

archief 259

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

METING VAN DE PLAATSELIJKE WARMTEOVERDRACHTS-
COEFFICIENT AAN DE WAND VAN EEN GEROERD VAT

K. D. ENTHOVEN
AFSTUDEERVERSLAG
juni 1968

LABORATORIUM VOOR FYSISCHE TECHNOLOGIE

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

METING VAN DE PLAATSELIJKE WARMTEOVERDRACHTS-
COEFFICIENT AAN DE WAND VAN EEN GEROERD VAT

Afstudeerverslag

K.D. Enthoven

Juni 1968

<u>Inhoud</u>	<u>blz.</u>
I Samenvatting	1
II Inleiding	2
III Meetmethode	4
IV Resultaten van <u>Fokkelman</u> en <u>Dekkers</u>	6
V Meetresultaten	
A. Metingen met water; plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in vertikale richting	7
B. Metingen met olie; bepaling van de invloed van η/η_w op de warmteoverdrachtscoëfficiënt	8
C. Metingen met water; plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in horizontale richting	9
VI Conclusies	11
VII Symbolenlijst	12
VIII Literatuur	13

I Samenvatting

Onderzocht is de plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de wand van een geroerd vat.

Het vat heeft een vlakke bodem, 4 keerschotten en is afgesloten met een vlakke deksel. De diameter van het vat is gelijk aan de hoogte. Het vat is geheel gevuld met water of olie, dat geroerd wordt met een Rushtonturbine.

- Gemeten is:
- a) de plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in verticale richting
 - b) de invloed op de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het verschillend zijn van de viskositeit van de vloeistof aan de vatwand en de viskositeit van de "bulk" van de vloeistof.
 - c) de plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in horizontale richting

Dit onderzoek is een voortzetting van het werk van Fokkelman en Dekkers.

II Inleiding

De lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de wand van een geroerd vat is o.a. afhankelijk van de plaats. Dit kan tot gevolg hebben dat de wandtemperatuur van het vat niet uniform is, wat een bezwaar is voor temperatuurgevoelige processen. Het is daarom zinvol te onderzoeken hoe de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt gecorreleerd is met de plaats.

Het is reeds bekend dat de gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de wand van een geroerd vat afhankelijk is van de fysische eigenschappen van de vloeistof in het vat, de geometrie van het vat en de roerder en van het toerental van de roerder. De lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt zal, behalve van de plaats op de vatwand, ook van deze factoren afhangen.

Fokkelman en Dekkers [1] hebben een begin gemaakt om voor één geometrie van vat en roerder (vat met vlakke bodem voorzien van 4 keerschotten en geroerd met een Rushtonturbine; vloeistofhoogte gelijk aan de vattendiameter) te onderzoeken op welke wijze de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt afhankelijk is van de stofconstanten van de vatinhoud, het toerental en de diameter van de roerder en de plaats op de vatwand. Zij maakten hierbij gebruik van een warmtestroommeter ontwikkeld door Akse en de Graauw [2] (voor de beschrijving van de warmtestroommeter, zie III meetmethode). Deze warmtestroommeters bevinden zich steeds midden tussen de keerschotten, zodat alleen de plaatsafhankelijkheid in verticale richting is onderzocht.

Dit onderzoek is een voortzetting van het werk van Fokkelman en Dekkers. Gemeten is in hun kleine vat. De afmetingen van dit vat en de gebruikte roerder zijn weergegeven in fig. 1. Tevens is in deze figuur aangeduid op welke plaats de warmtestroommeters en de koudestroommeter (voor de beschrijving van de koudestroommeter zie III Meetmethode) geplaatst zijn. Het vat is afgesloten door een deksel en geheel gevuld met vloeistof.

De metingen vallen uiteen in drie groepen:

- 1) Metingen met water ter contrôle van de plaatsafhankelijkheid van de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt in verticale richting, welke gevonden is door Fokkelman en Dekkers. (Zie V Meetresultaten)

taten A)

- 2) Metingen met olie (tellus 23, Shell) om na te gaan hoe het verschillend zijn van de viskositeit van de vloeistof aan de wand (η_w) en de viskositeit van de "bulk"-vloeistof (η) de plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt beïnvloedt (zie V Meetresultaten B). Dit is gedaan zowel bij verwarmde vatwand ($\frac{\eta}{\eta_w} > 1$) als bij gekoelde vatwand ($\frac{\eta}{\eta_w} < 1$).
- 3) Metingen met water om na te gaan of de plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt ook nog plaatsafhankelijkheid in horizontale richting vertoont (zie V Meetresultaten C). Hiertoe zijn de keerschotten verplaatst, zodat de warmtestroommeters zich niet meer midden tussen de keerschotten bevinden.

III Meetmethode

De plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt gemeten met een warmtestroommeter of een koudestroommeter die ontwikkeld is door Akse en de Graauw [2]. Deze meter is gebaseerd op het volgende principe (Zie fig. 2).

Loodrecht in de wand van het vat is een rood koperen staaf (meet-cylinder) aangebracht, waarvan één uiteinde één geheel vormt met de binnenzijde van het vat, het andere uiteinde steekt uit het vat naar buiten om verwarmd of gekoeld te kunnen worden. Het verwarmen geschiedt met een thermocoaxkabel, die tegen de achterzijde van de cylinder geplaatst is. Het koelen gebeurt door langs de achterzijde van de cylinder spiritus van 17°C te laten stromen. In de meetcylinder zijn de thermokoppels 1 en 2 aangebracht op een afstand d_1 en d_1+d_2 van de vatwand. Deze meten resp. de temperaturen T_1 en T_2 .

De plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt kan als volgt berekend worden:

$$\phi_w'' = \alpha(T_w - T_b) \quad (1)$$

Voor de meetcylinder geldt dat:

$$\phi_w'' = - \lambda_k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Uit (1) en (2) volgt dan dat:

$$\alpha = - \frac{\lambda_k \frac{dT}{dx}}{T_w - T_b} \quad (3)$$

$\frac{dT}{dx}$ is de temperatuurgradient in de meetcylinder loodrecht op de vatwand. Daar de temperatuur in de meetcylinder lineair met de plaats verandert, is:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{d_2} \quad \text{en} \quad T_w = T_1 - \frac{d_1}{d_2} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Uit (3) en (4) volgt dan dat:

$$\alpha = \frac{\lambda_k (T_2 - T_1)}{d_2 (T_1 - T_b) - d_1 (T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Hiermeer kan nu α berekend worden: T_1 en T_2 worden met een compensator gemeten, T_b met een kwikthermometer, d_1, d_2 en λ_k zijn bekend.

Fokkelman en Dekkers gebruikten voor $\lambda_k = 380 \frac{W}{m^\circ C}$.

Later is gebleken dat $\lambda_k = 400 \frac{W}{m^\circ C}$ is [6]

Hun metingen, welke in dit verslag vermeld worden, zijn hiervoor gecorrigeerd.

In het bovenstaande is verondersteld dat er geen radiaal warmteverlies van de meetcilinder is.

Om de meetcilinder bevindt zich een rood koperen ring, welke op gelijke wijze verwarmd of gekoeld wordt als de meetcilinder, hetgeen gecontroleerd wordt met behulp van de thermokoppels 3 en 4. Deze ring heeft een tweeledig doel:

- 1) Doordat het temperatuurverloop in de meetcilinder en de buitenring hetzelfde is, is er geen radiaal warmteverlies van de meetcilinder.
- 2) Over de breedte van de ring kan de thermische grenslaag zich instellen; de breedte van de ring moet zo groot zijn dat het voor de meetcilinder is alsof de gehele vatwand verwarmd wordt. In de praktijk zal immers bijna altijd de gehele vatwand verwarmd worden.

Fokkelman en Dekkers geven een schatting van de benodigde breedte van de ring. Om dit te kunnen doen moet het snelheidsprofiel van de vloeistof langs de wand bekend zijn. Zij menen dit snelheidsprofiel in een theoretisch artikel van Glauert [3] gevonden te hebben. Recent is door Broek [4] echter aangetoond dat dit snelheidsprofiel niet juist kan zijn. Omdat de resultaten van Fokkelman en Dekkers zich goed laten correleren, is het toch zeer waarschijnlijk dat de door hen gebruikte ringen breed genoeg zijn. Bij dit onderzoek zijn dezelfde ringen gebruikt.

Om de "bulk"-temperatuur constant te houden, wordt de vloeistof met een uitwendig circuit gekoeld of verwarmd. De gemiddelde verblijftijd van de vloeistof in het vat is minimaal 20 x de circulatietijd. Uit het werk van Voncken [5] is af te leiden, dat dit zeker voldoende is om het stromingspatroon in het vat niet te verstoren.

IV Resultaten van Fokkelman en Dekkers

De onderzoeken van Fokkelman en Dekkers zijn gedaan in 2 vaten van verschillende diameter (0,294m en 1,2m). In het kleine vat is gemeten met water en olie (tellus 23, Shell), in het grote vat alleen met water.

De metingen met water zijn gedaan om de invloed van het toerental en de diameter van de roerder en de plaats op de vatwand op de plaatselijke warmteoverdrachtscoëfficiënt te vinden. De metingen met olie zijn hoofdzakelijk gedaan om te bepalen op welke wijze de stofconstanten van de vloeistof de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt beïnvloeden.

Uit al deze metingen is het volgende verband opgesteld:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,64 \cdot \text{Re}^{2/3} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (D/h)^{1/3} \cdot (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad \text{voor } D/h \leq 12 \\ \text{Nu} &= 1,5 \cdot \text{Re}^{2/3} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad \text{voor } D/h > 12 \end{aligned} \quad (6)$$

De onderzochte gebieden zijn:

$$\begin{aligned} 5 \cdot 10^2 &< \text{Re} < 10^6 \\ 7 &< \text{Pr} < 900 \\ 1 &< \eta/\eta_w < 16 \end{aligned}$$

Zie voor het gebied van D/h fig. 4.

V Meetresultaten

A. Metingen met water; bepaling van de plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in verticale richting

Eerst zijn drie series metingen met water gedaan, waarbij

$$\frac{Nu}{Pr^{1/3}(\eta/\eta_w)^{1/9}} \quad \text{als functie van Re in één grafiek voor}$$

verschillende D/h (18,4; 7,7; 2,2) is uitgezet. Deze metingen zijn weergegeven in fig. 3. Hier blijkt, evenals uit de metingen van Fokkelman en Dekkers, dat de exponent van Re gelijk is aan 2/3.

Fig. 4 geeft een overzicht van de plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in verticale richting met water als vloeistof zoals die gevonden is door Fokkelman en Dekkers [1], Akse [2] en in dit onderzoek. De afmetingen van de vaten en de roerders waarmee deze metingen verricht zijn, zijn tevens in fig. 4 opgenomen. Alle roerders zijn Rushtonturbines. De vaten van Akse en Dekkers zijn niet afgesloten door een deksel; zij hebben dus een vrij vloeistofoppervlak. Het vat gebruikt door Fokkelman en in dit onderzoek, is afgesloten door een vlakke deksel en is geheel met vloeistof gevuld. Uit fig. 4. blijkt dat de volgende betrekkingen de meetpunten het best correleren:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,74 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} \cdot (D/h)^{1/4} \quad \text{voor } D/h \leq 16 \\ Nu &= 1,5 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad \text{voor } D/h > 16 \end{aligned} \quad (7)$$

De betrekking voor kleine D/h voldoet beter dan de betrekking van Fokkelman en Dekkers: $Nu = 0,64 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/9} (D/h)^{1/3}$.

Drie meetpunten vertonen een afwijking, nl. de punten aangeduid door 0 3, X3 en X2. Deze afwijkingen zijn verklaarbaar. De punten 0 3 en X3 hebben betrekking op plaatsen die zich dicht bij het vloeistofoppervlak resp. het deksel en ver van de roerder bevinden. Hier is merkbaar dat de circulatiestroming van de wand naar het vloeistofoppervlak resp. het deksel afbuigt; er is in de "hoek" tussen de vatwand en het vloeistofoppervlak resp. het deksel een relatief "dood"-gebied (zie fig.1). Dit heeft een kleine warmte-

overdrachtscoëfficiënt tot gevolg. Het punt $\Theta 3$ ligt hoger dan het punt X3. Ook dit is begrijpelijk: het is te verwachten dat de circulatiestroming bij een vrij vloeistofoppervlak verder langs de vatwand zal doorlopen alvorens af te buigen dan in het geval dat het vat afgesloten is met een deksel. Het effect van de "dode hoek" zal dus geringer zijn.

Het punt X2 heeft betrekking op een plaats die even dicht bij de bodem ligt als de plaats behorende bij het punt X3 bij het deksel. De afstand tot de roerder is echter veel kleiner. Dit verklaart dat het effect van de "dode hoek" geringer is, zodat de afwijking van het punt X2 kleiner is dan de afwijking van het punt X3. Opmerkelijk is dat het punt $\Delta 2$, gemeten door Fokkelman en overeenkomend met ons punt X2, wel aan de correlatie voldoet. Hiervoor is geen verklaring. De discrepantie tussen de punten $\Delta 2$ en X2 is te groot om deze aan meetonauwkeurigheden toe te kunnen schrijven.

B Metingen met olie; bepaling van de invloed van η/η_w op de warmteoverdrachtscoëfficiënt

De metingen met olie hebben ten doel om na te gaan hoe de viscositeitscorrectie (η/η_w) in de formule voorkomt.

1) Verwarmen van de vatwand ($\eta/\eta_w > 1$)

Hiervoor zijn metingen gedaan door de wandtemperatuur te variëren en daarbij de "bulk"-temperatuur ($Pr = 626$ en 470), $D/h (= 8,9)$ en toerental ($Re = 2435$ en 1800) constant te houden. Deze metingen zijn in fig. 5 weergegeven met de metingen van Fokkelman. Hier blijkt dat de exponent van η/η_w gelijk aan $1/9$ is.

2) Koelen van de vatwand ($\eta/\eta_w < 1$)

De viscositeitscorrectie is eveneens nagegaan door in plaats van een warmtestroommeter een koudestroommeter te gebruiken. Op dezelfde wijze als met de warmtestroommeter is er nu gemeten: constante "bulk"-temperatuur ($Pr = 270$ en 435), constante $D/h (= 8,9)$ en constant toerental ($Re = 8050$ en 5000) en variabele wandtemperatuur. Deze metingen zijn te vinden in fig. 6. Ook nu blijkt de

exponent van η/η_w gelijk aan $1/9$ te zijn.

3) Andere metingen met olie

Om na te gaan of de betrekkingen (7) ook voor olie gelden, zijn voor $D/h = 8,9$ nog een groot aantal metingen gedaan. Gevarieerd wordt het toerental van de roerder, de "bulk"-temperatuur van de olie en de temperatuur van de vatwand (zowel koelen als verwarmen). Deze metingen zijn met de meetpunten van 1 en 2 en te samen met betrekking (7) in fig. 7 weergegeven.

De bestreken gebieden zijn:

$$\text{verwarmen van de vatwand} \quad \left\{ \begin{array}{l} 500 < Re < 5200 \\ 425 < Pr < 940 \\ 1,6 < \eta/\eta_w < 9 \end{array} \right.$$

$$\text{koelen van de vatwand} \quad \left\{ \begin{array}{l} 850 < Re < 8200 \\ 260 < Pr < 700 \\ 0,045 < \eta/\eta_w < 0,4 \end{array} \right.$$

Het blijkt dat de metingen bij verwarmde vatwand ($\eta/\eta_w > 1$) goed met elkaar overeenstemmen, terwijl hetzelfde geldt voor de metingen bij gekoelde vatwand ($\eta/\eta_w < 1$)

Er zijn nu twee vreemde feiten te constateren, nl.

- 1) de metingen bij verwarmde vatwand liggen gemiddeld 30% te hoog t.o.v. betrekking (7).
- 2) de metingen bij gekoelde vatwand liggen gemiddeld 30% te laag t.o.v. betrekking (7).

Een verklaring is hiervoor niet te geven. Omdat zowel bij verwarmen als bij koelen, Pr en η/η_w over een ruim gebied gevarieerd zijn, kan de verklaring niet zijn dat de exponenten van Pr en η/η_w onjuist zijn. Merkwaardig is bovendien dat Fokkelman en Dekkers, die met dezelfde olie gemeten hebben, wel overeenstemming tussen hun metingen met water en olie hebben gevonden.

C Metingen met water; bepaling van de plaatsafhankelijkheid in horizontale richting van de warmteoverdrachtscoëfficiënt

Voor drie waarden van D/h (18,4; 7,7; 2,2) zijn metingen gedaan om de plaatsafhankelijkheid in horizontale richting van de

warmteoverdrachtscoëfficiënt te bepalen. Daartoe werden de keerschotten in het vat verplaatst. De keerschotten zijn op $2,5^{\circ}$ en 10° van de warmtestroommeter geplaatst, gezien vanuit de as van het vat. De roerder heeft beide richtingen gedraaid, waardoor de warmtestroommeter zowel voor als achter de keerschotten kan staan. In de figuren 8, 9 en 10 zijn deze drie series weergegeven. In deze figuren is tevens het verband voor dezelfde waarden van D/h aangegeven, wanneer de warmtestroommeter midden tussen de keerschotten staat.

Uit deze grafieken blijkt dat, als het keerschot $2,5^{\circ}$ voor de warmtestroommeter staat, de verlaging van de warmteoverdrachtscoëfficiënt 15 - 20% kan zijn. In de andere gevallen is de afwijking minder dan 10%.

VI Conclusies

- 1) Uit de metingen met water van alle onderzoekers blijkt dat $(D/h)^{1/4}$ beter voldoet dan $(D/h)^{1/3}$.

De formules luiden dan:

$$Nu = 0,74 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta/\eta_w)^{1/9} \cdot (D/h)^{1/4} \quad \text{voor } D/h \leq 16 \quad (7)$$

$$Nu = 1,50 \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta/\eta_w)^{1/9} \quad \text{voor } D/h > 16$$

- 2) De metingen met olie (tellus 23, Shell) leverde voor de exponent van η/η_w een waarde van $1/9$ op, zowel voor η/η_w groter als kleiner dan 1.

De metingen met olie voldoen zowel bij verwarmde als bij gekoelde vatwand aan de eerste betrekking van (7), mits de coëfficiënt in het eerste geval 30% verhoogd wordt en in het tweede geval 30% verlaagd wordt.

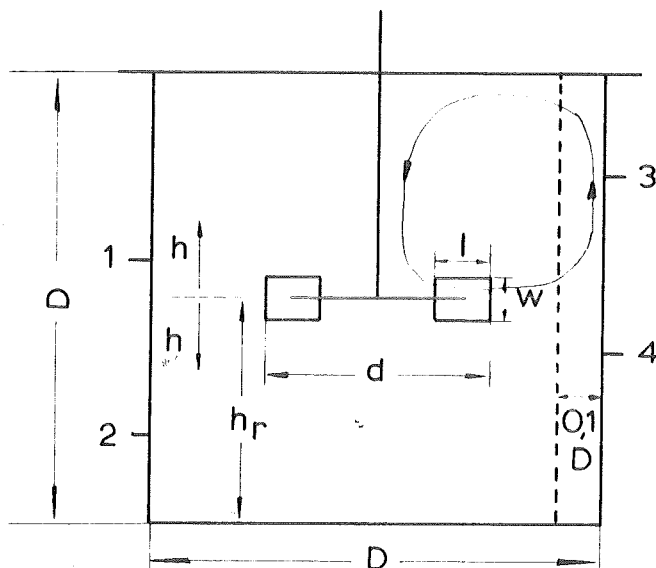
- 3) De plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in horizontale richting blijkt gering te zijn.

VII Symbolenlijst

a	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m^2/s
d	roerderdiameter	m
d_1, d_3	thermokoppelaafstand van vatwand	m
d_2, d_4	thermokoppelaafstand van d_1 resp d_3	m
D	vatdiameter	m
h	afstand van het roerdervlak	m
h_r	hoogte roerder vanaf bodem vat	m
l	roerderblad breedte	m
n	toerental	sec^{-1}
Nu	Nusseltgetal = $\frac{\alpha \cdot D}{\lambda}$	-
Pr	Prandtl-getal = $\frac{\nu}{a}$	-
Re	Reynolds-getal = $\frac{nd^2}{\nu}$	-
T_w	wandtemperatuur	$^{\circ}C$
T_b	"bulk"-temperatuur	$^{\circ}C$
T_1	temperatuur op afstand d_1 van vatwand	$^{\circ}C$
T_2	" " " $d_1 + d_2$ " "	$^{\circ}C$
w	roerderbladhoogte	m
α	warmteoverdrachtscoëfficiënt	$W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$
η	dynamische viscositeit van de "bulk"-vloeistof	$\frac{Nsec}{m^2}$
η_w	dynamische viscositeit van de vloeistof aan de vatwand	$\frac{Nsec}{m^2}$
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt van de vloeistof	$W/m \text{ } ^{\circ}C$
λ_k	" " " koper	$W/m \text{ } ^{\circ}C$
ν	kinematische viscositeit van de "bulk"-vloeistof	m^2/sec
ϕ_w	warmtestroomdichtheid door meetcilinder	W/m^2

VIII Literatuur

- 1 Fokkelman, Ph.A.M.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft juni 1967
- 2 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
- 3 Glauert, M.B.; J. Fluid. Mech. 1 (1956) 625
- 4 Broek, R.C.; Afstudeerverslag Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft juni 1968
- 5 Voncken, R.M.; Circulatiestroming en menging in geroerde vaten, dissertatie Delft, 1966
- 6 Rapport Technisch Fysische Dienst T.N.O. en T.H. no. 703.221



hoogte W.S.M.
van de bodem

1	17,5 cm
2	6,0 "
3	23,1 "
4	11,4 "

$D = 29,4 \text{ cm}$

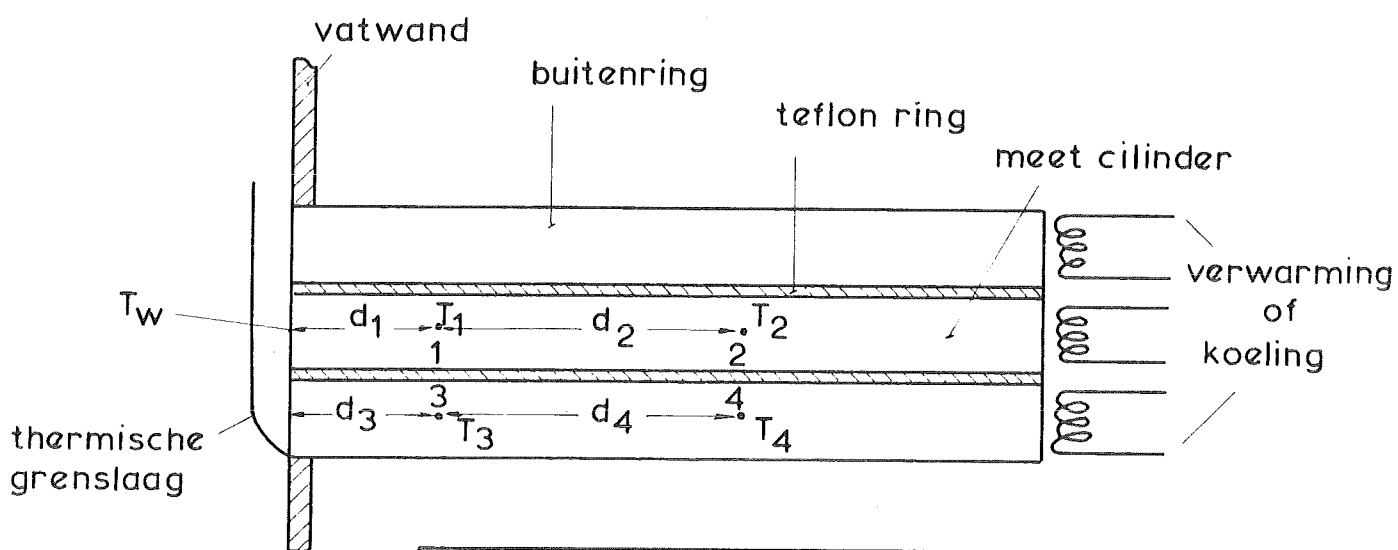
$d = \frac{1}{2} D$

$h_r = \frac{1}{2} D, \frac{1}{3} D$

$l = \frac{1}{4} d$

$w = \frac{1}{5} d$

Fig. 1 Vat en roerder



W.S.M.	$d_1 \text{ cm}$	$d_2 \text{ cm}$	$d_3 \text{ cm}$	$d_4 \text{ cm}$
1	2,01	4,05	2,02	4,05
2	2,00	4,00	2,02	3,98
3	2,01	3,99	2,01	3,97
4	2,00	4,04	1,99	3,99

Fig. 2 Principeschets warmtestroommeter

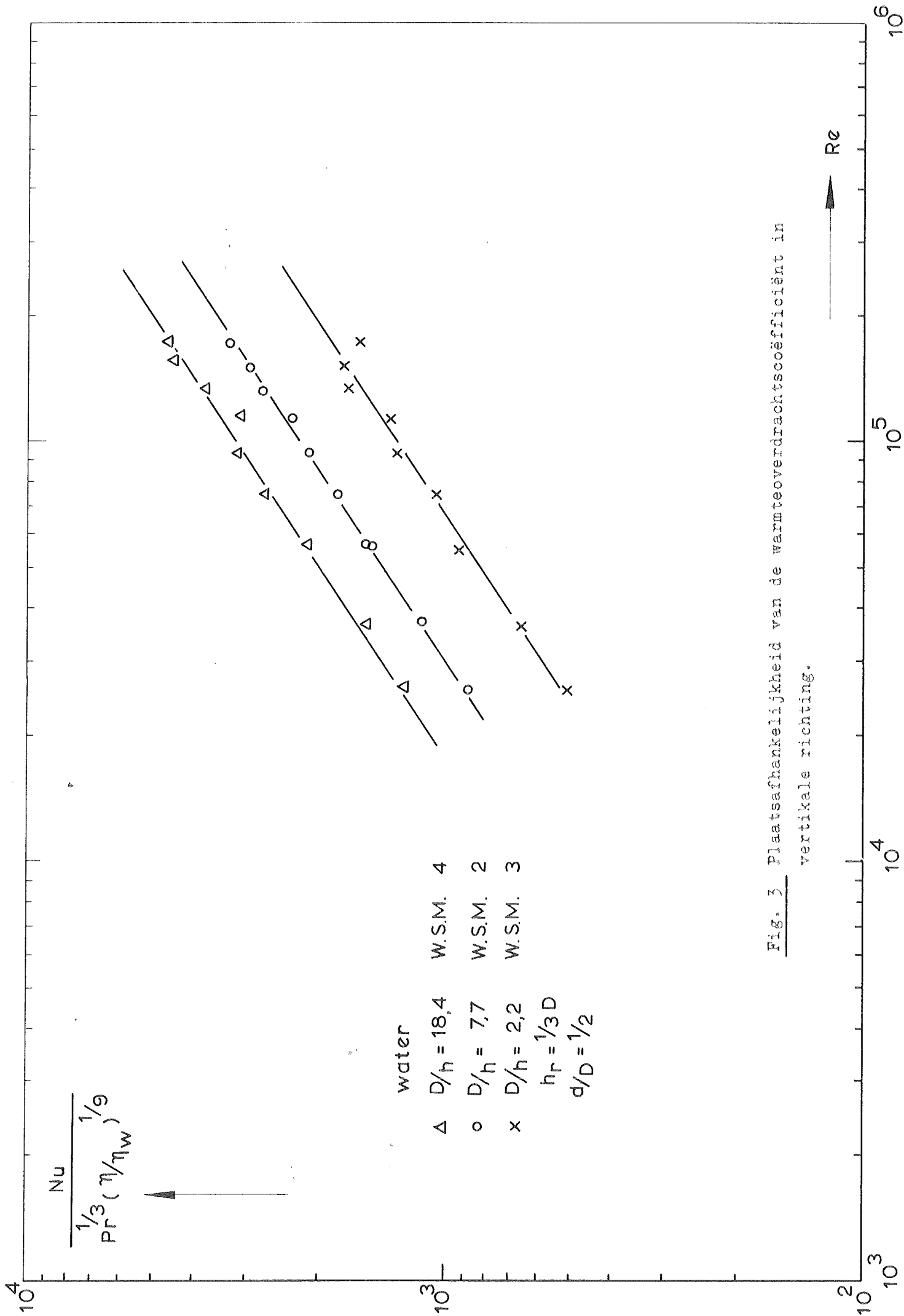


Fig. 3 Plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in vertikale richting.

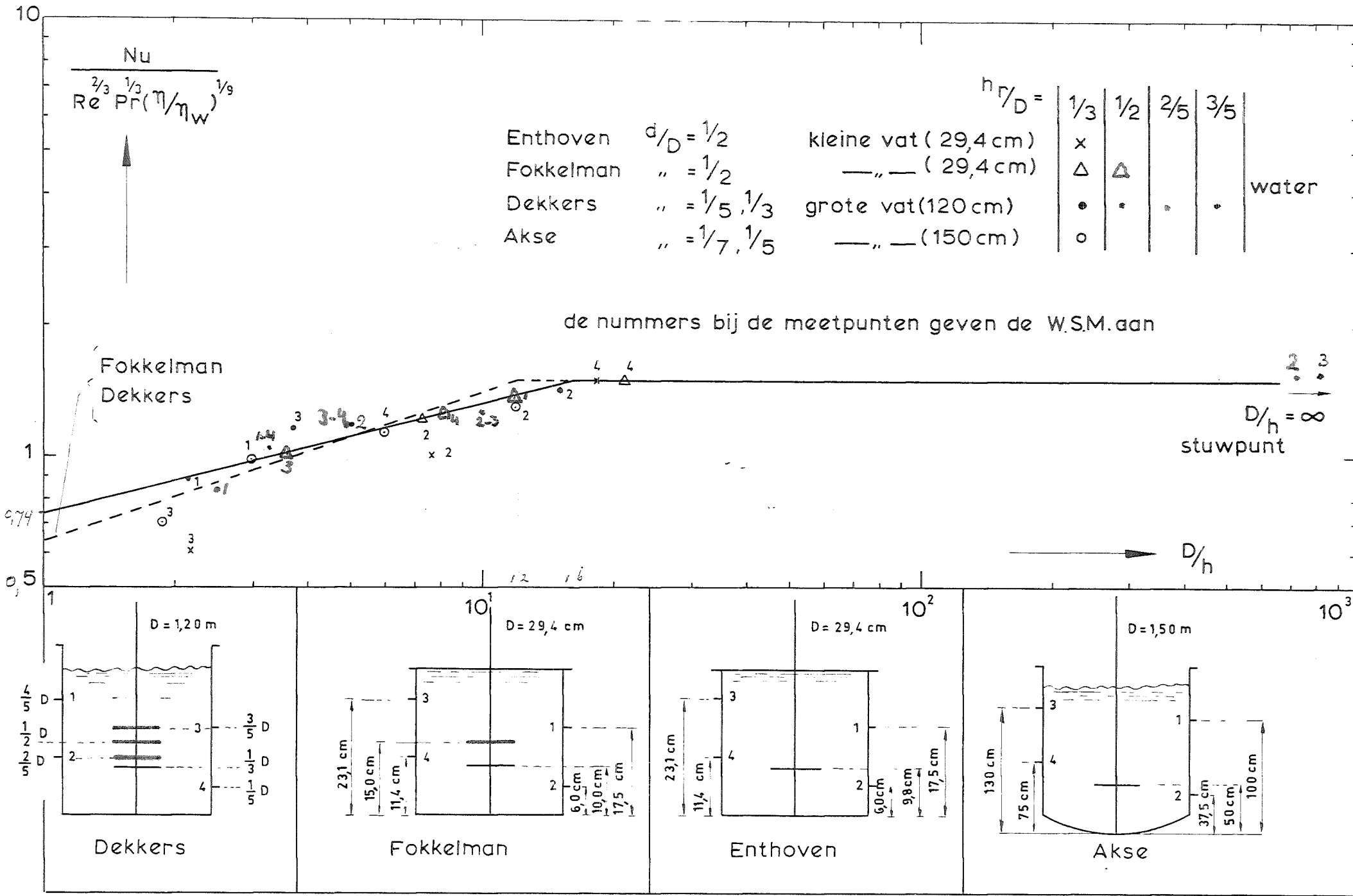
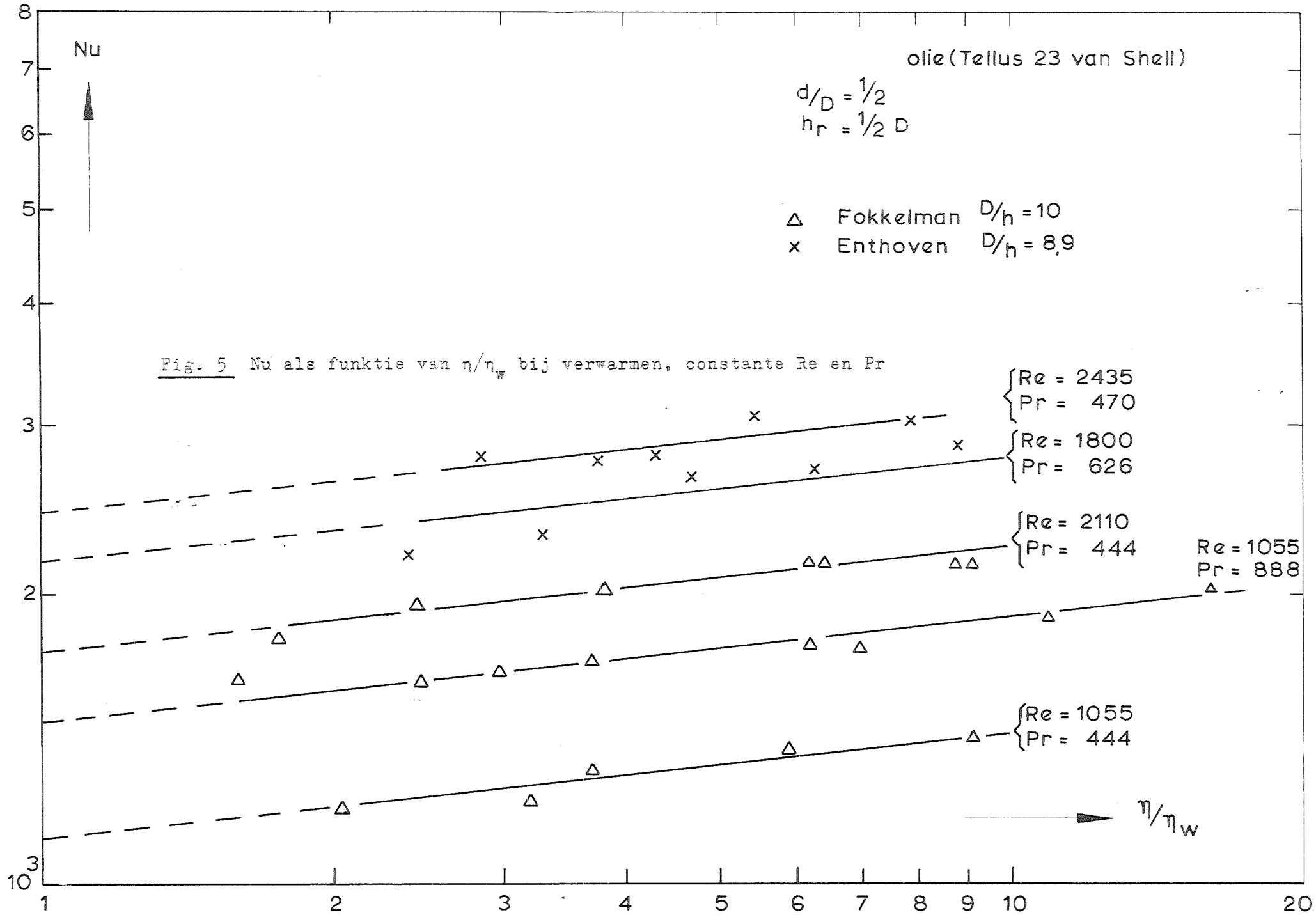
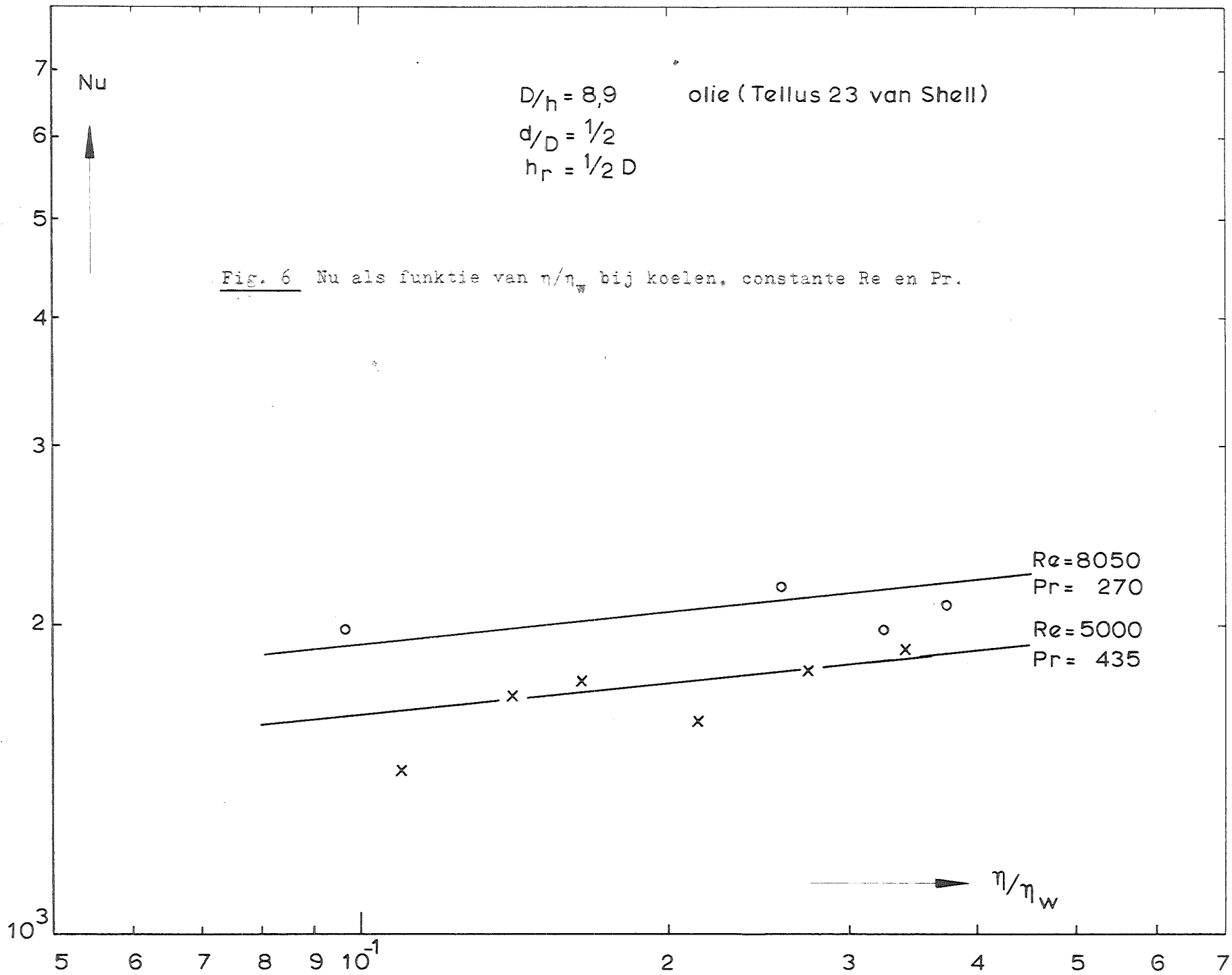


Fig. 4 Resumé alle metingen met water





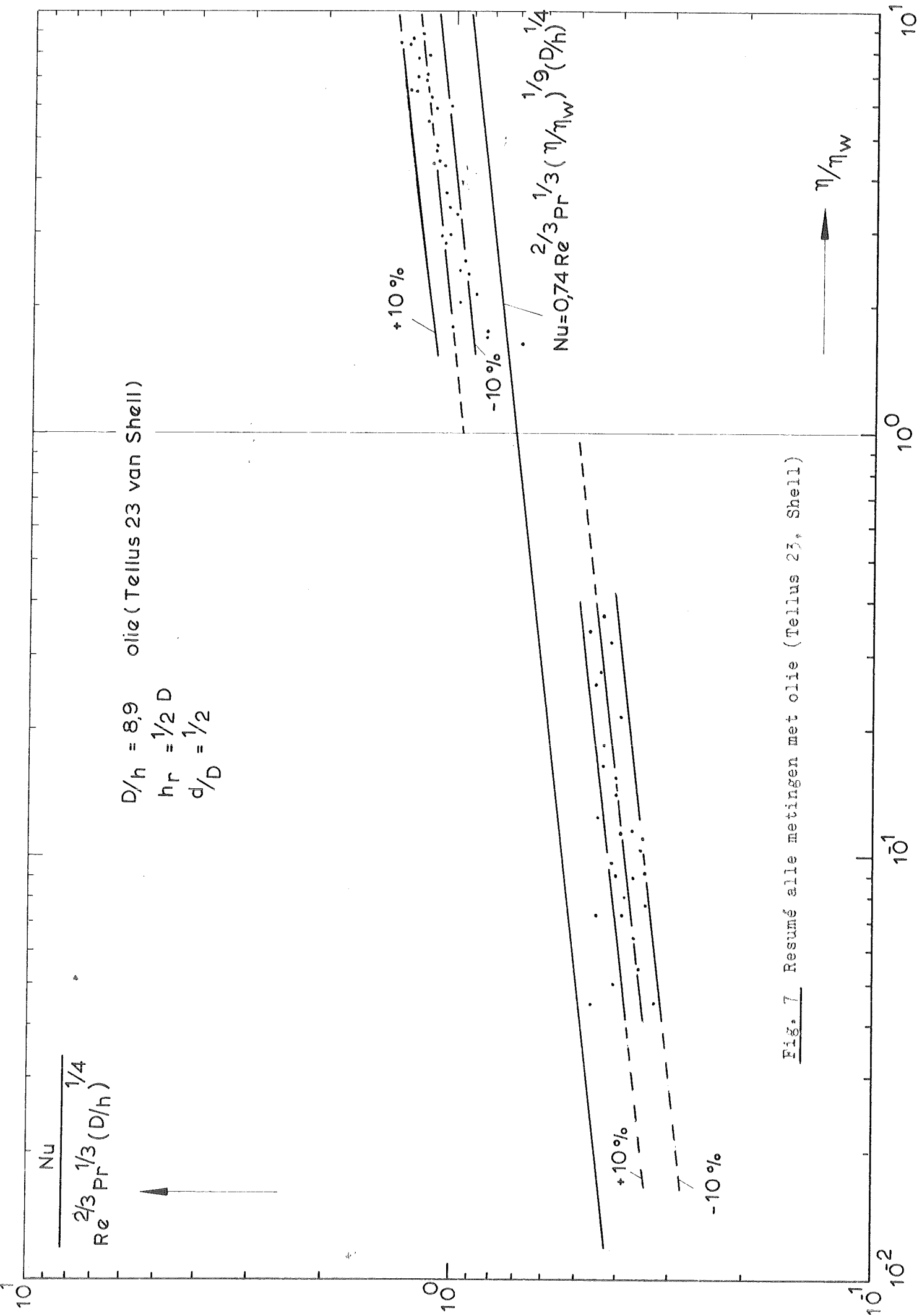


Fig. 7 Resumé alle metingen met olie (Tellus 23, Shell)

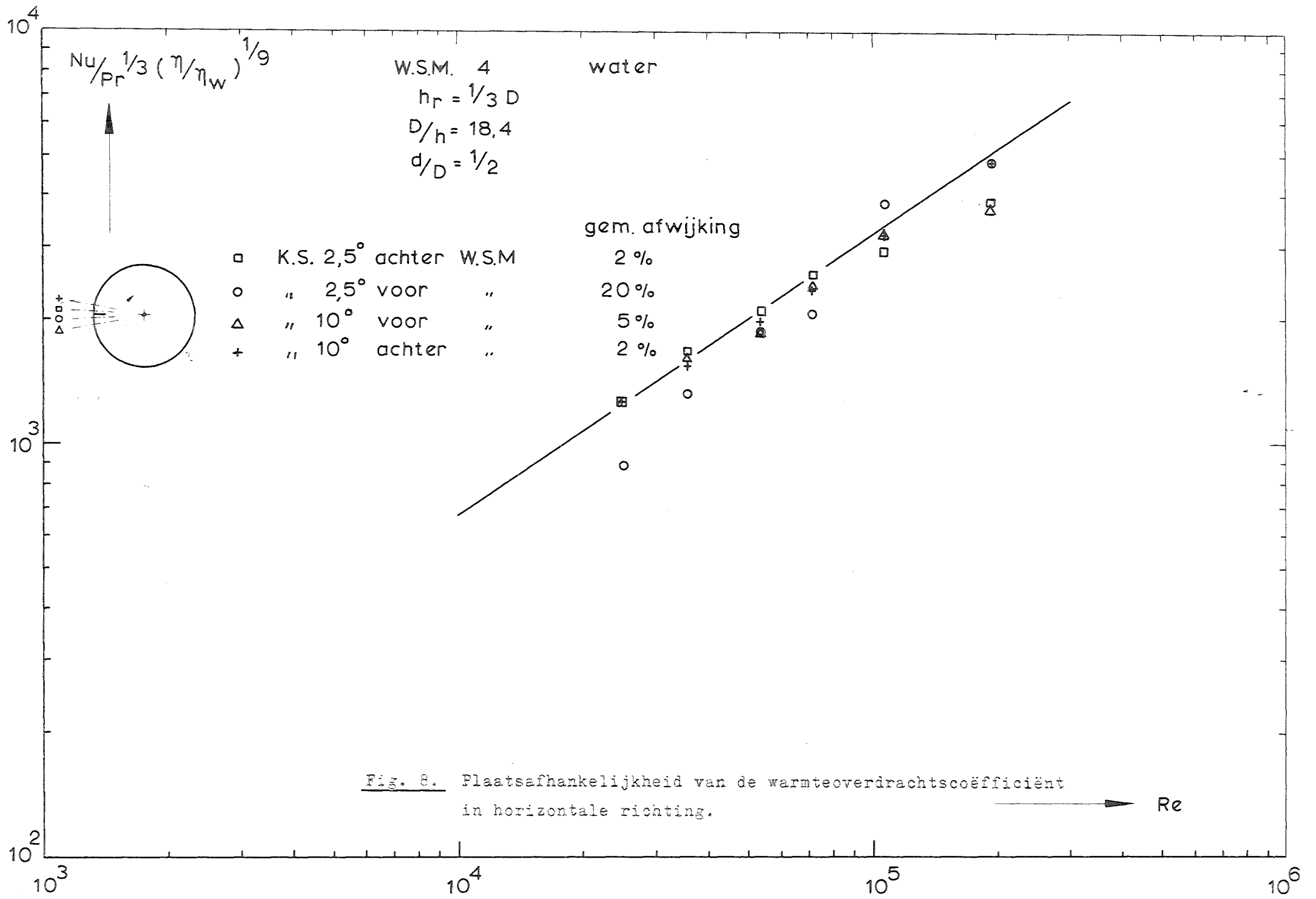


Fig. 8. Plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt
 in horizontale richting.

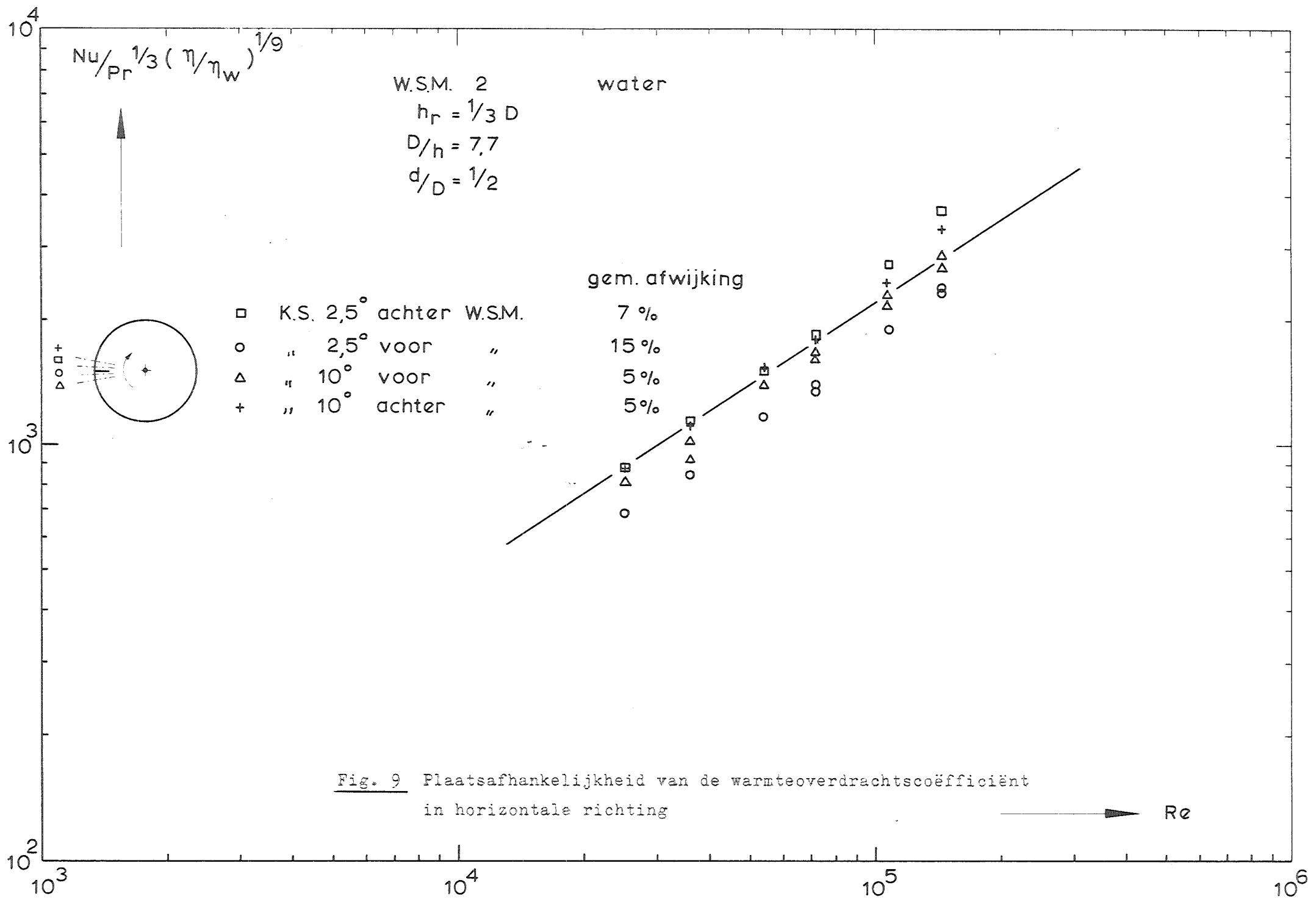


Fig. 9 Plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt
 in horizontale richting

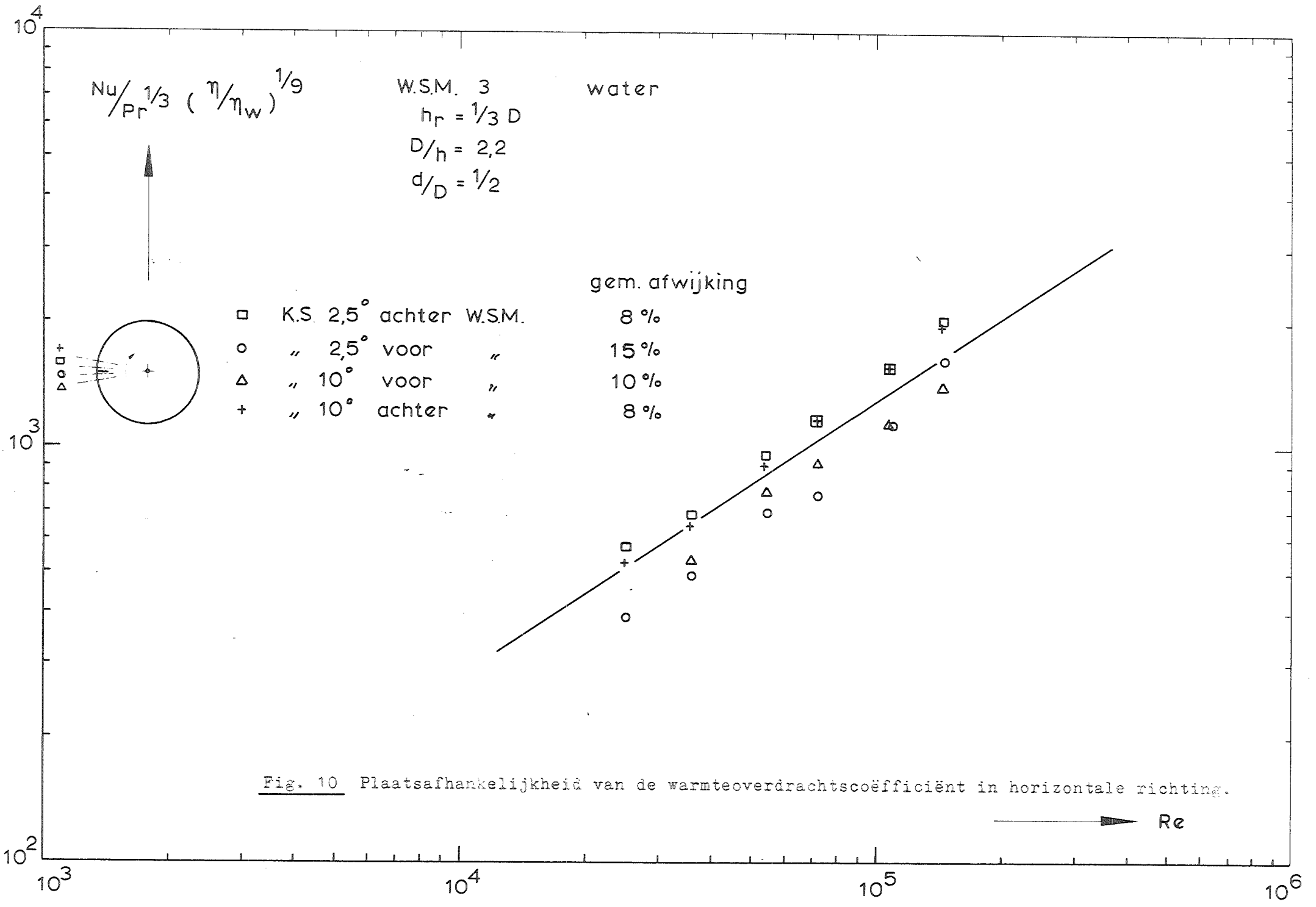


Fig. 10 Plaatsafhankelijkheid van de warmteoverdrachtscoëfficiënt in horizontale richting.