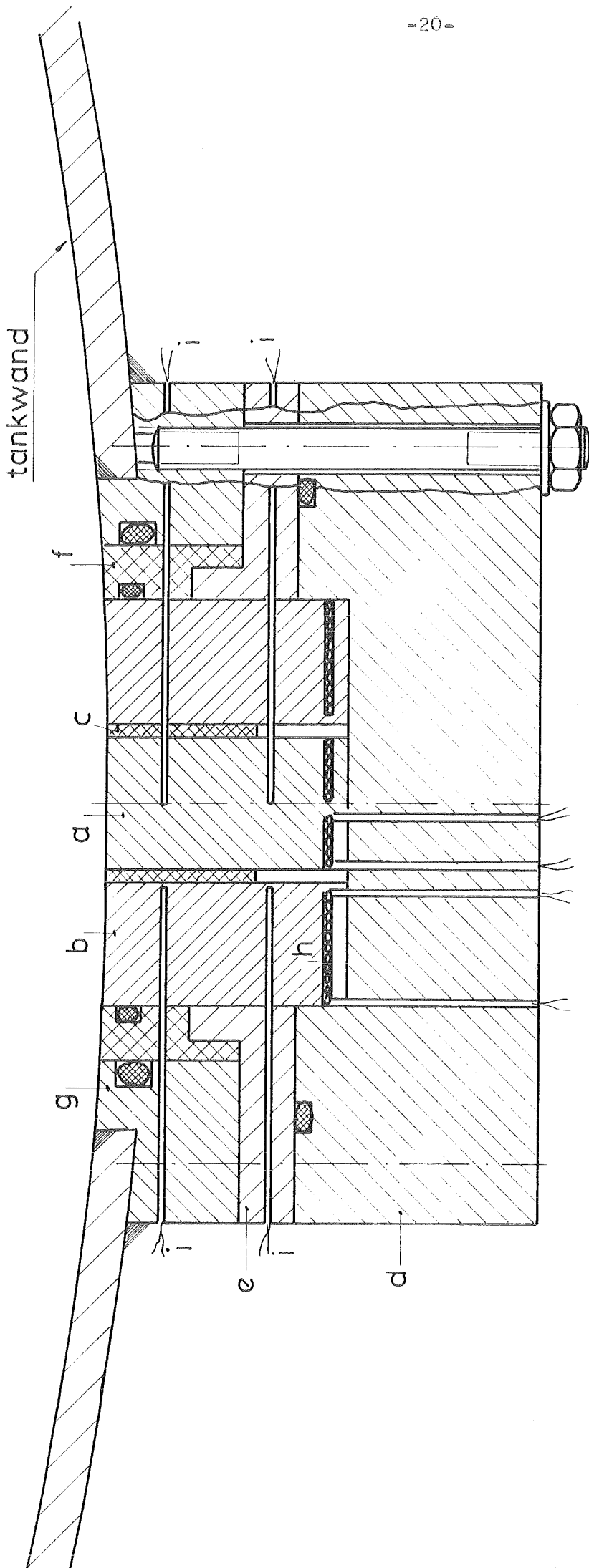


Fig.2. De warmtestroomdichtheidsmeter voor de wand.

- a = meetcilinder
- b = koperen isolatiering
- c = isolatie (siliconenrubber.)
- d = syndanyo blok
- e = syndanyo ring
- f = teflon ring
- g = flens in tankwand gelast
- h = thermo-coax verwarmingsdraad
- i = thermokoppel

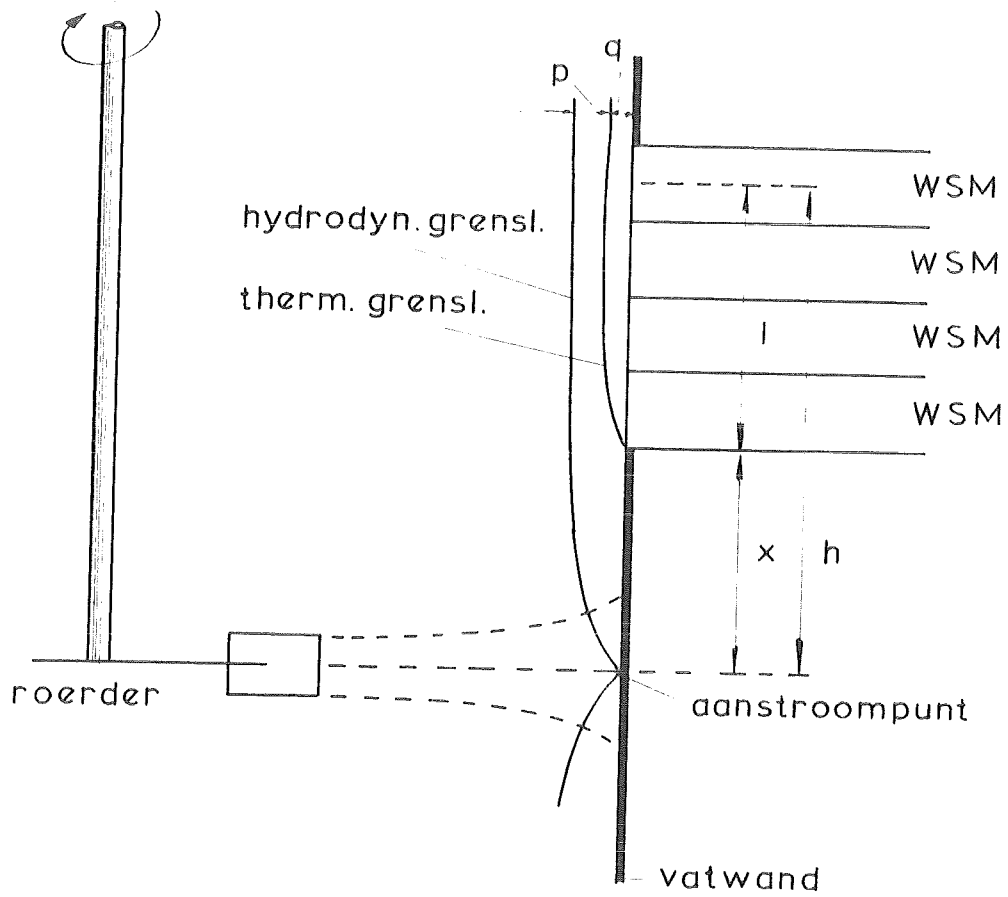


fig. 3. Deel van het vat met aanstroompunt en grenslagen.  
q = dikte Thermische grenslaag  
p+q = dikte Hydrodynamische grenslaag.

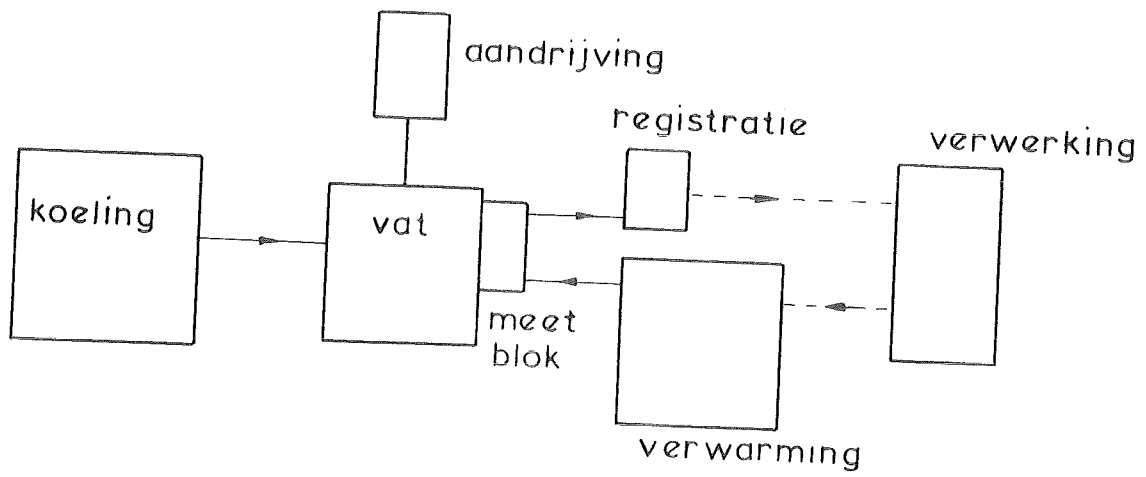


Fig. 4 Blokschema van de opstelling



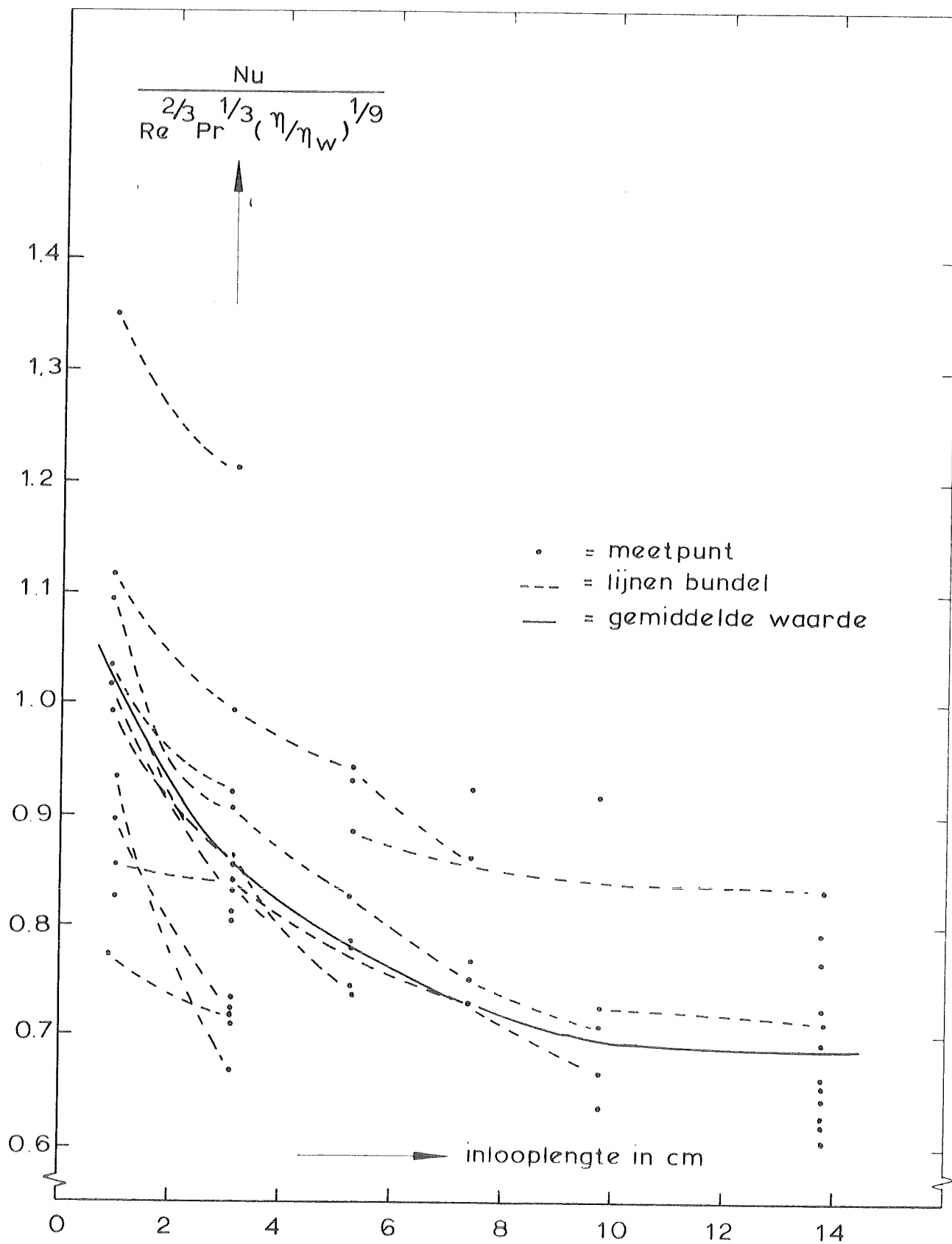


Fig. 5  $Nu / Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} = f(l)$   
 $D/h = 2,14 \quad h/D = 0.476$

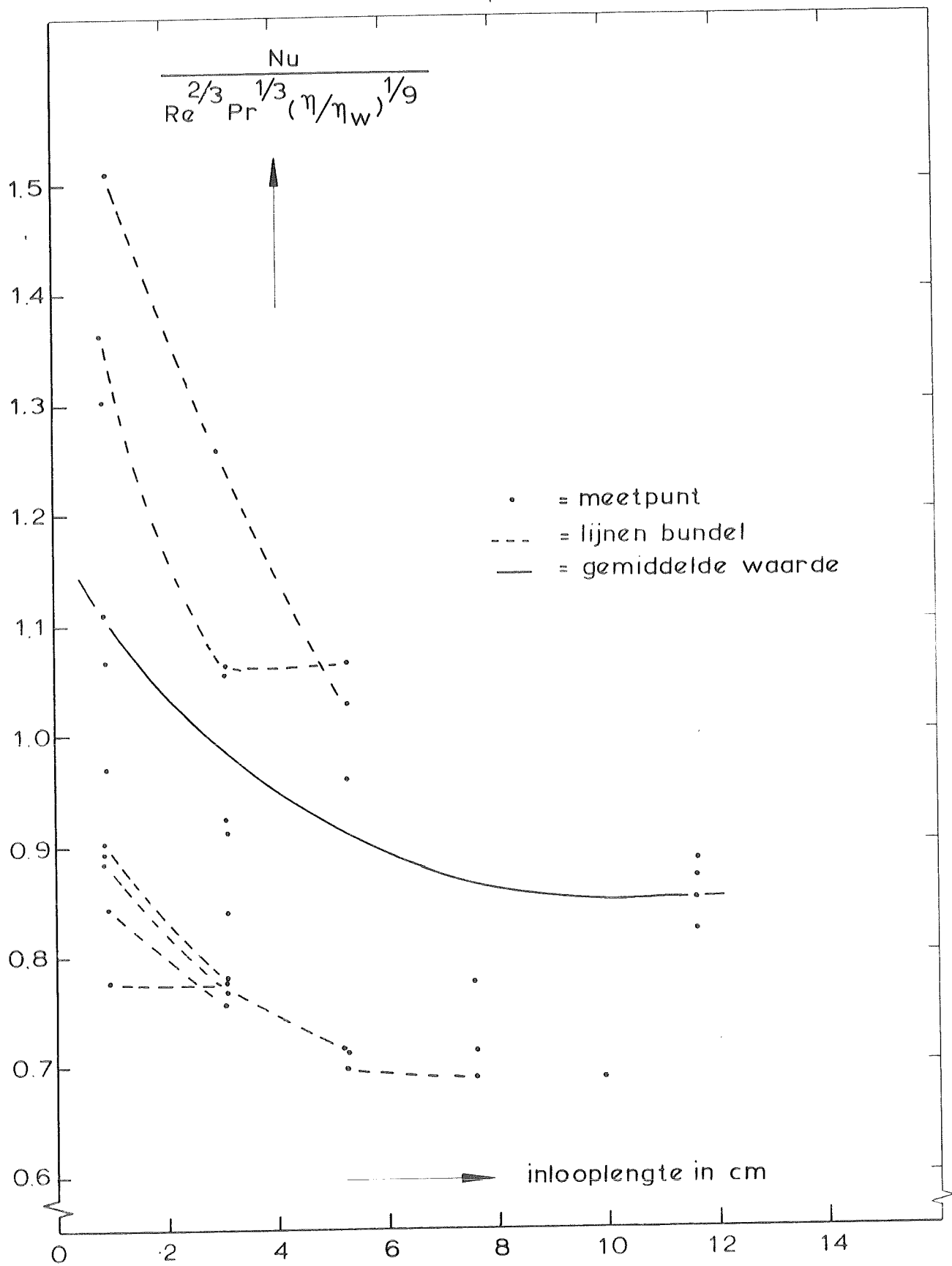


Fig. 6  $Nu / Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} = f(l)$

$D/h = 2.54 \quad h/D = 0.400$

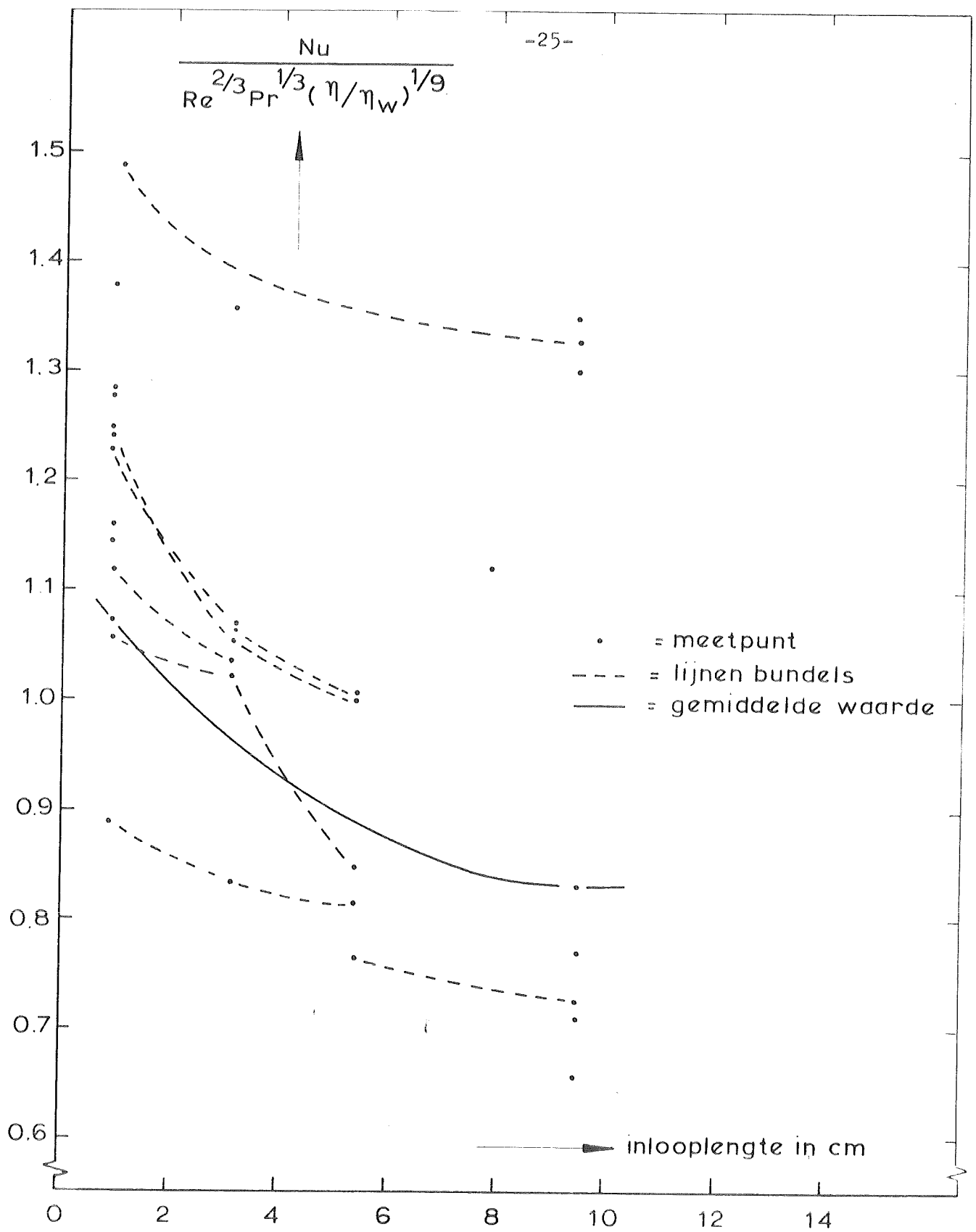


Fig. 7  $Nu / Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} = f(l)$   
 $D/h=3.16$   $h/D=0.326$

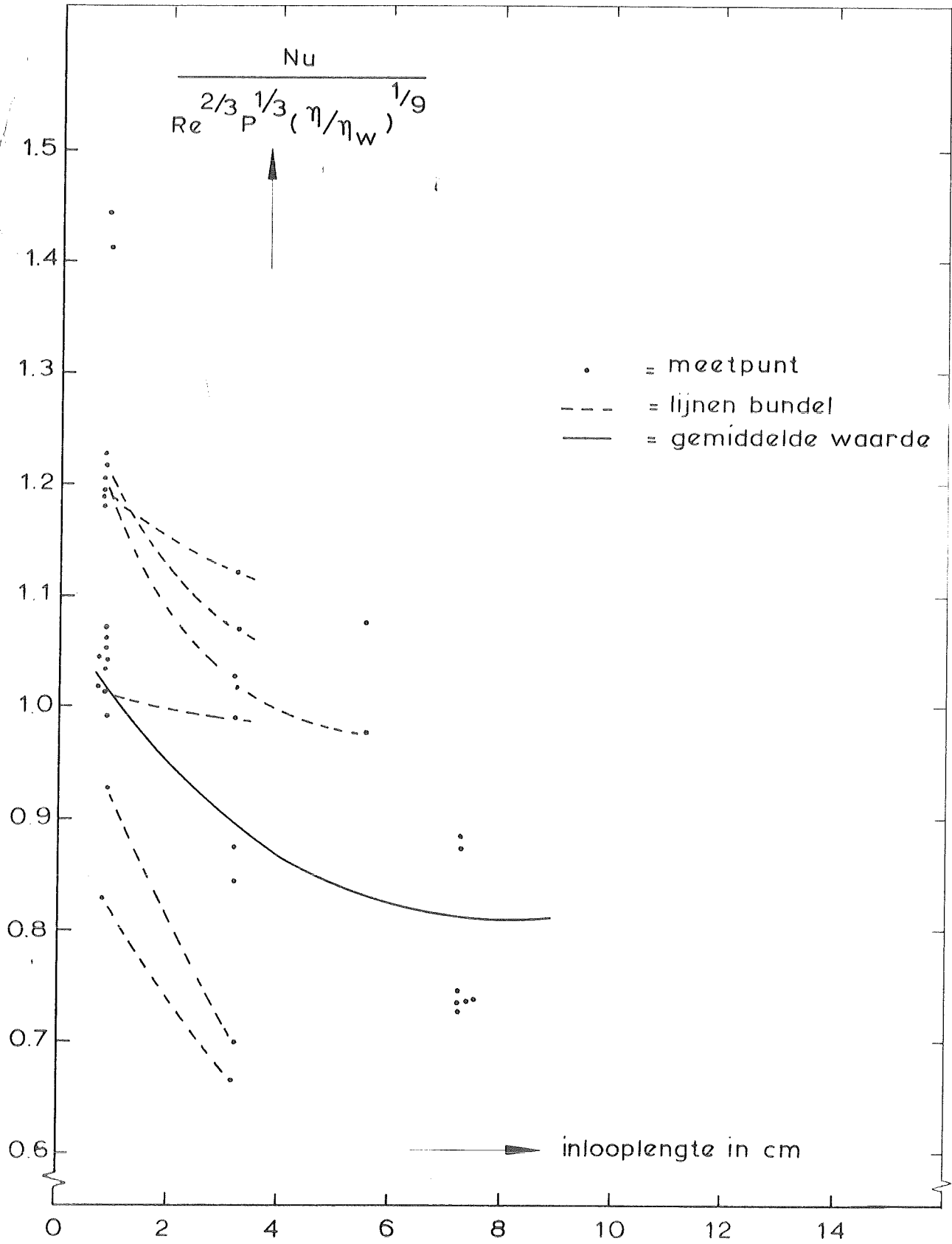


Fig. 8  $Nu / Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} = f(l)$   
 $D/h=3.99 \quad h/D=0.249$

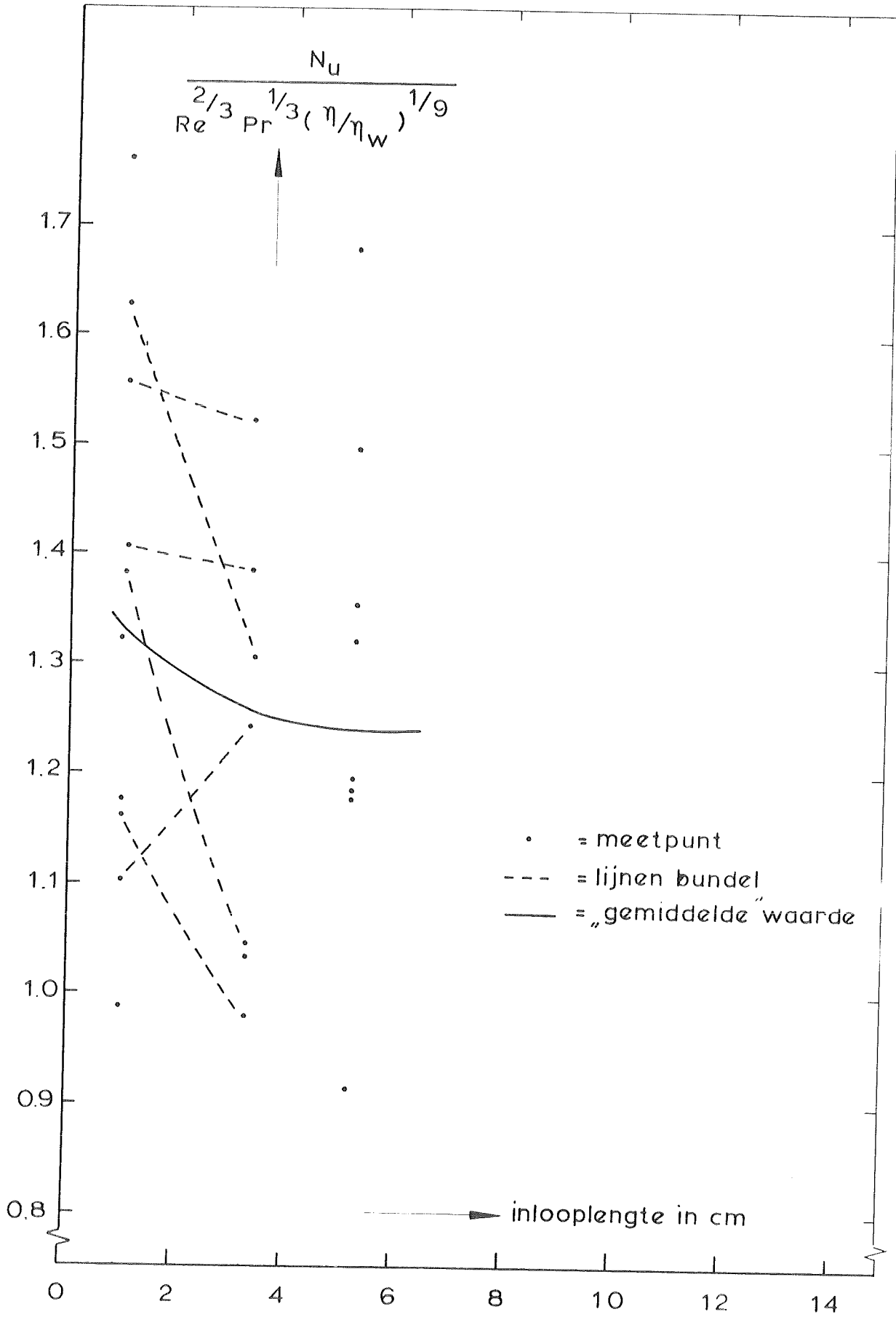


Fig. 9  $\frac{Nu}{Re^{2/3} Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9}} = f(l)$   
 $D/h=6,09 \quad h/D=0,174$

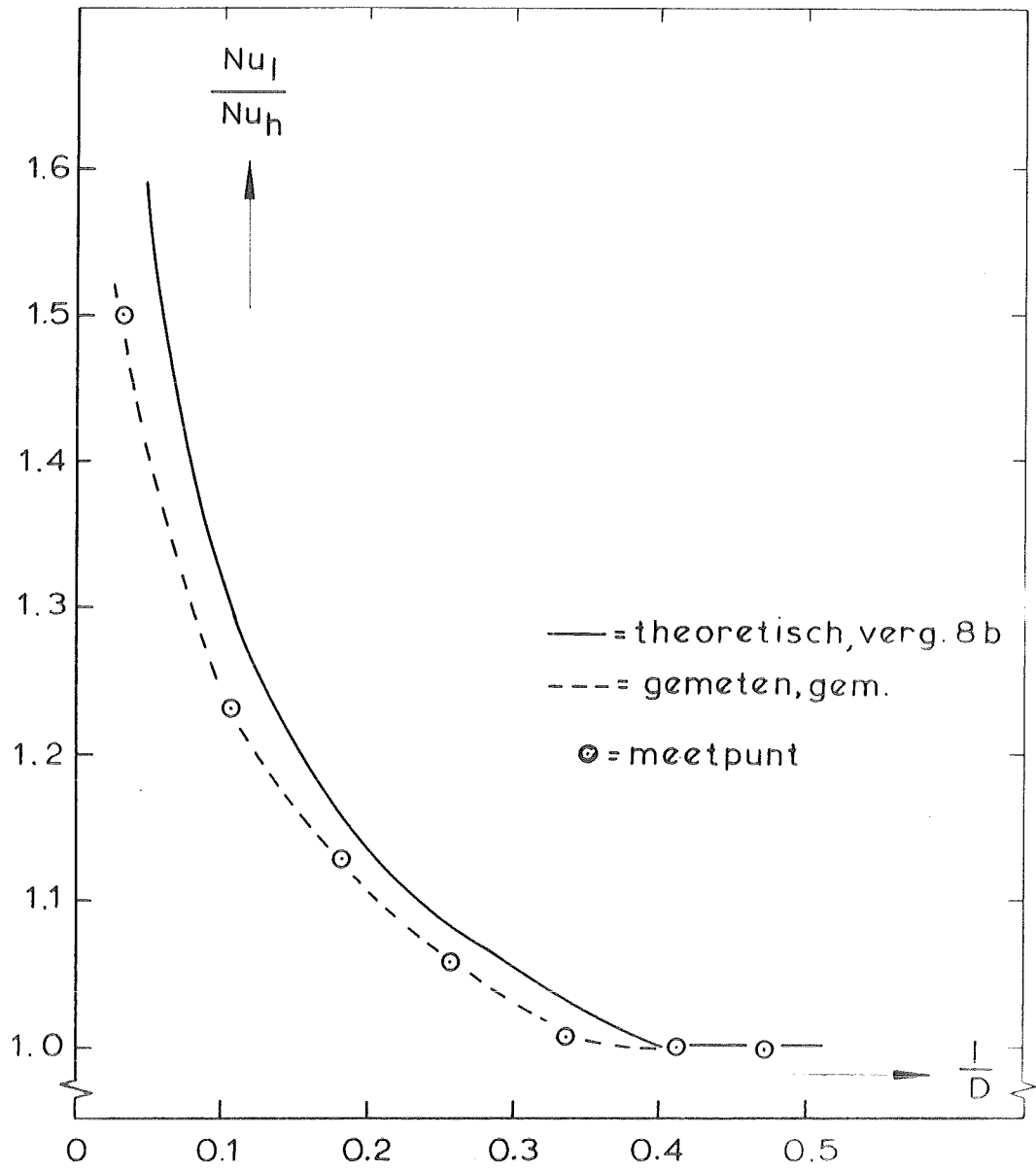


Fig. 10  $Nu_l/Nu_h = f(1/D)_{D/h}$

$D/h=2.14$        $h/D=0.476$

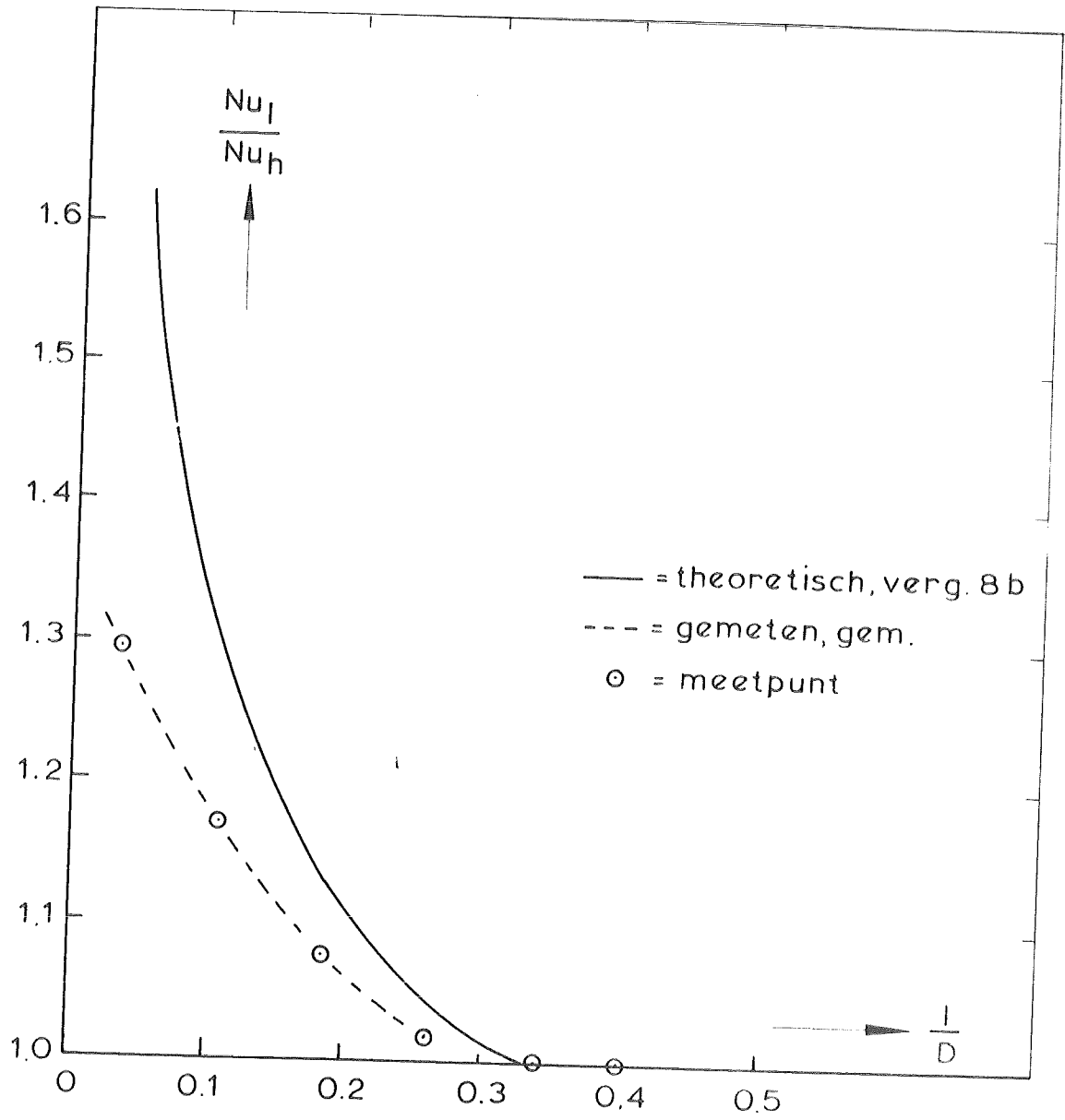


Fig. 11  $Nu_l/Nu_h = f(l/D)_{D/h}$

$D/h=2.54$   $h/D=0.400$

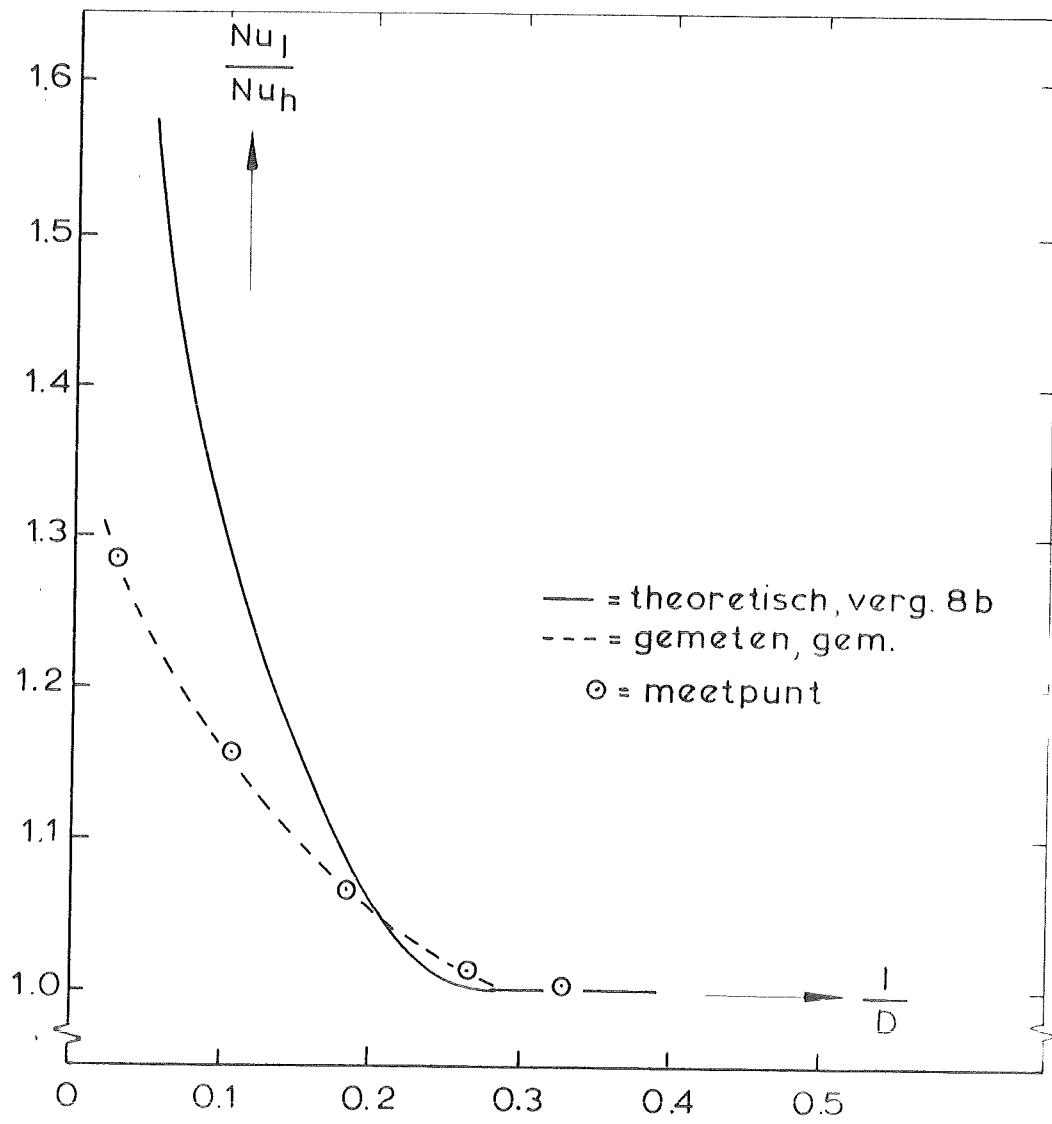


Fig. 12  $Nu_l/Nu_h = f(l/D)_{D/h}$

$D/h=3.16$       $h/D=0.326$



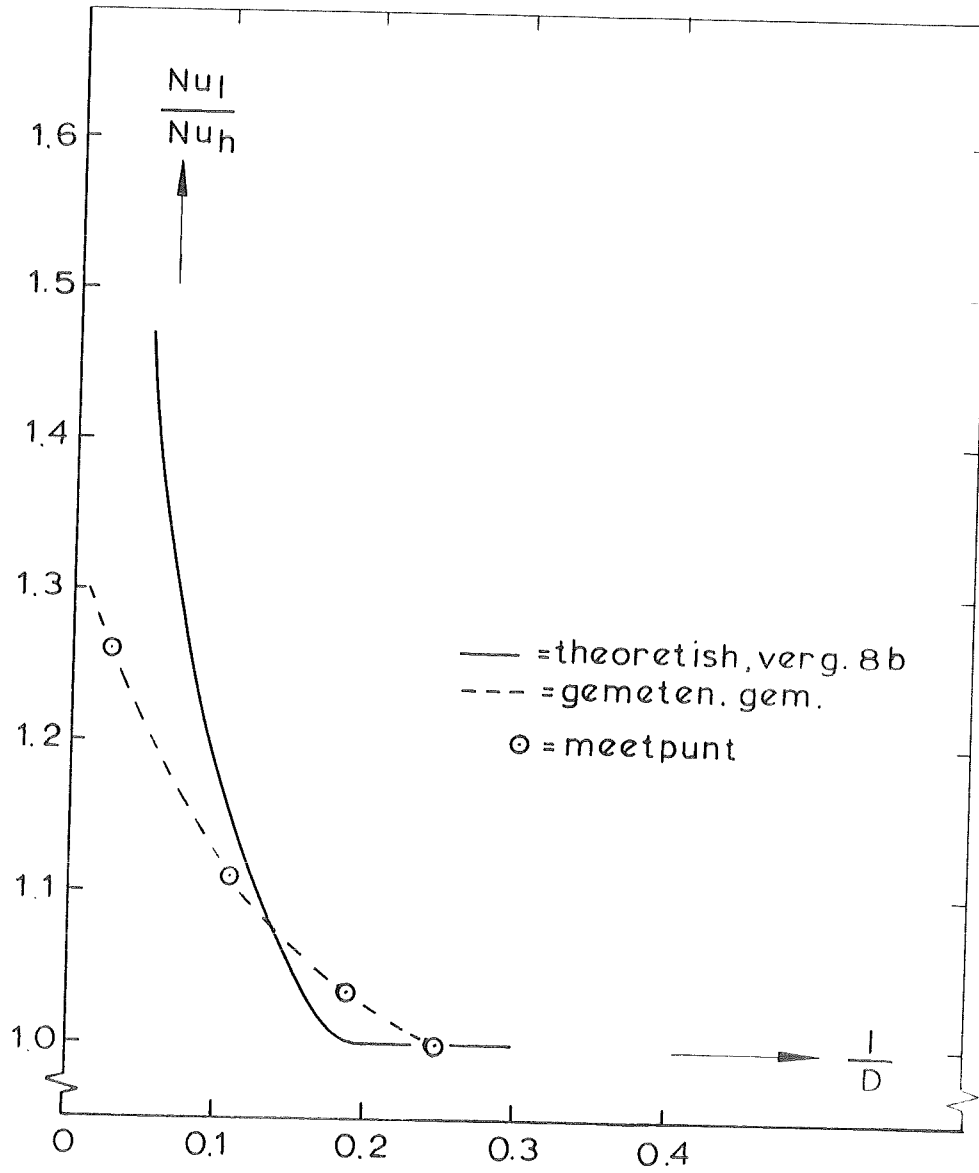


Fig. 13  $Nu_l/Nu_h = f(l/D)_{D/h}$   
 $D/h=3.99$   $h/D=0.249$

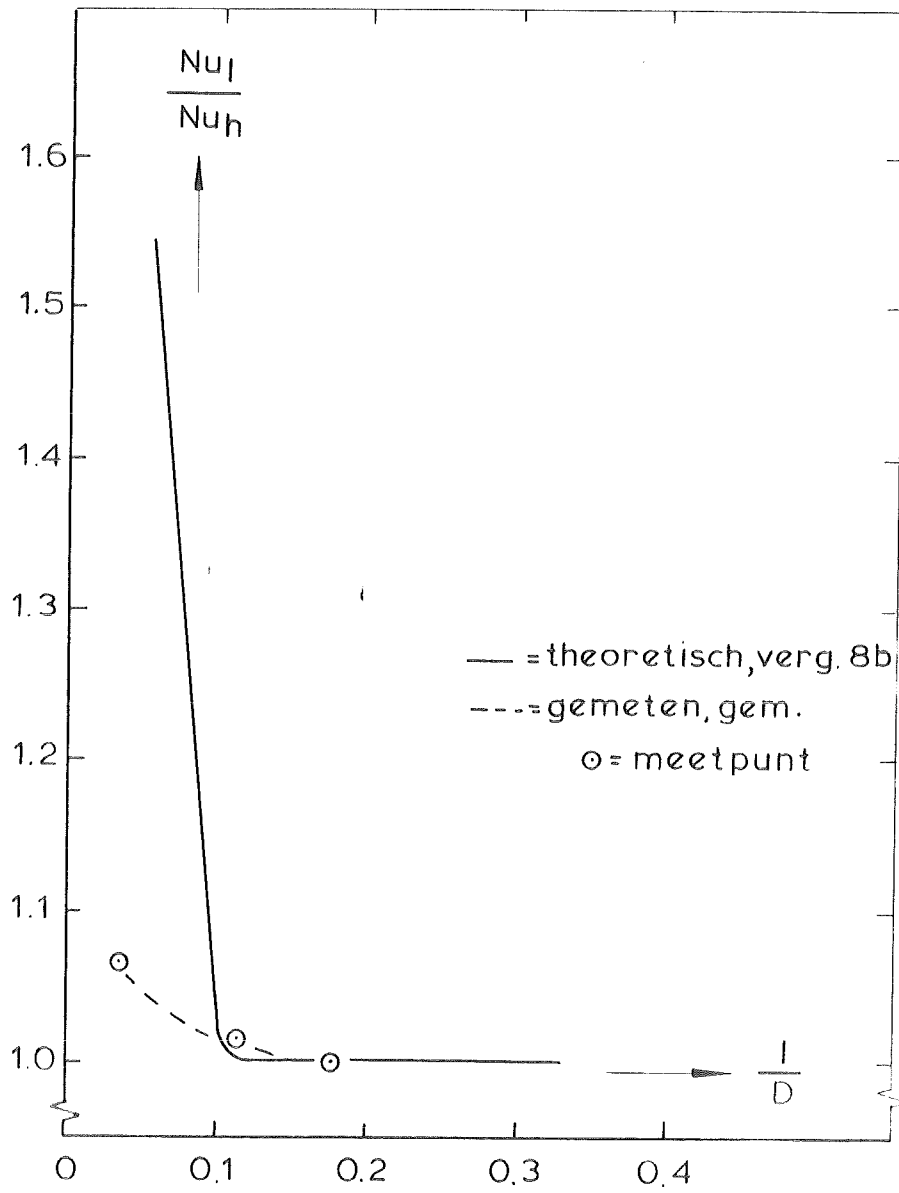


Fig. 14  $Nu_l/Nu_h = f(l/D)_{D/h}$

$D/h=6.09$       $h/D=0.174$

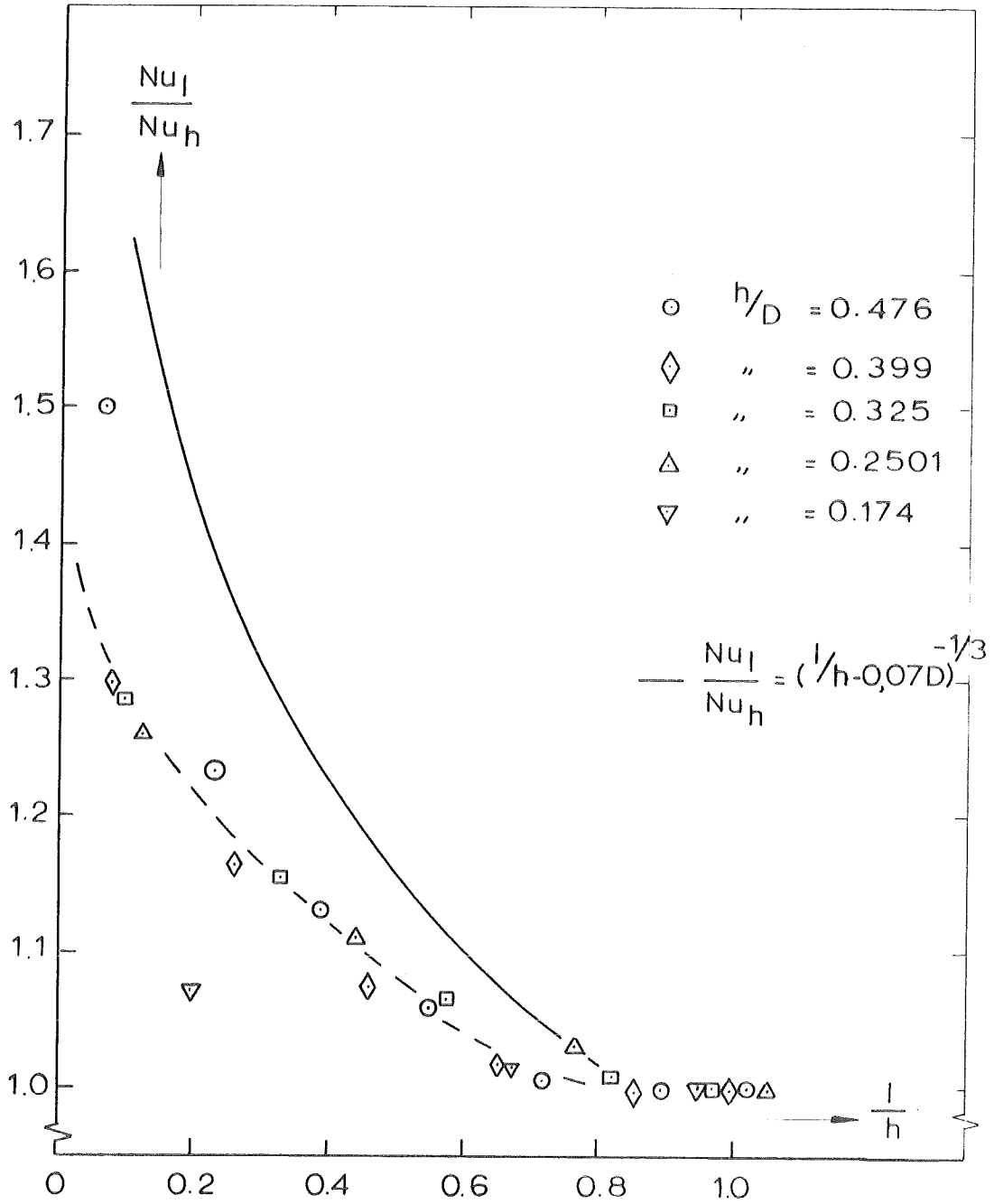


Fig. 15 Meetwaarde als functie van  $l/h$  vergeleken met betrekking (9b).

blz 1 Samenvatting dit is geen Samenv.

blz 4 laatste zin kan anderszeker

blz 5  $N_{u0} = f(y_0, h_0)$   
aanmerkelijk?

blz 7  $N_{u0} \div \left\{ \frac{2l}{D} \frac{N_{u0}}{(1+2h_0)} \right\}^{-1/3}$

$(N_{u0})_{e_0} \div (a + b \frac{h}{D})^{-1/3}$

$\frac{N_{u0}}{N_{u0h}} = \left\{ \frac{h}{l} \left( 1 - \frac{h-l}{D} \right) \right\}^{1/3} \approx \left( \frac{h}{l} \right)^{1/3}$

mier dekt geweest

blz 10 een las  
?

blz 11 verduuring ykkm.

12 overgangs - enk's  
niet

13 (15) t.o.v. (7b) op blz 7  
?

beide gemeten

14 2 onduidelijkheden

14.  $\frac{N_{up}}{N_{down}} \approx \left(\frac{h}{l}\right)^{1/3}$

$\left(\frac{h}{l}\right)^{1/3} < 1.1$

$\frac{h}{l} < 1.33$

$$\begin{array}{r} 121 \quad 133/ \\ \underline{121} \quad 690 \\ 133 \quad \underline{665} \end{array}$$

$l > 0.75h$

th. →

$\frac{h}{l} < \frac{1}{0.45}$

$l > \underline{0.45h}$

ex →

15. conclusie  
 waarom alleen F  
 thermokoppels  
 bevoeling laatste zin?

