

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

afsluiting Oosterschelde

krachten op nieuwe zinkstukken

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 1190

mei 1982

afsluiting Oosterschelde

krachten op nieuwe zinkstukken

verslag modelonderzoek

M 1190

mei 1982

INHOUD

	blz.
1 <u>Inleiding en opdracht</u>	1
2 <u>Conclusies</u>	2
3 <u>Schaalkeus</u>	5
4 <u>Model</u>	6
4.1 Algemeen.....	6
4.2 Reproductie zinkstukken in het model.....	7
5 <u>Onderzoek</u>	10
5.1 Algemeen.....	10
5.2 Onderzoek blokkenmat in stroom.....	11
5.2.1 Wand- en breedte-effecten.....	11
5.2.2 Stroomkracht bij rechte aanstroming.....	12
5.2.3 Stroomkracht bij scheve aanstroming.....	14
5.2.4 Gedrag bij omkering van stroomrichting.....	15
5.2.5 Krachten tijdens het afzinken.....	16
5.2.6 Ontwikkelde lengte van de mat.....	16
5.3 Onderzoek steenasfaltmat in stroom.....	17
5.3.1 Stroomkracht bij rechte aanstroming.....	17
5.3.2 Stroomkracht bij scheve aanstroming.....	18
5.3.3 Invloed van de ruwheid van het zinkstuk.....	19
5.3.4 Ontwikkelde lengte van de mat.....	20
5.4 Krachten op de blokkenmat ten gevolge van golven.....	20
5.4.1 Algemeen.....	20
5.4.2 Onderzoek.....	22
5.4.3 Resultaten van het onderzoek naar de krachten door golven....	22

REFERENTIES

TABELLEN

1. Overzicht gebruikte zinkstukken
2. Overzicht van het onderzoek naar de invloed van golven

FIGUREN

- 1 Snelheidsvertikalen
- 2 Invloed doorlatendheid op de stroomdruk
- 3 Optredende krachten, definitieschets
- 4 Invloed van B/b op de stroomkracht

Zinkstuk 1, $\gamma = 0^\circ$

- 5 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 6 Verband $\bar{v}$ en K_{sh} , $h = 10, 15, 20$ en 30 m
- 7 Verband K_{sv} en α , $h = 20$ m
- 8 Verband $\bar{v}$ en K_{sv} , $h = 10, 15, 20$ en 30 m, $\alpha = 0^\circ$

Zinkstuk 10, $\gamma = 0^\circ$

- 9 Verband K_{sh} en α , $h = 10$ m
- 10 Verband $\bar{v}$ en K_{sh} , $h = 10$ en 20 m
- 11 Verband K_{sv} en α , $h = 10$ m
- 12 Verband $\bar{v}$ en K_{sv} , $h = 10$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$

Zinkstuk 5, $\gamma = 0^\circ$

- 13 Verband K_{sh} en α , $h = 30$ m
- 14 Verband $\bar{v}$ en K_{sh} , $h = 10, 20$ en 30 m
- 15 Verband K_{sv} en α , $h = 30$ m
- 16 Verband $\bar{v}$ en K_{sv} , $h = 10, 20$ en 30 m, $\alpha = 0^\circ$

- 17 Verband tussen r en q_o , $\gamma = 0^\circ$

Zinkstuk 1, $\gamma = 15^\circ$

- 18 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 19 Verband $\bar{v}$ en K_{sh} , $h = 10$ en 20 m
- 20 Verband K_{sv} en α , $h = 10$ m
- 21 Verband $\bar{v}$ en K_{sv} , $h = 10$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$

Zinkstuk 1, $\gamma = 30^\circ$

- 22 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 23 Verband $\bar{v}$ en K_{sh} , $h = 10$ en 20 m
- 24 Verband K_{sv} en α , $h = 10$ m
- 25 Verband $\bar{v}$ en K_{sv} , $h = 10$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$

FIGUREN (vervolg)

Posities zinkstuk, $\gamma = 180^\circ$

- 26 Zinkstuk 1, $h = 10$ m
- 27 Zinkstuk 1, $h = 20$ m
- 28 Zinkstuk 10, $h = 20$ m

K_{sh} en K_{sv} tijdens het aan de grond brengen, $\gamma = 0^\circ$

- 29 Zinkstuk 1, $h = 20$ m

Zinkstuk 1, verband l_z en α , $\gamma = 0^\circ$

- 30 $h = 10$ m
- 31 $h = 15$ m
- 32 $h = 20$ m
- 33 $h = 30$ m

Zinkstuk 5, verband l_z en α , $\gamma = 0^\circ$

- 34 $h = 10$ m
- 35 $h = 20$ m
- 36 $h = 30$ m

Zinkstuk 10, verband l_z en α , $\gamma = 0^\circ$

- 37 $h = 10$ m
- 38 $h = 20$ m

39 Zinkstuk 1, 5 en 10, l_z/h als functie van h , $\gamma = 0^\circ, \alpha = 0^\circ$

40 Zinkstuk 1 en 5, invloed van $\bar{v}$ op l_z , $\gamma = 0^\circ, h = 20$ m

Zinkstuk 3, $\gamma = 0^\circ$

- 41 Verband K_{sh} en α , $h = 10$ m
- 42 Verband K_{sh} en α , $h = 15$ m
- 43 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 44 Verband K_{sh} en $\bar{v}$, $h = 10, 15$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$
- 45 Verband K_{sv} en α , $h = 10$ m
- 46 Verband K_{sv} en α , $h = 15$ m
- 47 Verband K_{sv} en α , $h = 20$ m
- 48 Verband K_{sv} en $\bar{v}$, $h = 10, 15$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$

FIGUREN (vervolg)

Zinkstuk 3, $\gamma = 30^\circ$

- 49 Verband K_{sh} en α , $h = 10$ m
- 50 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 51 Verband K_{sh} en $\bar{v}$, $h = 10$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$
- 52 Verband K_{sv} en α , $h = 10$ m
- 53 Verband K_{sv} en α , $h = 20$ m
- 54 Verband K_{sv} en $\bar{v}$, $h = 10$ en 20 m, $\alpha = 0^\circ$

Zinkstuk 7, $\gamma = 0^\circ$

- 55 Verband K_{sh} en α , $h = 20$ m
- 56 Verband K_{sv} en α , $h = 20$ m
- 57 Verband K_{sv} , K_{sh} en $\bar{v}$, $h = 20$ m, $\alpha = 0^\circ$

- 58 Zinkstuk 3, verband l_z en α , $\gamma = 0^\circ$, $h = 10, 15$ en 20 m

- 59 Proefopstelling onderzoek met golven
- 60 Registraties bij regelmatige golven
- 61 Registraties bij onregelmatige golven
- 62 Overzicht proeven met golven
- 63 Energiedichtheidspectra bij waterstand NAP + 3,0 m

Serie I, $\alpha = 0^\circ$

- 64 Verband δ_a , δ_m en H
- 65 Verband K_{gv} en H

Serie I, $\alpha = 15^\circ$

- 66 Verband δ_a , δ_m en H
- 67 Verband K_{gh} en H
- 68 Verband K_{gv} en H

Serie II, $\alpha = 0^\circ$

- 69 Verband δ_a , δ_m en H
- 70 Verband K_{gh} en H
- 71 Verband K_{gv} en H
- 72 Krachtenverdeling van K_{gv} bij onregelmatige golven

FIGUREN (vervolg)

Serie II, $\alpha = 15^{\circ}$

73 Verband δ_a , δ_m en H

74 Verband K_{gh} en H

75 Verband K_{gv} en H

76 Krachtenverdeling van K_{gv} bij onregelmatige golven

Serie III, $\alpha = 15^{\circ}$

77 Verband K_{gh} en H

78 Verband K_{gv} en H

Serie IV

79 Verband K_g en H, $\alpha = 0^{\circ}$ en 15°

80 Krachtenverdeling van K_g bij onregelmatige golven, $\alpha = 0^{\circ}$

81 Krachtenverdeling van K_g bij onregelmatige golven, $\alpha = 15^{\circ}$

Serie V, $\alpha = 0^{\circ}$

82 Verband δ_a , δ_m en H

83 Verband K_{gh} en H

84 Verband K_{gv} en H

85 Krachtenverdeling van K_{gv} bij onregelmatige golven

SYMBOLEN

a	= constante	$(m^{1-n} \cdot s^n)$
b	= breedte van het zinkstuk	(m)
B	= breedte van de goot	(m)
C _v	= weerstandscoefficiënt voor de verticale stroomkracht	(-)
C _h	= weerstandscoefficiënt voor de horizontale stroomkracht	(-)
d	= dikte (van mat of betonstaaf)	(m)
D	= diameter	(m)
e	= grondtal van de natuurlijke logaritmie	(-)
E	= elasticiteitsmodulus	(N/m^2)
f	= wrijvingscoëfficiënt	(-)
g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s^2)
G _b	= gewicht van het matdeel boven water, inclusief randbalk	(N)
G _o	= gewicht van het onder water hangende deel van de mat	(N)
h	= waterdiepte	(m)
Δh	= verval	(m)
H	= golfhoogte	(m)
H _s	= significante golfhoogte	(m)
K _l	= ophangkracht van het zinkstuk	(N)
K _a	= ankerkracht	(N)
K _{gh}	= horizontale component van de golfkracht in het ophangpunt van de mat	(N)
K _{gv}	= verticale component van de golfkracht in het ophangpunt van de mat	(N)
K _g	= golfkracht in het ophangpunt van de mat	(N)
K _{sh}	= horizontale stroomkracht	(N)
K _{sv}	= verticale stroomkracht	(N)
l _z	= lengte van het onder water hangende deel van de mat	(m)
M _o	= energiedichtheid	(m^2)
N	= Gewicht van het op de bodem liggende deel van de mat (inclusief randbalk)	(N)
m	= constante	(-)
n	= schaalfactor	(-)
p	= verticale afstand van ophangpunt tot de stilwaterspiegel	(m)
q _o	= massa van de mat onder water	(kg/m^2)
q _b	= massa van de mat boven water	(kg/m^2)
r	= exponent	

R	= verticale oplegreactie ten gevolge van stijfheid van de mat	(N)
T	= golfperiode	(s)
u_f	= filtersnelheid	(m/s)
v	= stroomsnelheid	(m/s)
W	= wrijvingskracht	(N)
α	= hoek tussen de mat en de verticaal op de waterspiegel	($^{\circ}$)
β	= hoek die de richting van de ophangkracht met de verticaal maakt	($^{\circ}$)
γ	= aanstroomrichting	($^{\circ}$)
δ_a	= amplitude verticale beweging van het achterschip	(m)
δ_m	= amplitude verticale beweging van het middenschip	(m)

AFSLUITING OOSTERSCHELDE

Krachten op nieuwe zinkstukken

1. Inleiding en opdracht

Voor de bodembescherming bij de aanleg van de Oosterschelddedam wordt gebruik gemaakt van nieuwe typen zinkstukken. De basis van deze zinkstukken is een polypropeenmat waarop ballast is bevestigd. Bij het leggen van deze zinkstukken wordt het zinkstuk opgerold op een drijvende rol die bevestigd is aan een ponton. Aan het einde van het zinkstuk is een randbalk bevestigd. Na het plaatsen van de randbalk op de bodem wordt het ponton met rol stroomafwaarts vooruitgetrokken, terwijl gelijktijdig de mat van de rol wordt afgerold. Teneinde de lieren op de ponton te kunnen dimensioneren en de noodzakelijke treksterkte van de mat te kunnen bepalen is het noodzakelijk de maximaal optredende trekkracht in de mat te weten. De trekkracht op de mat bestaat uit het eigen gewicht, de stroomkracht en eventueel een kracht tengevolge van golven. De door de stroom op de mat uitgeoefende kracht werd voor twee typen zinkstukken onderzocht: de blokkenmat en de steenasfaltmat. De blokkenmat bestaat uit een polypropeenweefsel waarop volgens een regelmatig patroon betonblokken zijn bevestigd. De steenasfaltmat bestaat uit een laag steenasfalt van circa 0,12 m dikte dat warm op een polypropeenmat wordt aangebracht. In de steenasfalt is als wapening een staalnet aangebracht om grote rek in de mat, waardoor de steenasfalt los zou kunnen raken, te voorkomen.

Behalve onderzoek naar de stroomkrachten op de blokkenmat en de steenasfaltmat, werd met de blokkenmat bovendien een oriënterend onderzoek uitgevoerd onder golfomstandigheden. De mat was daarbij opgehangen aan een drijvend ponton. Van het golfonderzoek is tevens een film vervaardigd.

De krachten op de mat onder invloed van de combinatie van stroom en golven bij grote waterdiepte werd door het Nederlands Scheepbouwkundig Proefstation te Wageningen uitgevoerd.

Het onderzoek bij het Waterloopkundig Laboratorium stond onder leiding van ir. J. Jorritsma die tevens dit verslag samenstelde.

Het onderzoek is uitgevoerd in de Grote Stroomgoot en in de Windgoot van het Laboratorium De Voorst in 1972.

2. Conclusies

- 1 Bij krachtmetingen aan het zinkstuk is bij een verhouding gootbreedte/zinkstukbreedte $B/b = 6$ een wandeffect aanwezig van circa 20%.
- 2 De horizontale stroomkracht op een zinkstuk is onafhankelijk van de stand van het zinkstuk en kan worden voorgesteld door:
$$K_{sh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_h$$

met $C_h = 2,1$ voor blokkenmat en steenasfaltmat.
- 3 De verticale stroomkracht kan worden voorgesteld door:
$$K_{sv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_v \cdot e^{r \cdot \alpha}$$
 - Voor de blokkenmat geldt:
 $C_v = 2,0$, terwijl de grootte van r van het gewicht van de mat blijkt af te hangen volgens figuur 17.
 - Een ruw oppervlak van het zinkstuk resulteert in een grotere waarde van C_v en een kleinere waarde van r dan een glad oppervlak.
Voor de gladde steenasfaltmat werd gevonden:
 $C_v = 1,5$ en $r = 0,032$
en voor de ruwe steenasfaltmat (beplakt met grind van $D_{50} = 0,06$ m):
 $C_v = 1,75$ en $r = 0,027$.
- 4 Bij schuine aanstroming vertoonde het zinkstuk de neiging zich te verdraaien naar een positie meer loodrecht op de stroom. Slingering van het zinkstuk deed zich niet voor. Door de relatief smalle goot konden de stroomkrachten hierbij niet goed worden bepaald.
- 5 Bij omkering van de stroomrichting wordt de blokkenmat opgefrommeld bij stroomsnelheden groter dan circa $v = 0,65$ m/s voor het zinkstuk $q_0 = 60$ kg/m². Bij $q_0 = 185$ kg/m² was deze stroomsnelheid maar nauwelijks groter.
- 6 Bij het aan de bodem brengen van het zinkstuk neemt de grootte van K_{sv} relatief sterk toe, terwijl K_{sh} relatief klein is als de randbalk vlak boven de bodem is (figuur 29).
- 7 De ontwikkelde lengte onder water is tot een stroomsnelheid van circa $v = 1,0$ m/s afhankelijk van de stroomsnelheid. Bij $v > 1,0$ m/s neemt l_z zo goed als niet meer toe.

- 8 De ontwikkelde lengte was bij $q_o = 185 \text{ kg/m}^2$ en $q_o = 310 \text{ kg/m}^2$ nagenoeg gelijk. Voor $q_o = 60 \text{ kg/m}^2$ was l_z groter dan bij $q_o = 185 \text{ kg/m}^2$ en $q_o = 310 \text{ kg/m}^2$.

Voor de blokkenmat met $q_o = 60 \text{ kg/m}^2$ kon worden afgeleid:

$$l_z = 0,23 \alpha + 1,87 h - 0,014 h^2$$

en bij $q_o = 185 \text{ kg/m}^2$ en $q_o = 310 \text{ kg/m}^2$:

$$l_z = 0,25 \alpha + 1,52 h - 0,005 h^2$$

Voor de steenasfaltmat gold:

$$l_z = 0,025\alpha + 1,4 h - 2$$

- 9 De krachten in de mat tengevolge van golfwerking zijn het kleinst als de mat op het achterschip wordt opgehangen.
- 10 De hoogte van het ophangpunt is tussen $p = 3 \text{ m}$ en $p = 10 \text{ m}$ niet van invloed op de krachten in de mat.
- 11 De beweging van de toegepaste ponton wordt door een zinkstuk met $q_o = 310 \text{ kg/m}^2$ sterk beïnvloed.
- 12 De horizontale component van de kracht in het ophangpunt van de mat tengevolge van golven is aanzienlijk kleiner dan de verticale component.
- 13 Vergroting van het gewicht van het zinkstuk resulteert in toename van de ophangkracht tengevolge van golven.
- 14 Bij toenemende golfhoogte neemt de ophangkracht door golven toe.
- 15 Bij toenemende golfperiode neemt in de meeste gevallen de ophangkracht door golven toe.
- 16 Bij een hoek tussen het zinkstuk en de verticaal op het stilwateroppervlak van $\alpha = 0^\circ$ zijn de ophangkrachten door golven kleiner dan bij $\alpha = 15^\circ$.

- 17 De krachtpieken bij regelmatige golven en een golfhoogte $H = 1,22$ m werden bij het toegepaste golfspectrum met $H_s = 1,22$ m door circa 5% van de krachtpieken ($\approx$ aantal golven) overschreden.

3. Schaalkeuze

Voor het onderzoek naar stroomkrachten op nieuwe zinkstukken stond de Grote Stroomgoot in het Laboratorium De Voorst ter beschikking. Bij de breedte van de stroomgoot van 3 m diende de breedte van het zinkstuk zodanig te worden gekozen dat wandeffecten geen grote rol zouden spelen.

Besloten werd daarom een zinkstuk te onderzoeken met een breedte $b = 0,50$ m en een lengteschaal $n_1 = 20$. In het model werd zodoende een mat weergegeven met een breedte van 10 m, hetgeen voordelen bood met het oog op de gelijktijdig met het laboratoriumonderzoek verlopende prototype-metingen met een zinkstuk van 10 m breed.

In de literatuur [1] wordt de stromingsweerstand van een vlakke plaat (hoogte van de plaat = waterdiepte) loodrecht in de stroom gegeven als functie van de verhouding plaatbreedte tot gootbreedte. De wandinvloed bleek bij de verhouding gootbreedte/zinkstukbreedte = 6 circa 20% te zijn. Bij uitgevoerde controleproeven waarbij de breedte van het zinkstuk werd gevarieerd, werd eenzelfde wandinvloed vastgesteld.

Bekend is dat de grootte van de weerstandscoefficiënt bij ronde voorwerpen afhankelijk is van het getal van Reynolds. De oorzaak ervan is gelegen in het verschijnsel dat het punt waar de stroom het voorwerp loslaat, niet vast is. Bij vlakke platen met een vast loslaatpunt is de weerstandscoefficiënt voor voldoende grote Reynoldsgetallen ($> 10^3$) niet meer afhankelijk van de grootte van het getal. Daar bij stroomsnelheden in het model van 0,1 m/s het Reynoldsgetal al circa 5×10^4 bedraagt, behoeft niet gevreesd te worden voor schaal-effecten ten gevolge van viskositeitsinvloeden.

Voor het bepalen van de schalen voor stroomsnelheid en krachten is uitgegaan van de schaalregels volgens Froude.

4. Model

4.1 Algemeen

Het onderzoek naar de stroomkrachten werd uitgevoerd in de Grote Stroomgoot van het Laboratorium De Voorst. Deze stroomgoot is 100 m lang, 3 m breed en 3 m hoog. De waterstand en het debiet werden geregeld met een schuif aan het bovenstroomse einde van de goot en een klep aan het benedenstroomse einde. Bovenstrooms van de bovenschuif stond het water in verbinding met een regelvijver waarvan het niveau 2,80 m boven de gootbodem lag. De waterdiepte in de goot was bij het onderzoek naar de stroomkrachten 0,5, 0,75, 1,00 en 1,50 m overeenkomend met $h = 10, 15, 20$ en 30 m in het prototype.

Het onderzoek vond plaats op circa 60 m benedenstrooms van de bovenschuif. De snelheidsverticaal ter plaatse van de metingen is weergegeven in figuur 1. In dezelfde figuur is een snelheidsverticaal gegeven, zoals die in het overzichtsmodel van de Oosterschelde (M1000) is gemeten. Aan het te onderzoeken zinkstuk werd aan de uiteinden een randbalk van aluminium aangebracht. Tijdens een proef werd de randbalk die op de bodem lag, met twee draden aan de uiteinden van de balk vastgehouden. In deze ankerdraden waren krachtopnemers opgenomen. Aan de andere kant van het zinkstuk, boven water, was de randbalk opgehangen aan een draad die over een katrol naar een lier liep. Met de lier kon de randbalk opgetrokken worden. Tussen de katrol en de randbalk was eveneens een krachtopnemer aanwezig. Het plateau waarop de katrol en de lier waren bevestigd, was over de gootwanden verplaatsbaar. Door verplaatsing van het lierplateau en het zinkstuk meer of minder op te trekken, kon de stand van het zinkstuk worden ingesteld. Om te weten welk deel van de gemeten krachten het gevolg is van het eigen gewicht van de mat en welk deel het gevolg is van stroomdruk, moest bekend zijn welk deel van de mat op de bodem rustte en welk deel in het water hing.

De positie van het zinkstuk werd daarom vastgelegd met behulp van een echolood. (figuur 3). Omdat de minimum waterdiepte voor het echolood circa 0,30 m was kon de ligging van het bovenste deel van het zinkstuk niet worden gepeild. De plaats waar het zinkstuk boven water kwam, werd opgemeten, evenals de plaats van de randbalk. Door de opgemeten punten werd het zinkstuk getekend, zodanig, dat het niet met het echolood gemeten deel goed aansloot bij het wel met het echolood gemeten deel. Als controle werd nagegaan of de lengte van het getekende zinkstuk gelijk was aan de lengte van het beproefde zinkstuk. Ter plaatse van de krachtopnemer in de ophangdraad werd steeds de hoek tussen de

ophangdraad en de verticaal gemeten teneinde de ophangkracht in een horizontale en een verticale component te kunnen ontbinden.

De hoek α die het zinkstuk met de verticaal maakt bij het wateroppervlak werd eveneens gemeten.

Voor een beschrijving van het model bij het onderzoek naar golfkrachten wordt verwezen naar hoofdstuk 5.3.1.

4.2 Reproductie zinkstukken in het model

Op het moment dat het onderzoek begon, waren zowel ontwerpen voor de blokkenmat als voor de steenasfaltmat aanwezig. Deze ontwerpen hadden echter een voorlopig karakter, zodat rekening diende te worden gehouden met mogelijke wijzigingen in de ontwerpen. Om hierop in te spelen werden in het onderzoek de massa van de blokkenmat en de ruwheid van de steenasfaltmat gevariëerd.

De blokkenmat bestond in het prototype uit een polypropeenmat (Robusta-mat nr. 21) waarop betonelementen van $0,30 \times 0,30 \times 1,00 \text{ m}^3$ waren bevestigd. De betonelementen waren in horizontale rijen h.o.h. 2,00 m aangebracht. De ruimte tussen de elementen in een rij was 0,10 m.

De betonelementen werden in het model op lengteschaal gereproduceerd. De massa van de blokkenmat werd in het model gevariëerd door de betonelementen geheel of gedeeltelijk te vervangen door stalen staafjes $\phi 16 \text{ mm}$ met een lengte van 50 mm.

Bij de keus van een ondergrond voor de blokkenmat in het model werd uitgegaan van de Robusta-mat nr. 21 in het prototype. De stijfheid van de mat is in het prototype te verwaarlozen. Bij toepassing van eenzelfde matstructuur in het model gaat dit niet meer op. Het werd daarom wenselijk geacht in het model een zo flexibel mogelijke ondergrond toe te passen in de vorm van een doekstructuur.

Verwacht werd dat ook een eis ten aanzien van de waterdoorlatendheid gesteld diende te worden. De waterdoorlatendheidskarakteristiek van de Robusta-mat nr. 21 kan als volgt worden geschreven

$$\Delta h = a \cdot u_f^m \quad (1)$$

waarin:

Δh = verval over de mat (m)
 u_f = filtersnelheid door de mat (m/s)
 a = constante ($m^{1-m} s^m$)
 m = afhankelijk van stromingstoestand (-)
 $m = 1$ bij laminaire stroom en
 $m = 2$ bij turbulente stroom

Voor de Robusta-mat nr. 21 was $a = 28 m^{1-m} \cdot s^m$ en $m = 1,34$

Uitgaande van de schaalwet van Froude waarbij $n_t = \sqrt{n_1}$ wordt de schaal voor a $n_a = n_1^{1-\frac{1}{2}m}$. Bij aanname van een gelijke m voor model en prototype wordt $n_a = 2,7$, zodat voor het doek moet gelden:

$a \approx 10$ bij $m \approx 1,35$

Om de invloed van de doorlatendheid van een doek op de stroomdruk na te gaan, werden de stroomdrukken gemeten op een vlies PRF 140 met $m = 1,34$ en $a = 1,5$ en een stuk plastic folie. Het vlies PRF 140 was te open voor de bij het onderzoek te beproeven mat en de plastic folie was te dicht. Bij het meten van de stroomkrachten op het vlies PRF 140 en het plastic werden het vlies of het plastic op een raamwerk gespannen dat loodrecht op de stroom scharnierend bij de bodem stond opgesteld. Met behulp van een draad waarin een krachtopnemer was opgenomen werd het raam verticaal in de stroom gehouden (figuur 2). Duide-lijk blijkt dat er geen wezenlijk verschil in stroomkracht aanwezig is tussen het doorlatende vlies en het dichte plasticfolie. Eventuele verschillen in stroomdruk vielen binnen de meetnauwkeurigheid van circa 5%. Bij het onder-zoek werd als ondergrond voor de blokkenmat een doek van de Zakkencentrale, type St 28 ($m = 1,54$, $a = 17$), toegepast of plasticfolie (zie tabel 1).

In tegenstelling tot de blokkenmat had de steenasfaltmat een niet te verwaar-lozen stijfheid. De elasticiteit van de steenasfaltmat in het prototype was $E = 10^8 \text{ N/m}^2$ bij een dikte van 0,12 m. Voor een strook van 1 m breed is het traagheidsmoment gelijk aan $I = 1/12 \cdot 1 \cdot 0,12^3 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$, zodat $EI = 1,4 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2$.

Om de vorm van de steenasfaltmat in het model goed weer te geven, moet gelden

$$n_{EI} = n_1^5 \quad (2)$$

zodat

$$EI_{\text{model}} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^2 \quad (3)$$

Er werd een rubberstrip van 0,005 m dik gevonden die aan (3) voldeed.

De ruwheid van de steenasfaltmat werd in het model gevariëerd door een laag korrels op de mat te plakken.

Bij bovenstaande beschouwing is de tijd- en temperatuurafhankelijkheid van de elasticiteitsmodulus van de prototype-mat buiten beschouwing gelaten.

Tabel 1 geeft een overzicht van de toegepaste zinkstukken. De onderzochte blokkenmatten, met een variatie in massa, zijn de nummers 1, 5 en 10 (hoofdstukken 5.2 en 5.4). De onderzochte steenasfaltmatten, met een variatie in ruwheid, zijn de nummers 3 en 7 (hoofdstuk 5.3)

De overige nummers zijn toegepast tijdens het onderzoek naar wand- en breedte-effecten (hoofdstuk 5.2.1).

5. Onderzoek

5.1 Algemeen

Het onderzoek kan worden verdeeld in drie delen:

- 1 Het onderzoek naar de blokkenmat in stroom (5.2)
- 2 Het onderzoek naar de steenasfaltmat in stroom (5.3)
- 3 Krachten op de blokkenmat tengevolge van golven (5.4)

Het voornaamste punt van onderzoek in stroming was het bepalen van de ophangkracht van het zinkstuk, dus het bepalen van de afhankelijkheid van de stroomkrachten en de ontwikkelde lengte onder water als functie van de stroomparameters.

Bij het onderzoek naar de stroomkrachten werden de door de krachtmeters geregistreerde krachten steeds herleid tot stroomkrachten in horizontale richting (K_{sh}) en in verticale richting (K_{sv}).

De bij stroming op de mat werkende krachten waren de volgende (zie figuur 3):

K_{sh}	: de resulterende horizontale stroomkracht	(N)
K_{sv}	: de resulterende verticale stroomkracht	(N)
G_o	: het gewicht onder water van het onder water hangende deel van het zinkstuk	(N)
N	: het gewicht van het deel van het zinkstuk dat op de bodem ligt (= reactie van de bodem op de mat)	(N)
W	: Bodemwrijving ($W = f.N$, waarbij f -wrijvingscoëfficiënt)	(N)
K_a	: ankerkracht op de bodemankers	(N)
G_b	: het gewicht van het deel van de mat boven water (inclusief het gewicht van de randbalk)	(N)
K_l	: ophangkracht van het zinkstuk	(N)
R	: verticale oplegreactie van de bodem tengevolge van de stijfheid van de mat (alleen bij de steenasfaltmat)	(N)

Uit het horizontale en verticale krachtenevenwicht kunnen K_{sh} en K_{sv} worden berekend volgens:

$$K_{sh} = K_l \cdot \sin\beta - K_a - W \quad (4)$$

$$K_{sv} = K_l \cdot \cos\beta - G_b - G_o + R \quad (5)$$

De mat werd steeds zodanig opgehangen dat van de mat circa 3 m op de bodem rustte. De registratie van de ankerkracht vertoonde dan wisselingen om een gemiddelde waarde. Verandering van de ankerkracht was alleen mogelijk door heen en weer verschuiven van het deel van het zinkstuk op de bodem, waarbij de wrijving telkens van richting wisselt. De gemiddelde waarde van de geregistreerde ankerkracht is gelijk aan de gemiddelde waarde van de wisselende kracht in het zinkstuk juist benedenstrooms (zie figuur 3) van het deel dat op de bodem ligt. Voor het bepalen van de grootte van K_{sh} moet W daarom niet in rekening worden gebracht.

De grootte van R kan berekend worden uit de elasticiteitsmodulus, het traagheidsmoment en de afrondingstraal van het zinkstuk bij de bodem. De invloed van R zal zich manifesteren wanneer de overige krachten klein zijn, dus bij kleine hoeken α en kleine stroomsnelheden. Bij de blokkenmat is $R=0$, terwijl bij de steenasfaltmat R een functie van de afrondingsstraal en de stijfheid van de mat is.

5.2 Onderzoek blokkenmat in stroom

5.2.1 Wand- en breedte-effecten

In de literatuur [1] werd gevonden dat de stromingsweerstand bij een vlakke tot op de bodem doorgaande strip dwars op de stroom bij een verhouding van gootbreedte tot stripbreedte van $B/b=6$ 20% hoger is dan bij een verhouding $B/b=\infty$.

Omdat in het model geen sprake was van een verticale, maar van een gebogen strip werd in het model nagegaan of het verloop van het wandeffect gelijk was aan dat van een vlakke strip.

Het onderzoek naar het wandeffect bij de blokkenmat werd uitgevoerd met het zinkstuk nr. 6 (tabel 1). Door versmalling van de stroomgoot konden waarden van $B/b=3$ en 6 worden bereikt, terwijl zonder versmalling gold: $B/b=9$.

In de versmalde goot (1 m) werd ook nog het zinkstuk 10 onderzocht met $B/b=2$. Hoewel het gewicht van zinkstuk 10 groter was dan van zinkstuk 6 kon de proef met zinkstuk 10 worden gebruikt voor de bepaling van het wandeffect, omdat de weerstandscoefficiënt voor de horizontale stroomkracht C_h uit de betrekking:

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_h \quad (6)$$

onafhankelijk van het gewicht bleek te zijn (zie hoofdstuk 5.2.2).

De grootte van C_h is op figuur 4 uitgezet als functie van de verhouding B/b . In dezelfde figuur is voor de steenasfaltmat (zinkstuk 3) het verband tussen B/b en C_h weergegeven. De metingen met de steenasfaltmat hadden betrekking op B/b -waarden van 2, 4 en 6.

De metingen sluiten goed aan bij de metingen van Shaw [1]. Geconcludeerd kan worden dat bij de proeven in de stroomgoot met een verhouding $B/b=6$ een stromingsweerstand wordt gevonden die circa 20% te groot is.

Behalve de in figuur 4 aangegeven proeven, zijn nog enkele controleproeven met andere zinkstukken uitgevoerd. Met de zinkstukken 2 en 9 is de, op grond van figuur 2, veronderstelde goede overeenkomst tussen plastic folie en doek getoetst. Het resultaat hiervan was positief.

Met zinkstuk 8 is getracht metingen te verrichten bij een zeer grote verhouding van B/b . Deze meting mislukte tengevolge van onvoldoende stabiliteit van het zinkstuk in de stroom.

De grootte van C_v voor de blokkenmat uit de betrekking:

$$K_{sv} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h e^{r \cdot \alpha} \cdot C_v \quad (\text{zie 5.2.2}) \quad (7)$$

is in figuur 4 eveneens uitgezet als functie van B/b .

Het verloop van C_v blijkt gelijk te zijn aan dat van C_h . De grootte van r was voor de verschillende waarden van B/b gelijk.

Geconcludeerd kan worden dat ook de verticale stroomkracht circa 20% te groot wordt gemeten bij $B/b=6$.

In de literatuur [2] kon worden nagegaan dat breedte-effecten optreden bij een breedte diepte-verhouding $b/h < 0,3$.

Bij $b/h < 0,3$ wordt de invloed van de stroming om de randen van het zinkstuk zo groot dat de stromingsweerstand afhankelijk wordt van de breedte-diepte-verhouding. Voor de bij het onderzoek gekozen breedte van het zinkstuk van 10 m houdt dat in dat geen breedte-effecten worden verwacht voor waterdiepte kleiner of gelijk aan 30 m.

5.2.2 Stroomkracht bij rechte aanstroming

Bij verschillende stroomsnelheden en waterdiepten ($h=10, 15, 20$ en 30 m) werd bij zinkstuk 1 in de goot met $B = 60$ m de hoek α (figuur 3) gevariëerd.

De grootte van K_{sh} bleek niet afhankelijk te zijn van de stand van het zinkstuk (figuur 5, $h = 20$ m). Het verband tussen $\bar{v}$ en K_{sh} is voor de genoemde waterdiepten gegeven op figuur 6. Hieruit blijkt dat K_{sh} evenredig is met de

waterdiepte en met het kwadraat van de stroomsnelheid, zodat voor K_{sh} geschreven kan worden:

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_h \quad (6)$$

Met inachtneming van het wandeffect wordt op grond van de resultaten in figuur 6 een gemiddelde waarde van $C_h \approx 2,0$ gevonden.

De grootte van K_{sv} bleek voor alle waterdiepten afhankelijk van α te zijn volgens:

$$K_{sv} : e^{r \cdot \alpha} \quad (7)$$

met $r = \text{constante} = 0,023$ (figuur 7, $h = 20$ m). Uit figuur 8 volgt:

$$K_{sv} :: v^2 \cdot h, \quad (8)$$

zodat K_{sv} geschreven kan worden als:

$$K_{sv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_v \cdot e^{r \cdot \alpha} \quad (9)$$

Het inachtneming van het wandeffect wordt voor C_v een gemiddelde waarde berekend van $C_v \approx 2,0$. Voor r wordt wederom een waarde van 0,023 gevonden.

De invloed van het gewicht van het zinkstuk op de stroomkracht werd onderzocht door de betonelementen op het zinkstuk geheel of gedeeltelijk door stalen staven te vervangen. Het gewicht van het zinkstuk was daardoor $q_b = 370 \text{ kg/m}^2$ (zinkstuk 5) of $q_b = 235 \text{ kg/m}^2$ (zinkstuk 10) (tabel 1). De waterdiepte bij het onderzoek naar de invloed van het gewicht was $h = 10$ m en $h = 20$ m.

In de figuren 9...12 zijn de metingen met zinkstuk 10 gegeven en op de figuren 13...16 de metingen met zinkstuk 5. De gevonden waarden voor C_h, C_v en r zijn in onderstaande tabel samengevat. (gecorrigeerd voor het wandeffect)

Zinkstuk	q_b	q_o	Ch	Cv	r
	kg/m ²				
1	100	60	2,0	2,0	0,023
10	235	185	2,1	2,1	0,027
5	370	310	2,2	2,6	0,032

De waarde van C_h nam toe met toenemend gewicht van het zinkstuk. Omdat de grootte van C_h bij de voorgaande proeven onafhankelijk van de stand van het zinkstuk bleek te zijn en de geometrie van zinkstuk 5 gelijk was aan die van

de andere blokkenmatten werd het verloop van de C_h -waarden aan meetonnauwkeurigheden toegeschreven. De C_h -waarde bij $h = 10$ m (zie figuur 14) die het hoogst was ($C_h = 2,8$), beïnvloedt het gemiddelde van C_h sterk, terwijl de meting bij $h = 10$ m het minst nauwkeurig is, omdat daar de stroomkracht relatief klein is ten opzichte van de andere optredende krachten.

De waarde van C_v bleek niet gevoelig te zijn voor het gewicht van het zinkstuk, de grootte van r bleek dat wel te zijn (zie figuur 17).

Als waarde voor C_h wordt de gemiddelde waarde aangehouden van alle C_h -waarden van de proeven met zinkstukken bij rechte aanstroming (zie figuren 6, 10 en 14), zodat voor de horizontale stroomkracht bij de blokkenmat bij rechte aanstroming kan worden geschreven

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot 2,1 \quad (10)$$

Voor de grootte van C_v wordt eveneens de gemiddelde waarde van C_v van alle proeven met rechte aanstroming genomen, zodat voor de verticale stroomkracht bij rechte aanstroming kan worden geschreven

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot e^{(3,3 \cdot 10^{-5} \cdot q_o + 0,021)\alpha} \cdot b \cdot h \cdot 2,0 \quad (11)$$

5.2.3 Stroomkracht bij scheve aanstroming

De stroomkrachten werden onderzocht bij de aanstroomrichtingen

$\gamma = 15^\circ$ en $\gamma = 30^\circ$ door het zinkstuk scheef in de stroomgoot op te hangen.

Horizontale stroomkracht

Ook bij scheve aanstroming bleek de horizontale stroomkracht onafhankelijk van de hoek α te zijn en evenredig met v^2 en h . (figuren 18, 19, 22 en 23). Bij $\gamma = 15^\circ$ werd voor C_h uit de betrekking $K_{sh} = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_h$ (6) gevonden $C_h = 2,1$ en bij $\gamma = 30^\circ$ werd gevonden $C_h = 2,3$. Door de stroom onderging het zinkstuk een verdraaiing waardoor het zinkstuk meer loodrecht op de stroom kwam te staan. Het in de stroomrichting geprojecteerde oppervlak was daardoor groter dan $b \cdot h \cdot \cos \gamma$.

Wordt voor het aangestroomde oppervlak bij hoeken tot $\gamma = 30^\circ$ het aangestroomde oppervlak verondersteld gelijk te zijn aan $b \cdot h$, dan kan de horizontale stroomkracht worden geschreven als

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h C_h, \quad (6)$$

waarbij voor C_h dezelfde waarde als bij rechte aanstroming kan worden aangehouden.

De waarde $C_h = 2,3$ bij $\gamma = 30^\circ$ zal vermoedelijk veroorzaakt zijn doordat het zinkstuk dichtbij de gootwand lag tengevolge van de scheve positie in de stroomgoot. Onderzoek in een bredere goot zou hierover uitsluitsel moeten geven.

Verticale stroomkracht

De verticale stroomkracht bleek evenredig te zijn met $e^{r \cdot \alpha}$, waarbij voor r dezelfde waarde werd gevonden als bij rechte aanstroming ($r=0,023$). (figuren 20 en 24). De verticale stroomkracht nam iets meer dan kwadratisch toe met de stroomsnelheid en was ook niet geheel evenredig met de waterdiepte. Tot een stroomsnelheid van circa $\bar{v} = 2$ m/s was de verticale stroomkracht echter kleiner dan bij rechte aanstroming (figuren 21 en 25). Hierdoor en wegens tijdgebrek werden de verschijnselen bij scheve aanstroming niet verder onderzocht. Opgemerkt wordt nog dat bij geen der proeven met scheve aanstroming de mat in slingering kwam.

5.2.4 Gedrag bij omkering van stroomrichting

Nagegaan werd bij de zinkstukkken I en IO (zie tabel I) hoe het gedrag was bij omkering van de stroomrichting ($\gamma = 180^\circ$). De situatie waarbij $\gamma = 180^\circ$ kan zich voordoen wanneer tijdens het normale afzinken een storing optreedt waardoor het afzinkvaartuig gedwongen kan worden met half afgerolde mat een getij over te blijven liggen.

Het onderzoek werd begonnen met zinkstuk I. Bij twee waterdiepten, $h = 10$ m en $h = 20$ m werd de stroomsnelheid opgevoerd tot een deel van het zinkstuk dat op de bodem lag, werd opgelicht. Bij het in stroomafwaartse richting bewegen van het ophangpunt veranderde de onder water hangende lengte van het zinkstuk (l_z) slechts weinig. Het deel dat nog op de bodem lag werd bij de beweging van het ophangpunt dubbelgevouwen. De bovenbeschreven situatie deed zich bij beide waterdiepten voor bij $\bar{v} = 0,65$ m/s. In figuur 26 is de positie van het zinkstuk getekend. In figuur 26 is tevens aangegeven welk deel van de mat onder water hing, welk deel opgevouwen was en welk deel nog op de bodem lag. Bij een waterdiepte $h = 20$ m werd tevens bij een vast ophangpunt de stroomsnelheid opgevoerd. In figuur 27 zijn de posities van de mat gegeven voor de verschillende stroomsnelheden.

Bij het zinkstuk 10 werd eveneens bij een vast ophangpunt de stroomsnelheid opgevoerd. De waterdiepte was $h = 20$ m.

De stand van het zinkstuk bij de verschillende stroomsnelheden is gegeven op figuur 28.

5.2.5 Krachten tijdens het afzinken

Voor twee situaties ($\alpha = 0^\circ$ en $\alpha = 17^\circ$) werden de ophangkrachten bepaald in de situatie tijdens het afzinken waarbij de randbalk de bodem nog niet had bereikt. De waterdiepte bij deze metingen was $h = 20$ m. Bij kleine afstand van de randbalk tot de bodem bewoog de randbalk periodiek op en neer met een periode van 45 à 60 sec (prototype) en een amplitude van 0,20 m à 0,80 m. De stroomkracht varieerde dan eveneens periodiek, bij $\alpha = 0^\circ$ met piekwaarden van 1,25 maal de gemiddelde waarde voor de verticale stroomkracht en 1,40 maal de gemiddelde waarde voor de horizontale stroomkracht. Bij $\alpha = 17^\circ$ waren de piekwaarden 1,5 respectievelijk 1,8 maal de gemiddelde waarde. Waarschijnlijk volgde de stroom de achterzijde van het zinkstuk gedeeltelijk, waardoor onderdrukken veroorzaakt werden, hetgeen resulteerde in een toename van K_{sv} . Door de aanwezigheid van het niet gefixeerde loslaatpunt van de stroom op de gekromde achterzijde van het zinkstuk kan het ontstaan van de periodieke beweging worden verklaard. Bij kleine afstand van randbalk tot bodem nam de waarde van K_{sh} relatief sterk af, waarschijnlijk tengevolge van verminderde opstuwning.

In figuur 29 is de gemiddelde optredende stroomkracht uitgedrukt in procenten van de stroomkracht als de randbalk de bodem bereikt heeft. Dit percentage is uitgezet als functie van de afstand van randbalk tot bodem. Bij een afstand groter dan circa twee meter tussen randbalk en bodem vond geen periodieke beweging meer plaats. De lengte van de ankerdraden, die in het model 40 m waren, speelt hierbij waarschijnlijk een rol.

5.2.6 Ontwikkelde lengte van de mat

Van alle uitgevoerde proeven werd het in het water hangende deel van het zinkstuk (l_z) opgemeten en uitgezet voor de verschillende waterdiepten als functie van α .

In de bepaling van l_z zit een onnauwkeurigheid van maximaal 2 m omdat op de echoloodregistratie niet nauwkeurig is vast te stellen welke de eerste rij

blokken is die niet meer op de bodem rust.

De lengte van l_z is gegeven op de figuren 30...33 voor het zinkstuk 1 ($q_0 = 60 \text{ kg/m}^2$), op de figuren 34...36 voor zinkstuk 5 ($q_0 = 310 \text{ kg/m}^2$) en op de figuren 37 en 38 voor zinkstuk 10 ($q_0 = 185 \text{ kg/m}^2$). Uit de figuren 30...38 blijkt, zoals gevoelsmatig te verwachten is, dat bij lage stroomsnelheid l_z in het algemeen kleiner is dan bij grotere stroomsnelheid. Het verband tussen l_z en $\bar{v}$ is uit de uitgevoerde proeven echter niet duidelijk. Bij zinkstuk 1 kan de grootte van l_z voor stroomsnelheden groter dan 1 m/s worden beschreven als:

$$l_z = 0,23\alpha + 1,87 h - 0,014 h^2 \quad (q_0 = 60 \text{ kg/m}^2) \quad (12)$$

voor zinkstuk 5 en 10:

$$l_z = 0,25\alpha + 1,52 h - 0,005 h^2 \quad (q_0 = 185 \text{ en } 310 \text{ kg/m}^2)$$

Tussen de coëfficiënten van h , h^2 en α enerzijds en q_0 anderzijds is geen duidelijk verband aanwezig. Tijd voor verder onderzoek naar de grootte van l_z was niet aanwezig. Niettemin wordt met de bestaande resultaten een indruk van de ontwikkelde lengte verkregen. Op figuur 39 is l_z/h uitgezet als functie van h .

Om de invloed van de stroomsnelheid na te gaan werd bij een ophanghoek $\alpha = 0^\circ$ de stroomsnelheid van $\bar{v} = 0 \text{ m/s}$ langzaam opgevoerd tot $\bar{v} = 1,80 \text{ m/s}$. Voor de blokkenmat met $q_0 = 60 \text{ kg/m}^2$ blijkt l_z bij stroomsnelheden groter dan circa 1 m/s weinig meer toe te nemen, de variatie in l_z tussen $\bar{v} = 0,90 \text{ m/s}$ en $\bar{v} = 2,00 \text{ m/s}$ is kleiner dan de meetnauwkeurigheid (figuur 40). Voor zinkstuk 5 (tabel 1) is de invloed van de stroomsnelheid ook bij grotere stroomsnelheden nog aanwezig. De variatie in l_z is echter ook hier bij stroomsnelheden tussen $\bar{v} = 0,90 \text{ m/s}$ en $\bar{v} = 2,00 \text{ m/s}$ kleiner dan de meetnauwkeurigheid, die circa 2 m bedroeg.

5.3 Onderzoek steenasfaltmat in stroom

5.3.1 Stroomkracht bij rechte aanstroming

Horizontale stroomkracht

In de figuren 41...43 is voor drie waterdiepten, $h = 10 \text{ m}$, 15 m en 20 m de horizontale stroomkracht K_{sh} uitgezet als functie van de hoek α . De grootte

van K_{sh} bleek onafhankelijk van de stand van het zinkstuk te zijn. Uit figuur 44 blijkt dat K_{sh} evenredig was met de waterdiepte en met het kwadraat van de stroomsnelheid. Voor de horizontale stroomkracht kan worden geschreven:

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h C_h$$

met $C_h = 2,1$ (gecorrigeerd voor wandeffect)

Verticale stroomkracht

In de figuren 45...47 is de verticale stroomkracht K_{sv} minus de oplegreactie R uitgezet als functie van de hoek α voor de waterdiepten $h = 10$ m, 15 m en 20 m voor verschillende stroomsnelheden. De invloed van R is bij de hoogste stroomsnelheden verwaarloosbaar omdat dan de afrondingstraal van het zinkstuk nabij de bodem klein is. Met in achtname van de invloed van R zijn door de meetpunten in de figuren 45...47 rechten getrokken die het verband tussen K_{sv} en α weergeven. De grootte van K_{sv} blijkt evenredig te zijn met $e^{r \cdot \alpha}$. Uit figuur 48 blijkt dat:

$$K_{sv} :: v^2 \cdot h, \quad (8)$$

zodat:

$$K_{sv} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h C_v e^{r \cdot \alpha} \quad (9)$$

met $C_v = 1,5$

$r = 0,032$

(gecorrigeerd voor wandeffect)

De waarden van C_v en r komen niet overeen met die bij de blokkenmat. De ruwheid van het zinkstuk blijkt hiervan de oorzaak te zijn (hoofdstuk 5.3.3).

5.3.2 Stroomkracht bij scheve aanstroming

Horizontale stroomkracht

De stroomkracht bij een aanstroomhoek $\gamma = 30^\circ$ werd onderzocht bij twee waterdiepten, $h = 10$ m en $h = 20$ m. De grootte van K_{sh} als functie van α is in de figuren 49 en 50 gegeven en in figuur 51 het verband tussen K_{sh} en $\bar{v}$. Het blijkt dat K_{sh} geschreven kan worden als

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot \cos \gamma \cdot C_h$$

Hierbij is $b \cdot h \cdot \cos \gamma$ het in de stroomrichting geprojecteerde oppervlak. Doordat het eindstuk een verdraaiing loodrecht op de stroom onderging, was het in de stroomrichting geprojecteerde oppervlak groter dan $b \cdot h \cdot \cos \gamma$. Voor het geprojecteerde oppervlak wordt daarom het oppervlak bij rechte aanstroming aangehouden ($=b \cdot h$). De grootte van K_{sh} kan nu worden voorgesteld door:

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_h \quad (6)$$

waarbij

$$C_h = 2,3$$

Dat de waarde van C_h bij scheve aanstroming groter is dan bij rechte aanstroming is vermoedelijk het gevolg van de scheve stand van het zinkstuk in de goot, waardoor de einden van het zinkstuk dichter bij de gootwanden kwamen en het wandeffect werd versterkt (zie ook 5.2.3).

Verticale stroomkracht

Uit de figuren 52...t/m 54 valt af te leiden dat de grootte van de verticale stroomkracht K_{sv} kan worden voorgesteld door

$$K_{sv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot b \cdot h \cdot C_v \cdot e^{r \cdot \alpha} \quad (9)$$

met $C_v = 1,6$

en $r = 0,032$

Evenals de horizontale stroomkracht is bij scheve stand van het zinkstuk de verticale stroomkracht groter dan bij rechte aanstroming. Dezelfde verklaring als bij de horizontale stroomkracht is van toepassing.

5.3.3 Invloed van de ruwheid van het zinkstuk

Het zinkstuk 3 (tabel 1) werd beplakt met grind $D_{50} = 0,06$ m (prototype-maat). Het aldus verruwde en enigszins verzwaarde zinkstuk werd zinkstuk 7 genoemd (tabel 1). De stroomkracht werd bepaald bij een waterdiepte $h = 20$ m en rechte aanstroming. Het verband tussen K_{sh} en α is gegeven in figuur 55, het verband tussen K_{sv} en α in figuur 56, terwijl in figuur 57 K_{sv} en K_{sh} als functie van $\bar{v}$ zijn gegeven voor $\alpha = 0$. Voor K_{sh} kan worden geschreven (zie de figuren 55 en 57):

$$K_{sh} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h C_h \quad (6)$$

met $C_h = 2,1$

Voor K_{sv} kan worden geschreven (zie de figuren 56 en 57):

$$K_{sv} = \frac{1}{2} \rho v^2 b h C_v e^{r \cdot \alpha} \quad (9)$$

met $C_v = 1,8$

en $r = 0,027$

De horizontale stroomkracht blijkt niet door de ruwheid van het zinkstuk te worden beïnvloed. De verticale stroomkracht daarentegen wel, de waarde van C_v is groter en de waarde van r is kleiner met dan zonder ruwheid op het zinkstuk. Bij de blokkenmat, waar de ruwheid nog groter was dan bij zinkstuk 7, was r kleiner (vergelijk figuur 17) en C_v groter.

Tijd om een relatie te onderzoeken die het verband aangeeft tussen r en C_v enerzijds en de ruwheid anderzijds was niet aanwezig. De ruwheid van zinkstuk 7 zal die van de prototype-mat echter goed benaderen.

5.3.4 Ontwikkelde lengte van de mat

Van de proeven met de steenasfaltmat werd steeds de lengte van het in het water hangende deel bepaald. Voor de waterdiepten $h \approx 10, 15$ en 20 m is in figuur 58 de grootte van l_z als functie van α weergegeven voor de verschillende stroomsnelheden. De invloed van de stroomsnelheid blijkt bij stroomsnelheden boven $0,80$ m/s niet groot te zijn.

De ontwikkelde lengte voor de steenasfaltmat met $q_0 = 145 \text{ kg/m}^2$ kan worden voorgesteld door:

$$l_z = 0,025 \alpha + 1,4 h - 2$$

5.4 Krachten op de blokkenmat tengevolge van golven

5.4.1 Algemeen

Het onderzoek naar de krachten op de blokkenmat tengevolge van golven had een enigszins oriënterend karakter. Bij het gehele krachtenspel is de onderlinge

beïnvloeding van ponton en zinkstuk van belang. Het ontwerp van een ponton was echter nog slechts in het beginstadium. Om deze reden is ook alleen de blokkenmat onderzocht waarbij het onderzoek werd toegespitst op twee aspecten:

- welke grootheden hebben invloed op de grootte van de krachten
- hoe groot zijn de krachten tengevolge van golven in verhouding tot de stroomkrachten.

Deze gegevens dienen als ondersteuning bij het ontwerpen van het afzink-ponton. Bij een meer uitgewerkt ontwerp van het afzink-ponton kan in een later stadium desgewenst aanvullend onderzoek worden uitgevoerd.

Het onderzoek naar de golfkrachten op de blokkenmat werd uitgevoerd met een lengte-schaal $n_1 = 20$ in een golfgoot van 4 m breed, zodat een breedte van 80 m (prototype) beschikbaar was. De waterdiepte was bij het onderzoek 16 m (prototype-maat).

De mat was opgehangen aan een ponton van 70 m lang, 10 m breed en een diepgang van 1,4 m. De blokcoëfficiënt was 1. De ponton was verankerd met vijf lineaire veren met een stijfheid van 165000 N/m. Omdat de ankerdraden in het prototype lang zijn is het toepassen van lineaire veren een goede weergave van de prototype-ankerdraden. De plaats van de ankers is op figuur 59 aangegeven. Het zinkstuk kon op het voorschip, op het achterschip en in een beun op het middenschip worden opgehangen op twee hoogten boven de stilwaterspiegel, $p = 3$ m of $p = 10$ m. De totale lengte van het zinkstuk was 50 m, zodat steeds een deel op de bodem lag.

De verticale ophangkracht werd met twee krachtmeters aan de zijanten van de bovenrandbalk gemeten (figuur 59). De horizontale ophangkracht werd gemeten met een krachtmeter in het midden van de bovenrandbalk (figuur 59).

Op het voorschip en op het middenschip waren verticale verplaatsingsmeters aangebracht om de beweging van het ponton te kunnen registreren. De golfhoogte werd op 30 m voor het ponton gemeten.

Bij stil water werd de hoek α ingesteld en werden de horizontale en verticale ophangkrachten bepaald. Krachtwisselingen ten opzichte van de krachten die bij stil water optraden, werden golfkrachten genoemd (horizontaal K_{gh} en verticaal K_{gv}). In verband met de periodiciteit werd bij regelmatige golven steeds de gemiddelde waarde van de hoogste periodiek terugkerende top gegeven (zie figuur 60). Bij de onregelmatige golven is alleen een kracht-overschrijdingskromme gegeven voor de grootte van K_{gv} , omdat K_{gh} van minder belang en tevens kleiner is dan K_{gv} . De gemeten krachten zijn het gevolg van de bewegingen van het

ponton (domp-, stamp- en schrikbeweging), van het zinkstuk en het water. De faseverschuivingen en de variaties in amplitude in de genoemde bewegingen, die van de golfperiode (toegevoegde massa) en de golfhoogte (niet lineaire verschijnselen) afhankelijk zijn, zijn de oorzaak van het niet regelmatig verloop van de krachten als functie van golfhoogte of golfperiode.

Op de figuren 60 en 61 zijn voorbeelden van registraties gegeven (bij regelmatige golven op figuur 60 en bij onregelmatige golven op figuur 61).

Bij het onderzoek werden de zinkstukken 1 en 5 (tabel 1) gebruikt. De elasticiteit van beide zinkstukken was relatief te klein. De gemeten krachten kunnen daardoor te groot zijn, zodat de meetresultaten aan de veilige kant zijn.

5.4.2 Onderzoek

Het onderzoek naar de golfkrachten kan worden verdeeld in vijf series proeven: serie I...serie V. Op figuur 62 is een overzicht gegeven van de vijf series proeven (zie ook tabel 2). Per serie was de positie van het zinkstuk verschillend wat betreft de ophanghoogte p en de plaats waar het zinkstuk aan het ponton was bevestigd. In elke serie werd de hoek α gevarieerd ($\alpha = 0^\circ$ of $\alpha = 15^\circ$) behalve bij serie III, waar α gelijk aan 15° was.

Behalve de hoek α werd per serie de golfperiode en de golfhoogte gevarieerd. De golfperiode was $T = 4, 6, 8$ of 10 s en de golfhoogte varieerde van $H = 0$ tot circa $H = 2,20$ m. Bij de series II, IV en V werd bovendien een onregelmatig golfpatroon ingesteld. Als voorbeeld voor het golfspectrum werd het golfspectrum in de mond van de Oosterschelde genomen zoals dat optreedt bij de maatgevende golfhoogte bij de waterstand NAP + 3,00 m in de nota W 71.141 van de Deltadienst van Rijkswaterstaat is gegeven [3]. Op figuur 63 is het spectrum uit de nota W 71.141 en het in het model gerealiseerde spectrum gegeven.

5.4.3 Resultaten van het onderzoek naar de krachten door golven

De figuren 64...68 hebben betrekking op de proeven van serie I. Bij de proeven met $\alpha = 0^\circ$ functioneerde de horizontale krachtopnemer niet en de verplaatsingsmeters waren bij $T=4$ s en 6 s niet in orde. De golfkrachten bij $\alpha = 15^\circ$ bleken veel groter te zijn dan bij $\alpha = 0^\circ$ (figuren 65 en 68). De verticale bewegingen van het ponton worden niet duidelijk beïnvloed door de stand van de mat.

De metingen van serie II zijn op de figuren 69...72 gegeven voor $\alpha = 0^\circ$ en op de figuren 73...76 voor $\alpha = 15^\circ$. Bij opstelling van het zinkstuk in het midden van het ponton waren de horizontale- en verticale golfkrachten groter dan bij bevestiging op het achterschip, ondanks het feit dat de verticale beweging in het midden circa de helft van die van het achterschip was. Vermoedelijk werd de watermassa tussen het ponton en het zinkstuk bij neergaande beweging van het achterschip samengedrukt waardoor de kracht op de mat toenam. Uit de registraties bleek inderdaad dat daling van het achterschip samenviel met een krachttoename in de mat. De vraag deed zich voor of bij bevestiging van de mat op het voorschip de golfkrachten nog groter zouden zijn. Bij serie III werd de mat daarom op dezelfde hoogte $p = 3$ m als bij serie I en II op het voorschip opgehangen en onder het ponton door gehaald (figuur 62). De hoek α bedroeg hierbij 15° . De metingen zijn op de figuren 77 en 78 weergegeven. Door een defect werden geen verplaatsingen gemeten. De golfkrachten blijken bij serie III nog enigszins hoger te zijn dan bij serie I (vergelijk de figuren 67 en 68). Bij serie IV werd de mat op het achterschip gehangen op een hoogte $p = 10$ m. De mat was alleen opgehangen aan twee krachtmeters, zodat de grootte van K_{gh} en K_{gv} niet afzonderlijk gemeten konden worden. Gemeten werd nu de resultante van K_{gv} en K_{gh} ($= K_g$). Omdat K_{gh} steeds veel kleiner is dan K_{gv} en de piekwaarde van K_{gv} niet altijd samenvalt met de piekwaarde van K_{gh} zal K_g niet veel van K_{gv} afwijken. De meetresultaten van de proevenserie IV zijn op de figuren 79...81 gegeven. De invloed van de verhoogde ophanging blijkt na vergelijking met serie II niet duidelijk aanwezig te zijn. Bij serie V werd het zinkstuk 5 ($q_0 = 310$ kg/m²) op het achterschip opgehangen. De meetresultaten zijn op de figuren 82...85 weergegeven. De beweging van het achterschip werd geremd door het zware zinkstuk. De amplitude van de verticale beweging van het middenschip was nu groter dan die van het achterschip (figuur 82). Hoewel de amplitude van de verticale beweging van het achterschip ongeveer de helft was van die bij serie II, waren de golfkrachten groter (figuren 83...85).

REFERENTIES

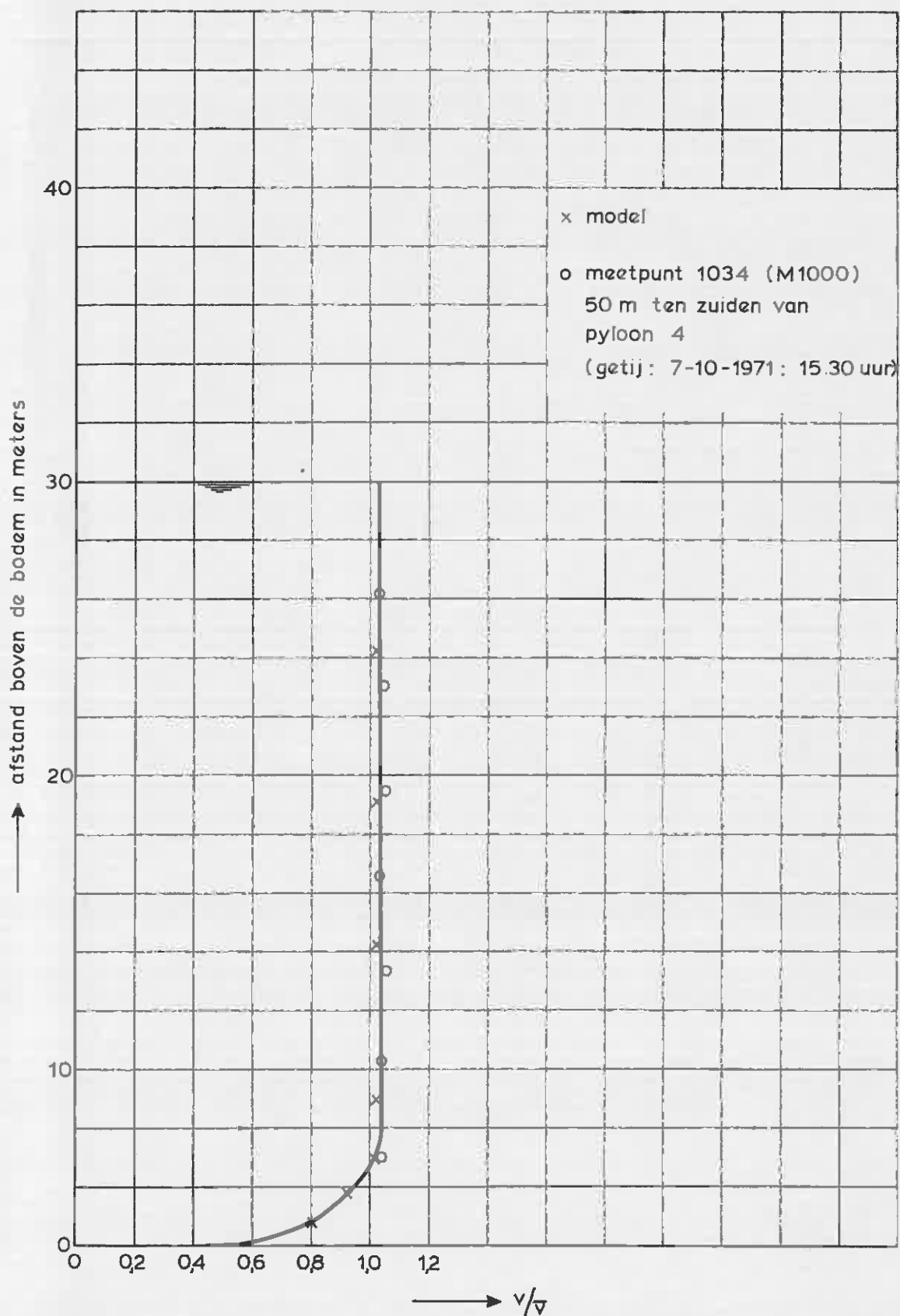
- 1 SHAW, T.L.
Steady flow past flat plate in channel
Proc.ASCE Journal of hydraulics division vol 95, 1969,
no. HY 6 Nov. pp 2013-2028
- 2 ROUSE, H.
Engineering Hydraulics
New York, Wiley, 1950
- 3 Golfbewegingen in de mond van de Oosterschelde
Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterloopkundige Afdeling nota W 71.141
Den Haag, (1971)

Nr.	Type	Breedte (m)	massa (kg/m ²)		materiaal in model
			q _b	q _o	
1	blokkenmat	10	100	60	plasticfolie
2	blokkenmat	10	100	60	doek
3	steenafaltmat	10	260	144	rubber
5	blokkenmat	10	370	310	doek
6	blokkenmat	6,6	100	60	doek
7	steenafaltmat	10	270	150	rubber
8	blokkenmat	3,2	100	60	doek
9	blokkenmat	6,6	100	60	plasticfolie
10	blokkenmat	10	235	185	doek

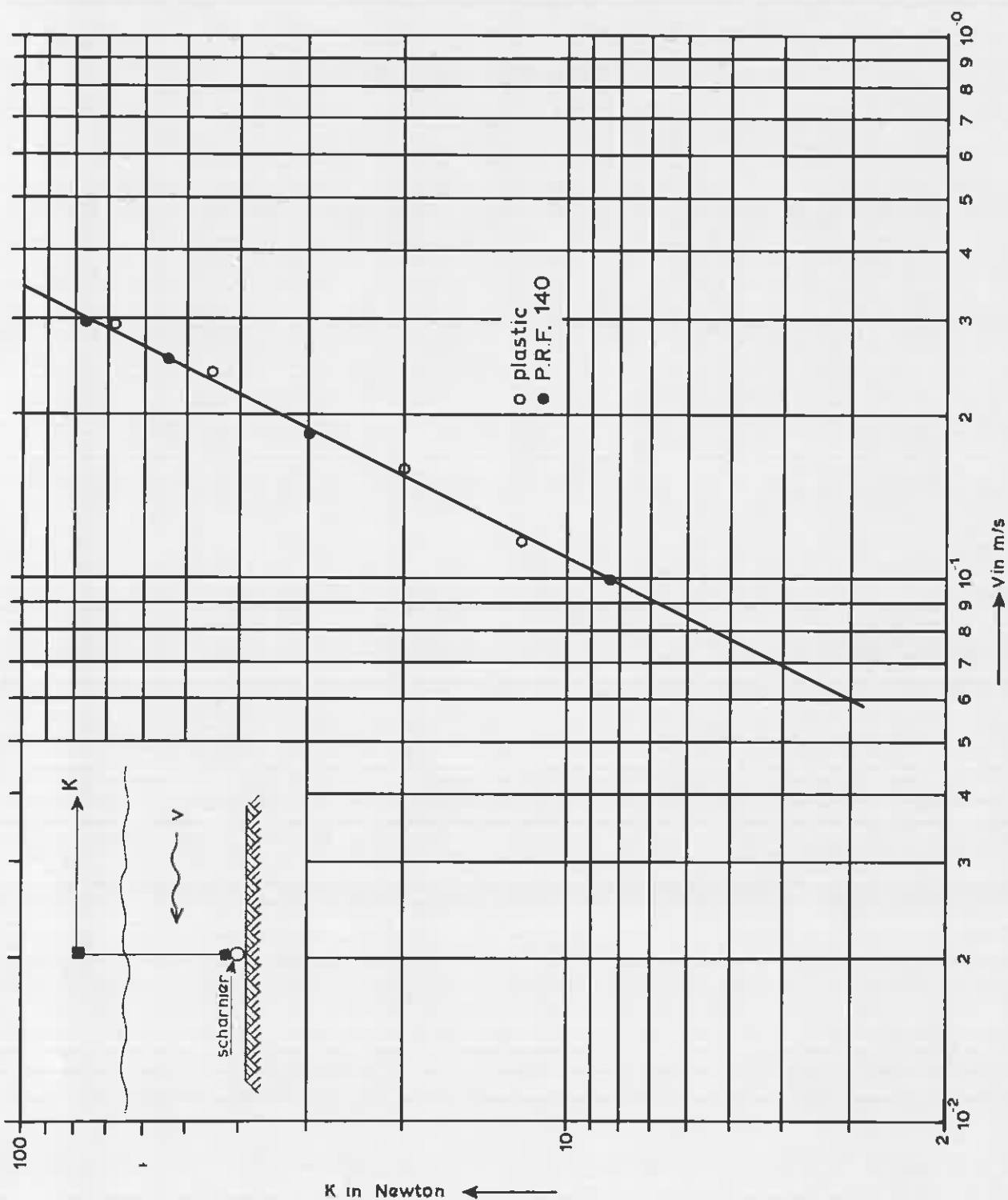
Tabel 1 Overzicht gebruikte zinkstukken

	α (graden)		P (meters)		PLAATS			MASSA q_b kg/m ²		GOLVEN	
	0	15	3	10	voor	midden	achter	100	370	regelm.	onregelm.
SERIE I	x		x			x		x		x	
		x	x			x		x		x	
SERIE II	x		x				x	x		x	
	x		x				x	x			x
		x	x				x	x		x	
		x	x				x	x			x
SERIE III		x	x		x			x		x	
SERIE IV	x			x			x	x		x	
		x		x			x	x		x	
	x			x			x	x			x
		x		x			x	x			x
SERIE V	x		x				x		x	x	
	x		x				x		x		x

Tabel 2 Overzicht van het onderzoek naar de invloed van golven



SNELHEIDSVERTICALEN

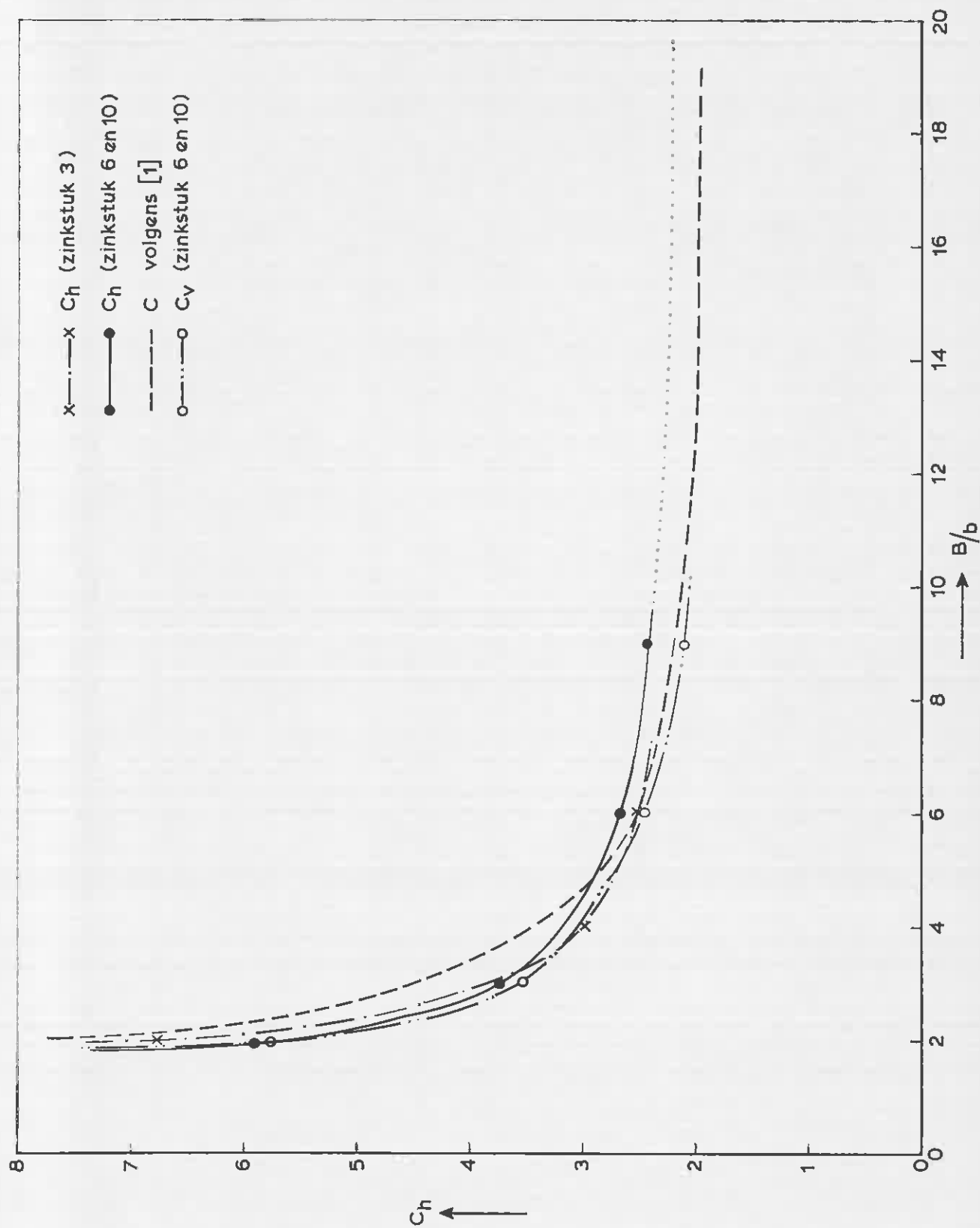


INVLOED DOORLATENDHEID OP DE STROOMDRUK

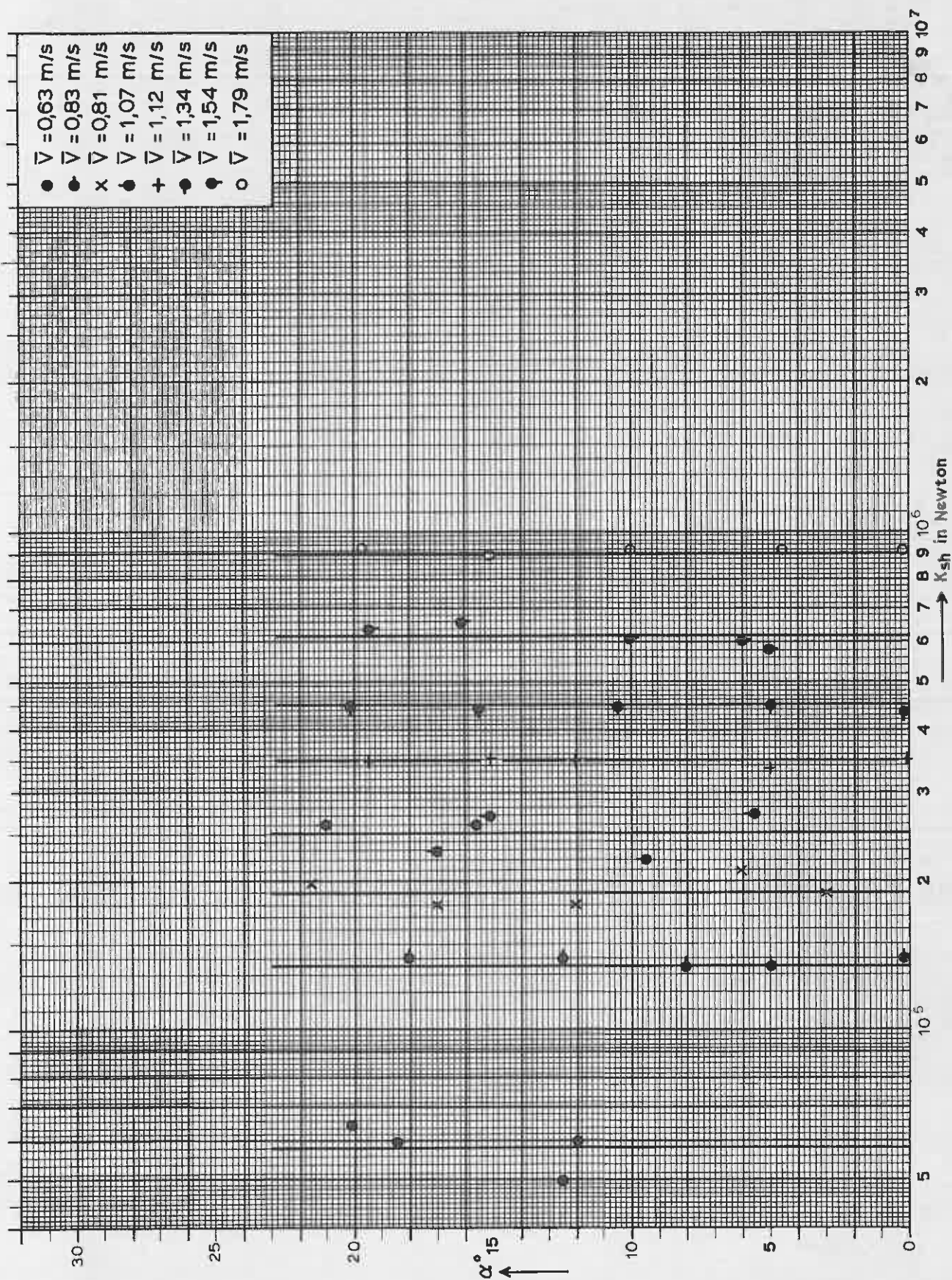
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 2



INVLOED VAN B/b OP DE STROOMKRACHT



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

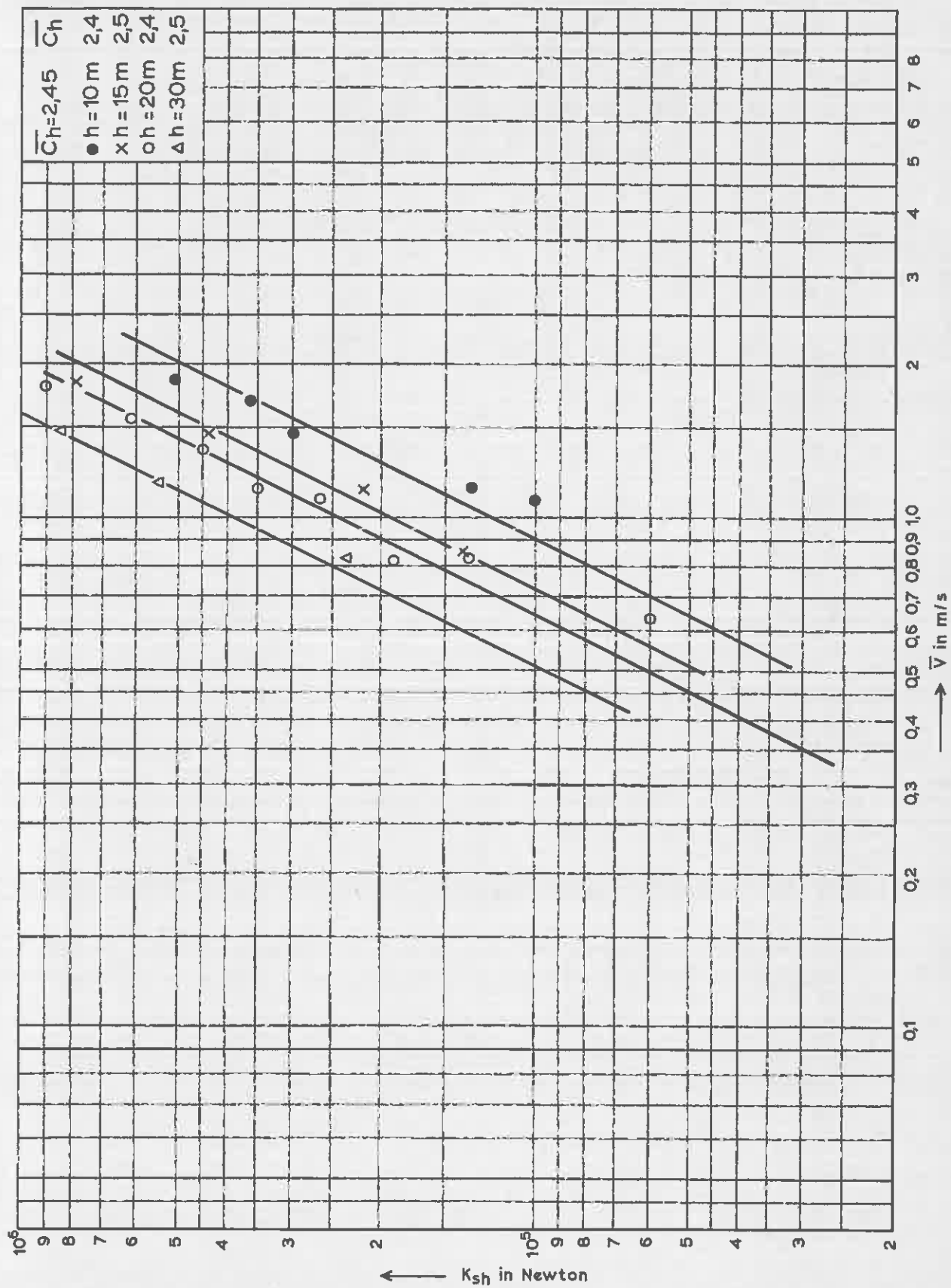
$h = 20\text{m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 5



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sh}

$\gamma = 0^\circ$

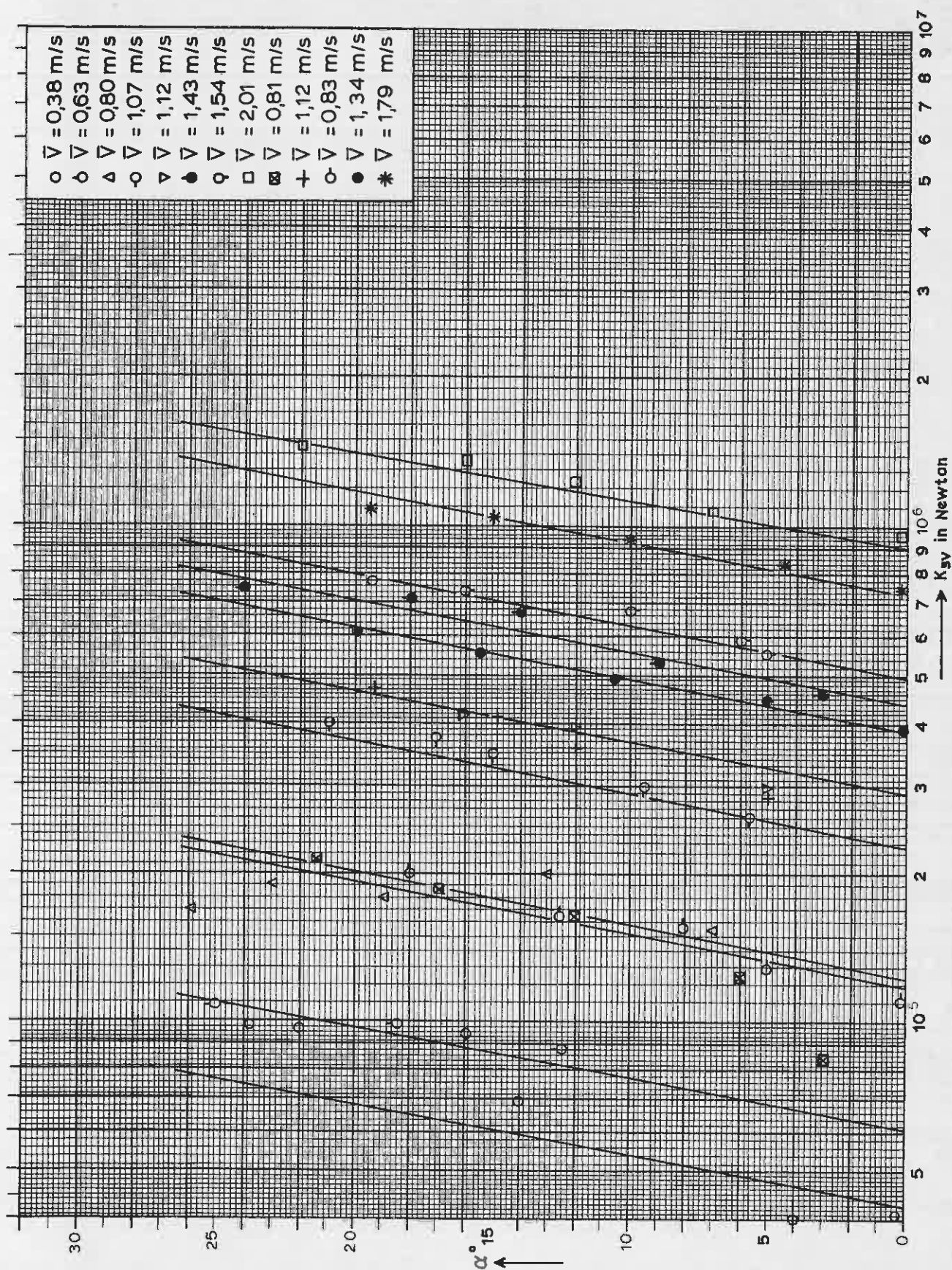
$h = 10, 15, 20, 30\text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 6



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

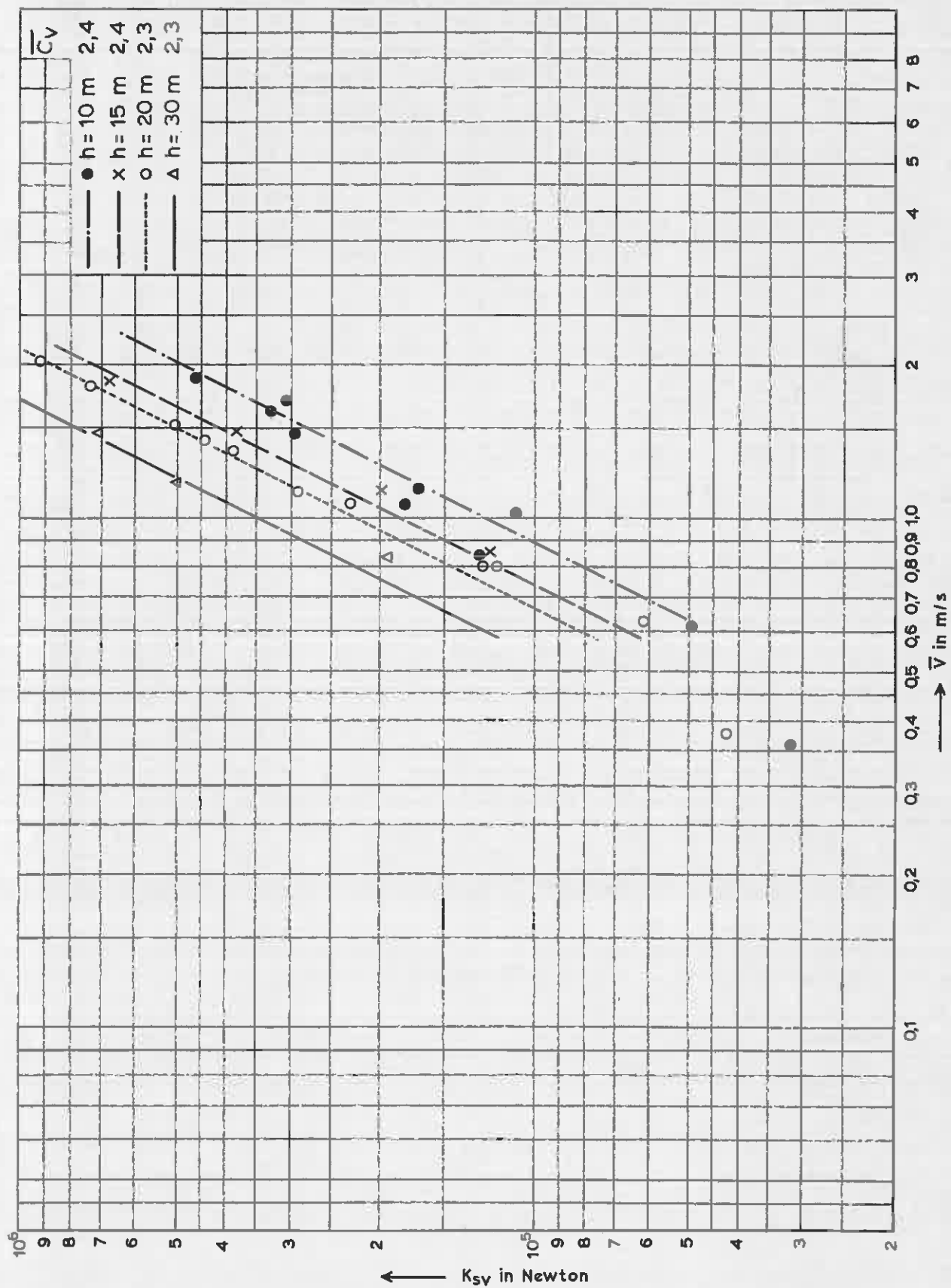
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 7



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{SV}

$\gamma=0^\circ; \alpha=0^\circ$

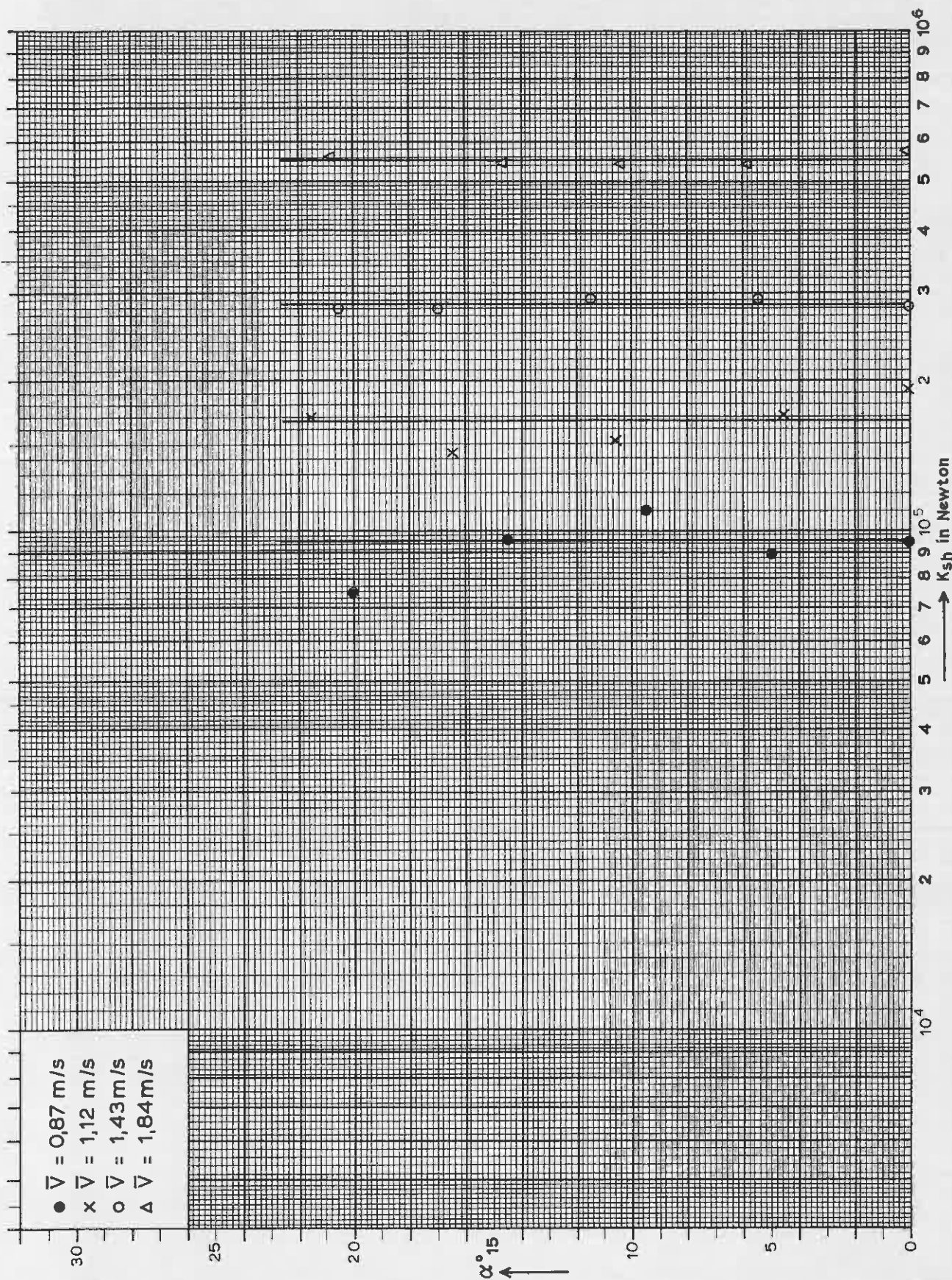
$h=10, 15, 20, 30 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 8



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

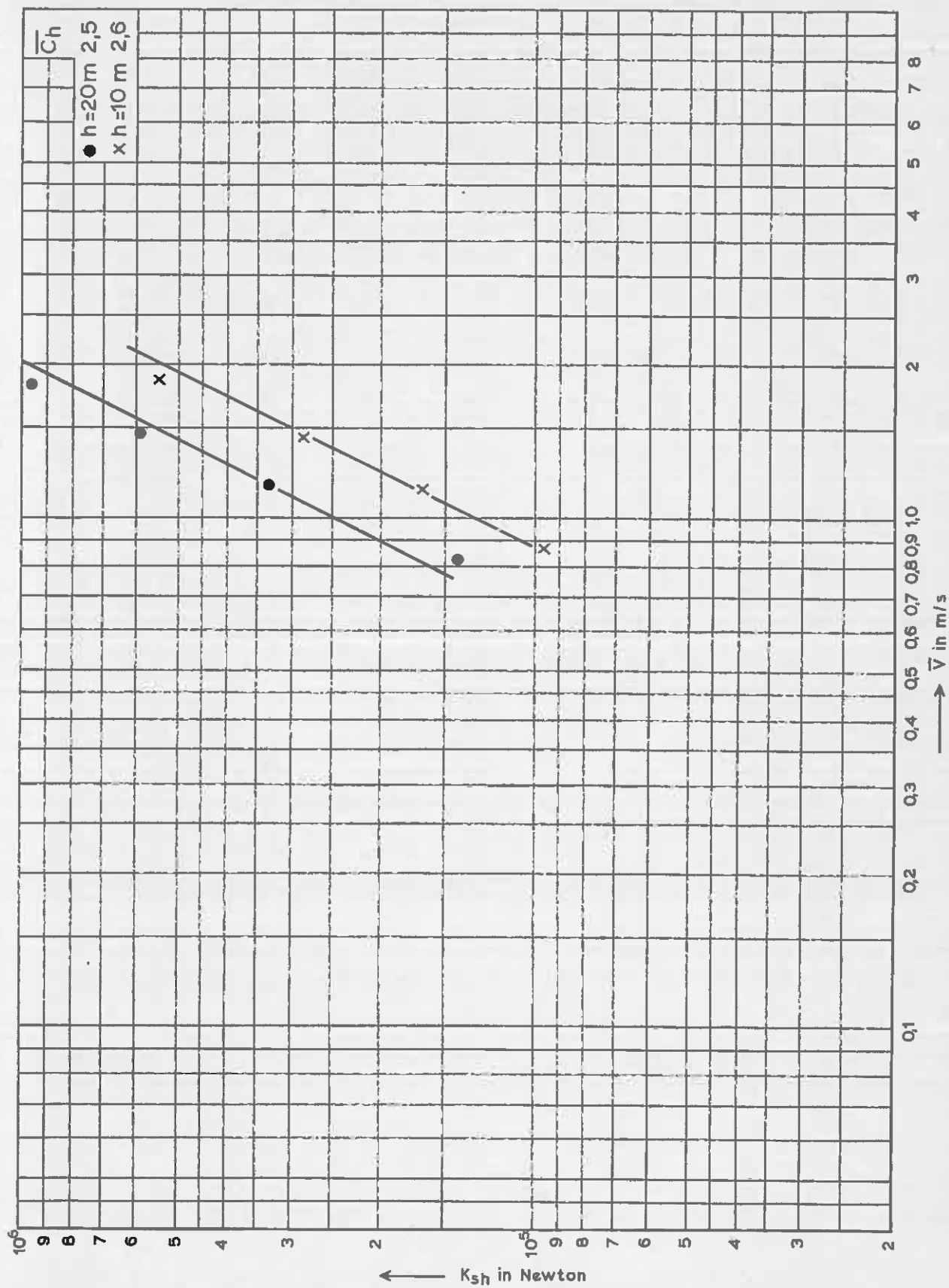
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 9



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sh}

$\gamma=0^\circ$

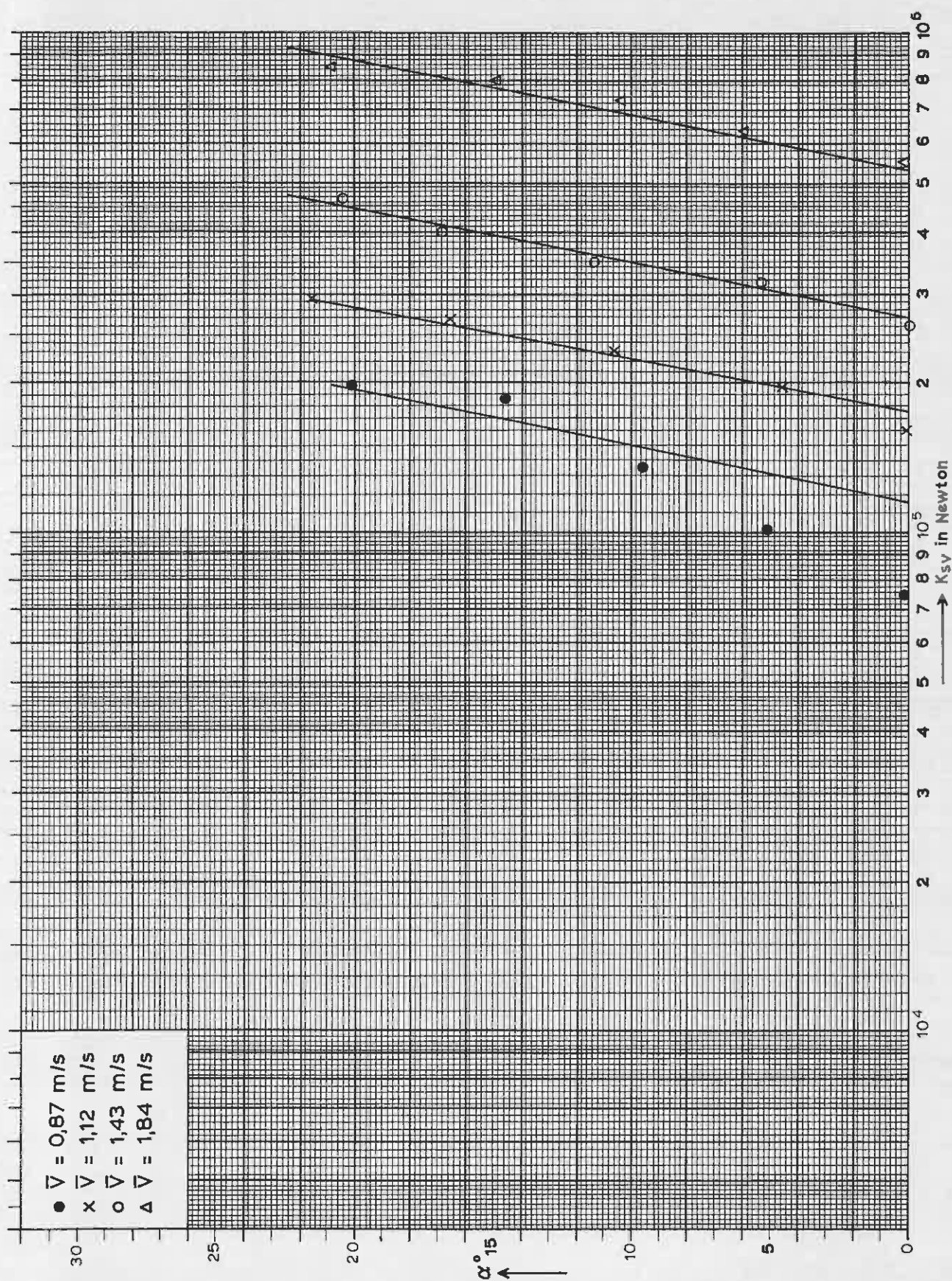
$h=10\text{ EN } 20\text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 10



VERBAND K_{SV} EN α

$\gamma = 0^\circ$

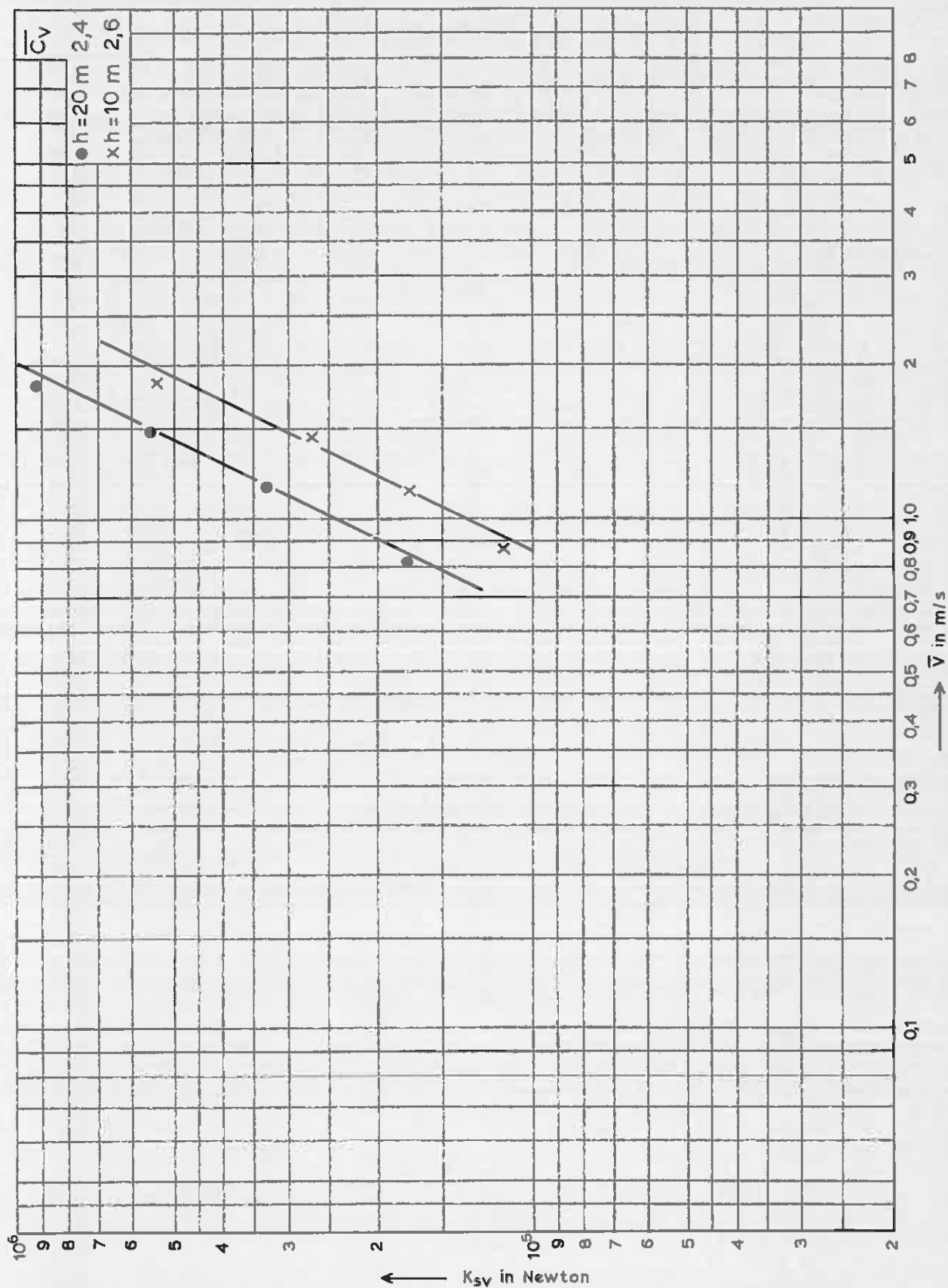
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 11



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sv}

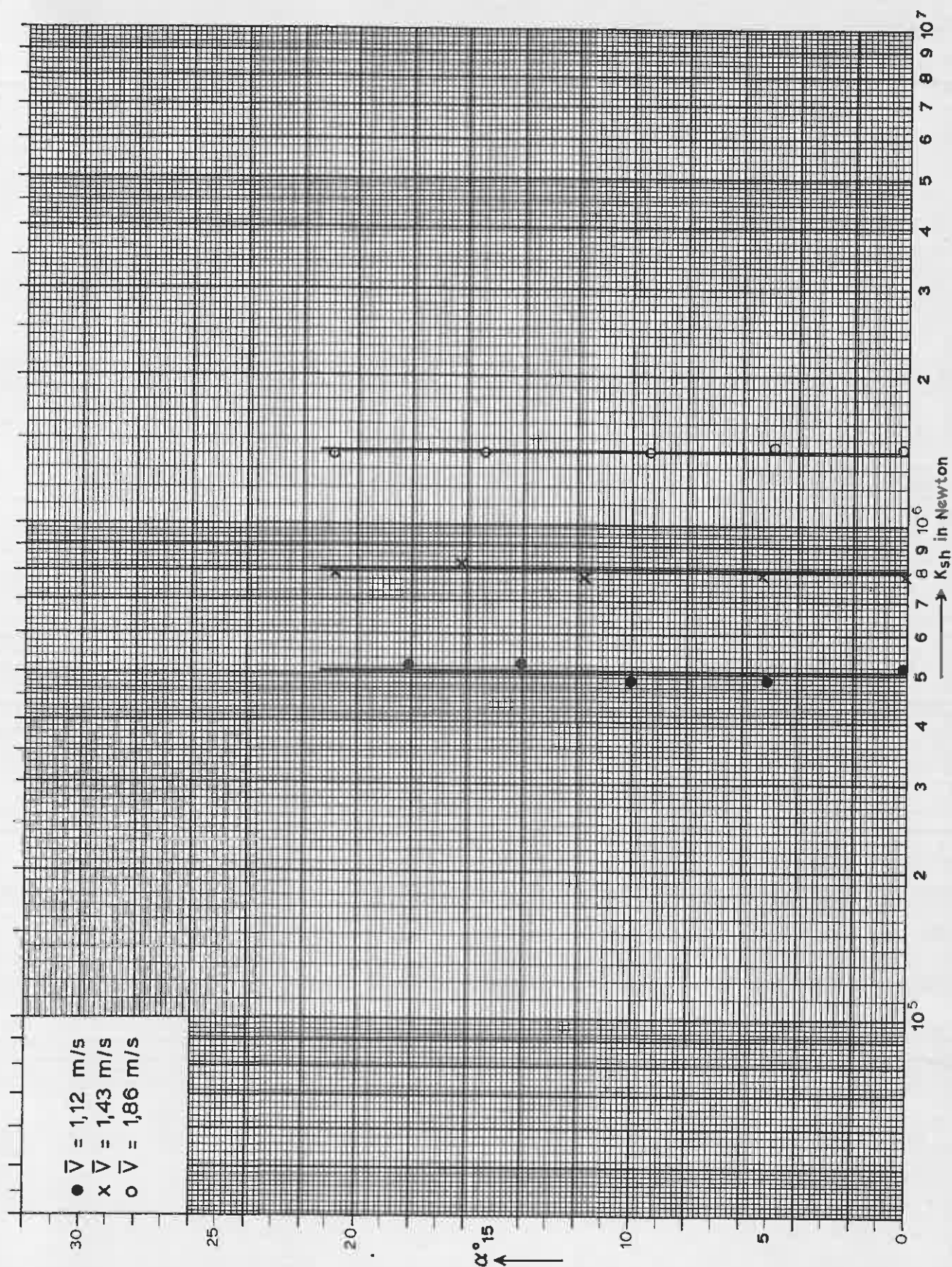
$\gamma=0^\circ, \alpha=0^\circ$ $h=10\text{ EN } 20\text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 12



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

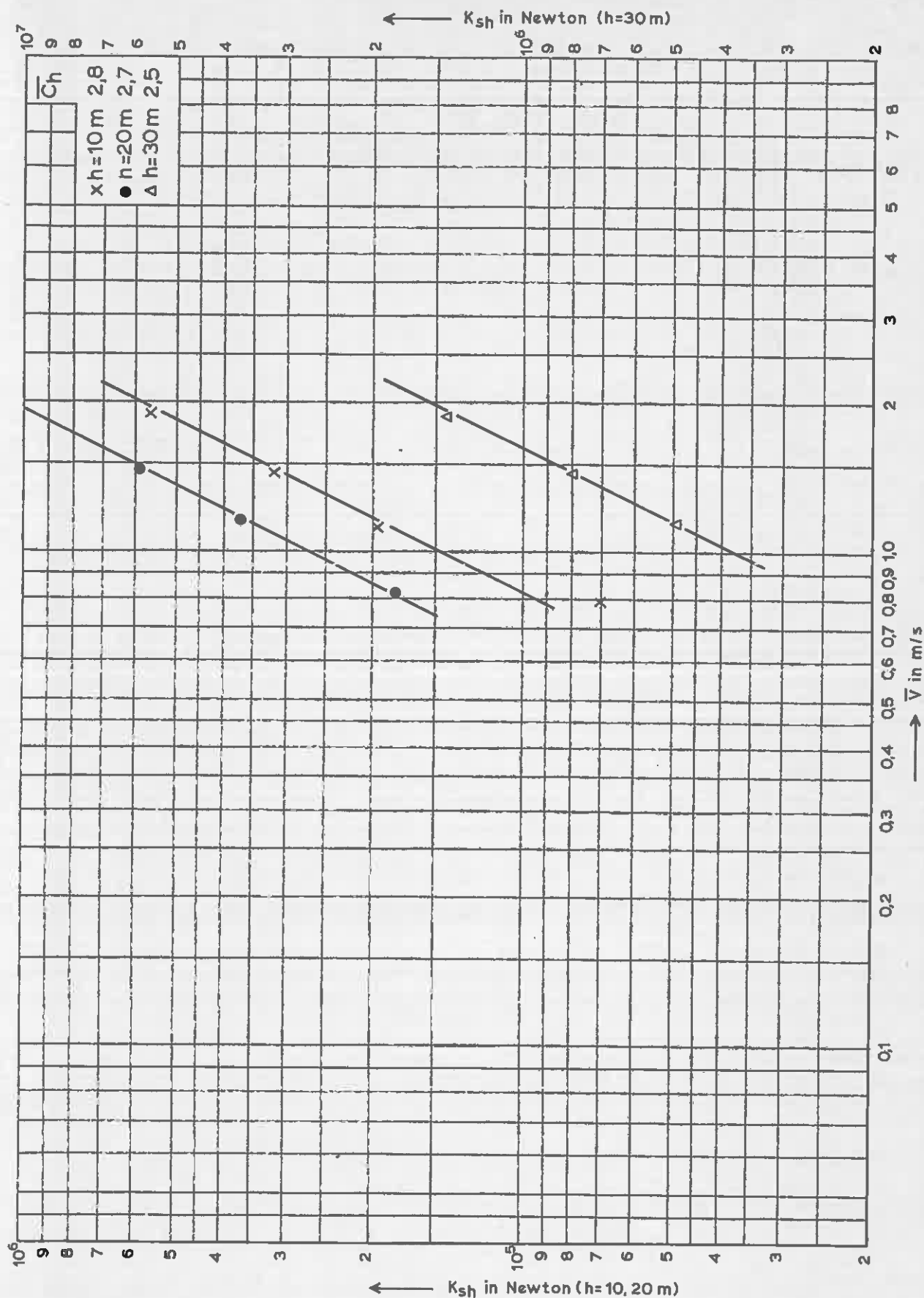
$h = 30 \text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 13



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sh}

$\gamma=0^\circ$

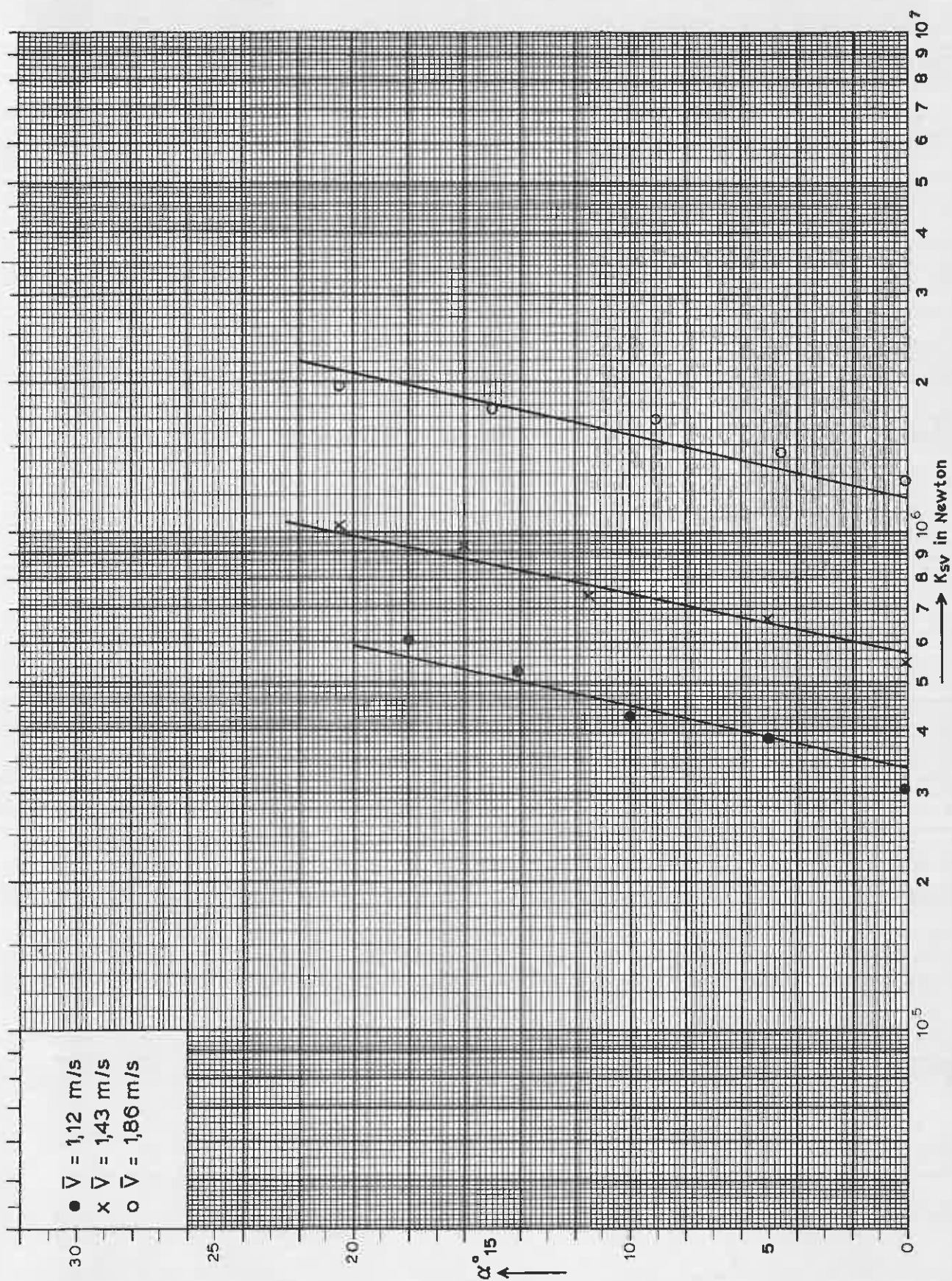
$h=10, 20, 30\text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 14



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

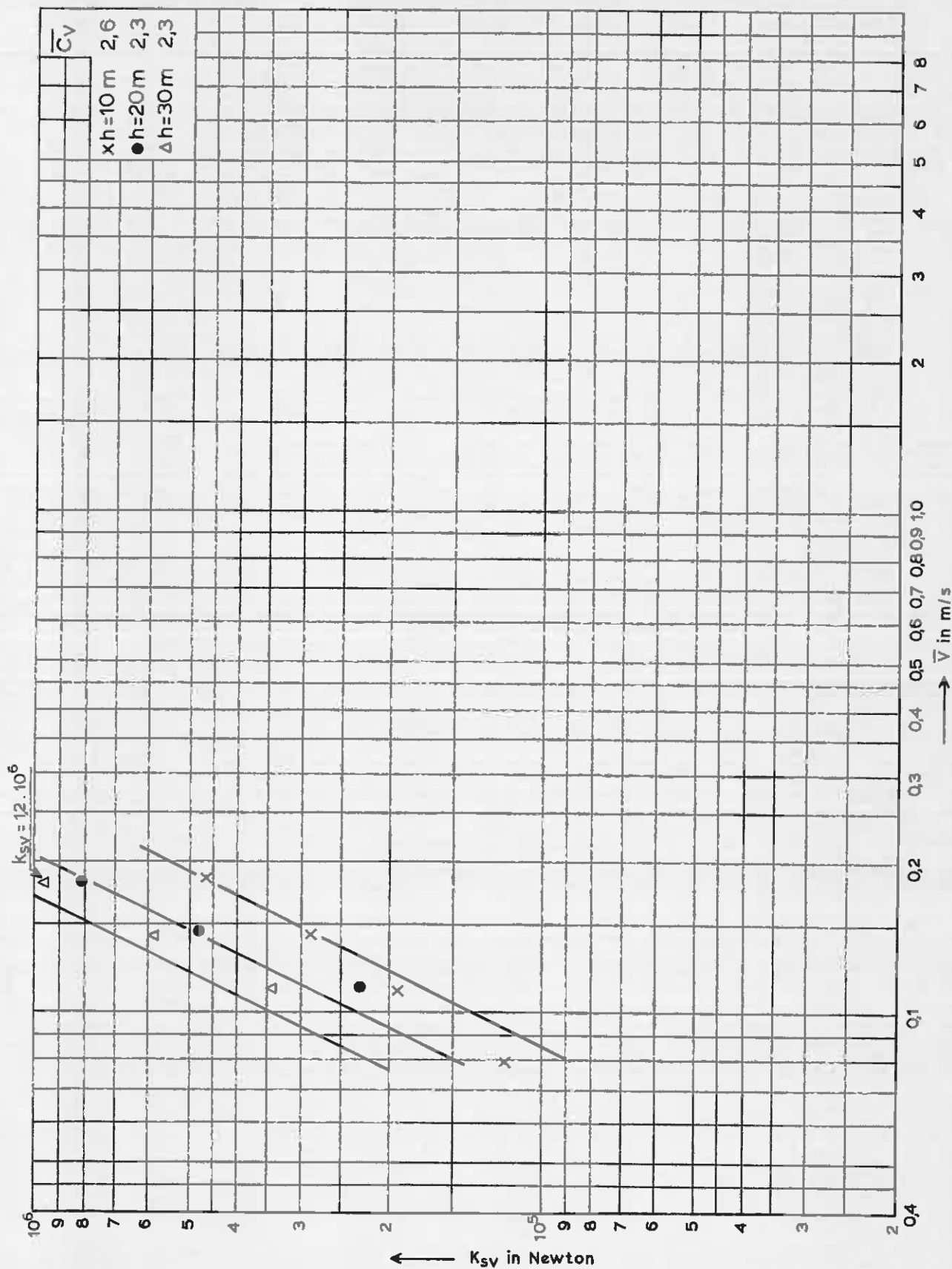
$h = 30 \text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 15



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{SV}

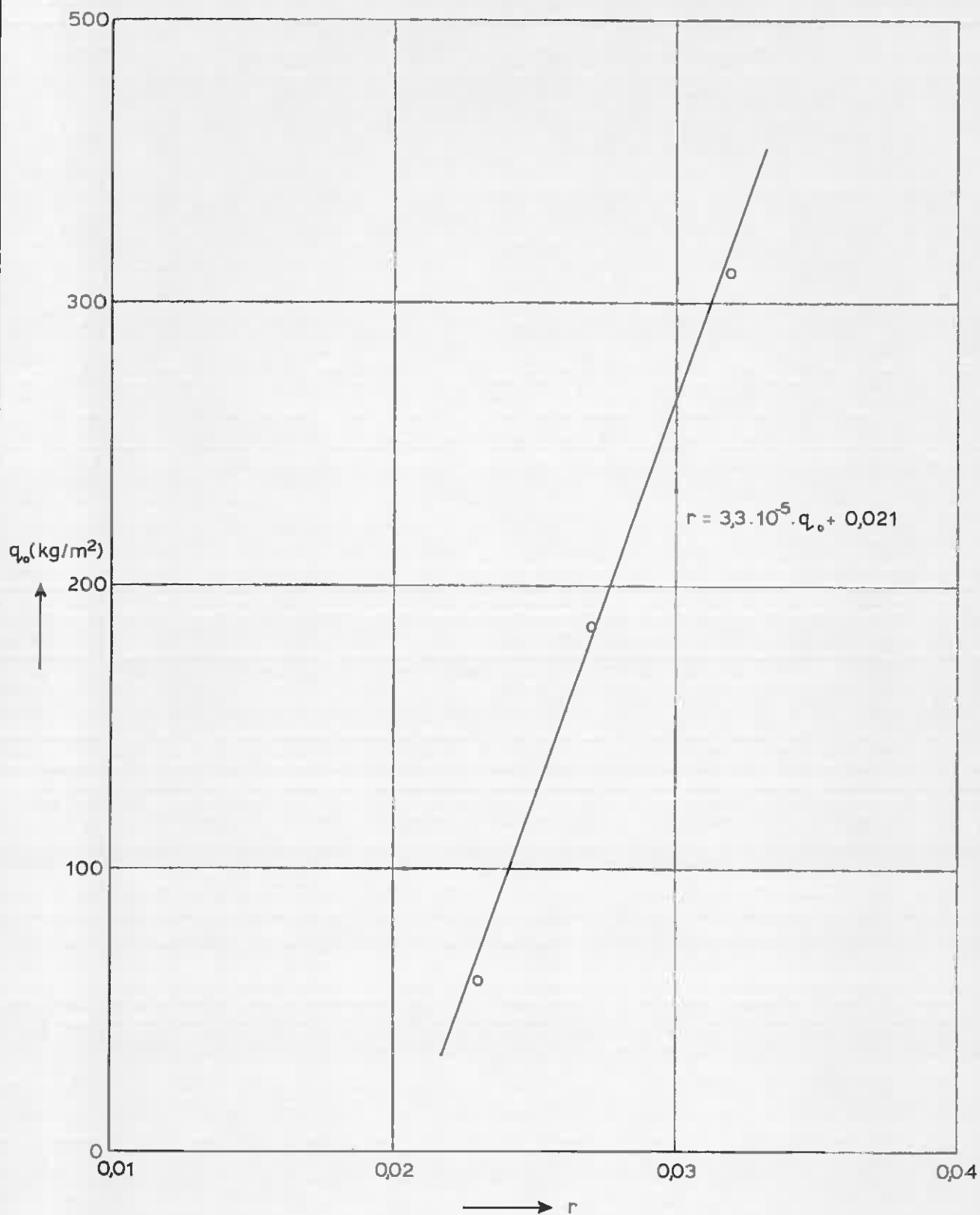
$\gamma=0^\circ; \alpha=0^\circ$ $h=10, 20, 30\text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

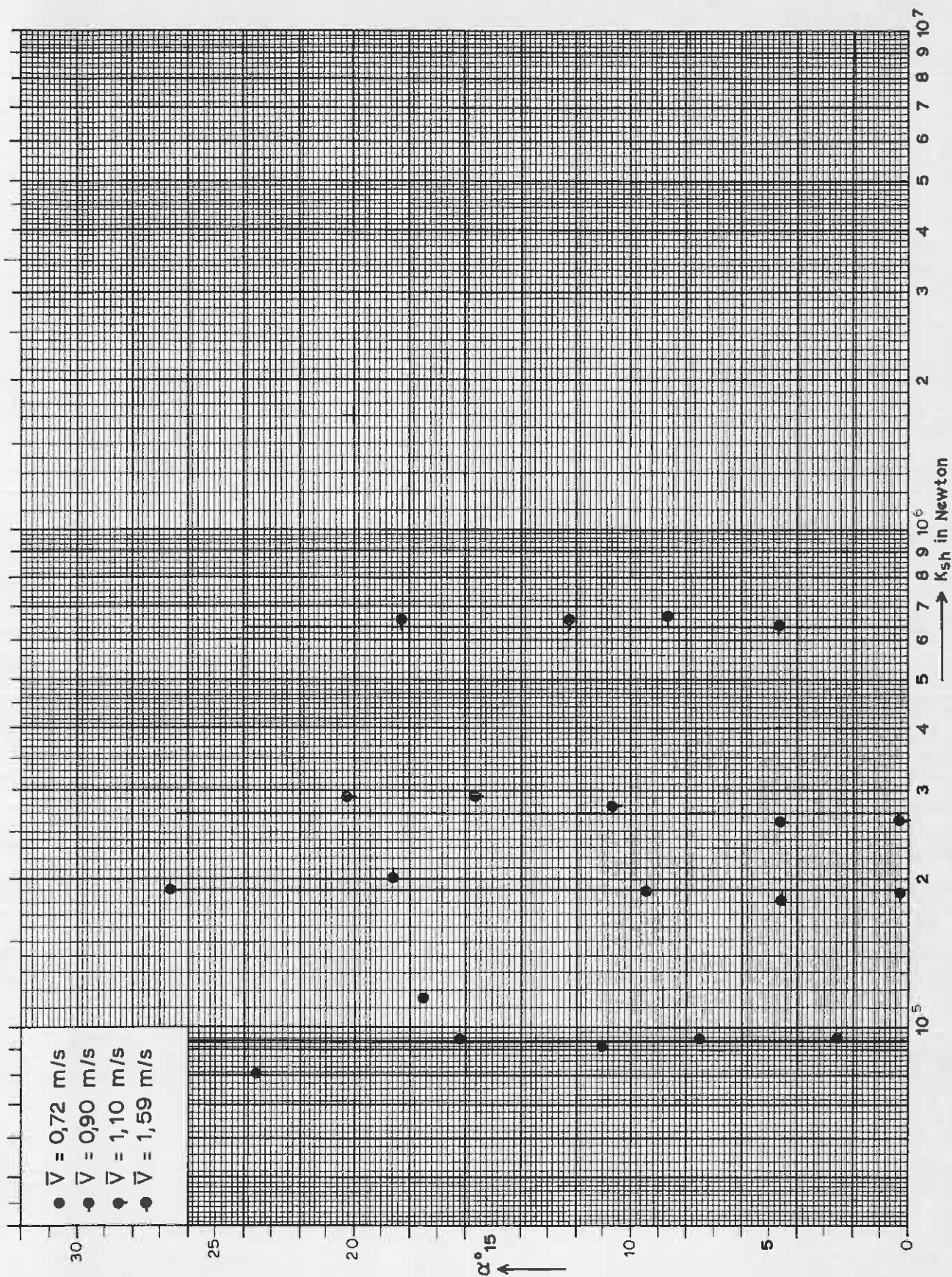
M 1190

FIG. 16



VERBAND TUSSEN r EN q_0

$\gamma = 0^\circ$



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 15^\circ$

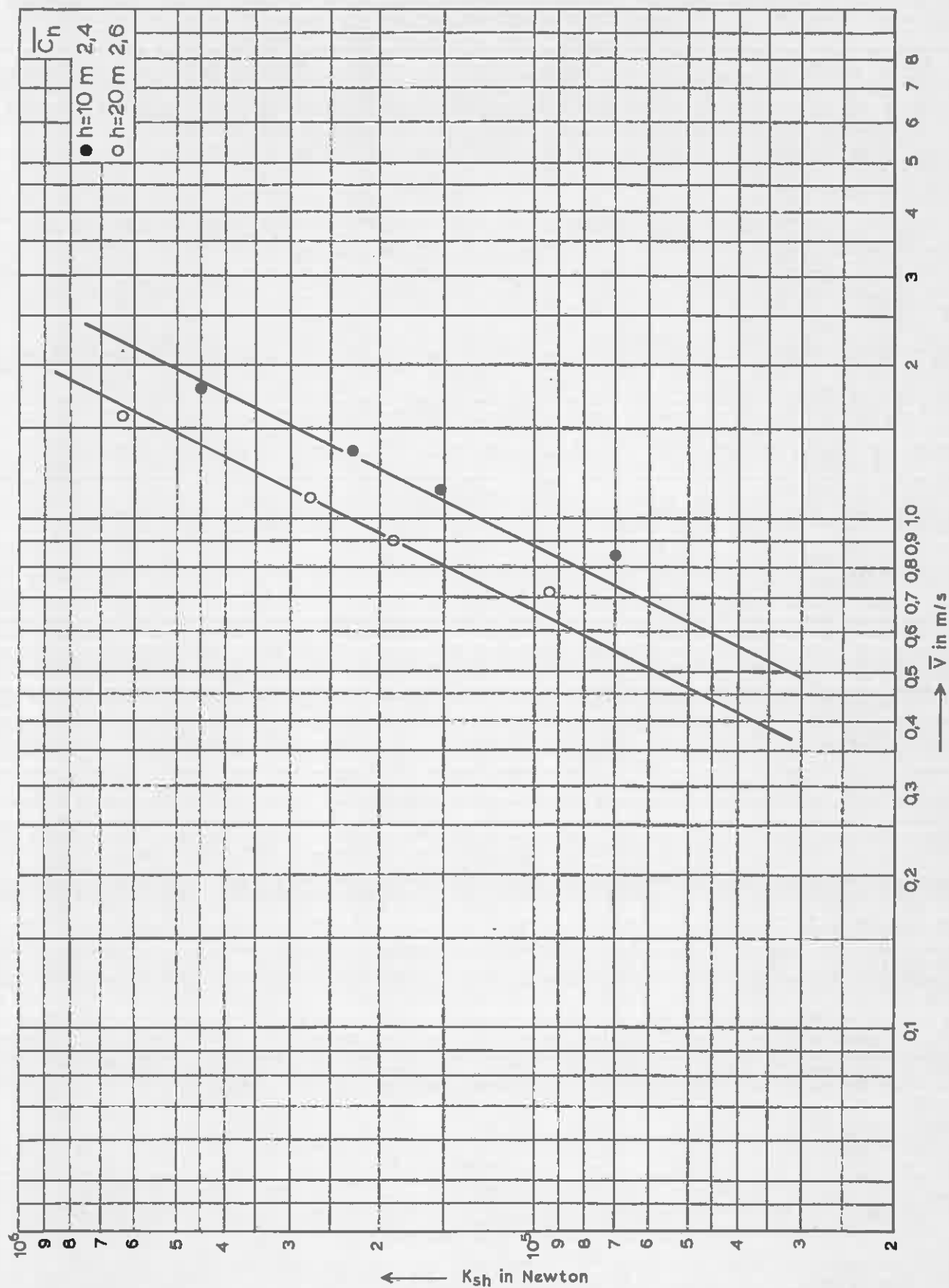
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 18



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sh}

$\gamma=15^\circ$

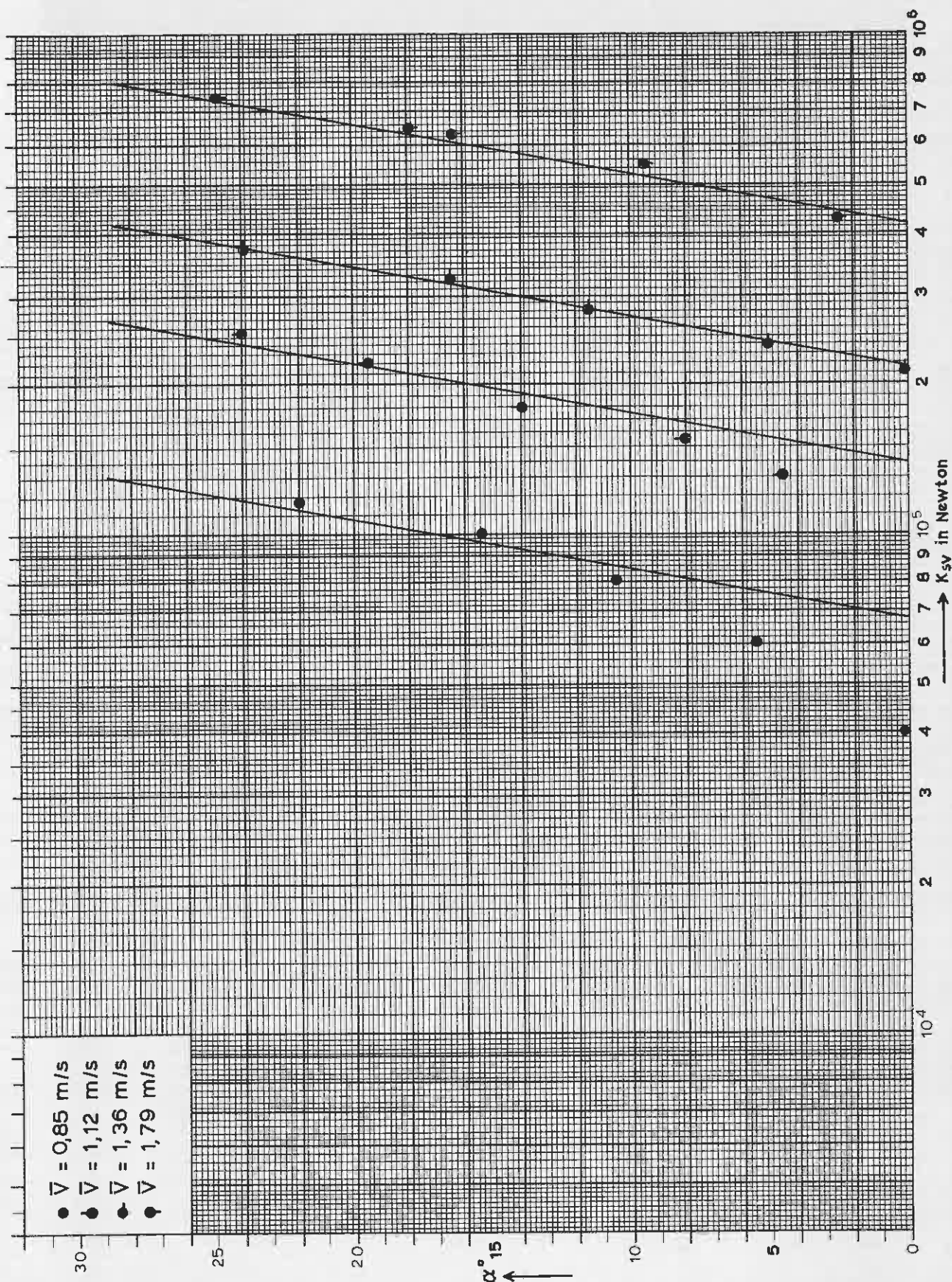
$h=10,20\text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 19



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 15^\circ$

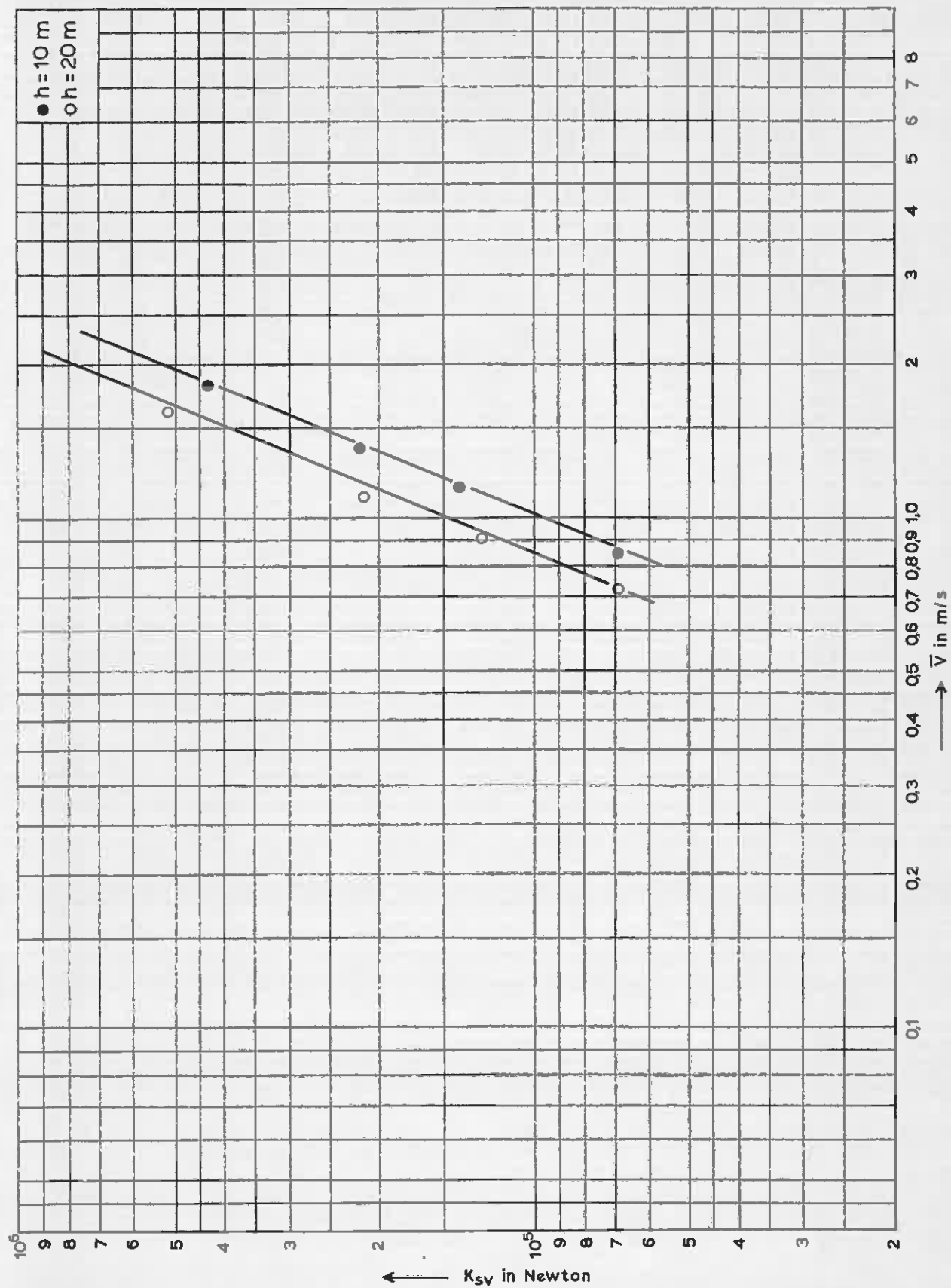
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 20



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sv}

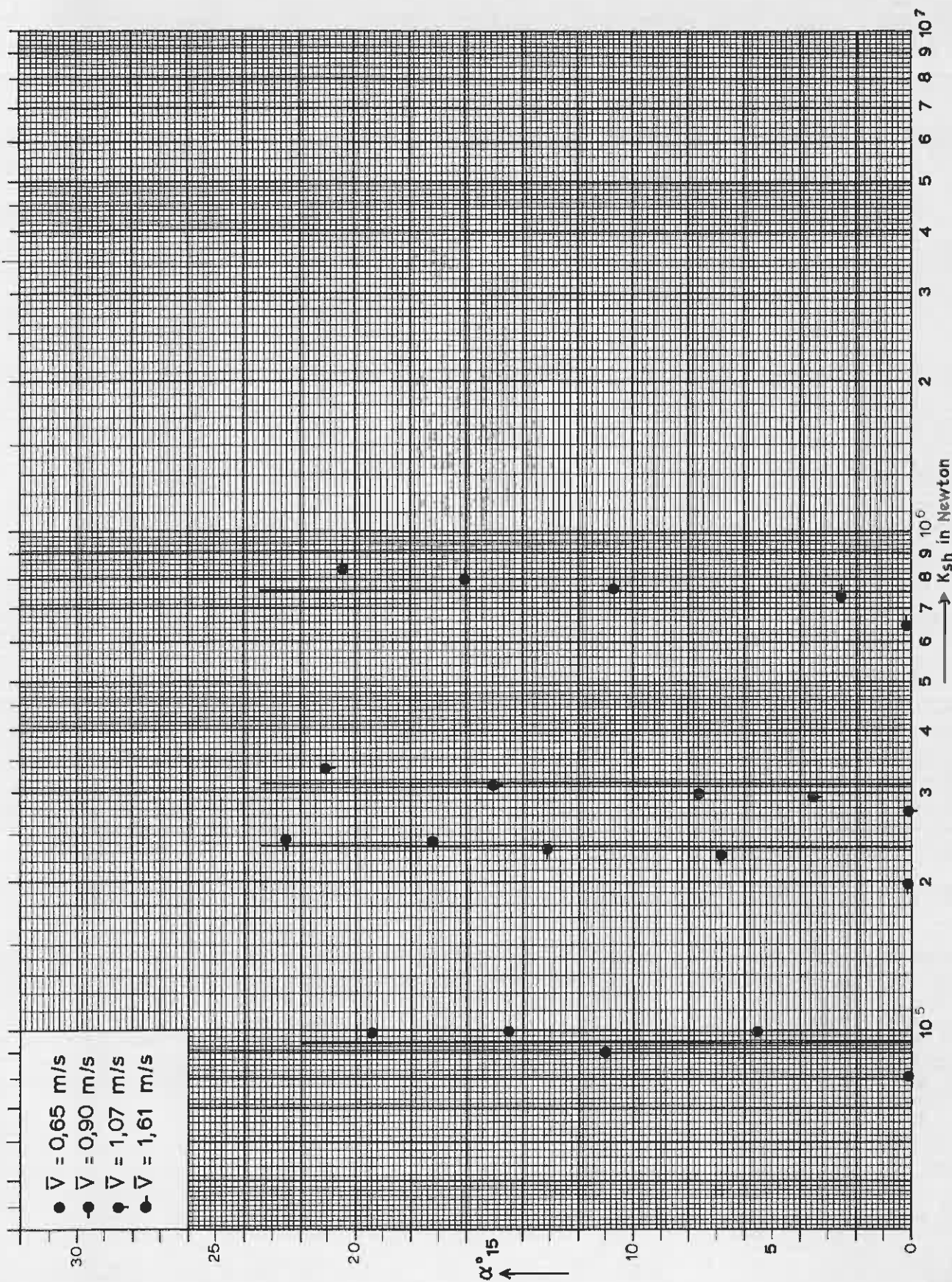
$\gamma = 15^\circ; \alpha = 0^\circ$ $h = 10, 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 21



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 30^\circ$

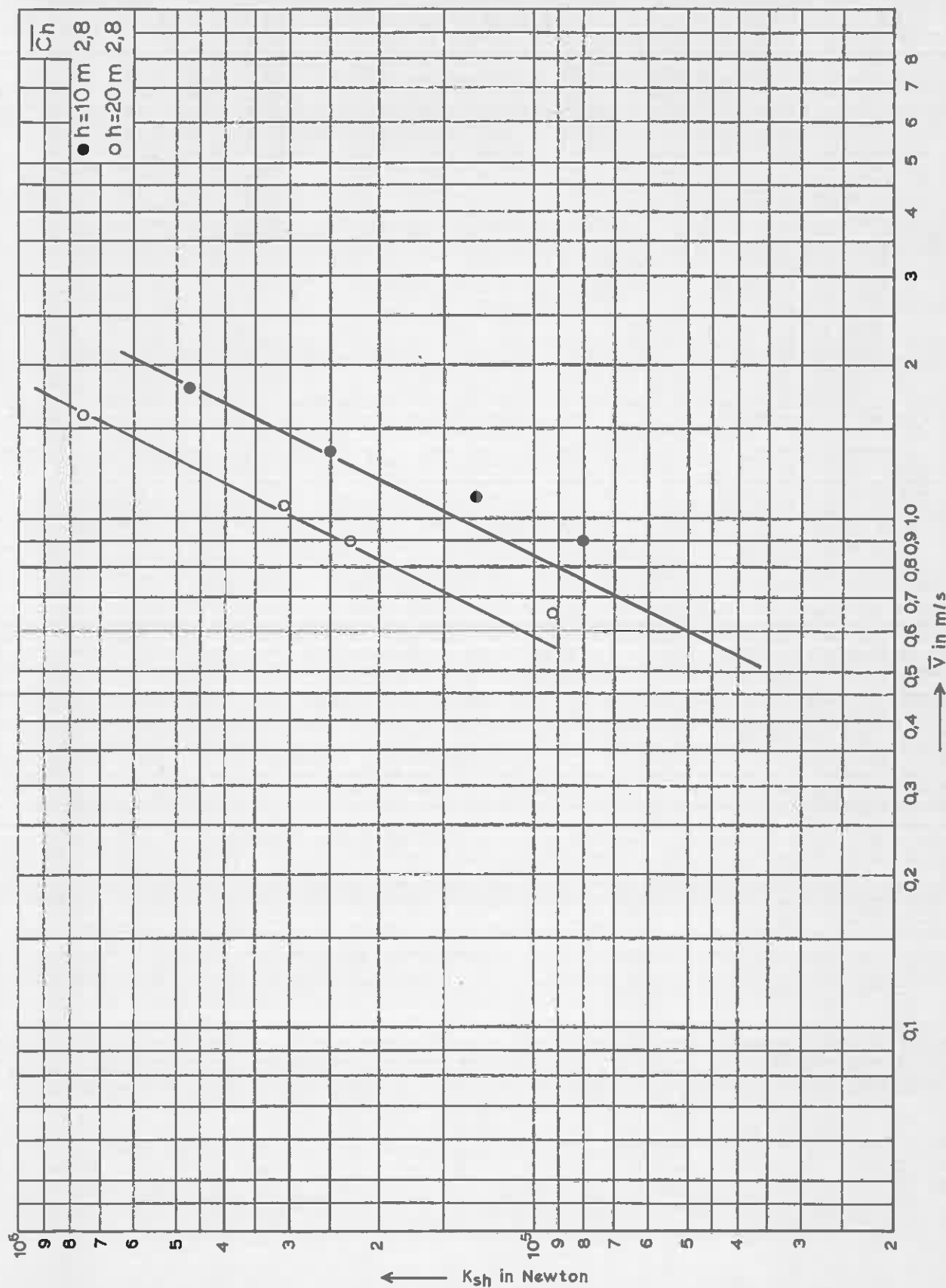
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 22



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sh}

$\gamma=30^\circ$

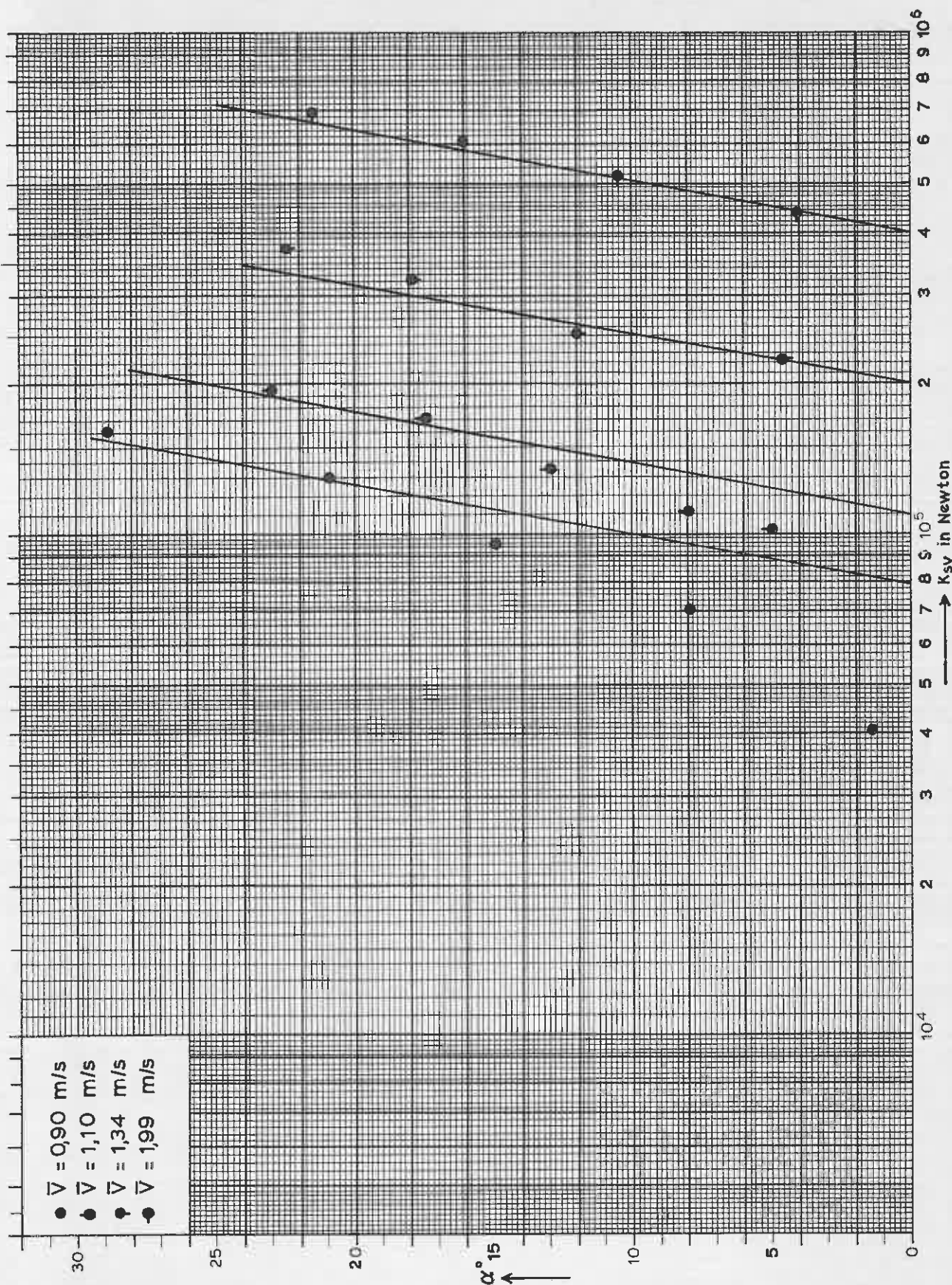
$h=10, 20\text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 23



VERBAND K_{SV} EN α

$\gamma = 30^\circ$

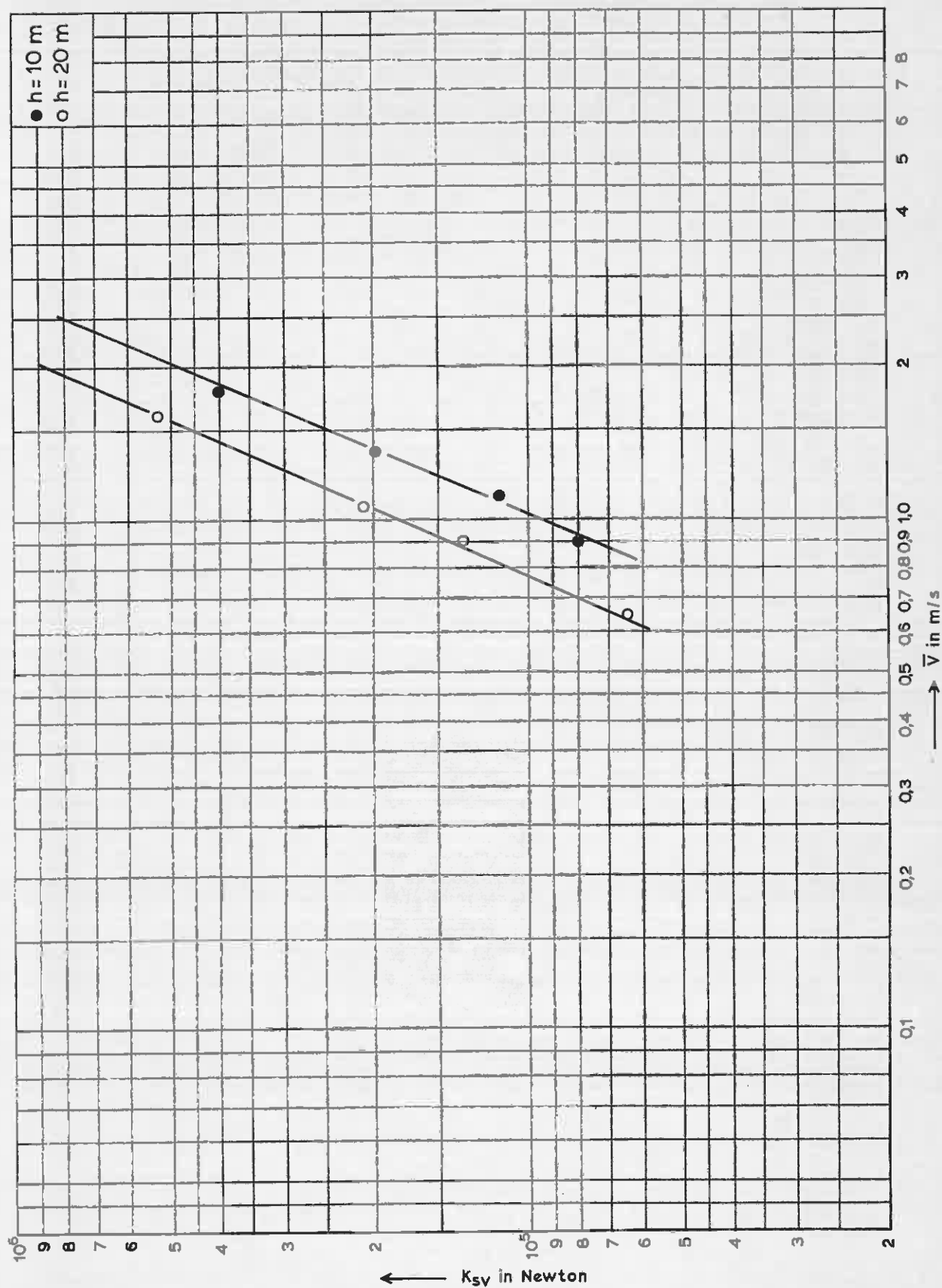
$h = 10$ m

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 24



VERBAND $\bar{V}$ EN K_{sv}

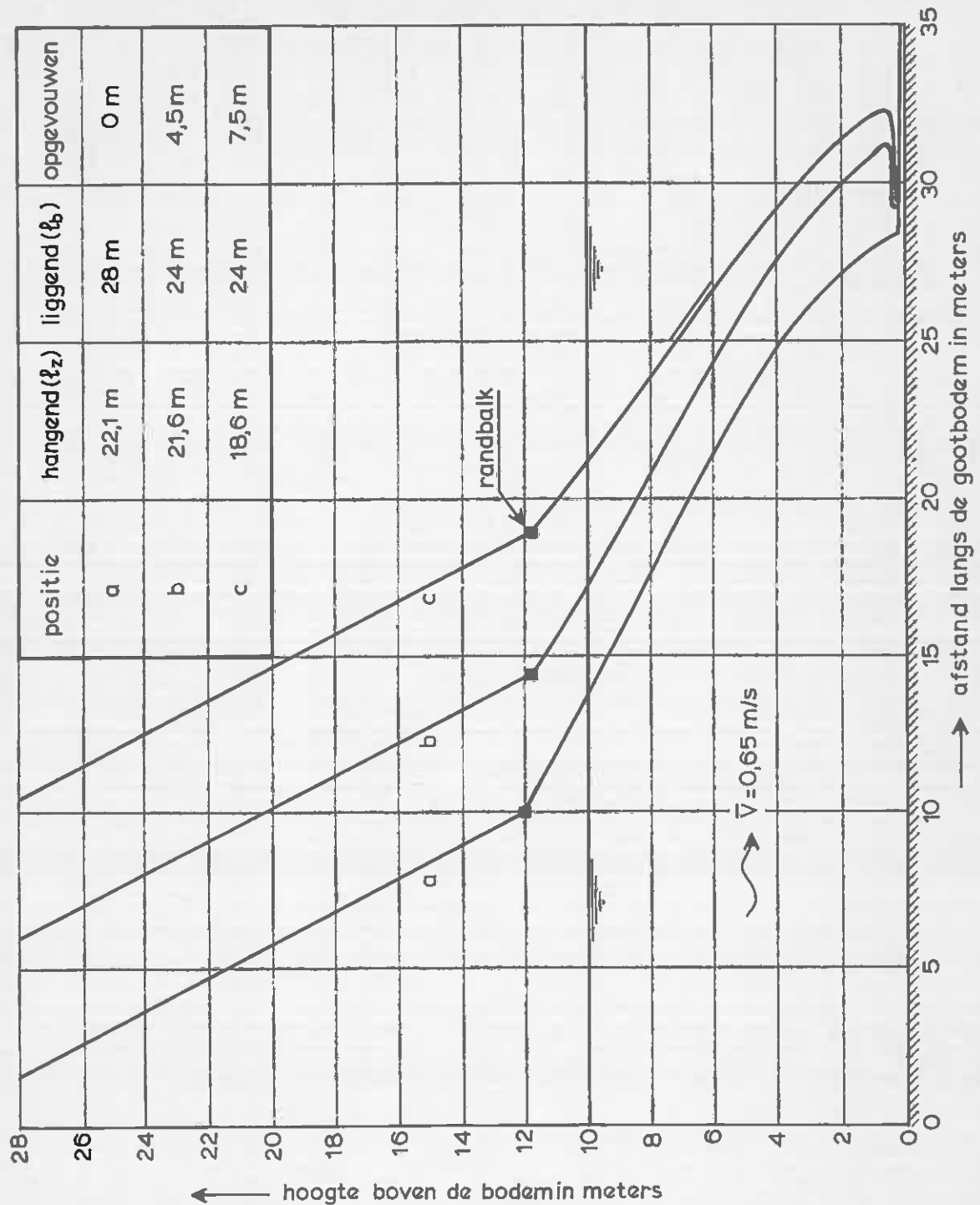
$\gamma = 30^\circ, \alpha = 0^\circ$ $h = 10, 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 25



POSITIES ZINKSTUK

$\gamma = 180^\circ$

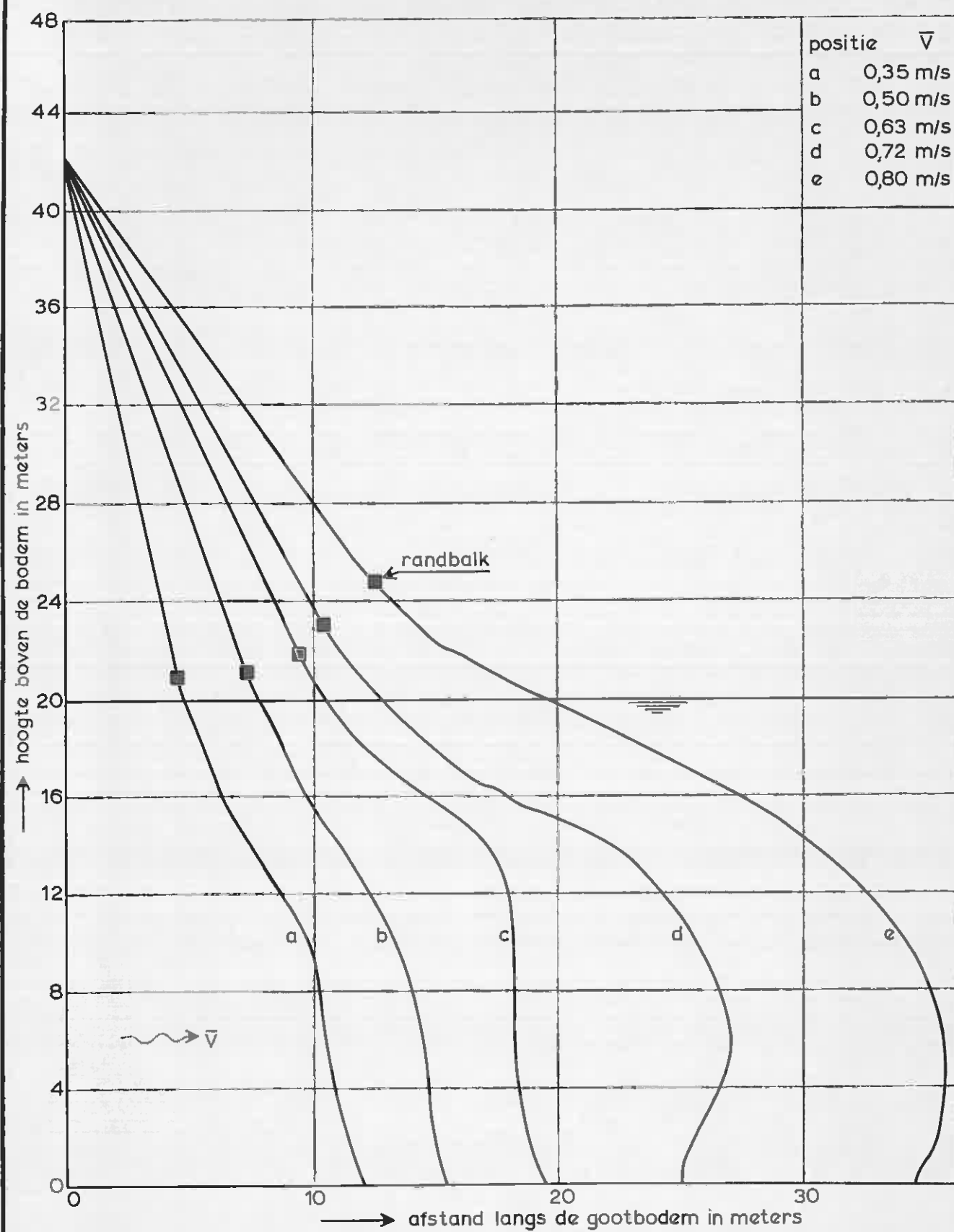
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 26



POSITIES ZINKSTUK

$\gamma = 180^\circ$

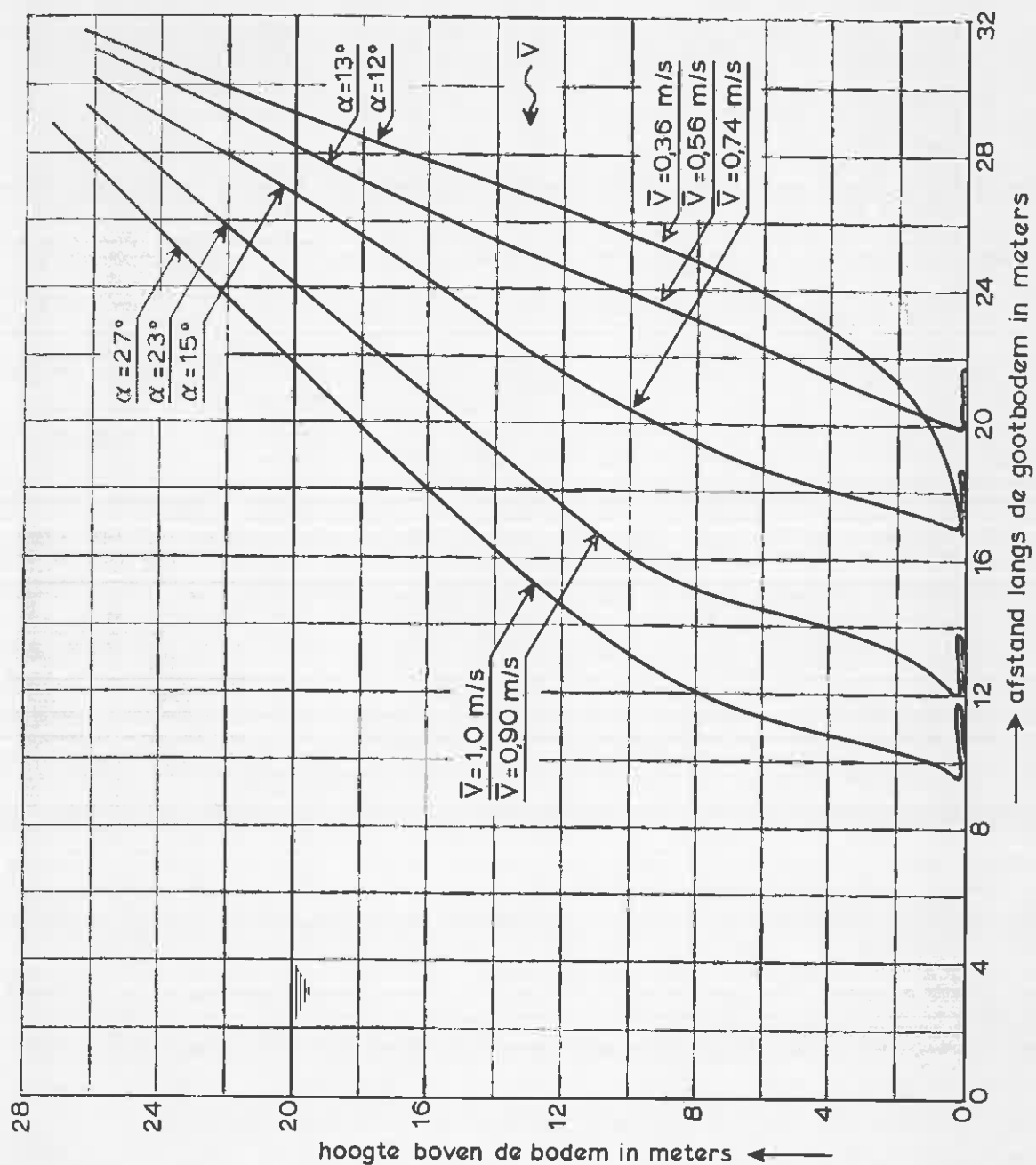
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG 27



POSITIES ZINKSTUK

$\gamma = 180^\circ$

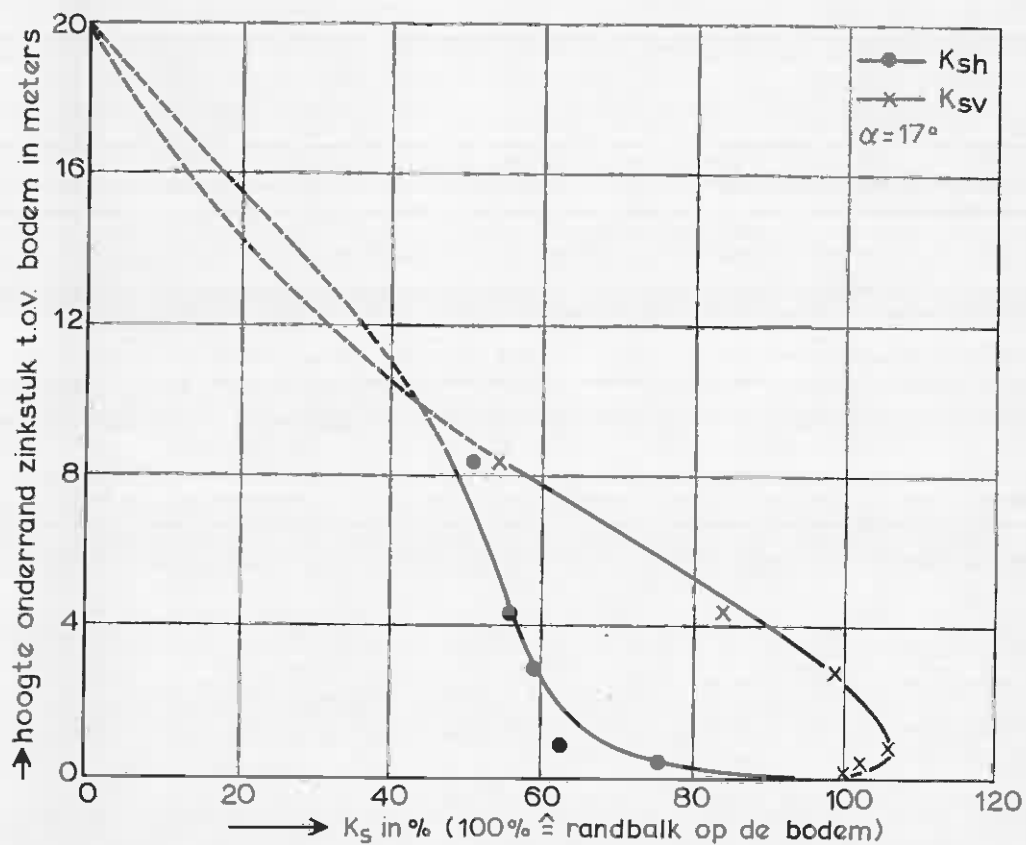
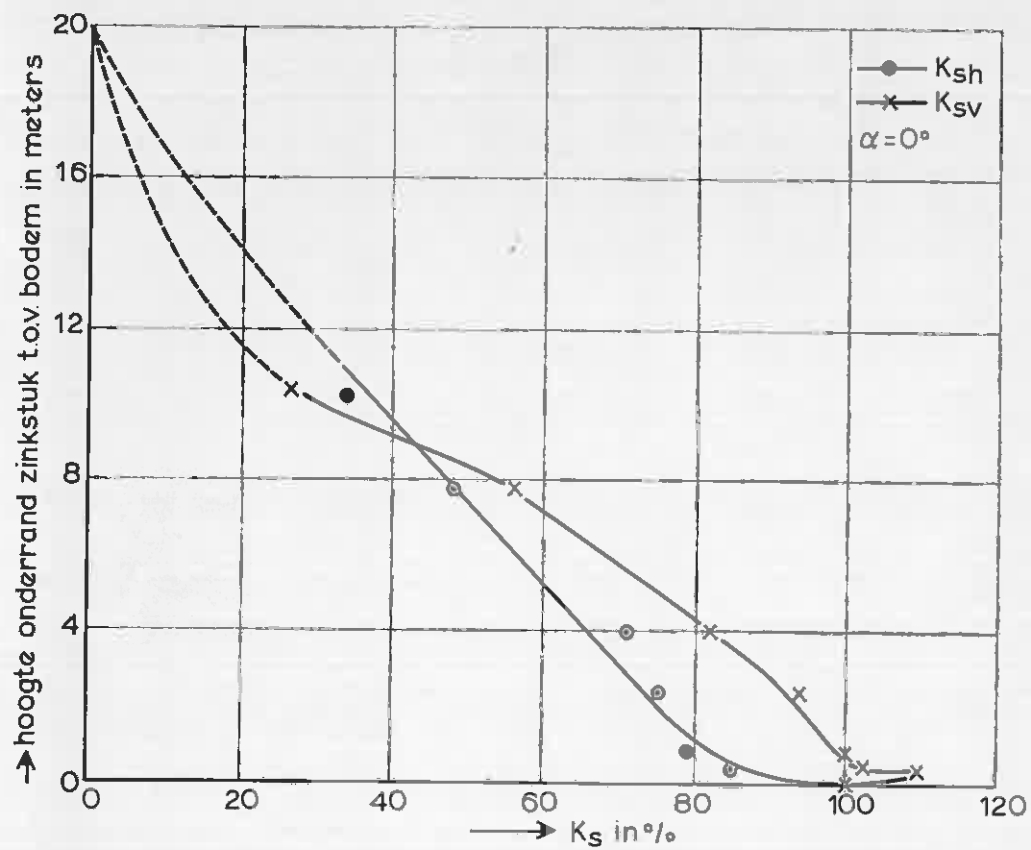
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 28



K_{sh} EN K_{sv} TIJDENS HET AAN DE GROND BRENGEN

$\gamma = 0^\circ$

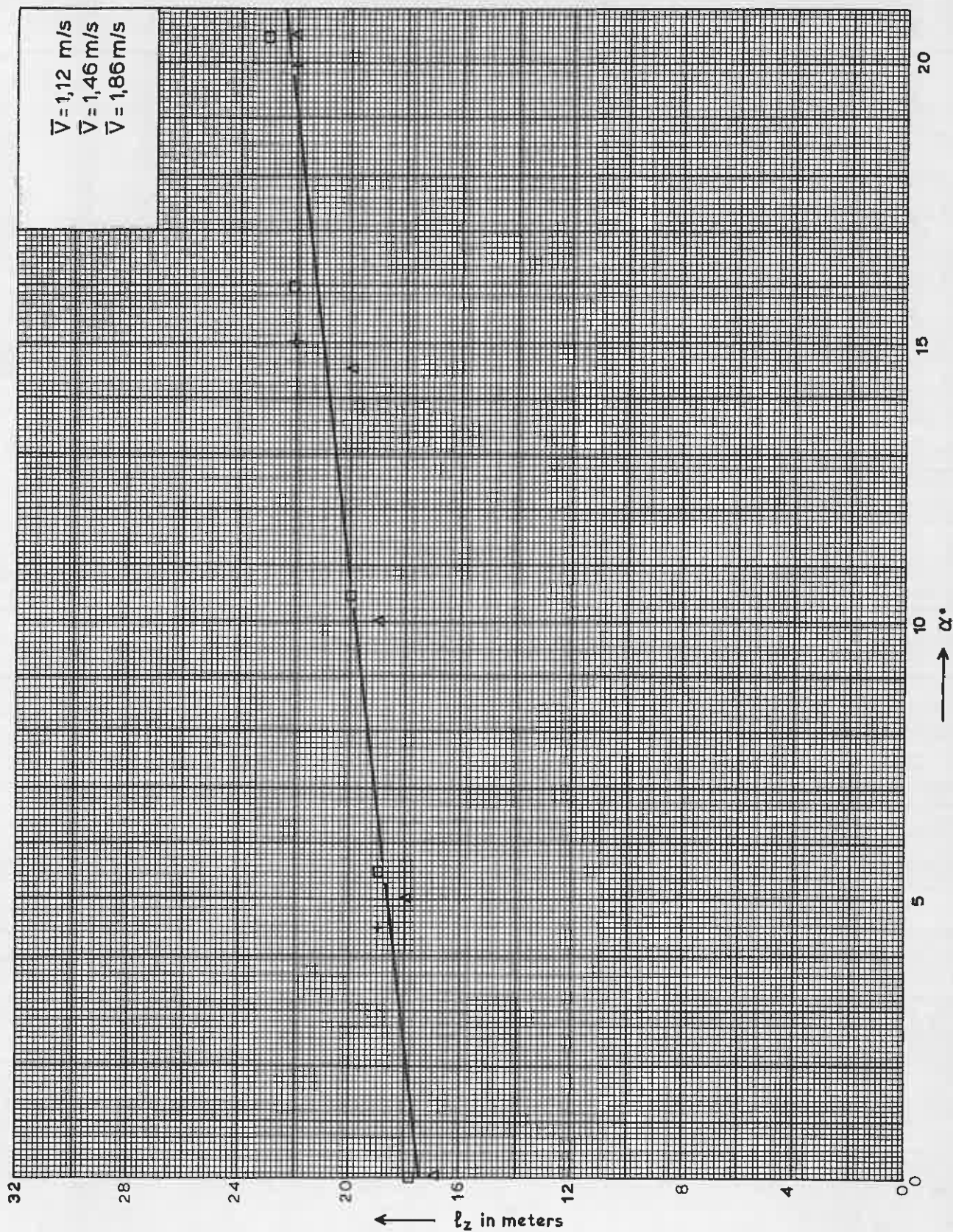
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 29



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

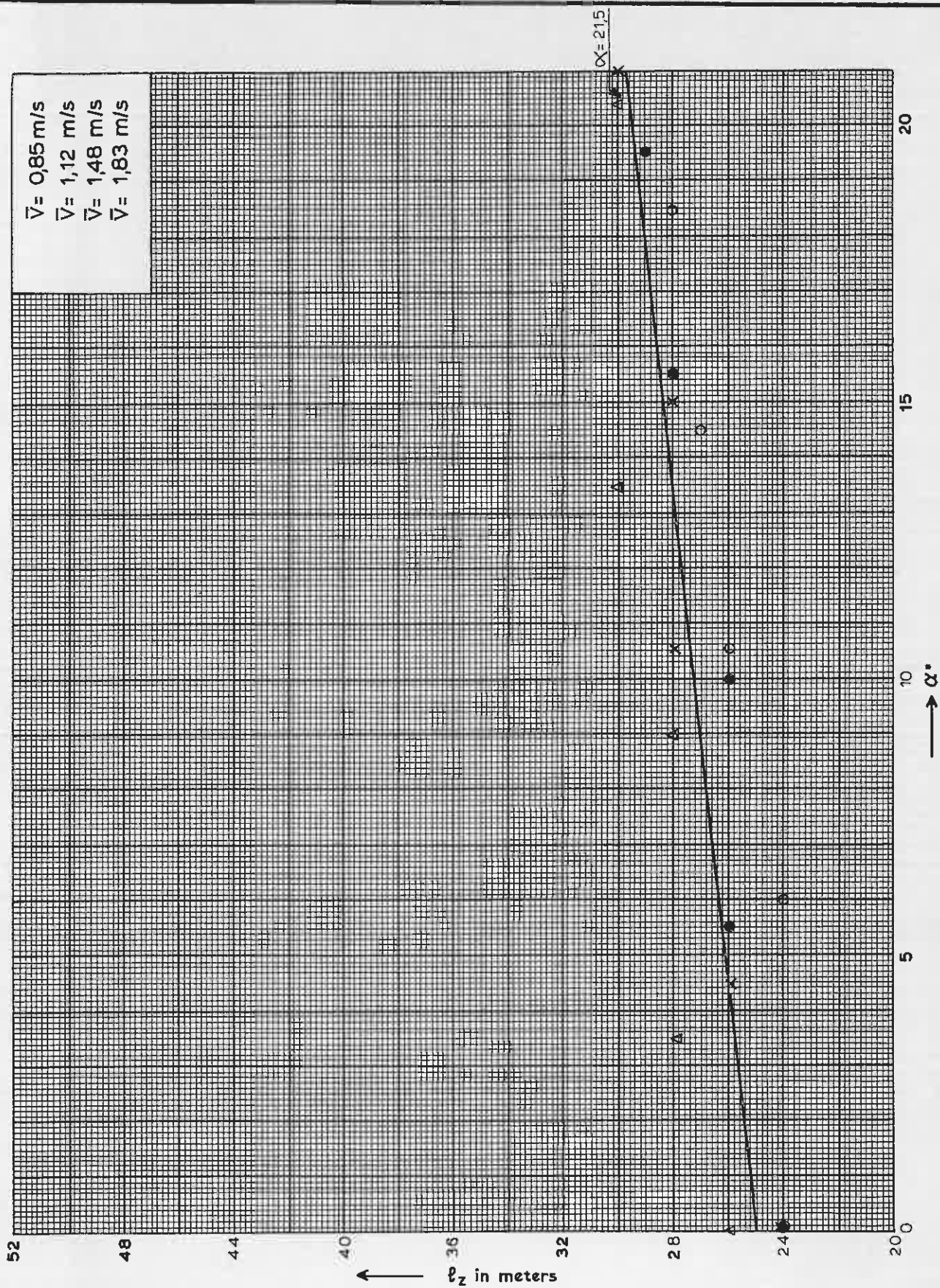
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 30



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

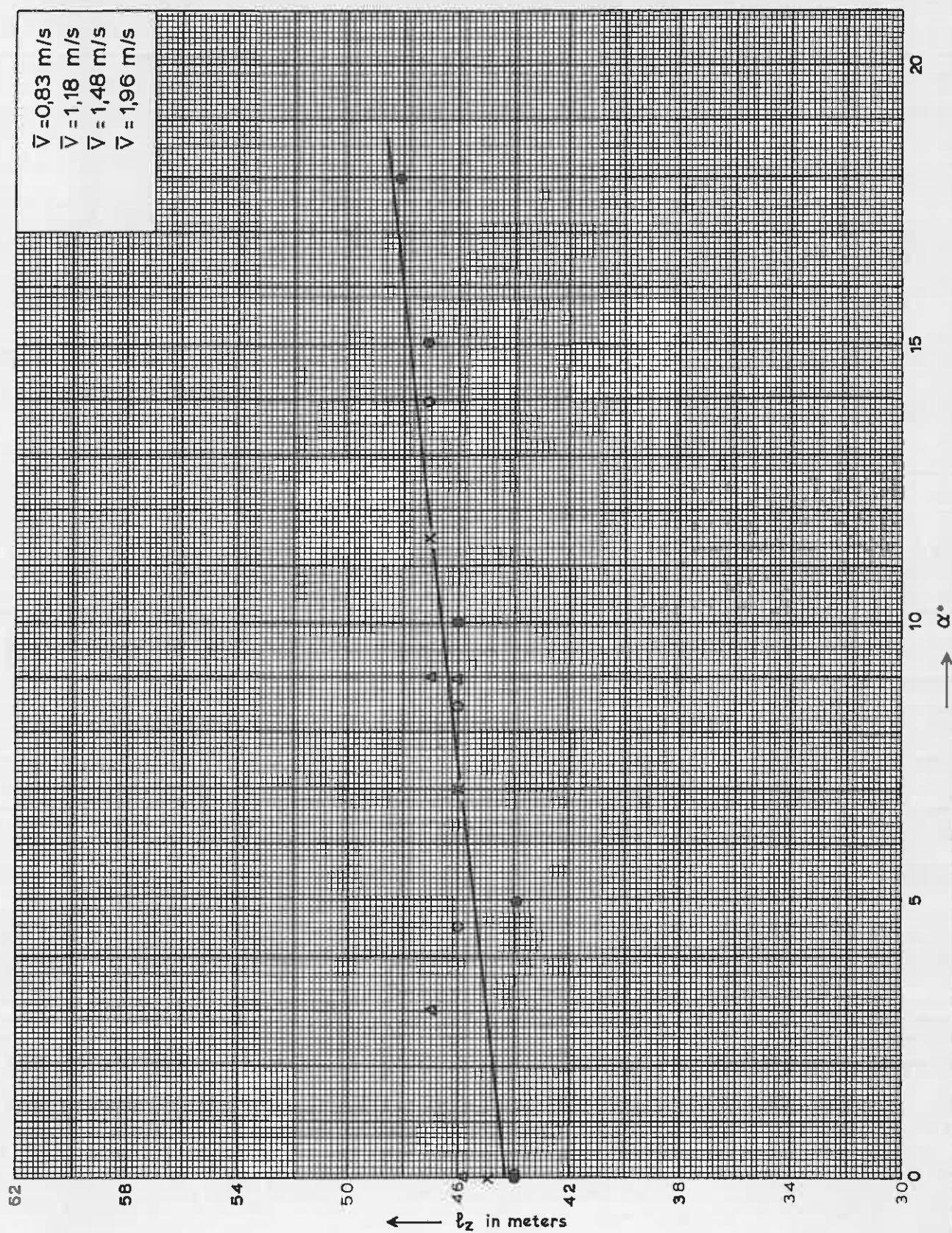
$h = 15 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 31



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

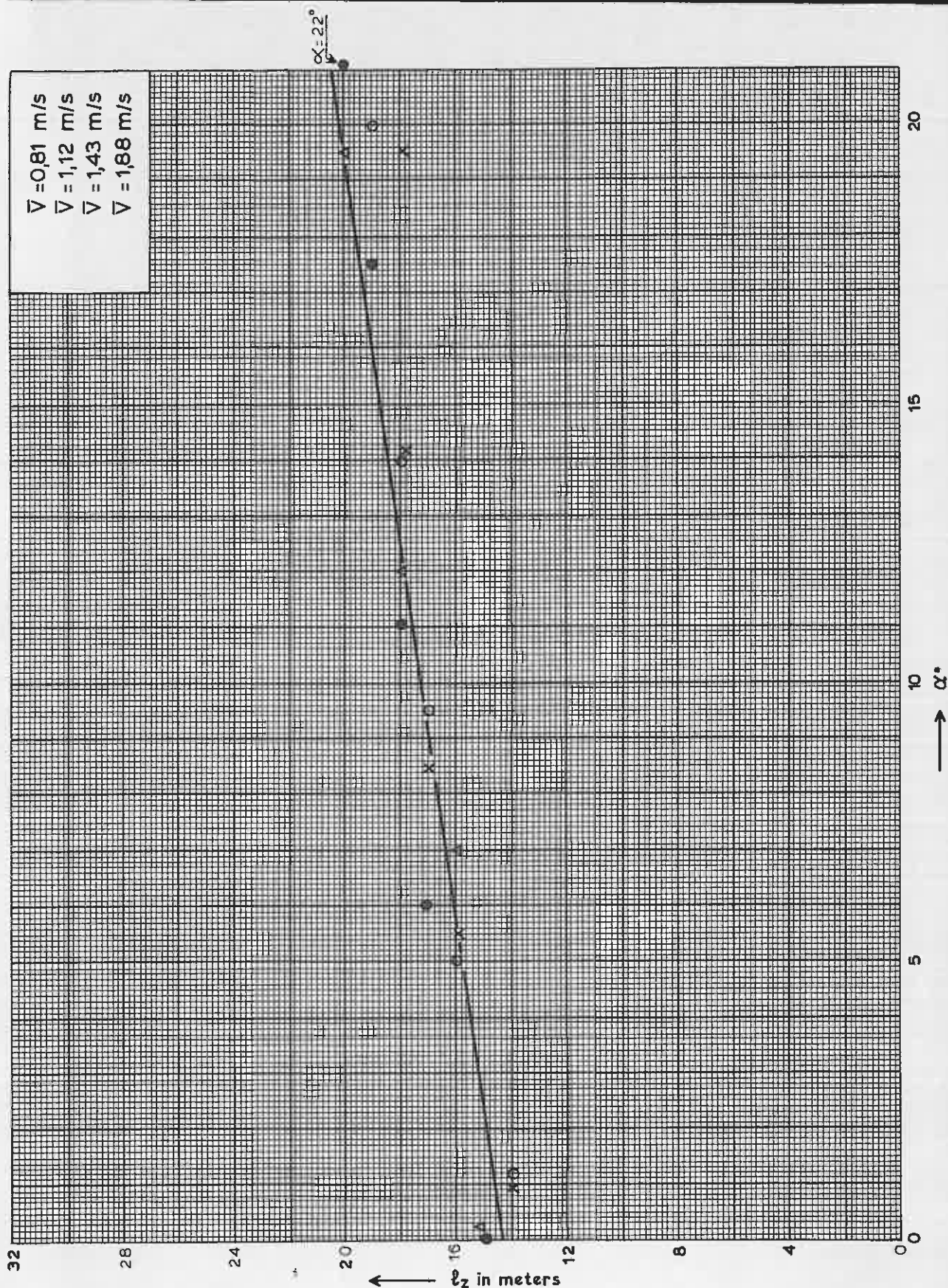
$h = 30 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 33



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

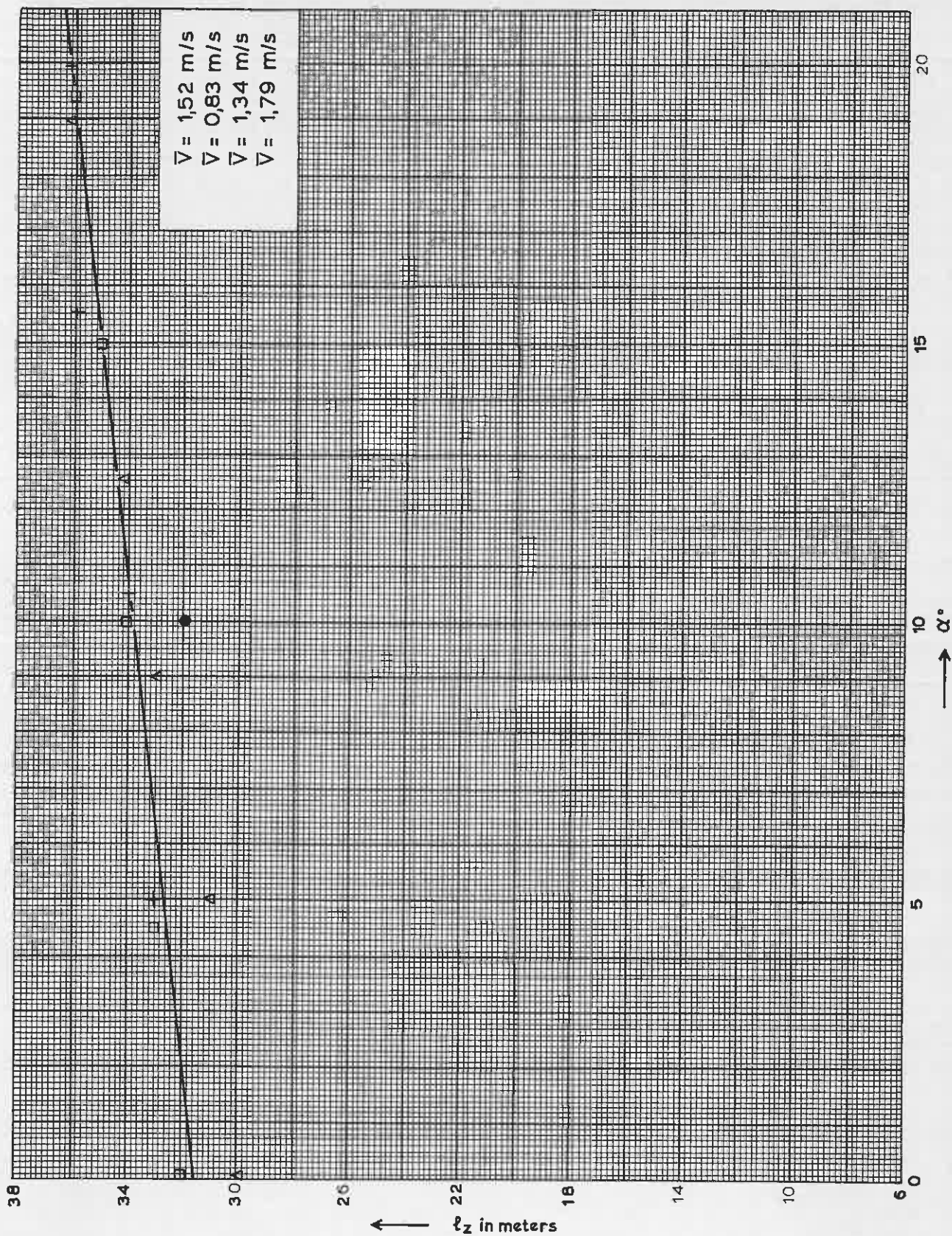
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 34



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

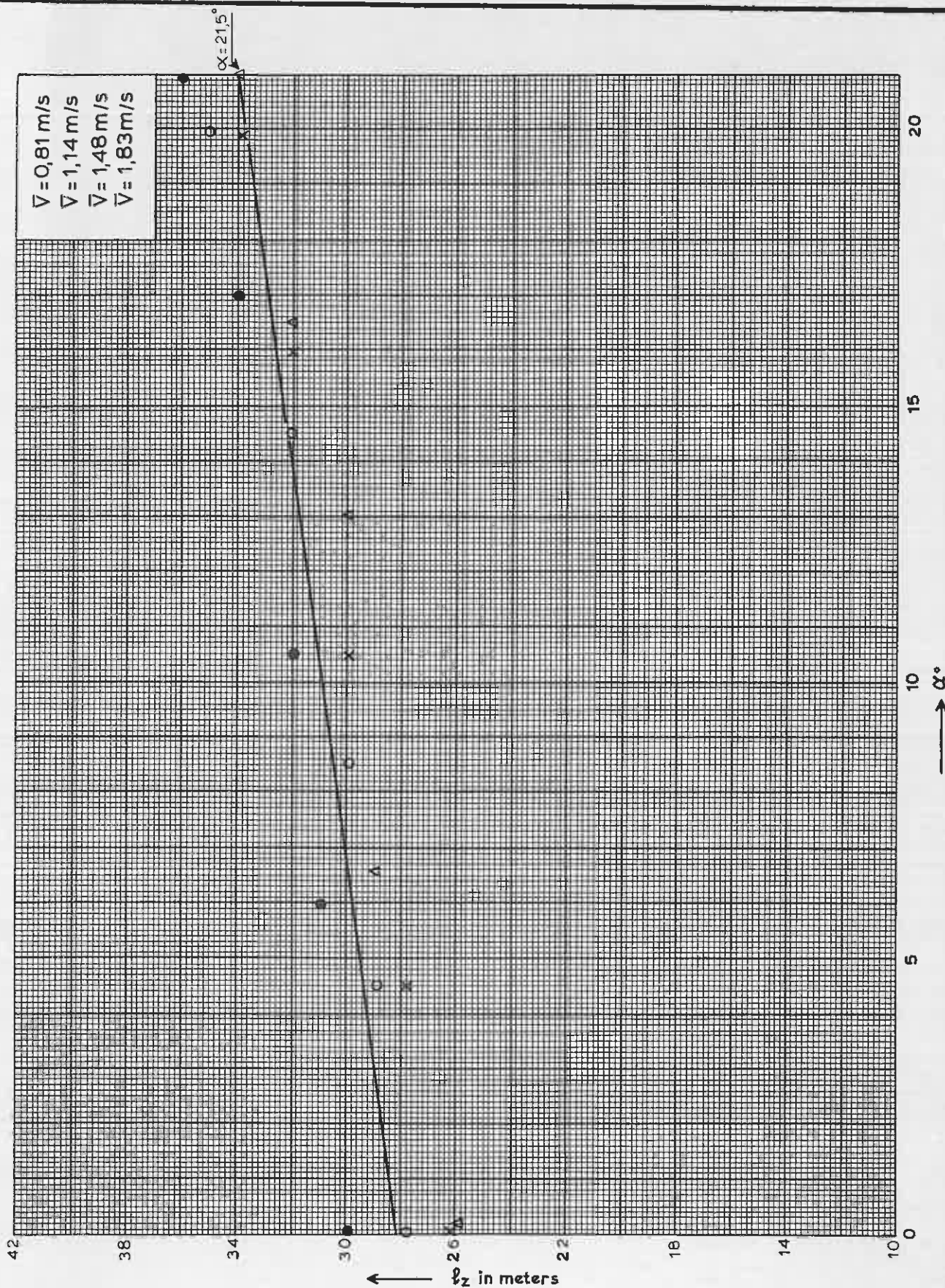
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 32



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

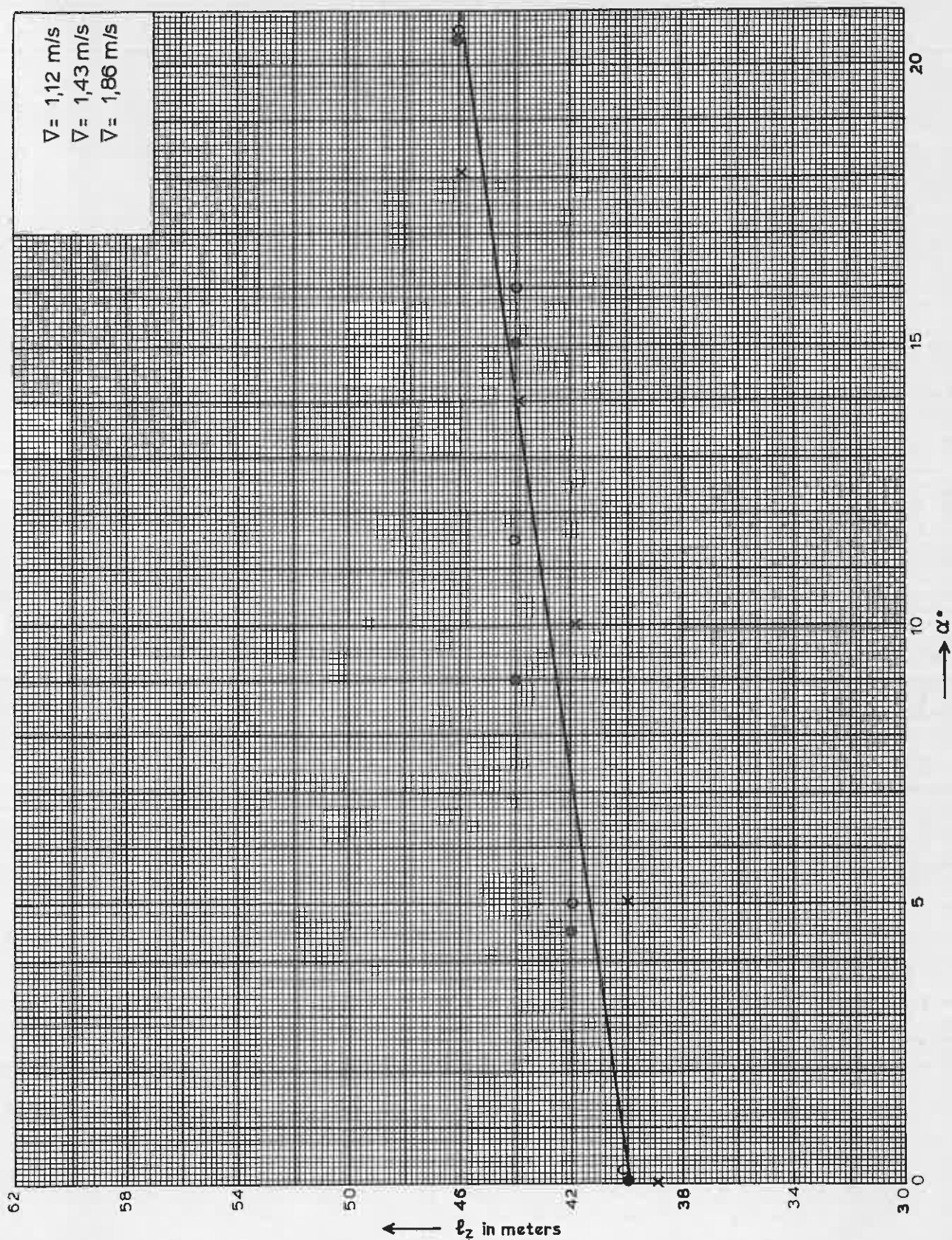
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 35



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

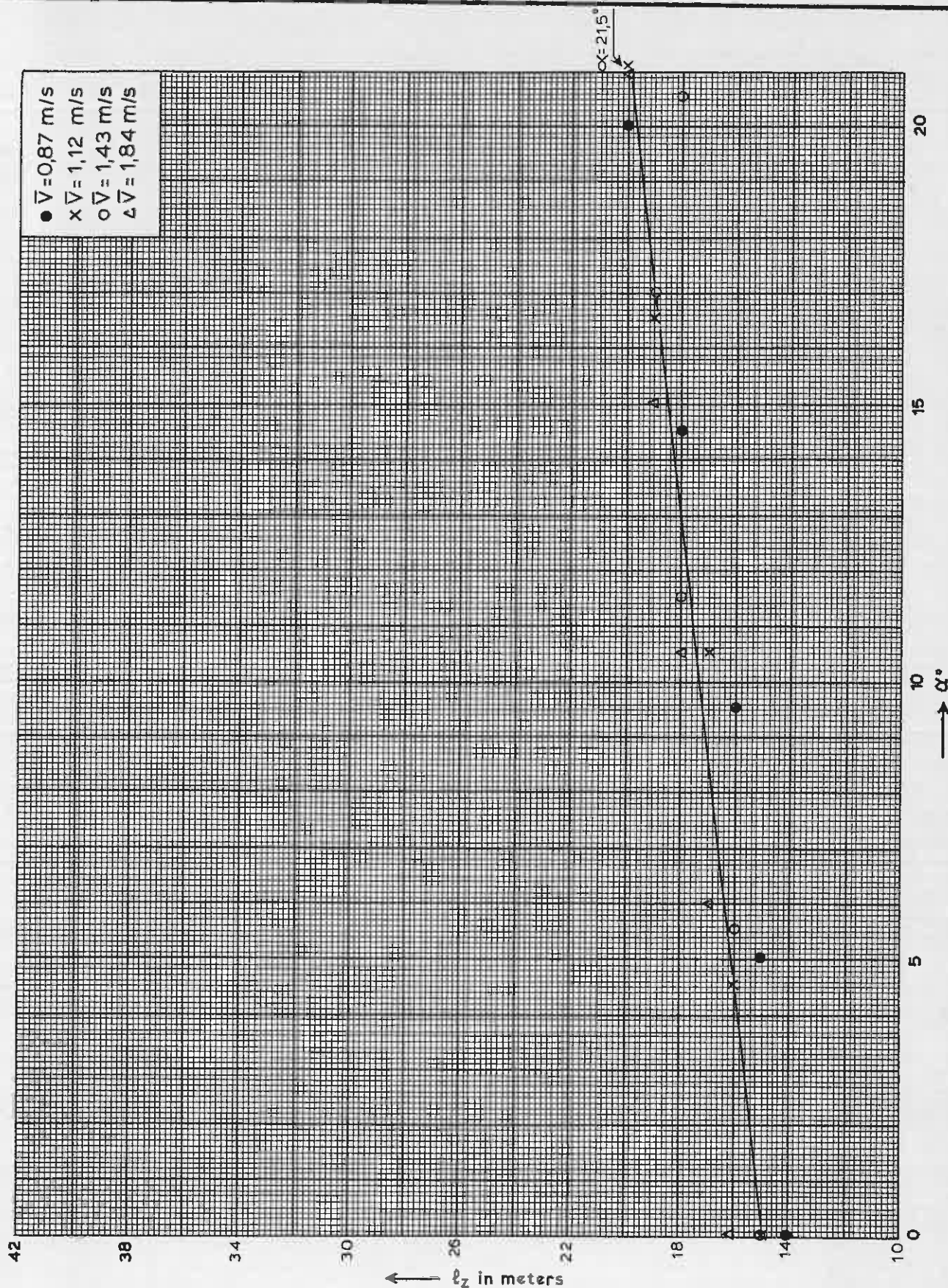
$h = 30 \text{ m}$

ZINKSTUK 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 36



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

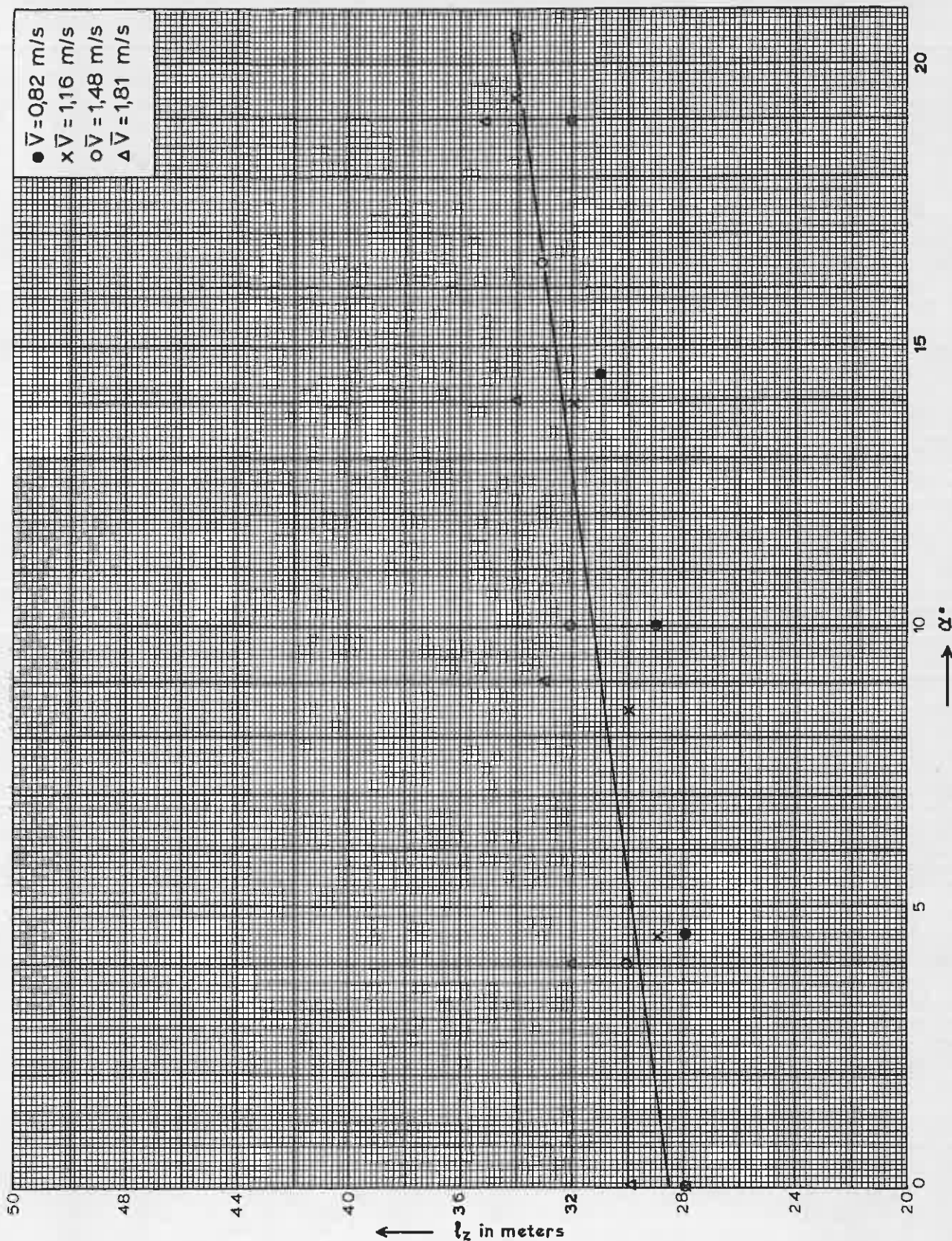
$h = 10 \text{ m}$

ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 37



VERBAND l_z EN α

$\gamma = 0^\circ$

$h = 20 \text{ m}$

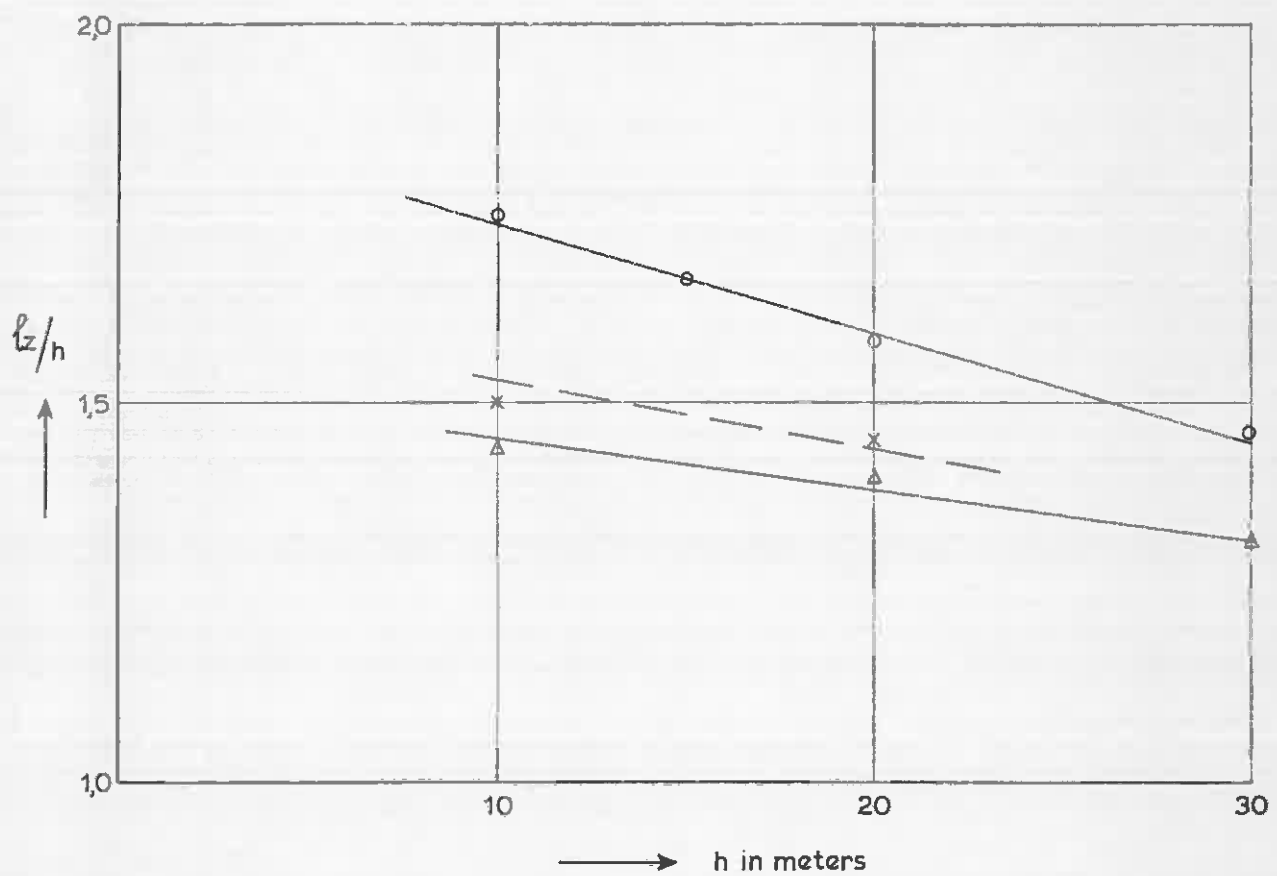
ZINKSTUK 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 38

	zinkstuk nr.	q_0
○ — ○	1	60
x — x	10	185
△ — △	5	310



l_z/h ALS FUNCTIE VAN h

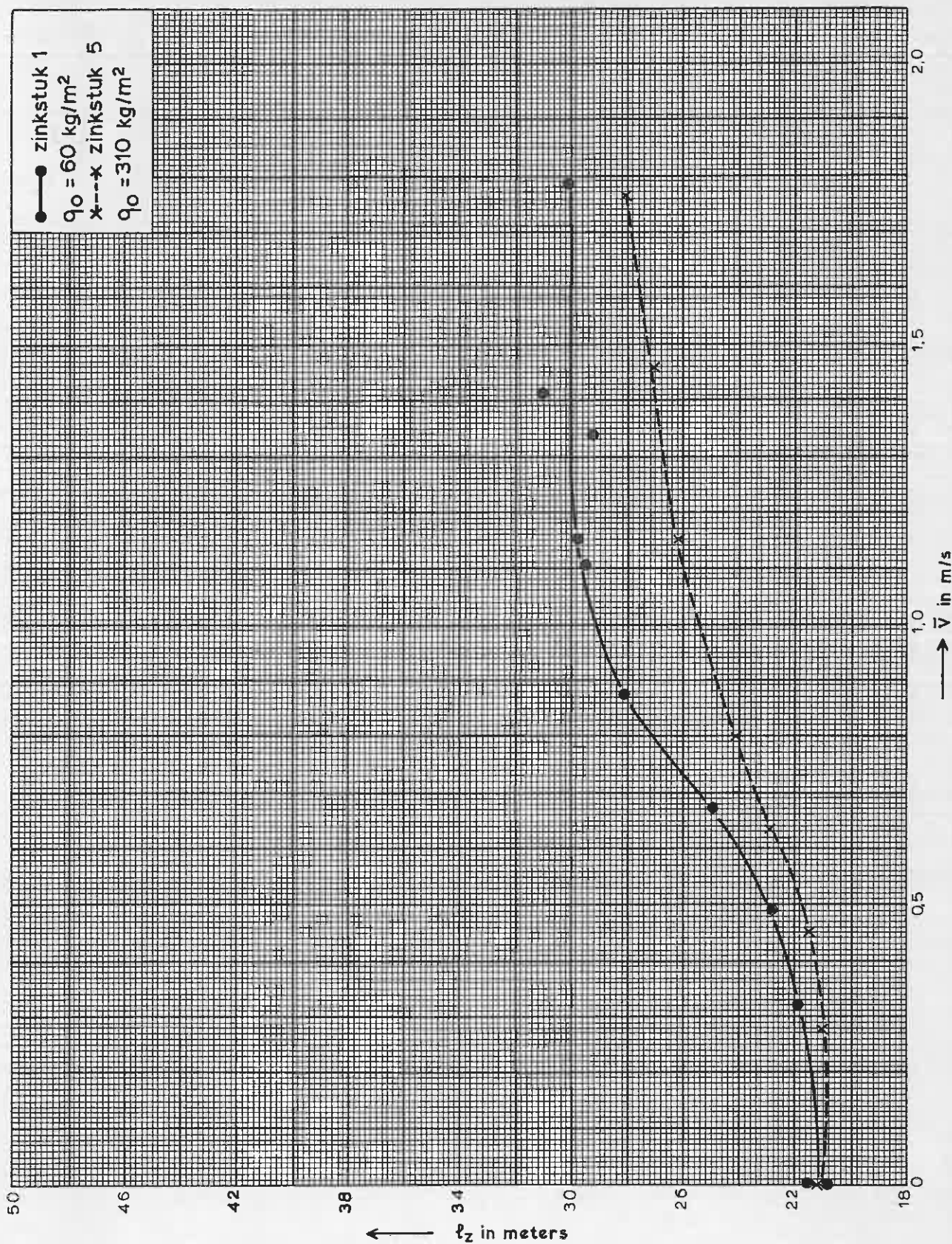
$\alpha = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$

ZINKSTUK 1, 5, 10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 39



INVLOED VAN $\bar{V}$ OP l_z

$\gamma = 0^\circ$

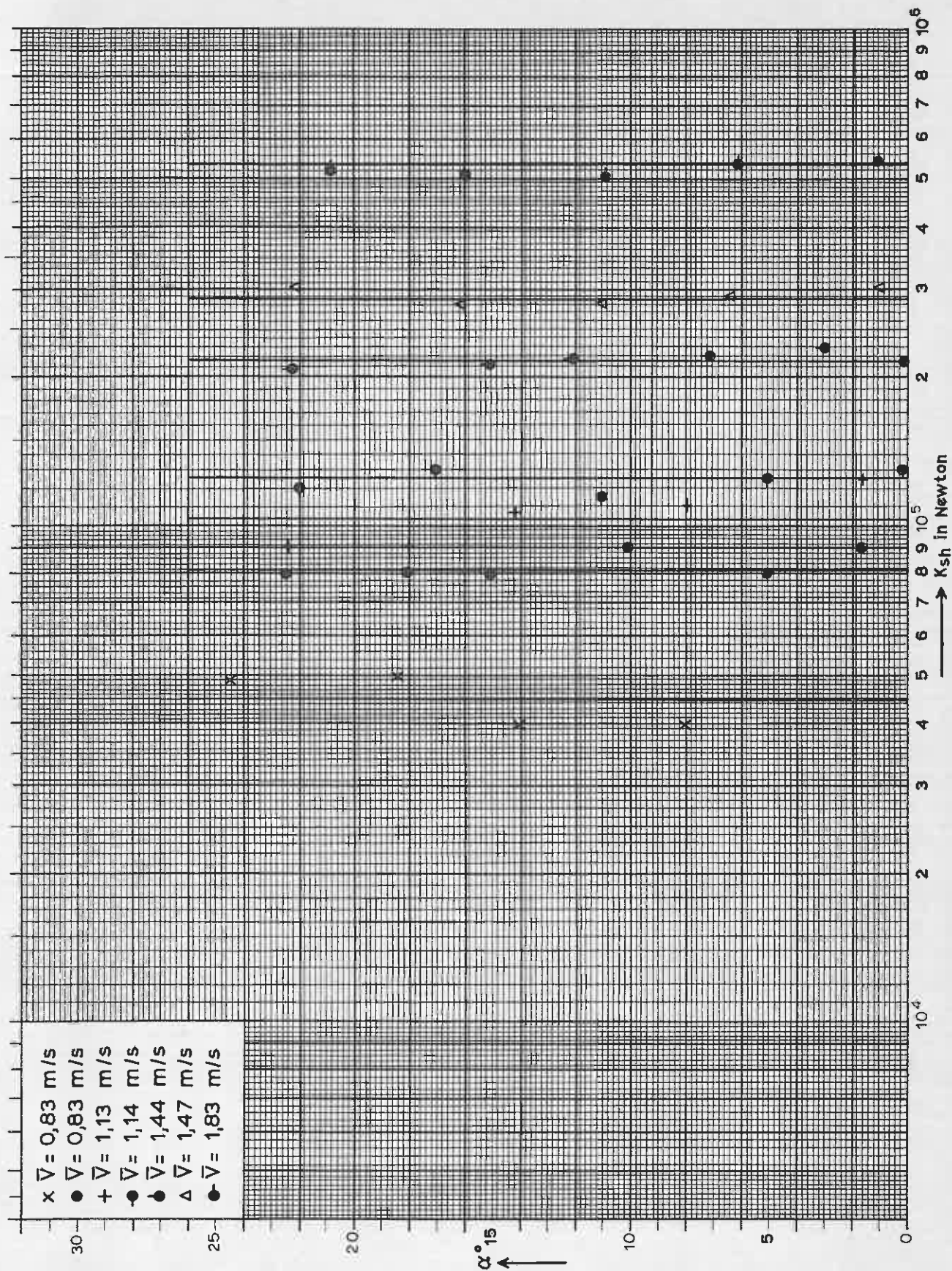
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 1 EN 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 40



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

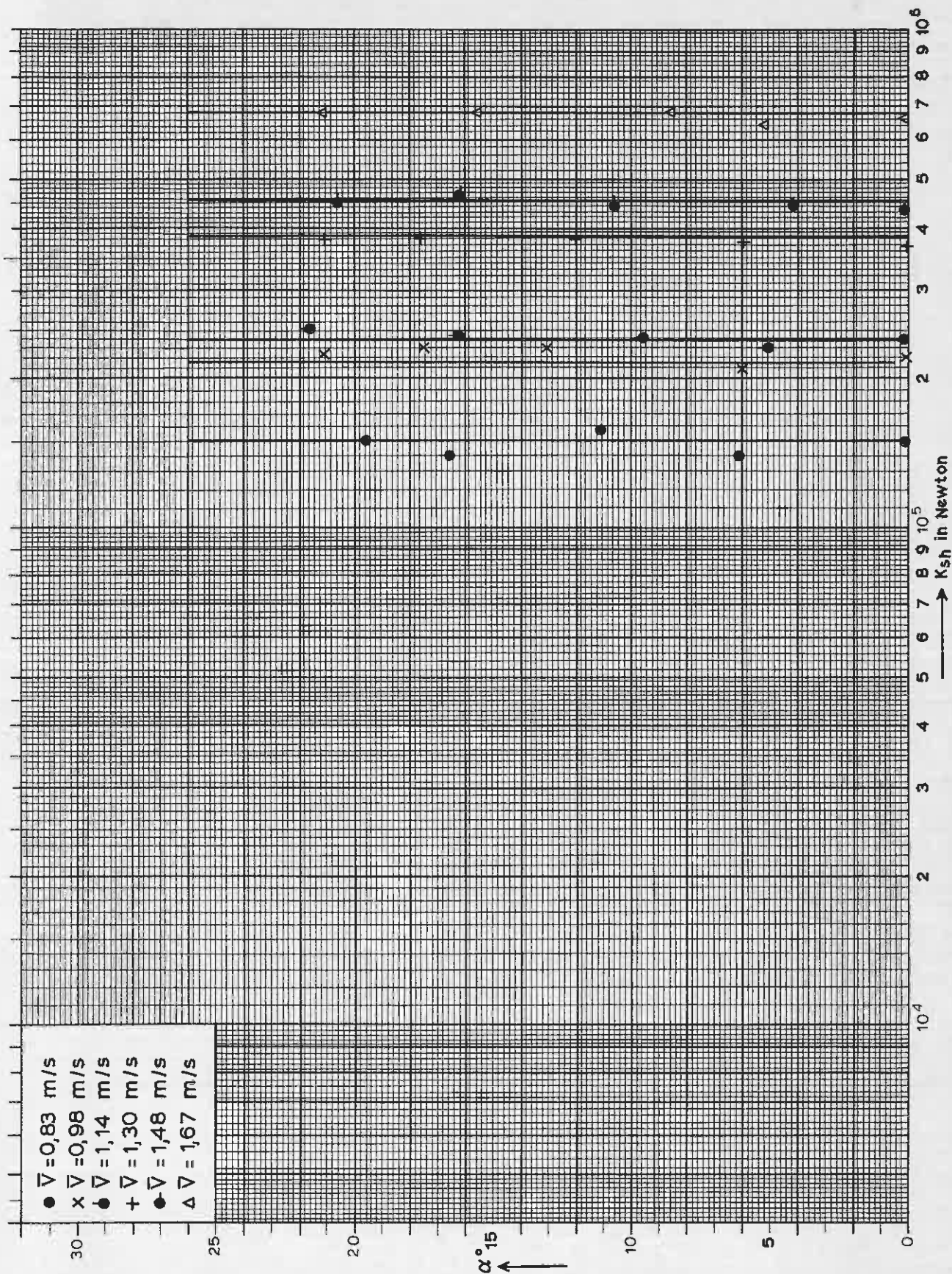
$h = 10$ m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 41



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

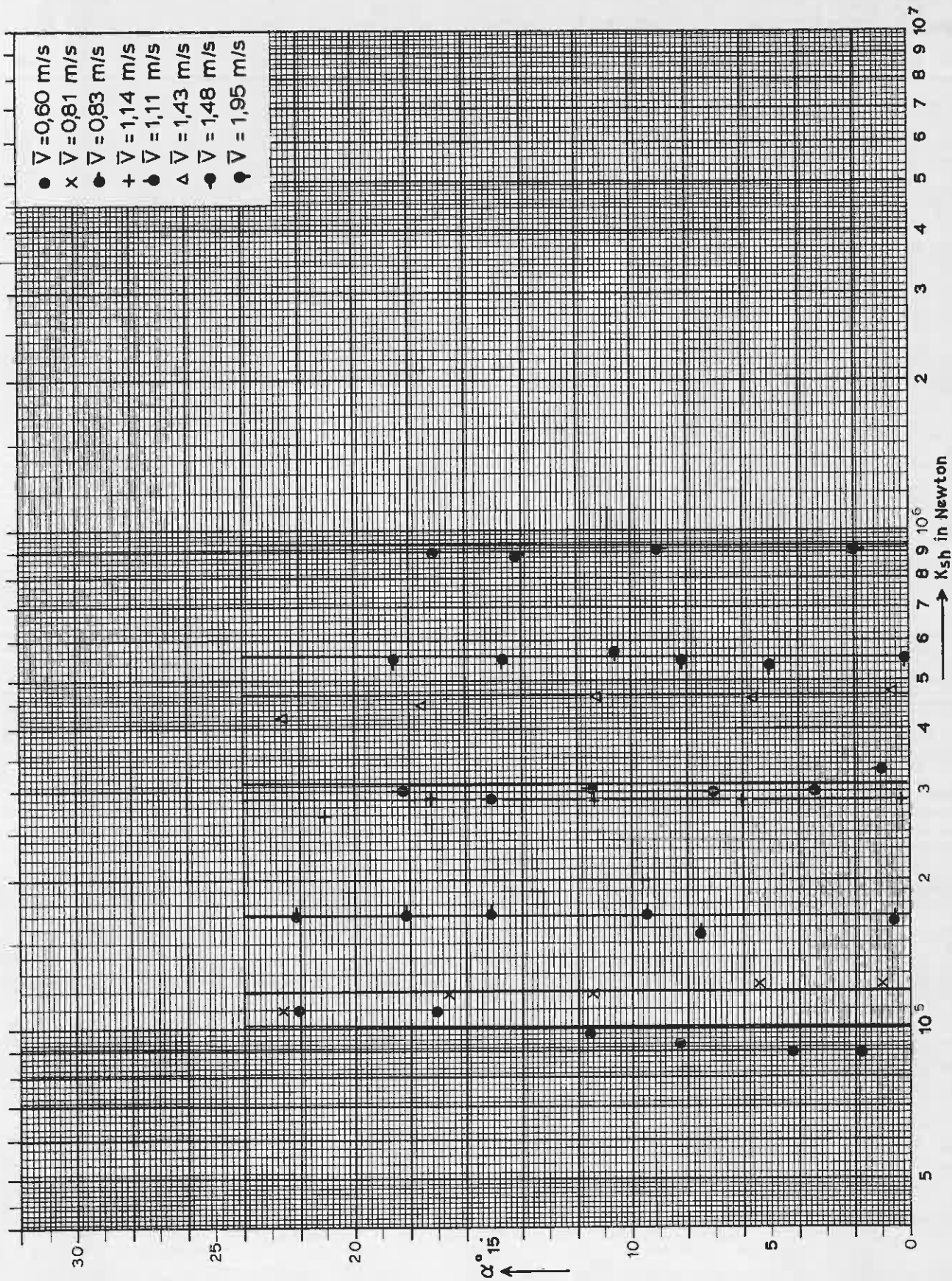
$h = 15 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 42



VERBAND K_{sh} EN α

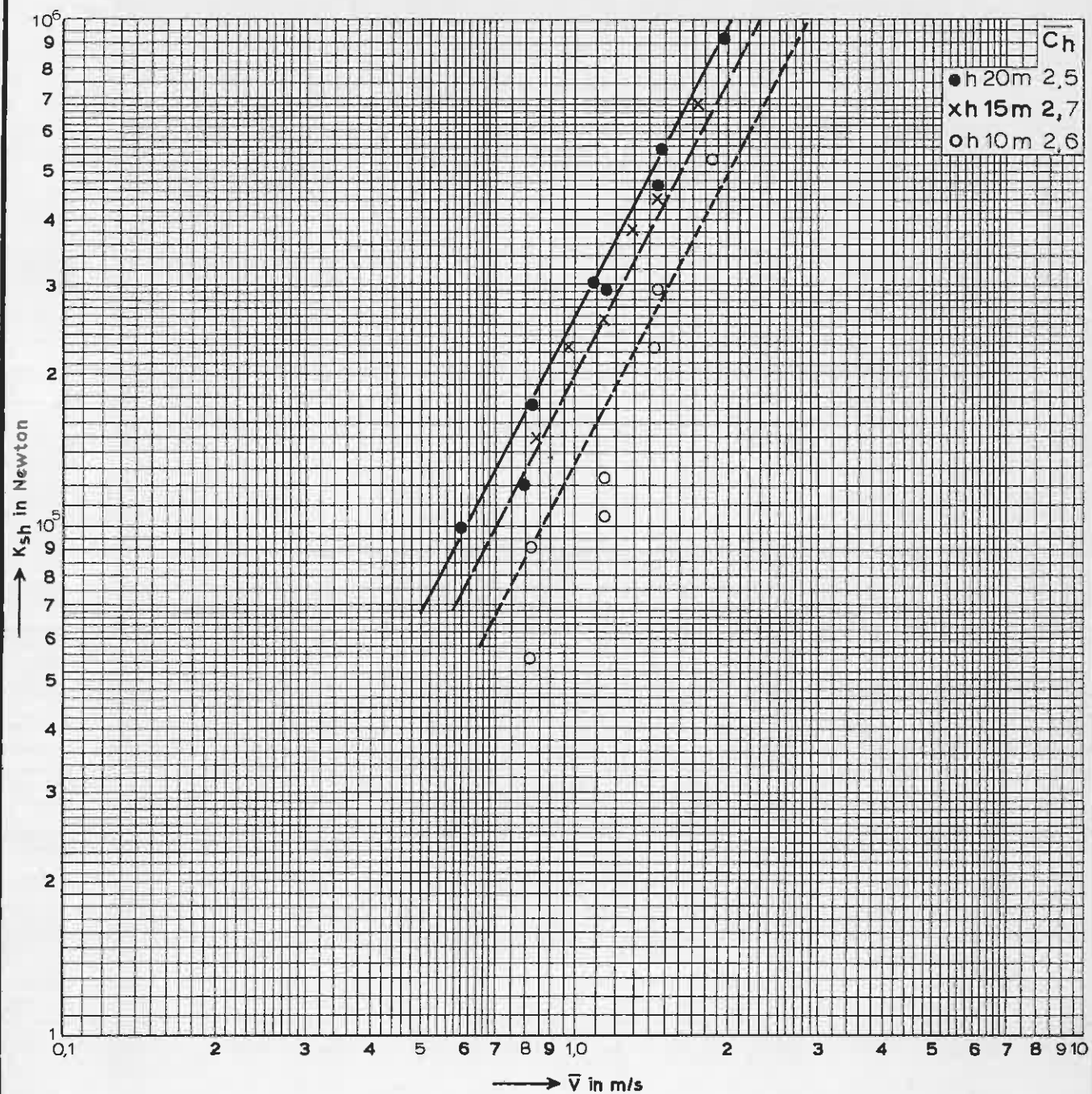
$\gamma = 0^\circ$ $h = 20\text{m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 43



VERBAND K_{sh} EN $\bar{V}$

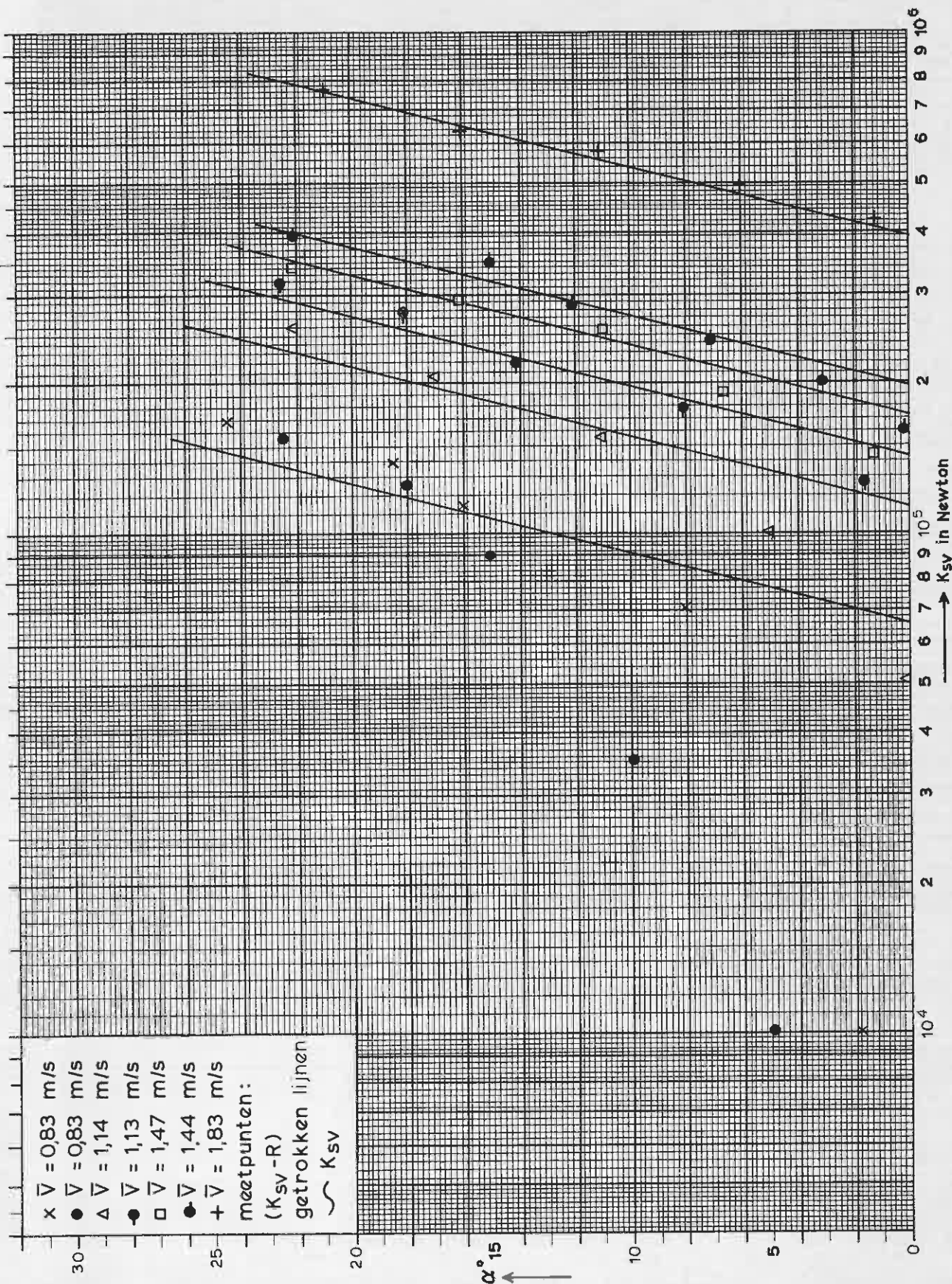
$\gamma=0^\circ \alpha=0^\circ$ $h=10,15$
EN 20m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 44



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

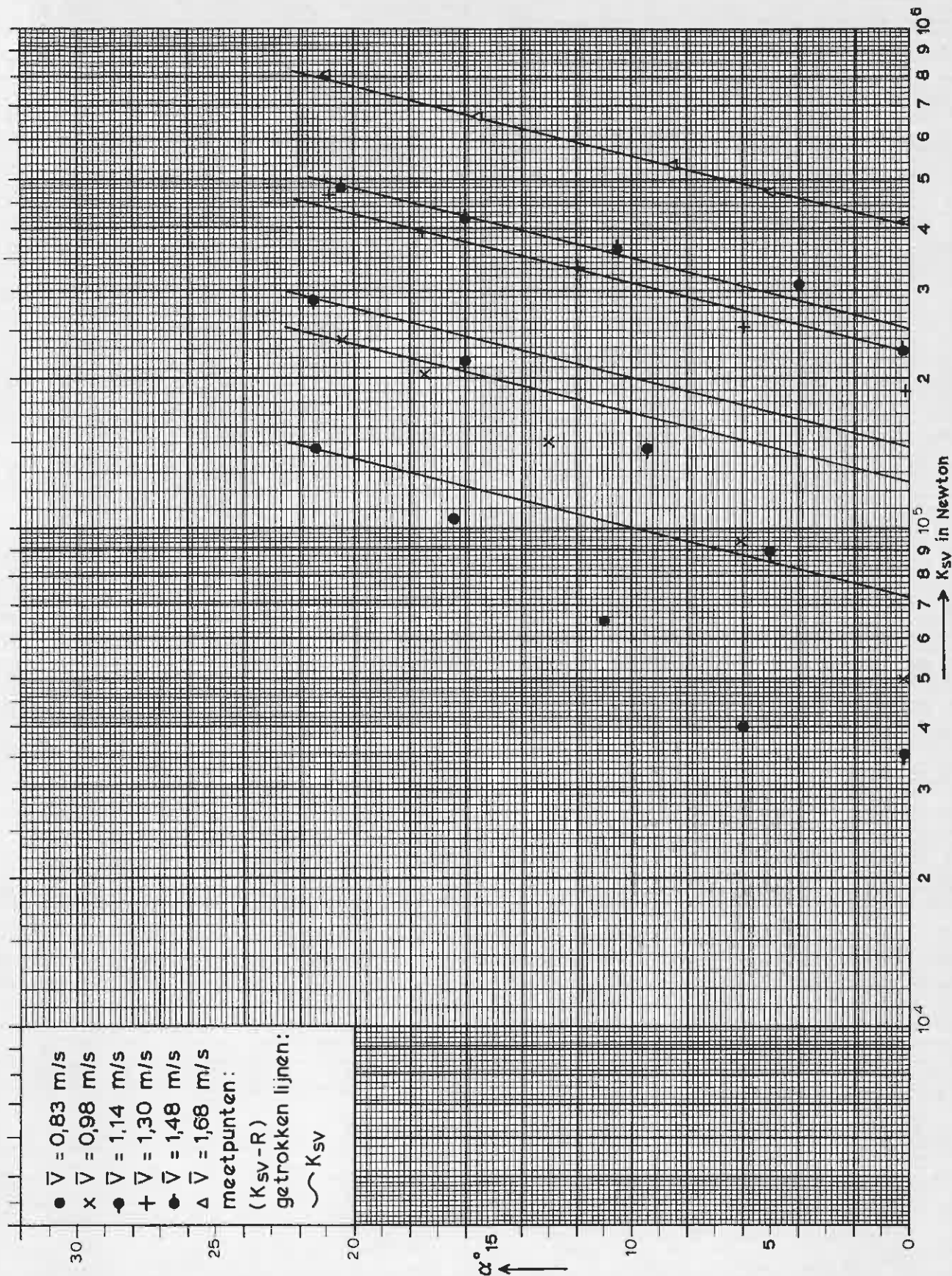
$h = 10$ m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 45



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

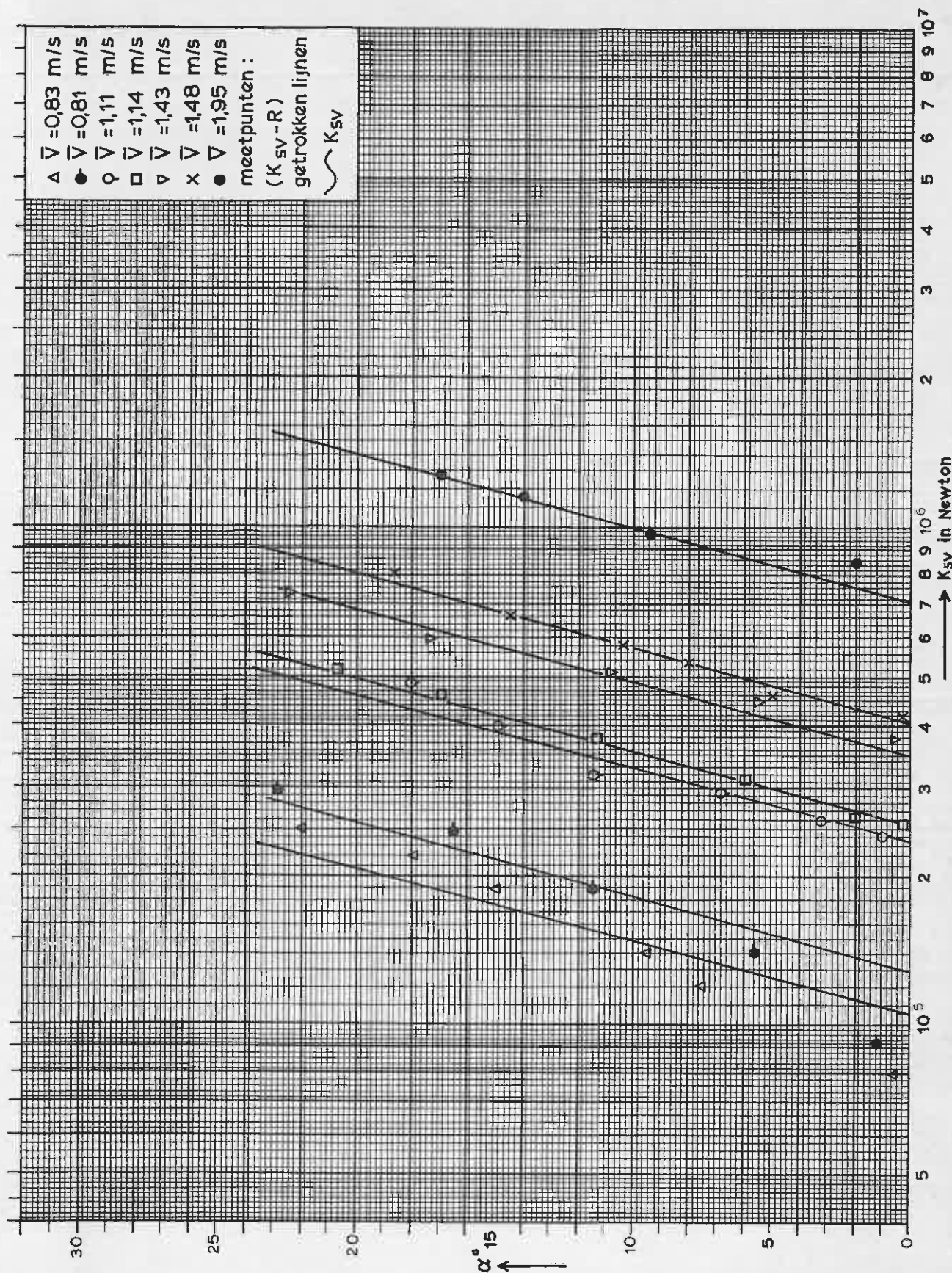
$h = 15 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 46



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

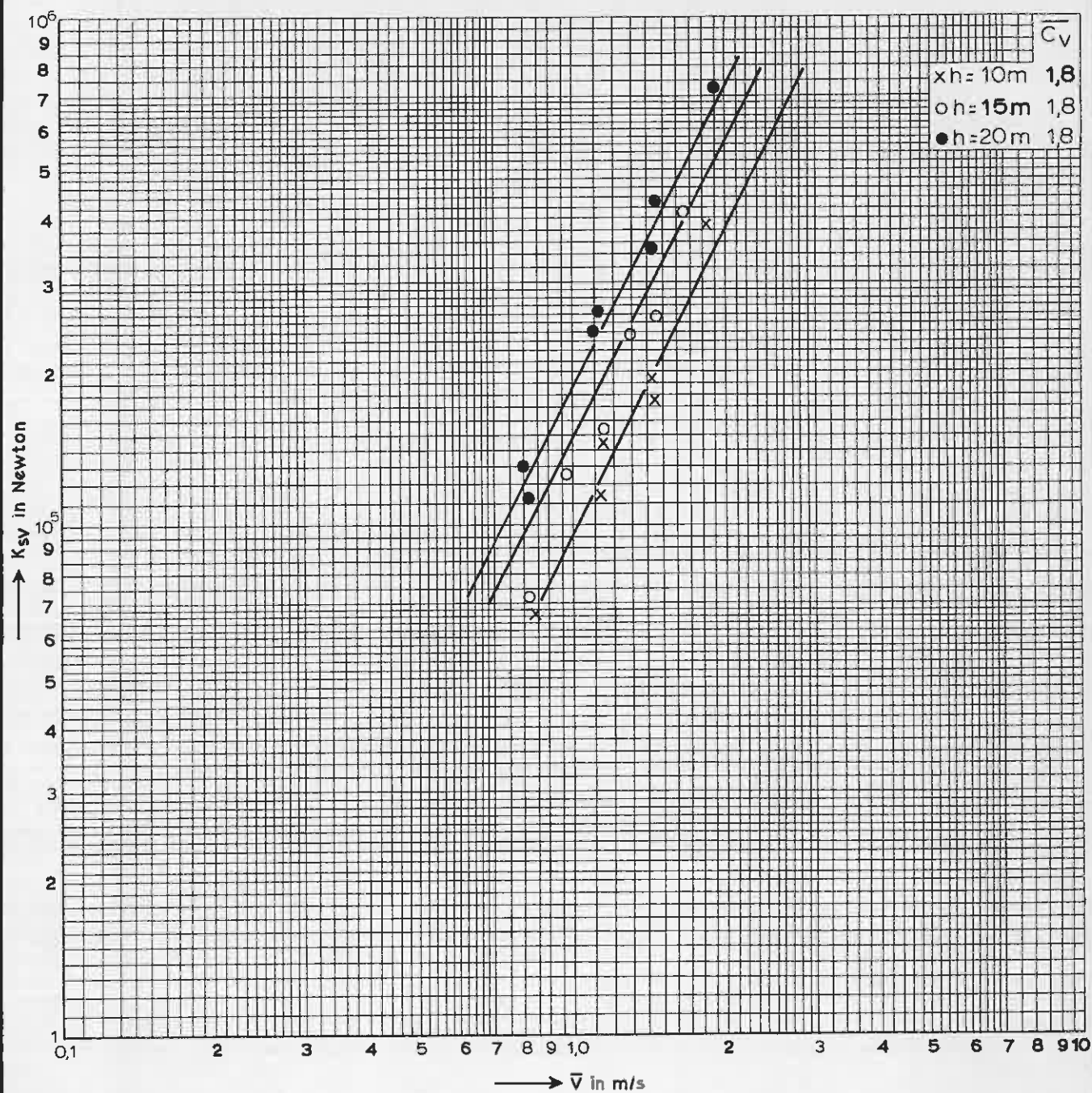
$h = 20$ m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 47



VERBAND K_{sv} EN $\bar{V}$

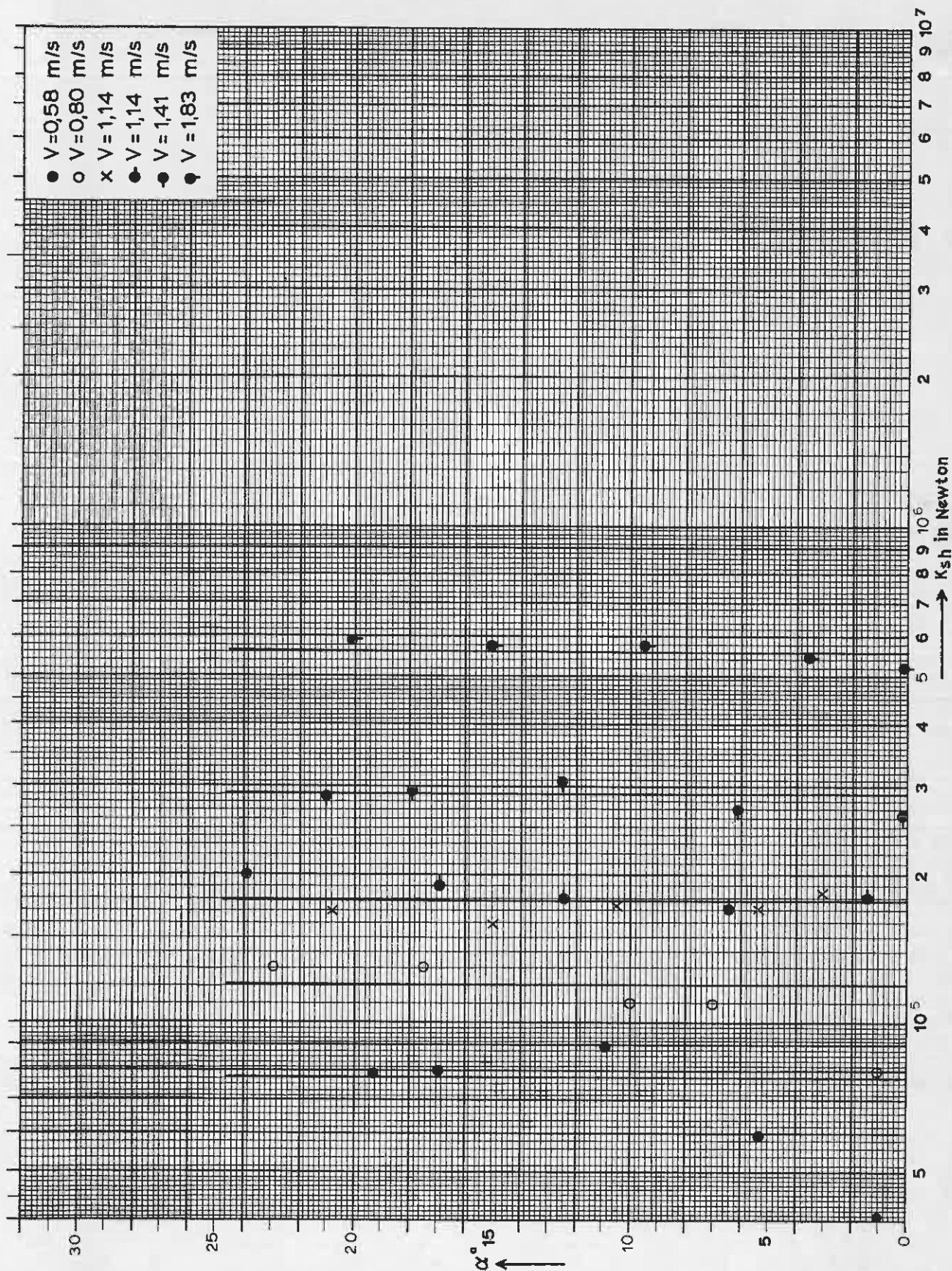
$\gamma=0^\circ, \alpha=0^\circ$ $h=10,15$
EN 20 m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 48



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 30^\circ$

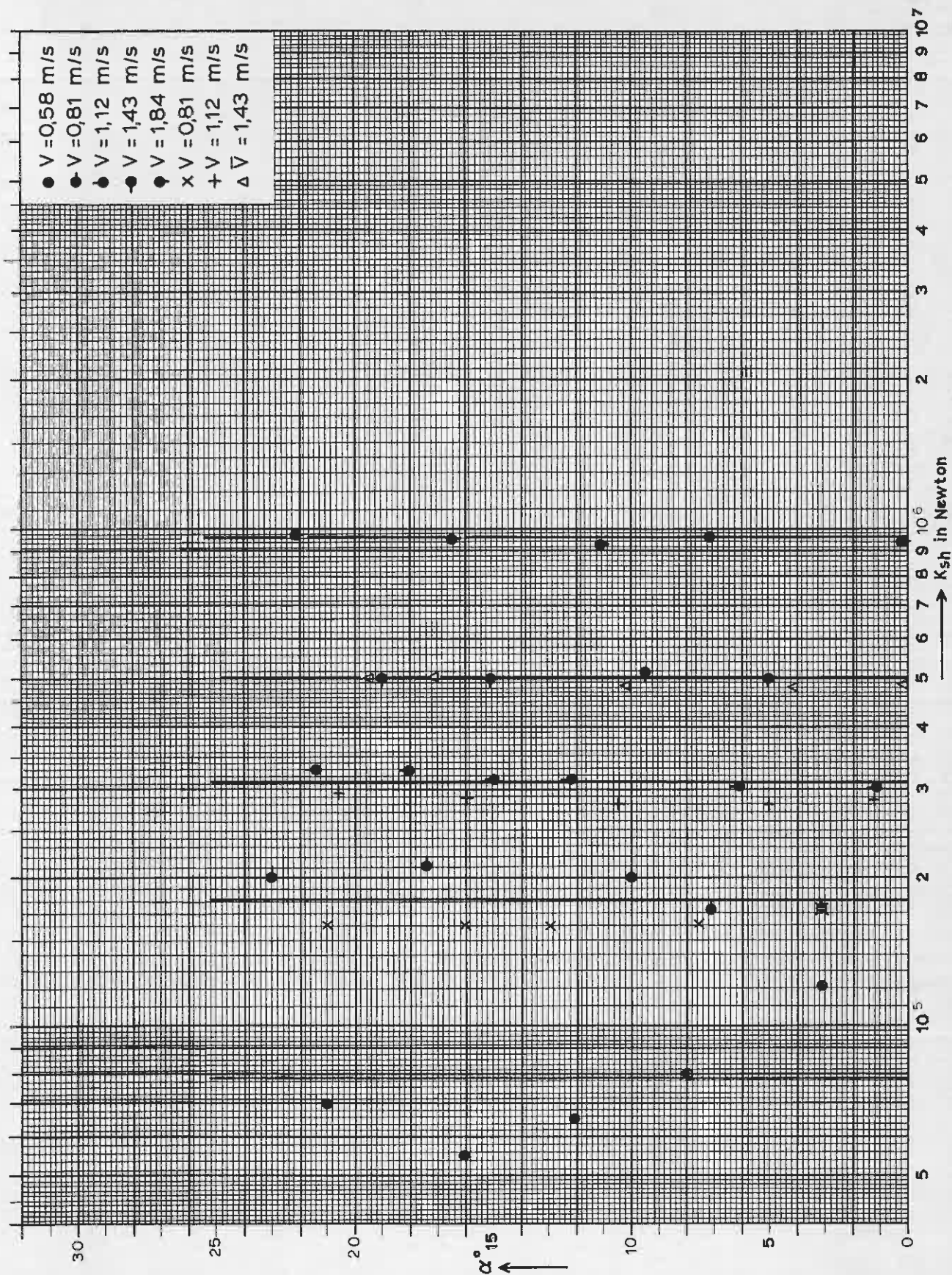
$h = 10$ m

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 49



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 30^\circ$

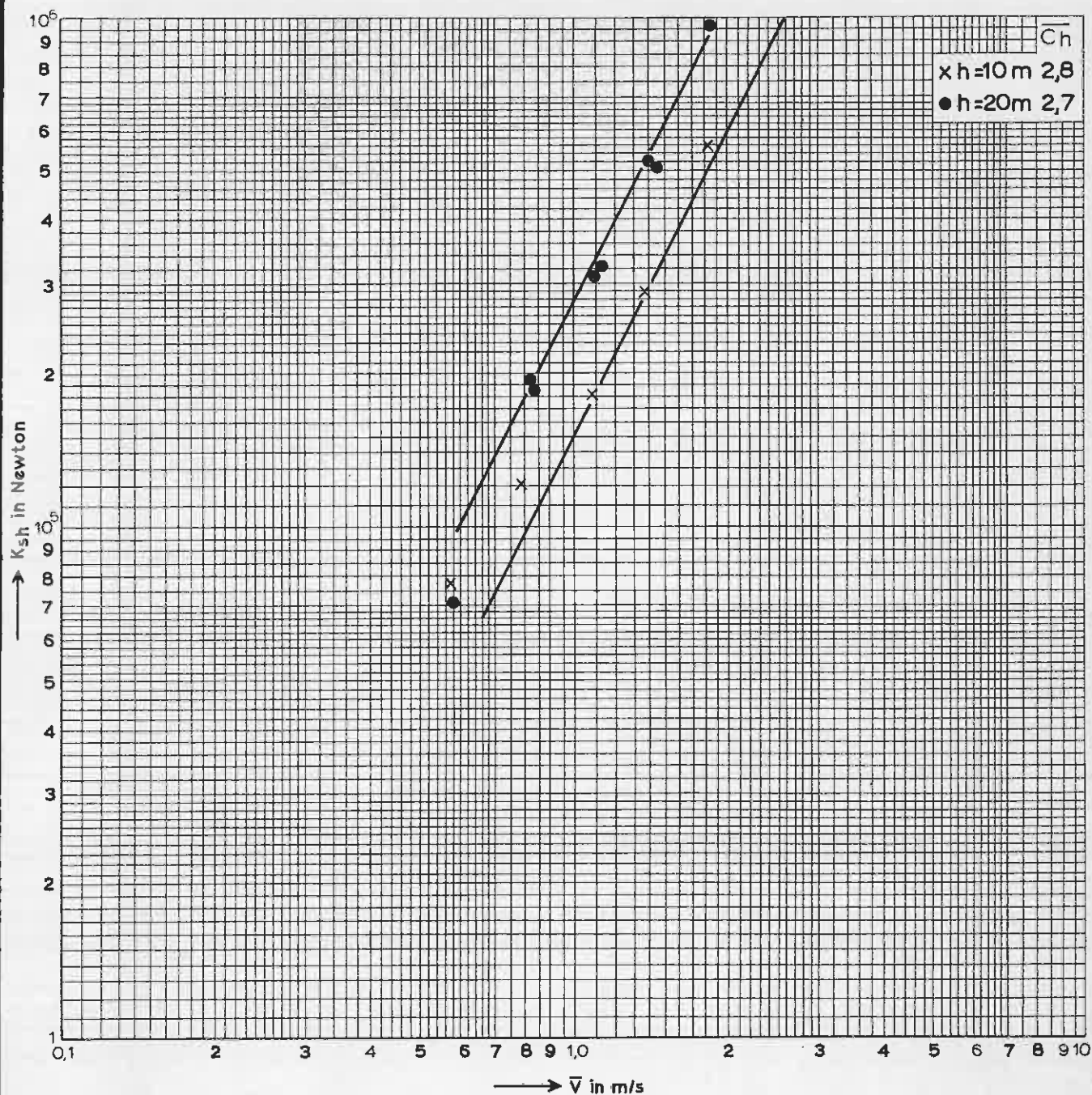
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 50



VERBAND K_{sh} EN $\bar{V}$

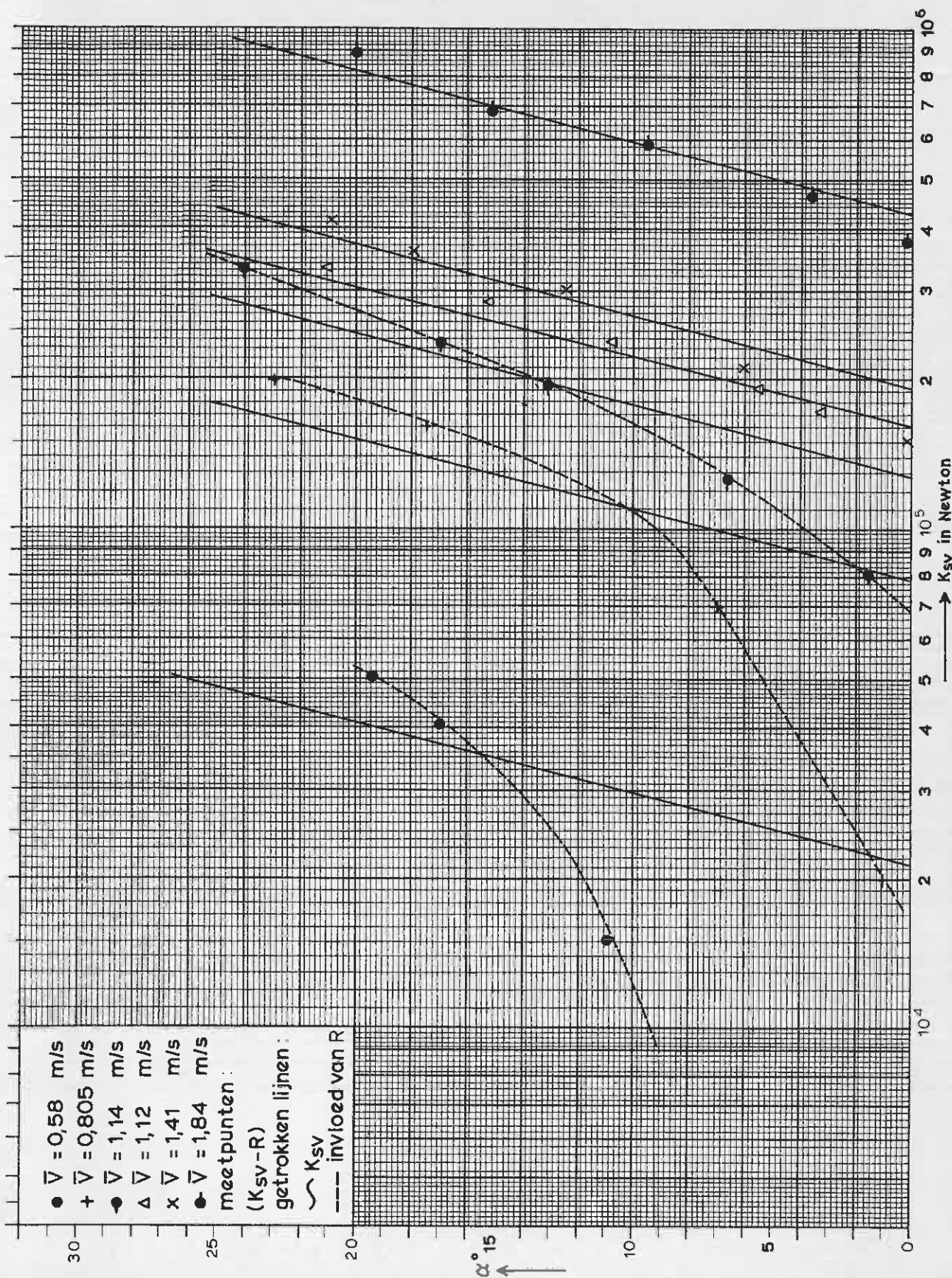
$\gamma = 30^\circ$ $\alpha = 0^\circ$ $h = 10, 20\text{m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 51



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 30^\circ$

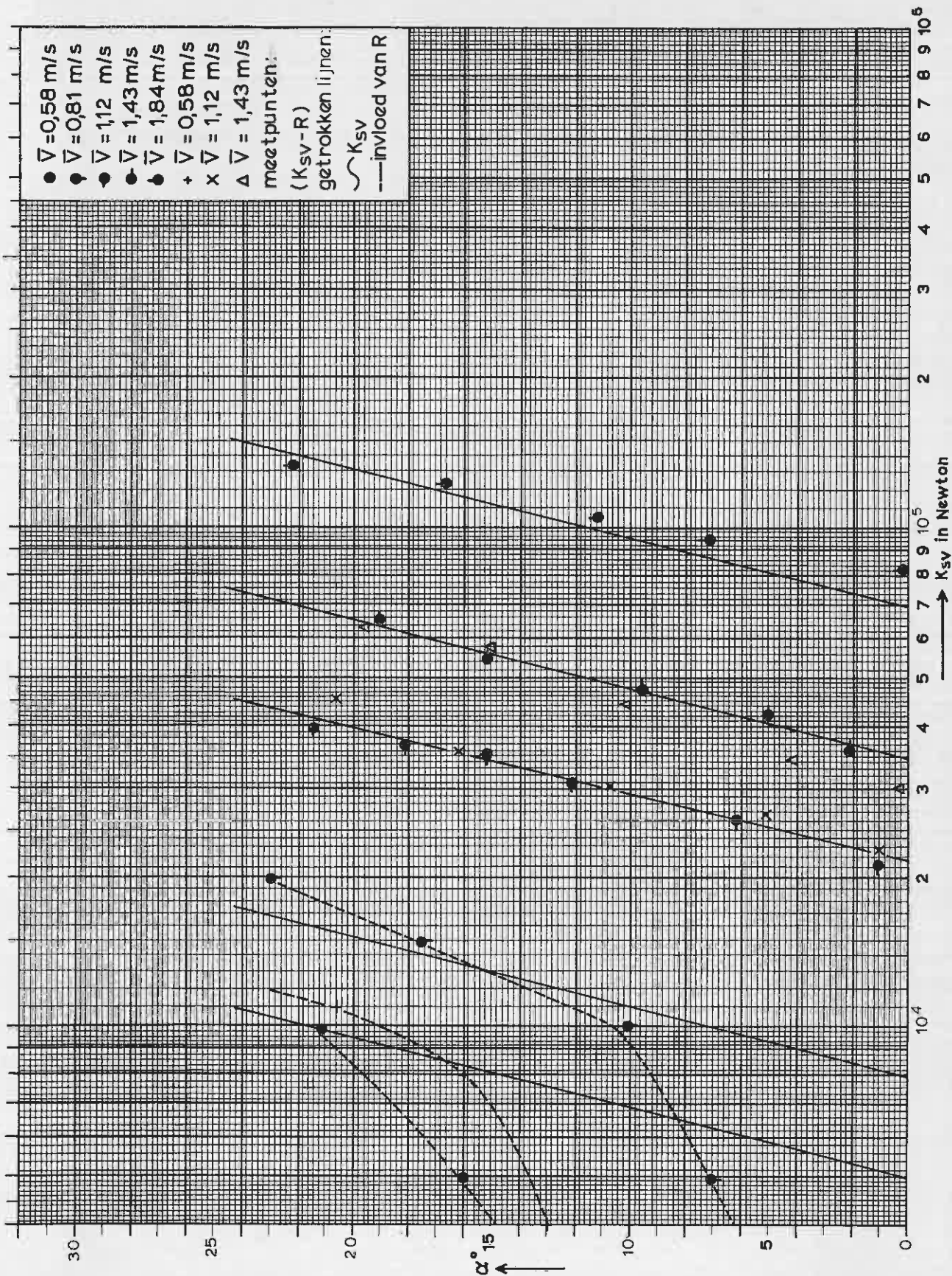
$h = 10\text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 52



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 30^\circ$

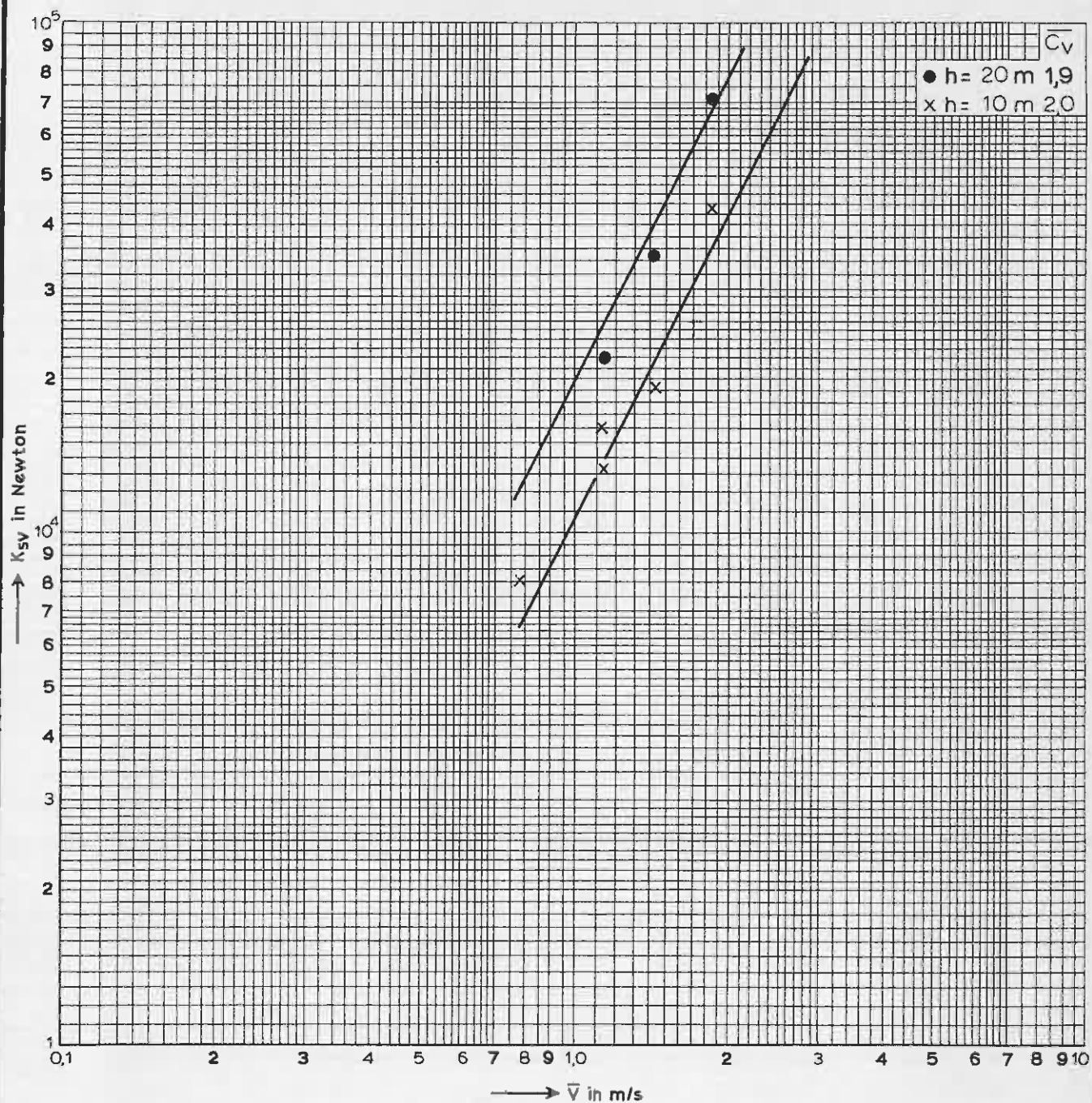
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 53



VERBAND K_{SV} EN $\bar{V}$

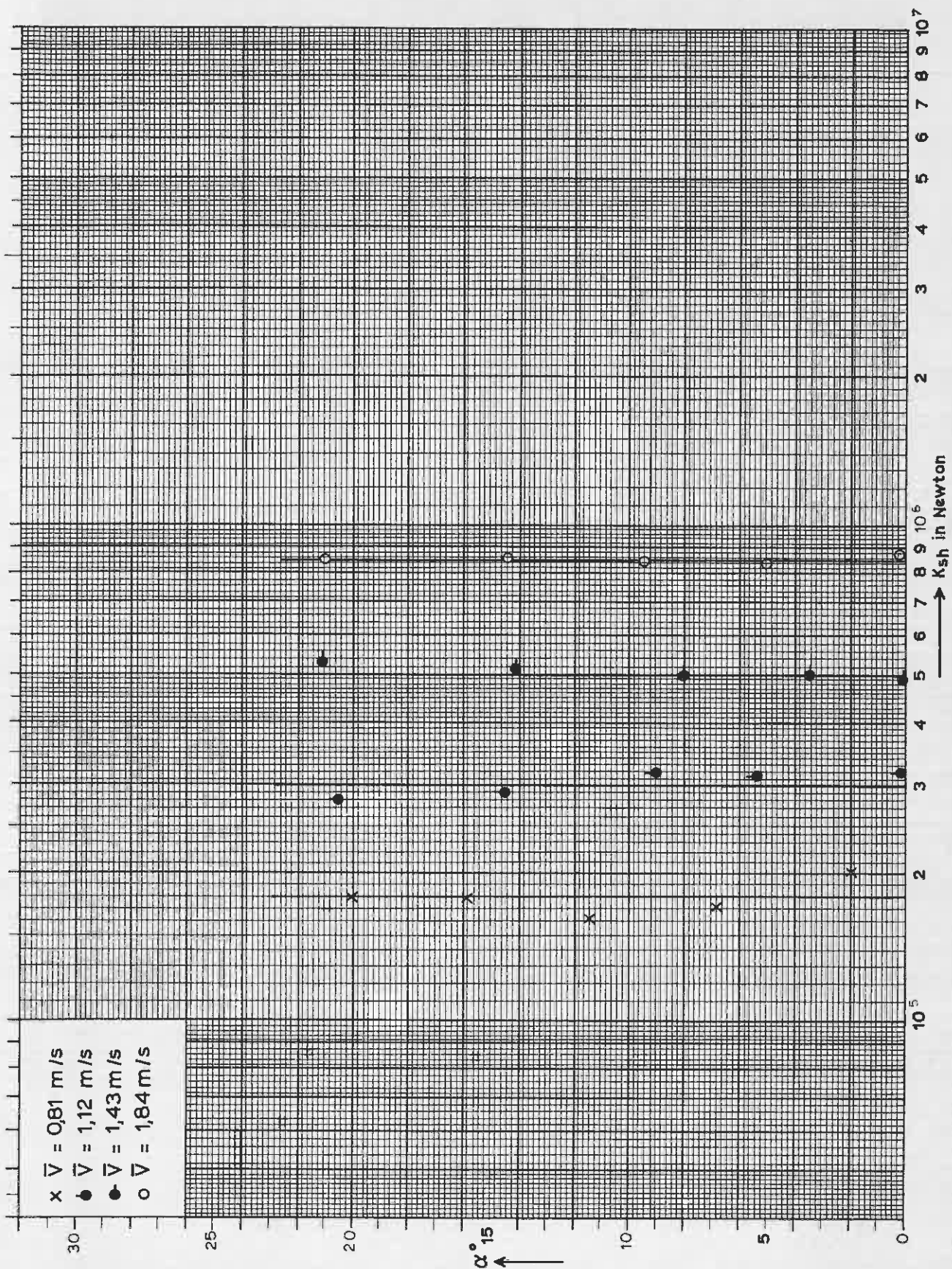
$\gamma = 30^\circ, \alpha = 0^\circ$ $h = 10, 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 54



VERBAND K_{sh} EN α

$\gamma = 0^\circ$

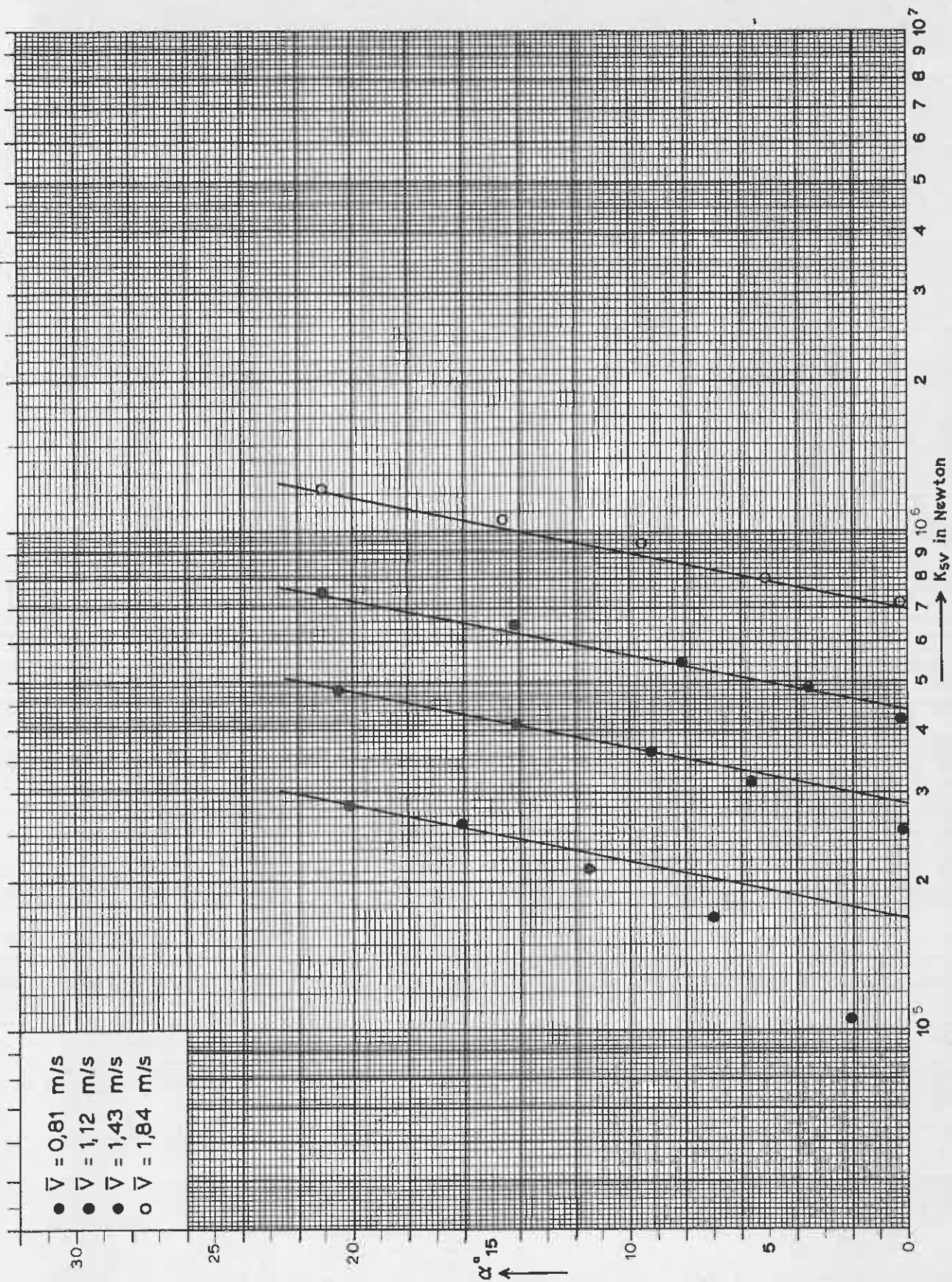
$h = 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 55



VERBAND K_{sv} EN α

$\gamma = 0^\circ$

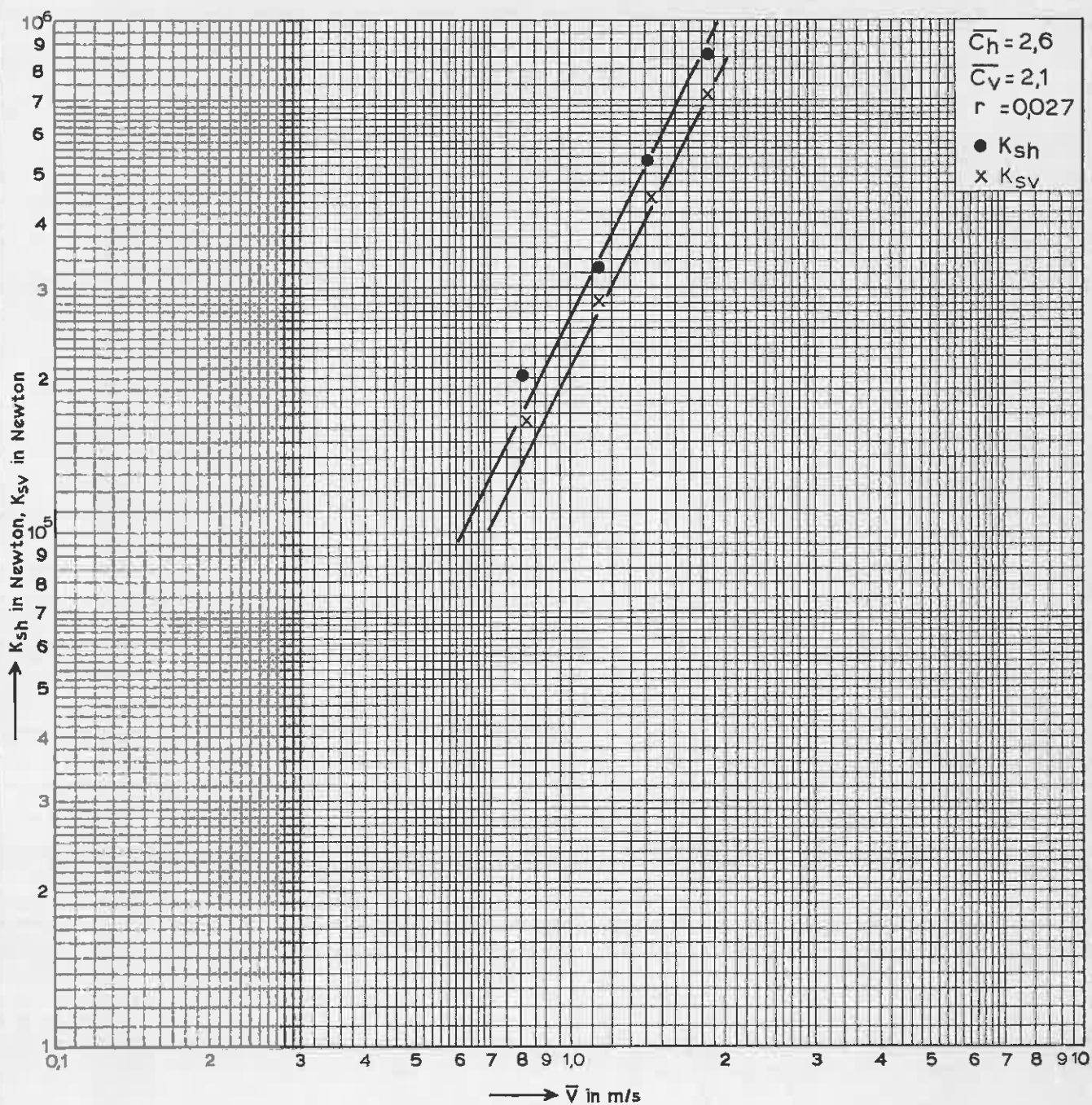
$h = 20$ m

ZINKSTUK 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 56



VERBAND K_{sv} , K_{sh} EN $\bar{V}$

$\gamma=0^\circ, \alpha=0^\circ$

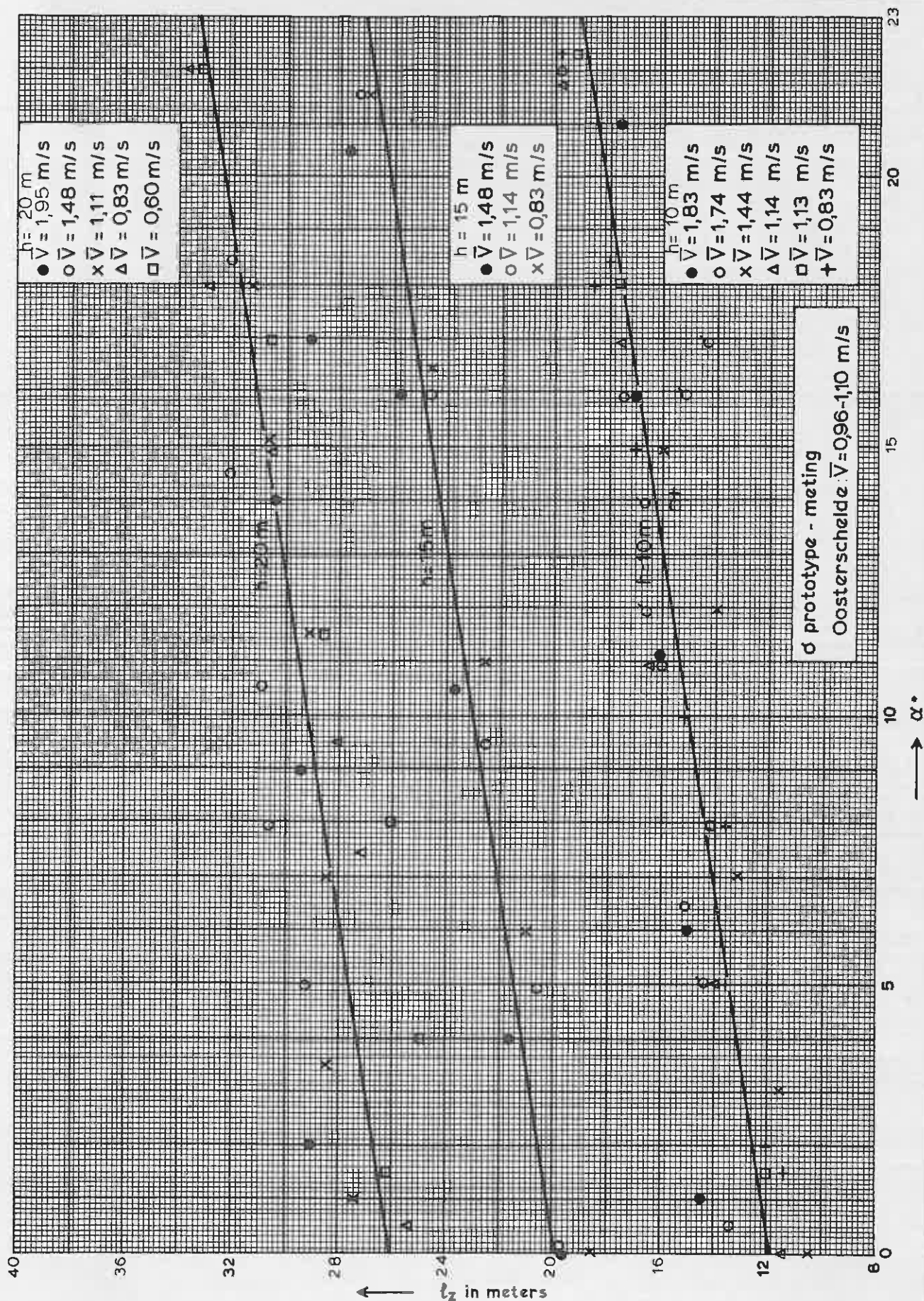
$h=20$ m

ZINKSTUK 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 57



VERBAND l_z EN α

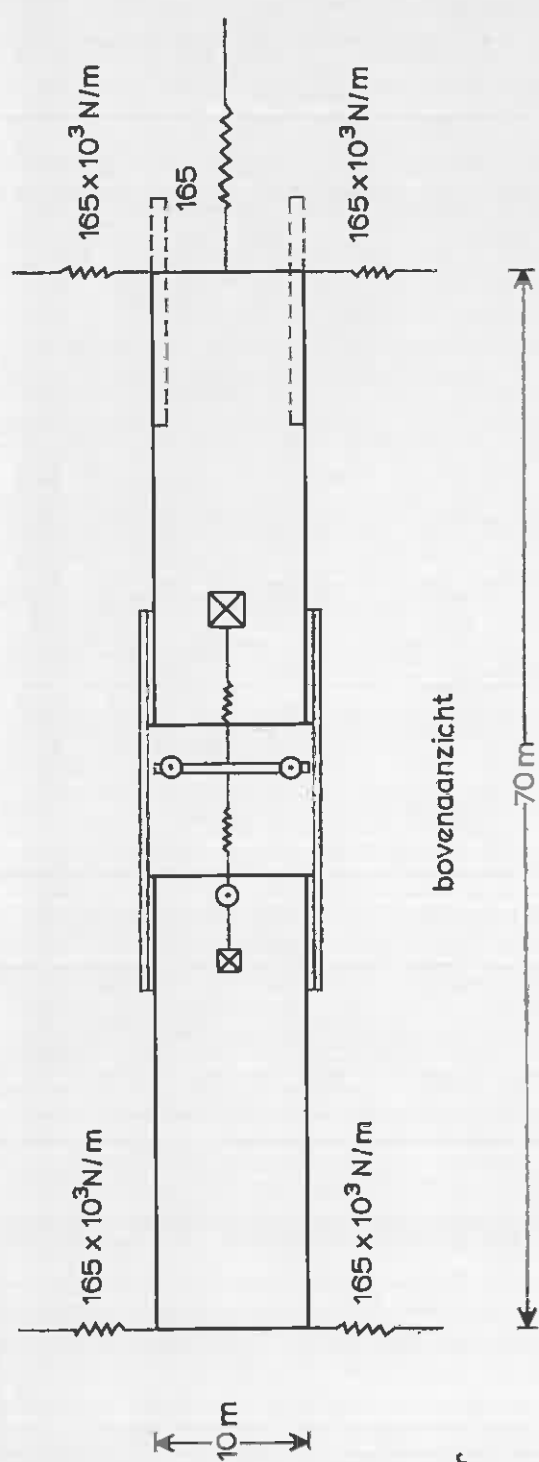
$\gamma = 0^\circ$ $h = 10, 15 \text{ EN } 20 \text{ m}$

ZINKSTUK 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

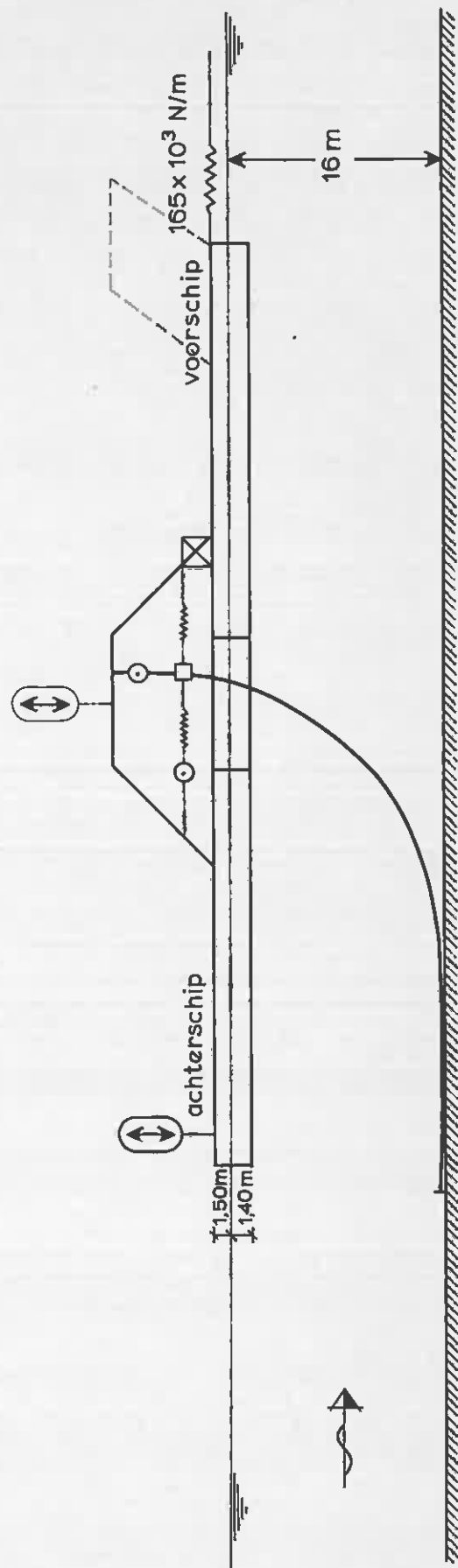
M 1190

FIG. 58



verplaatsingsmeter

krachtmeter



PROEFOPSTELLING ONDERZOEK MET GOLVEN

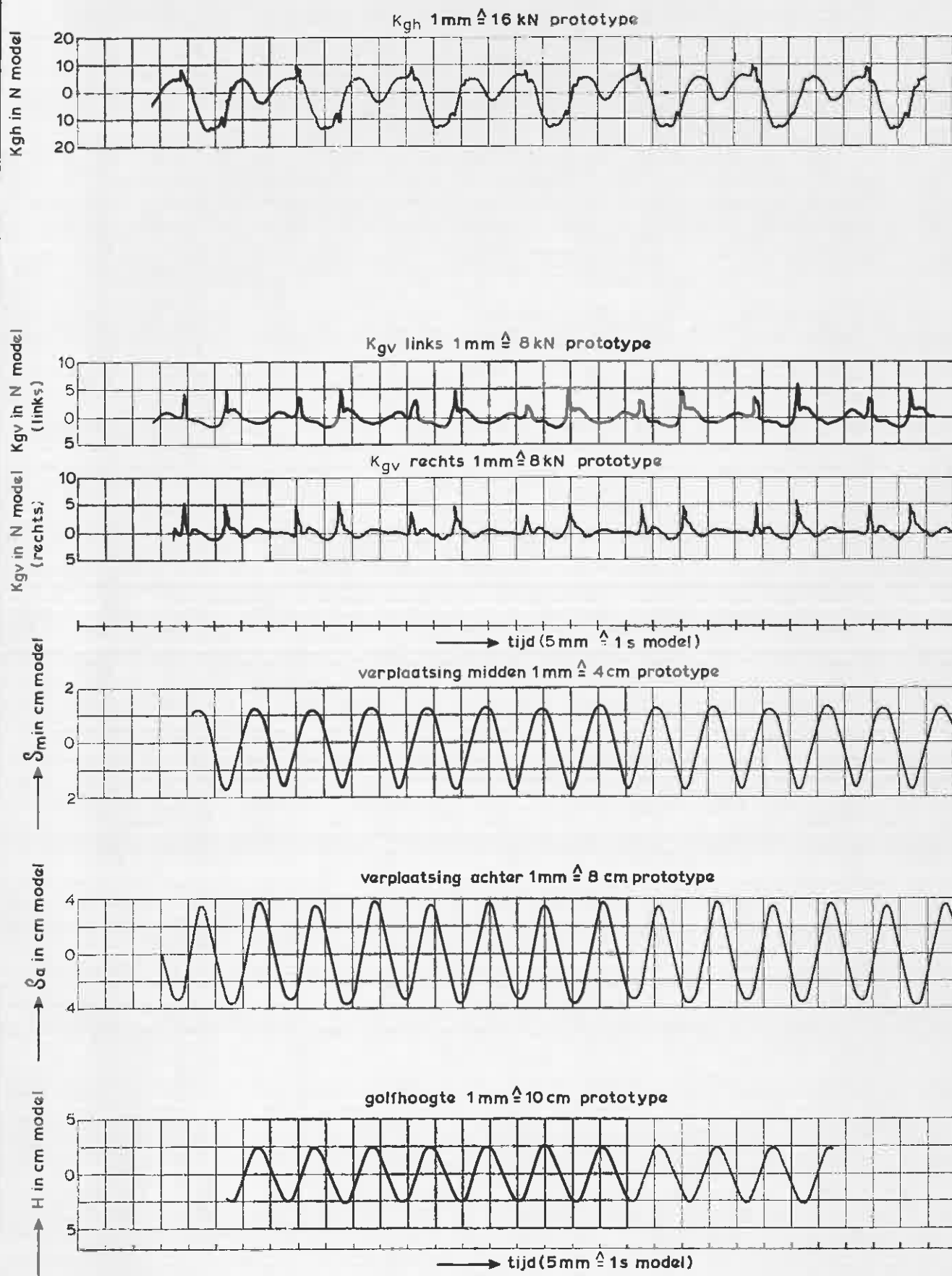
$h = 16 \text{ m}$

SCHAAL 1:500

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 59



REGISTRATIES BIJ REGELMATIGE GOLVEN ($T=10\text{ s}$

$H=1,20\text{ m}$) ZINKSTUK ACHTER, $p=3\text{ m}$

$\alpha=0^\circ$

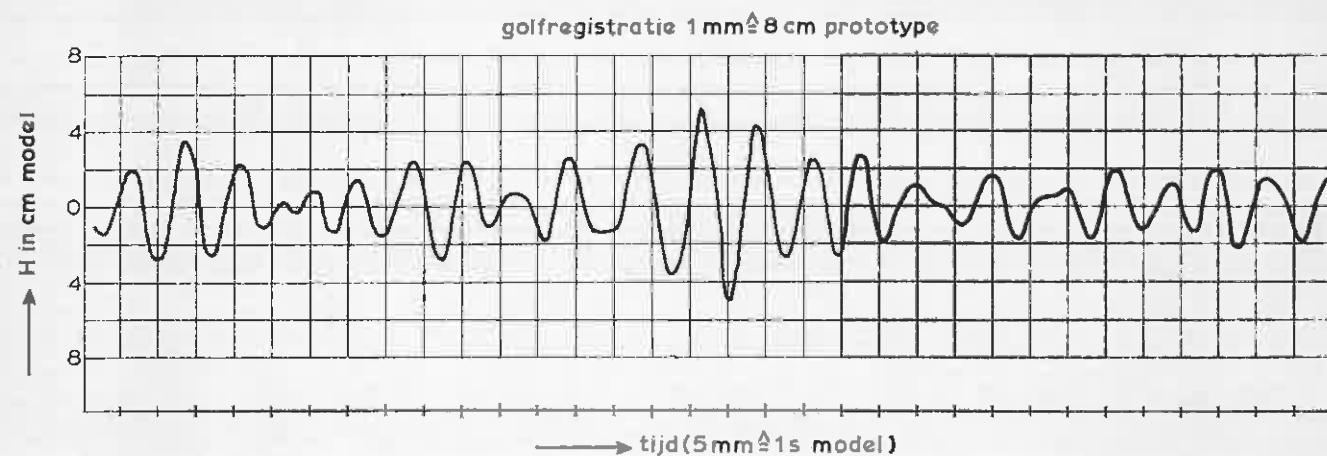
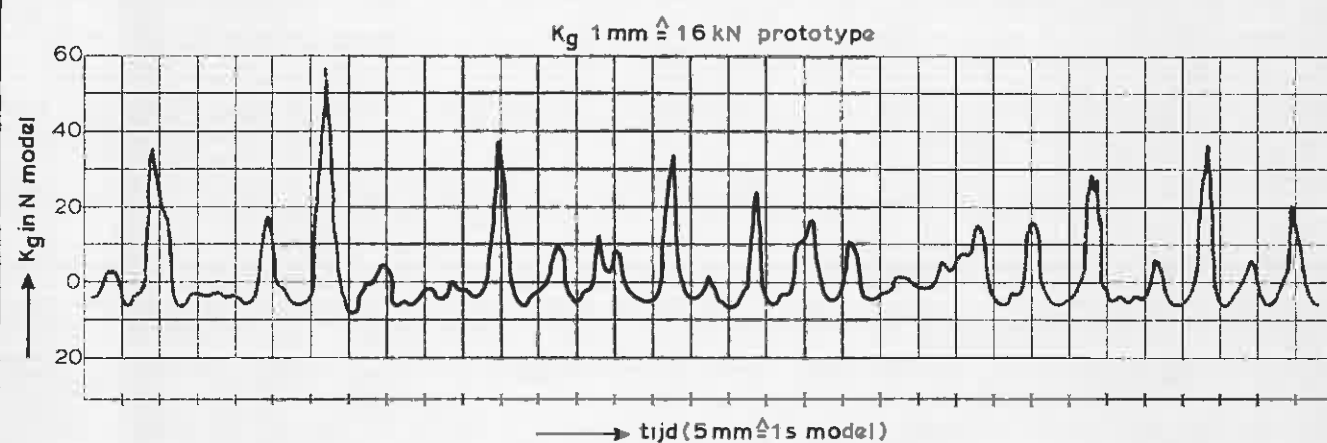
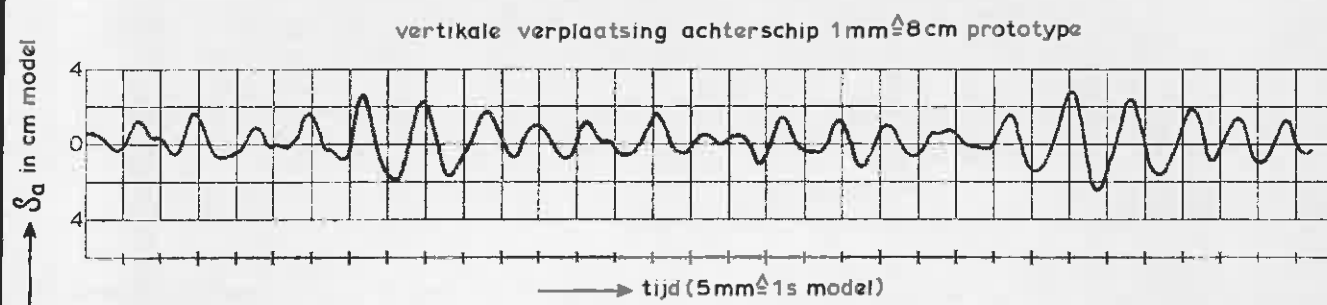
$h=16\text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 60



REGISTRATIES BIJ ONREGELMATIGE GOLVEN

$\alpha = 15^\circ$

$h = 16\text{ m}$

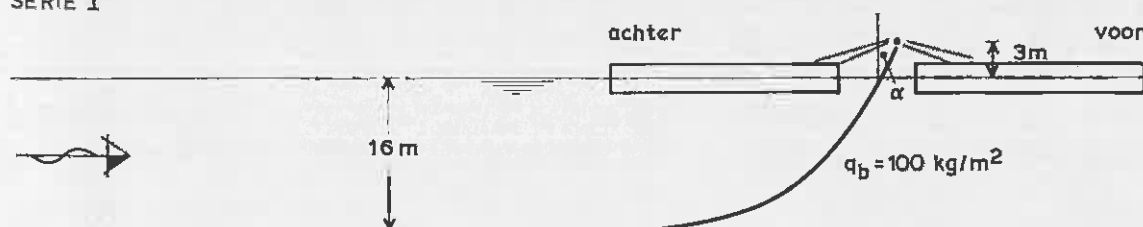
SERIE IV

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

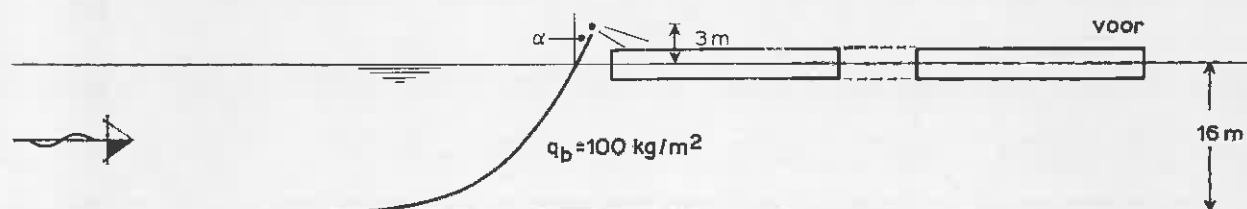
M 1190

FIG. 61

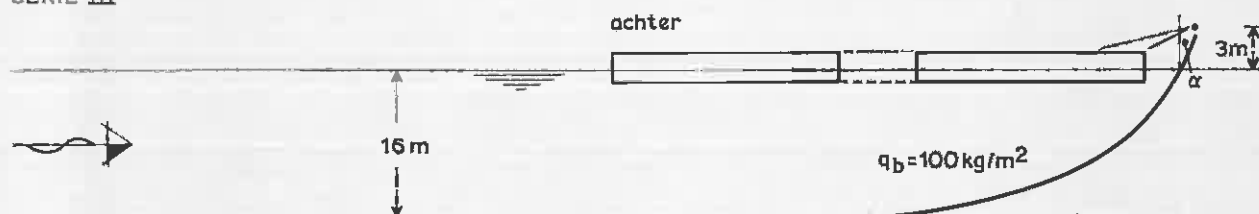
SERIE I



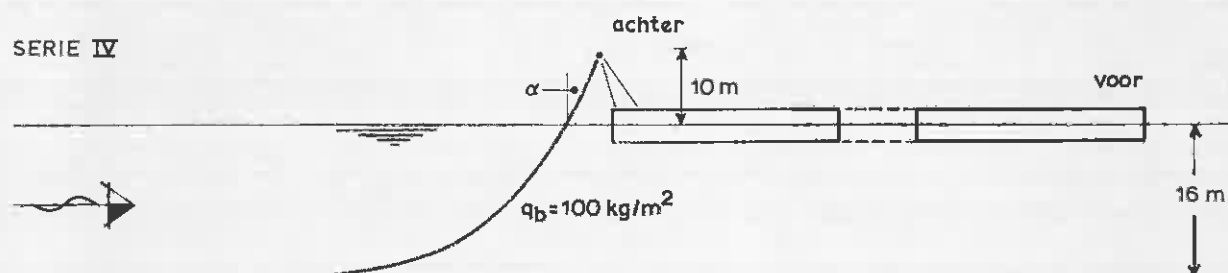
SERIE II



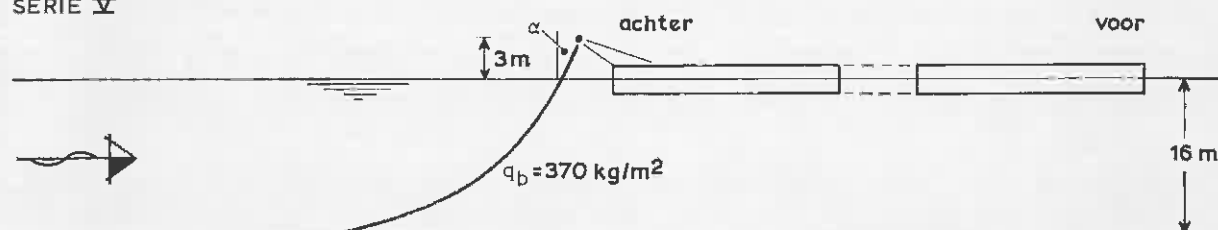
SERIE III



SERIE IV



SERIE V

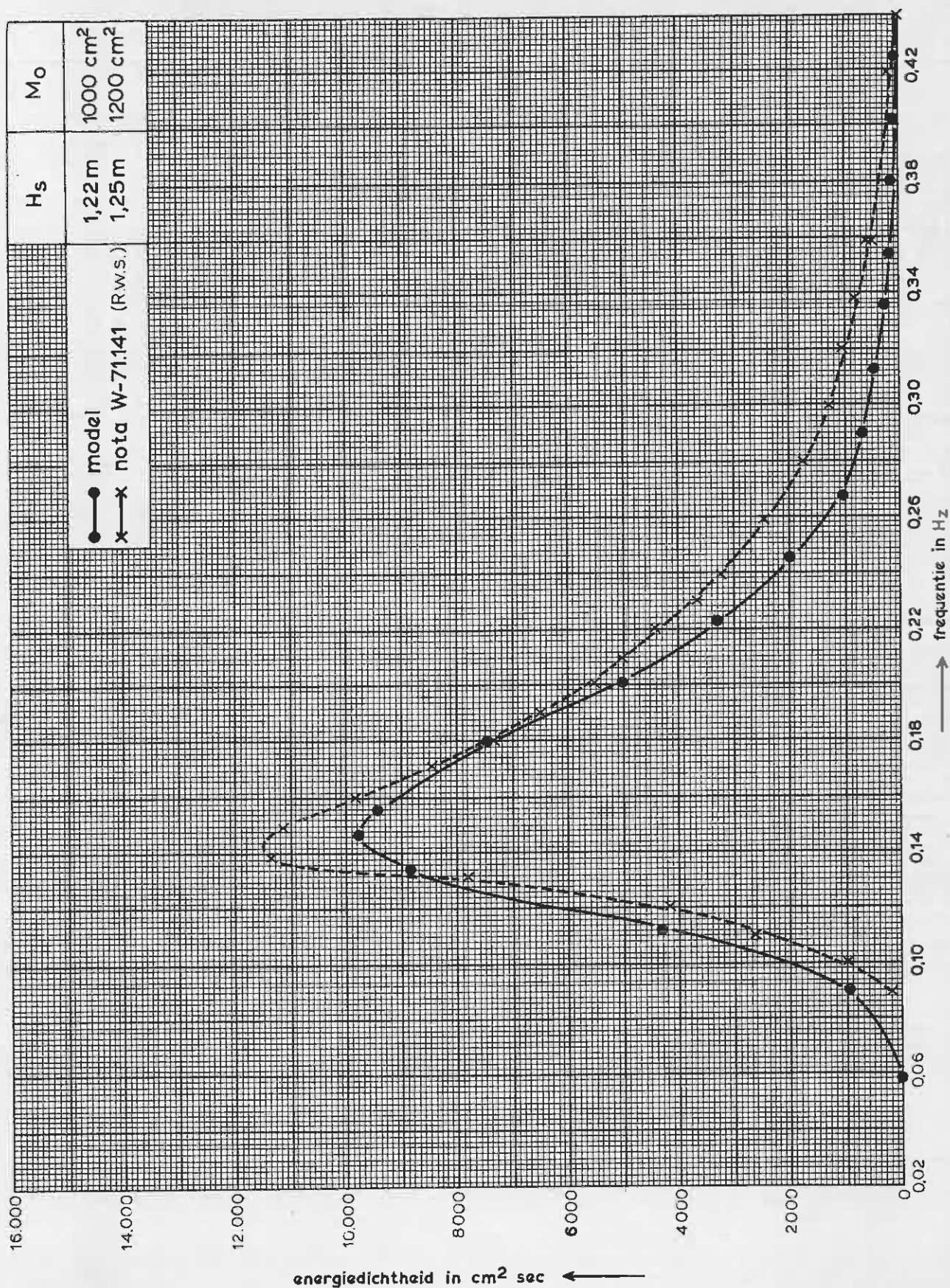


OVERZICHT PROEVEN MET GOLVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 62

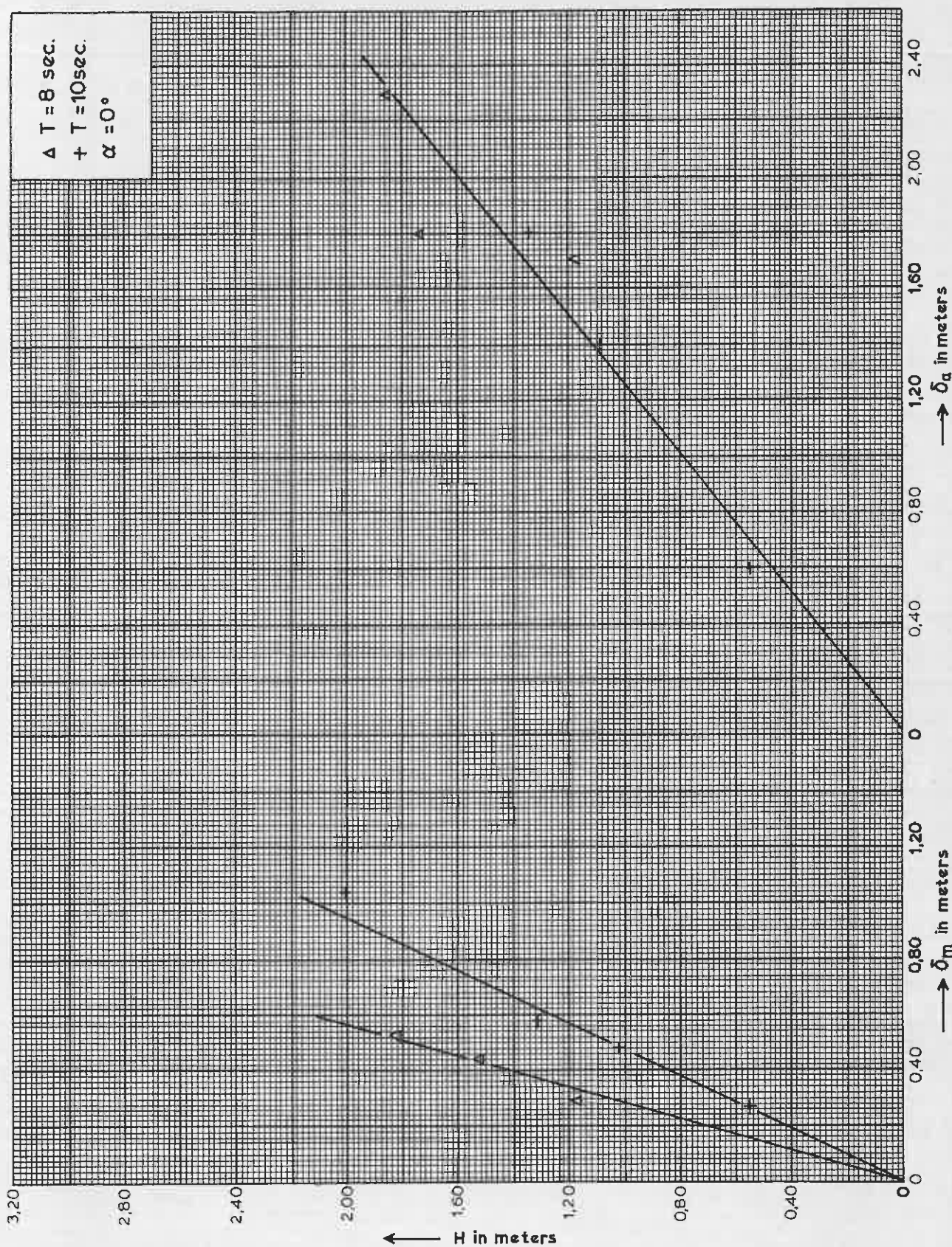


ENERGIEDICHTHEIDSSPECTRA BIJ WATERSTAND
N.A.P. + 3,0 m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 63



VERBAND δ_a , δ_m EN H

$\alpha = 0^\circ$

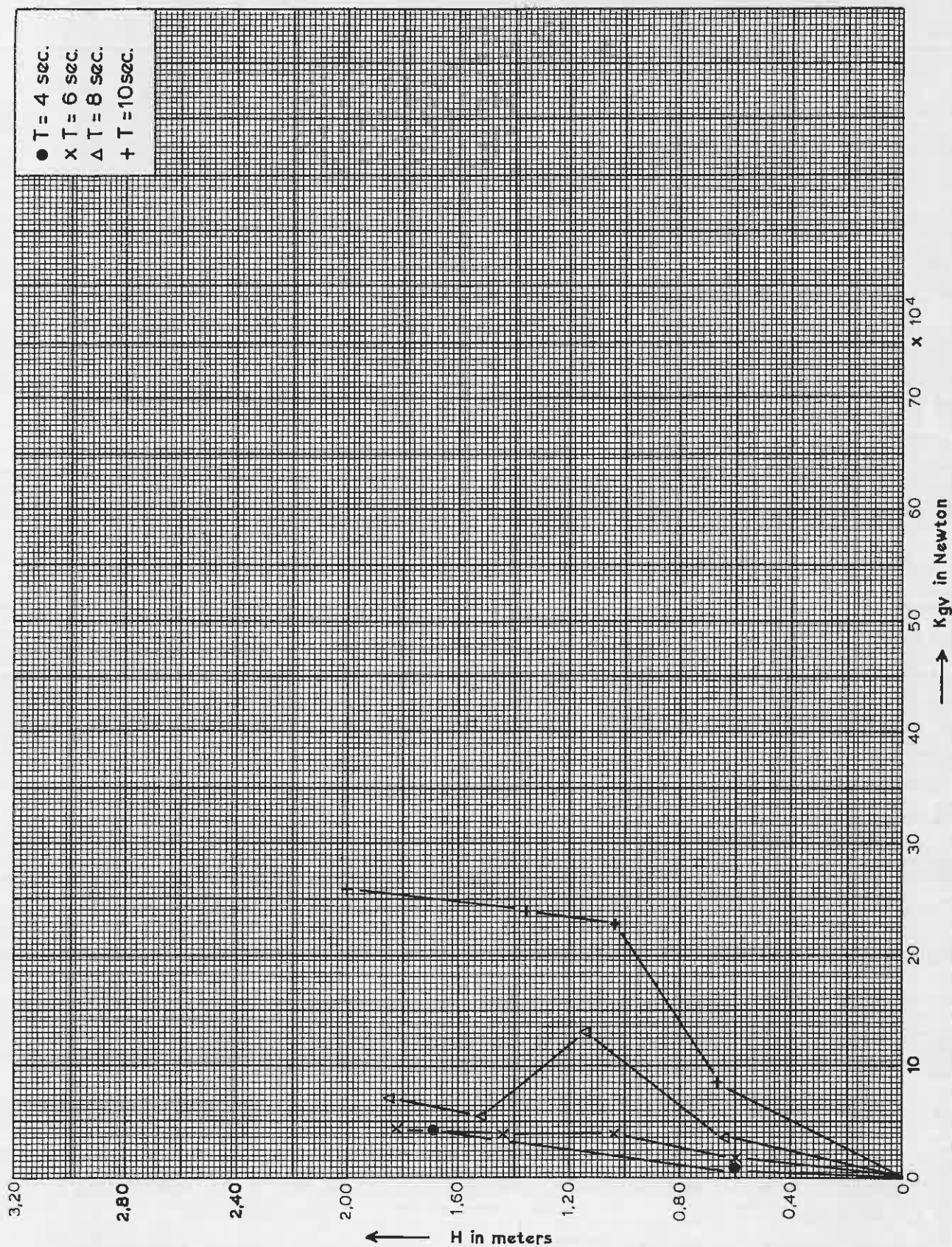
$h = 16 \text{ m}$

SERIE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 64



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 0^\circ$

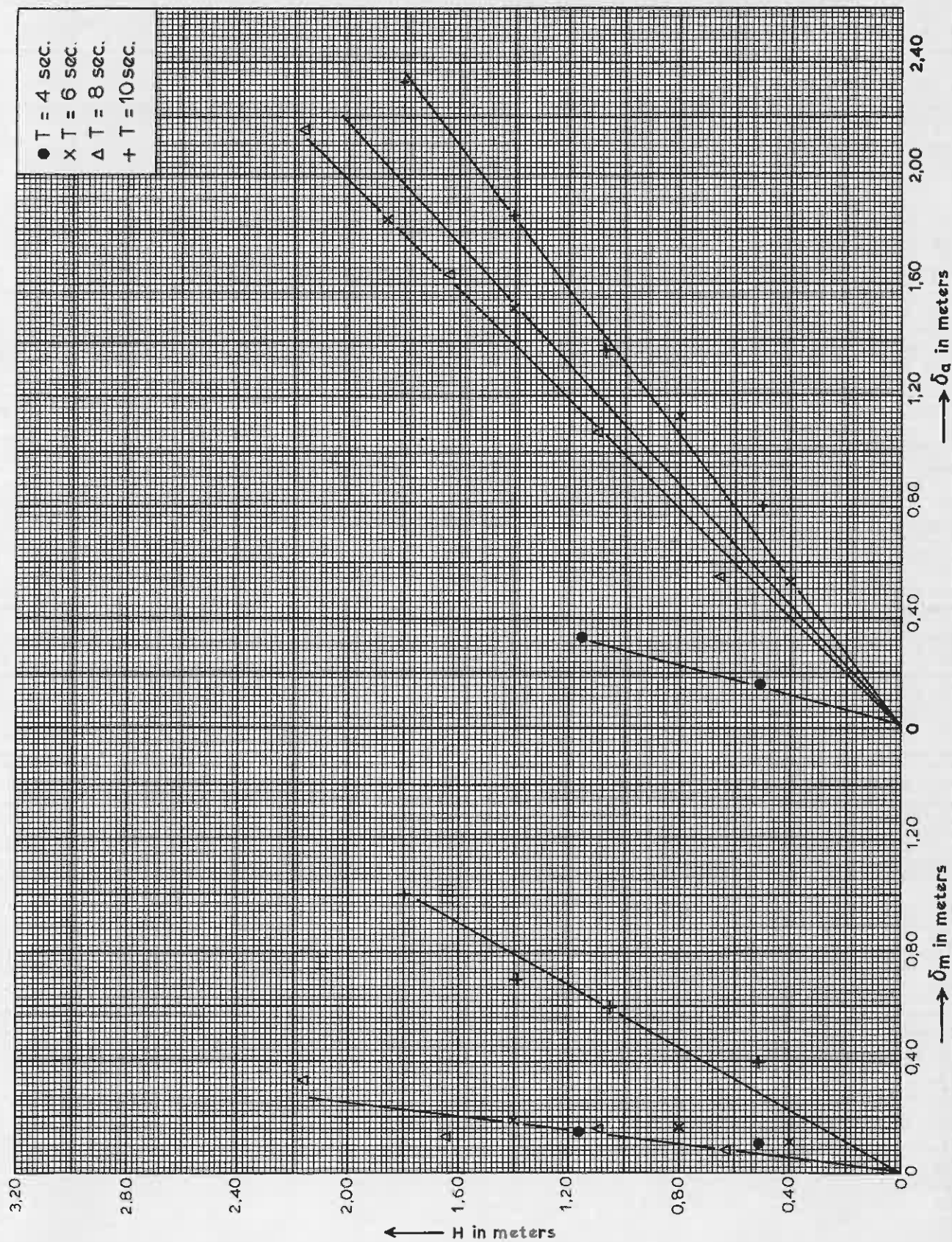
$h = 16m$

SERIE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 65



VERBAND δ_a , δ_m EN H

$\alpha = 15^\circ$

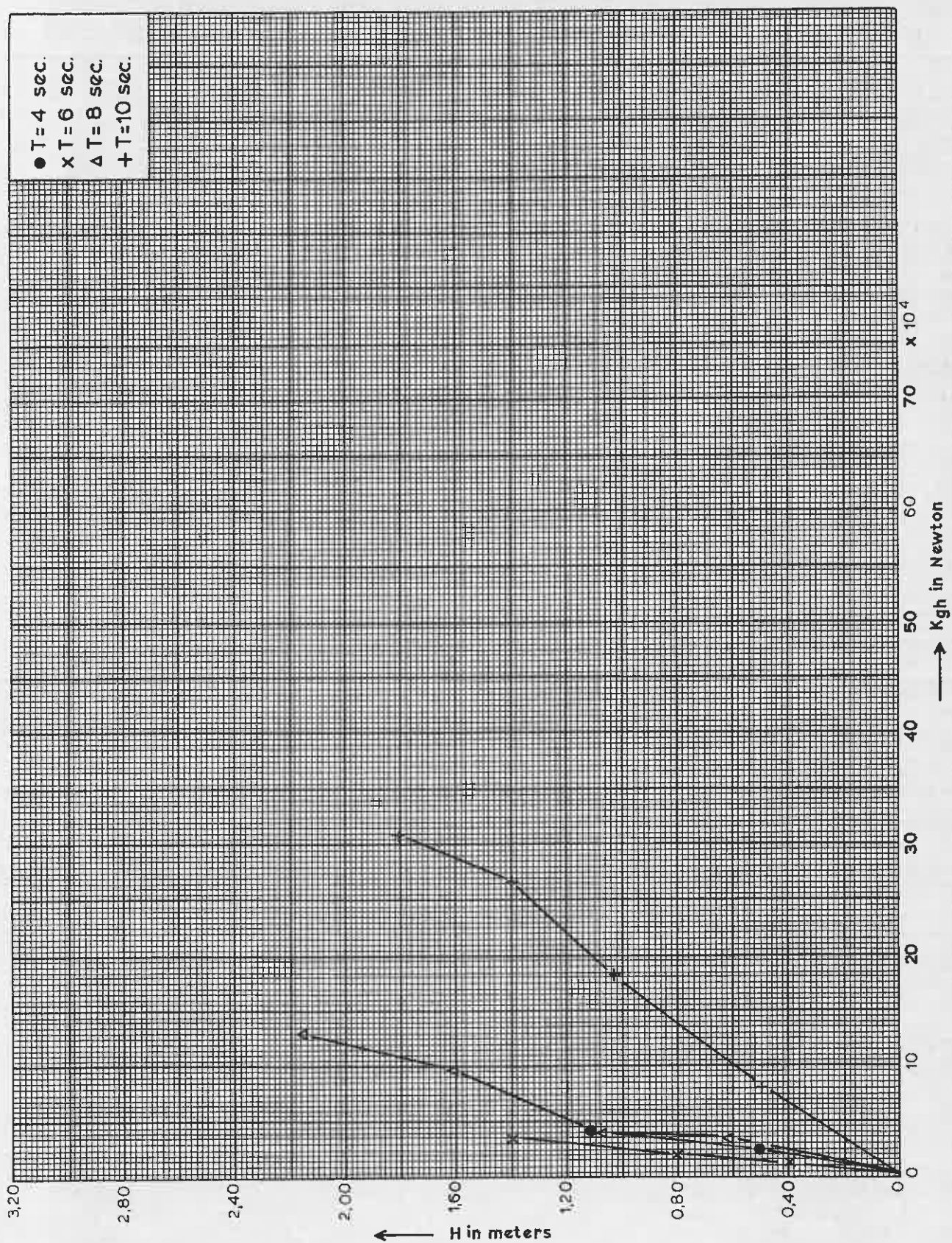
$h = 16 \text{ m}$

SERIE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 66



VERBAND K_{gh} EN H

$\alpha = 15^\circ$

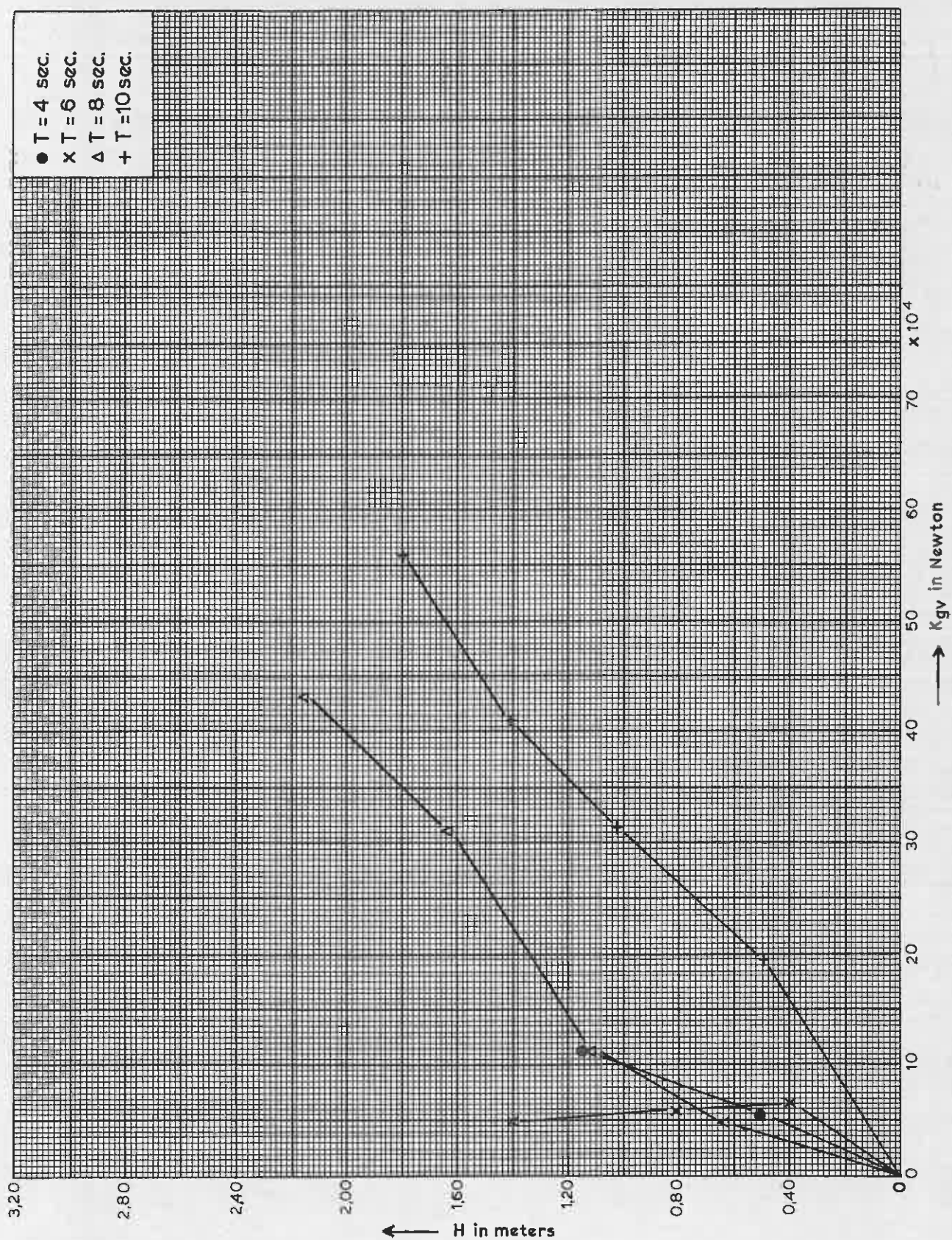
$h = 16\text{ m}$

SERIE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 67



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 15^\circ$

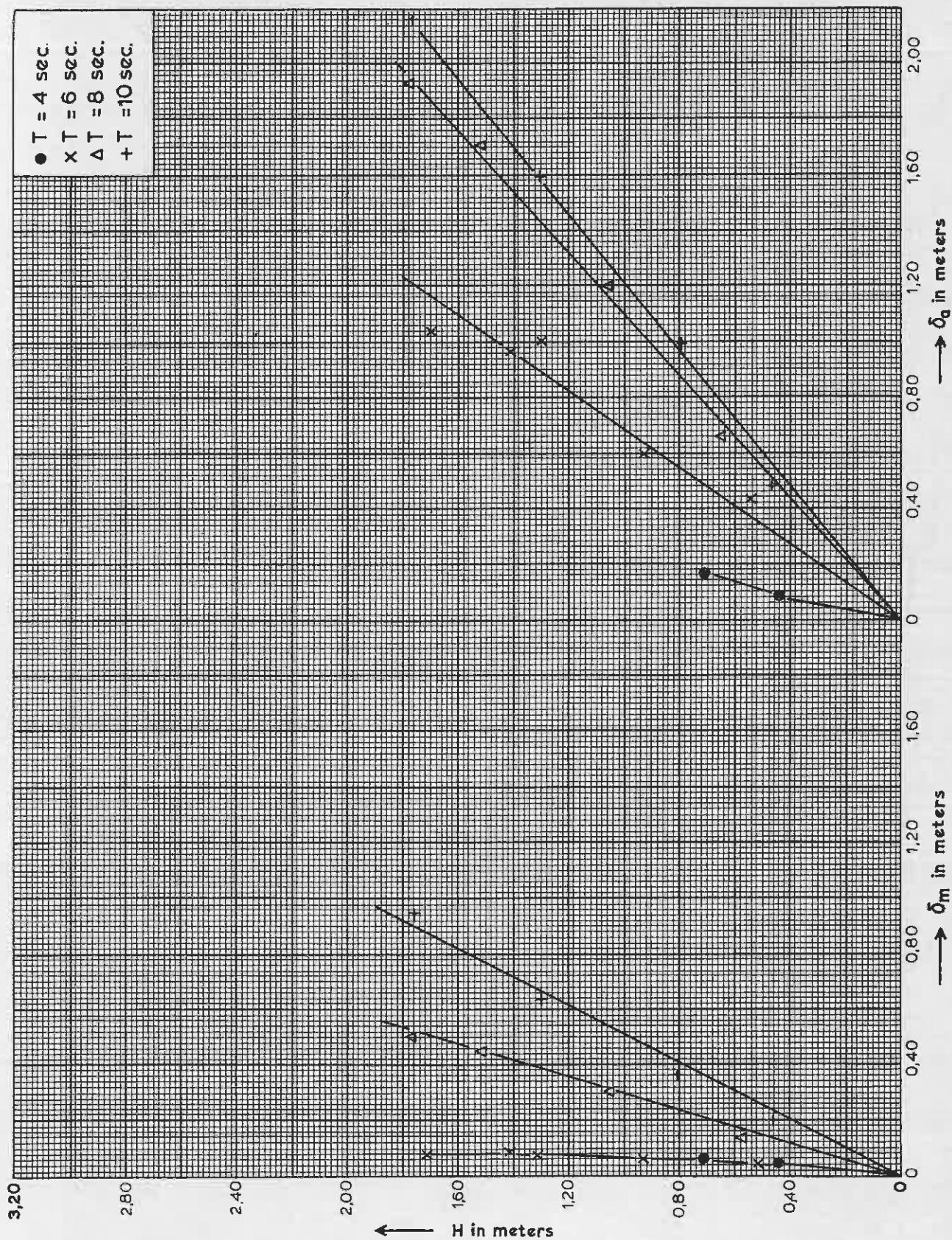
$h = 16 \text{ m}$

SERIE I

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 68



VERBAND δ_a , δ_m EN H

$\alpha = 0^\circ$

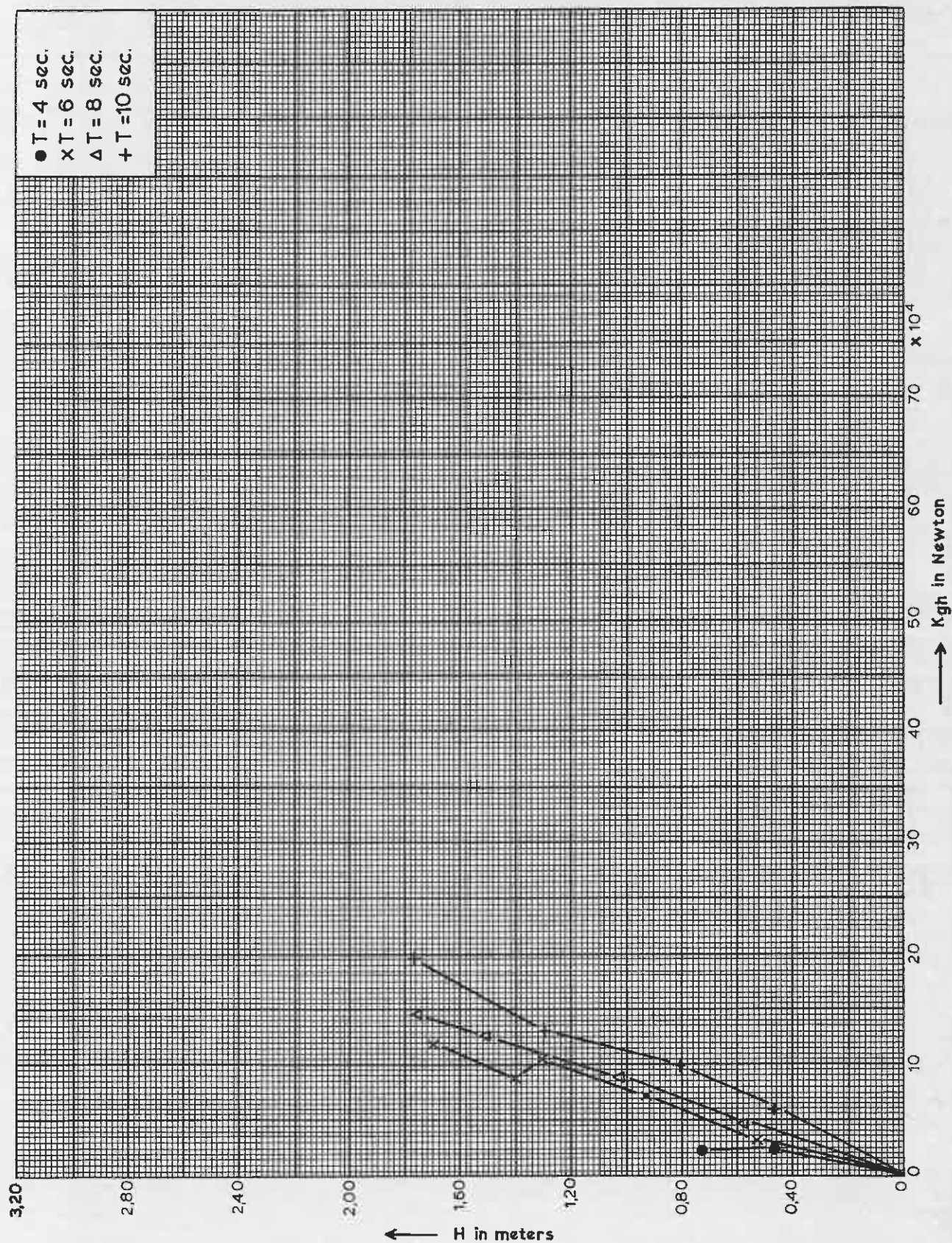
$h = 16 \text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 69



VERBAND K_{gh} EN H

$\alpha = 0^\circ$

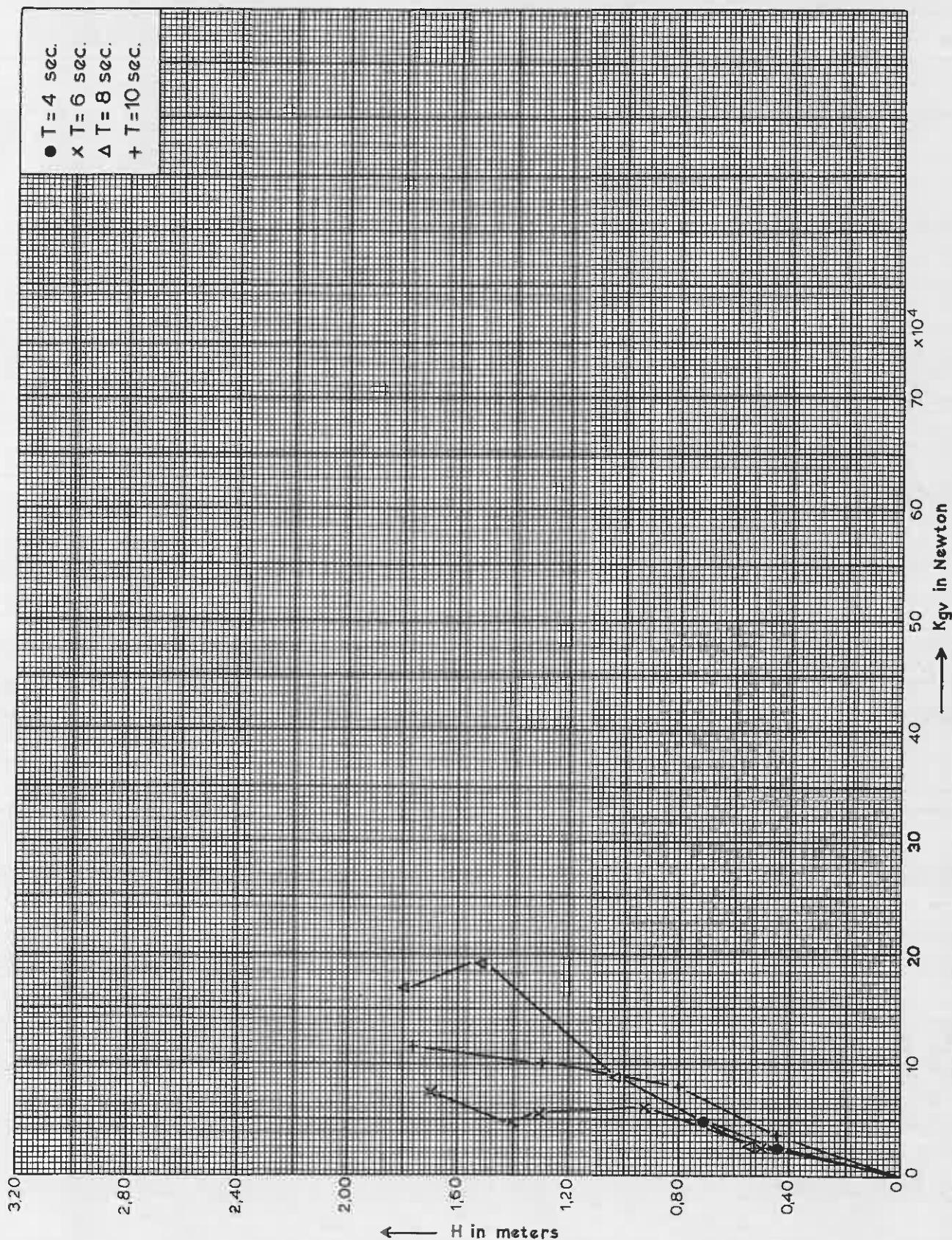
$h = 16 \text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 70



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 0^\circ$

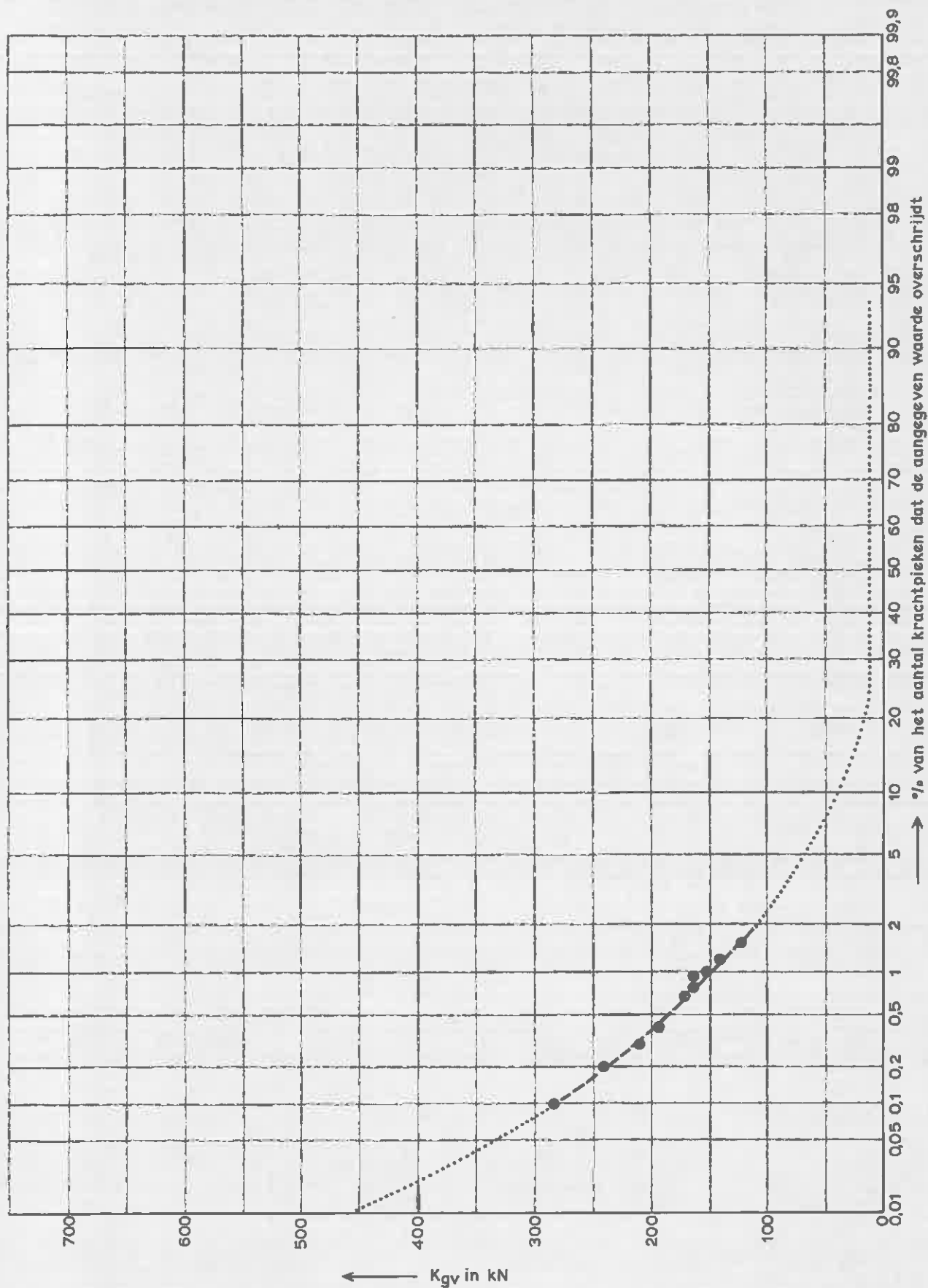
$h = 16 \text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 71



KRACHTENVERDELING VAN K_{gv} BIJ
ONREGELMATIGE GOLVEN

$\alpha = 0^\circ$

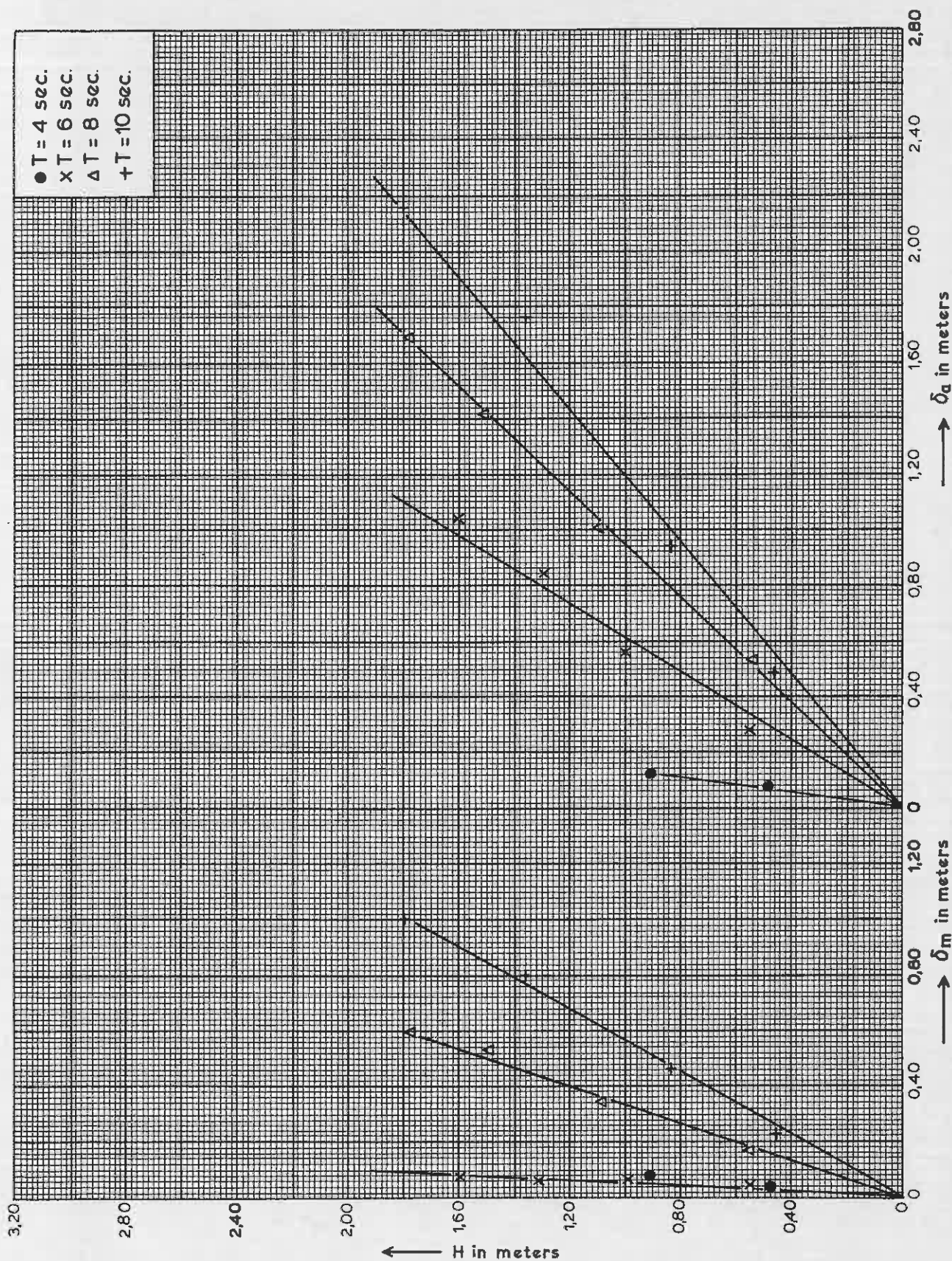
$h = 16\text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 72



VERBAND δ_a , δ_m EN H

$\alpha = 15^\circ$

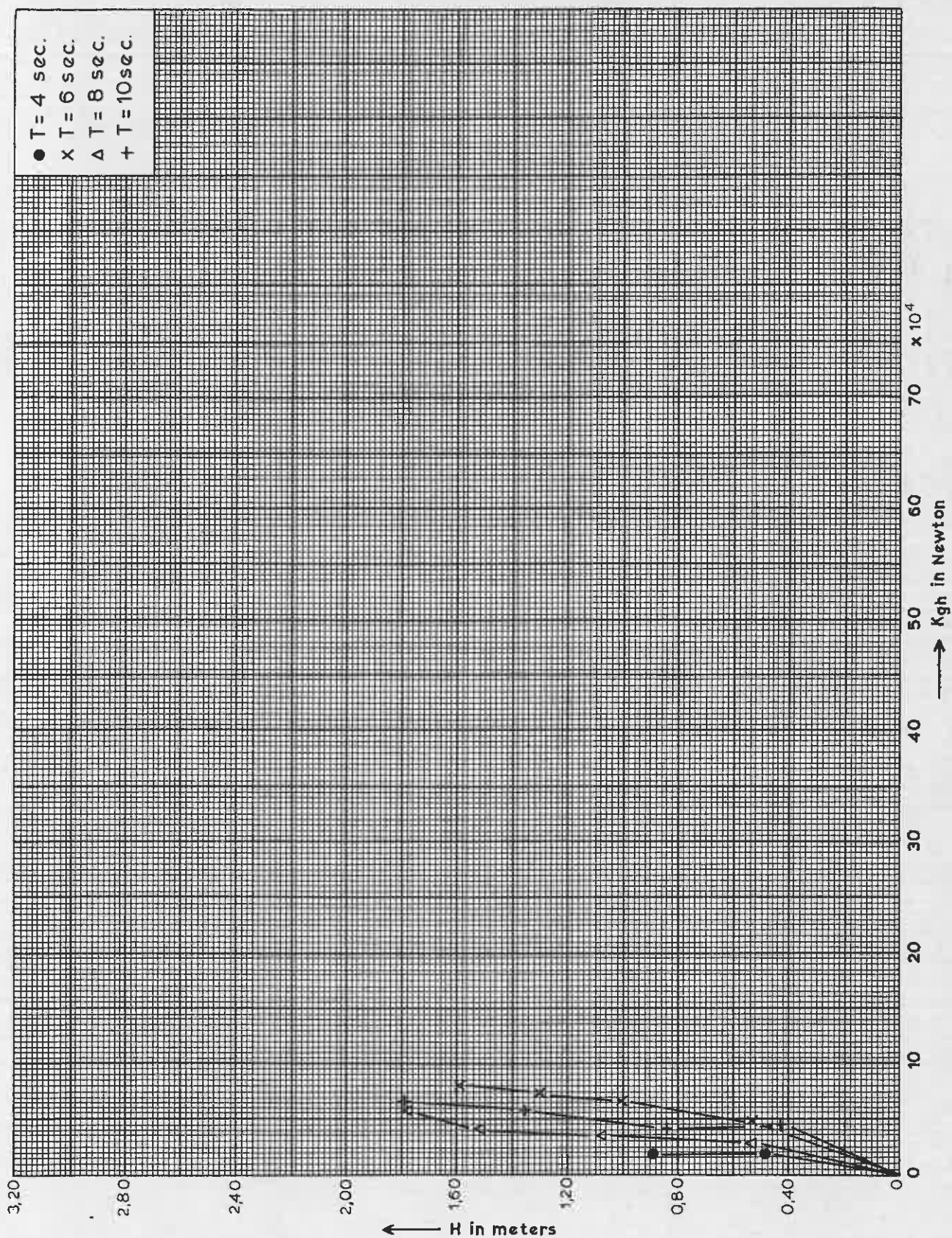
$h = 16 \text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 73



VERBAND K_{gh} EN H

$\alpha = 15^\circ$

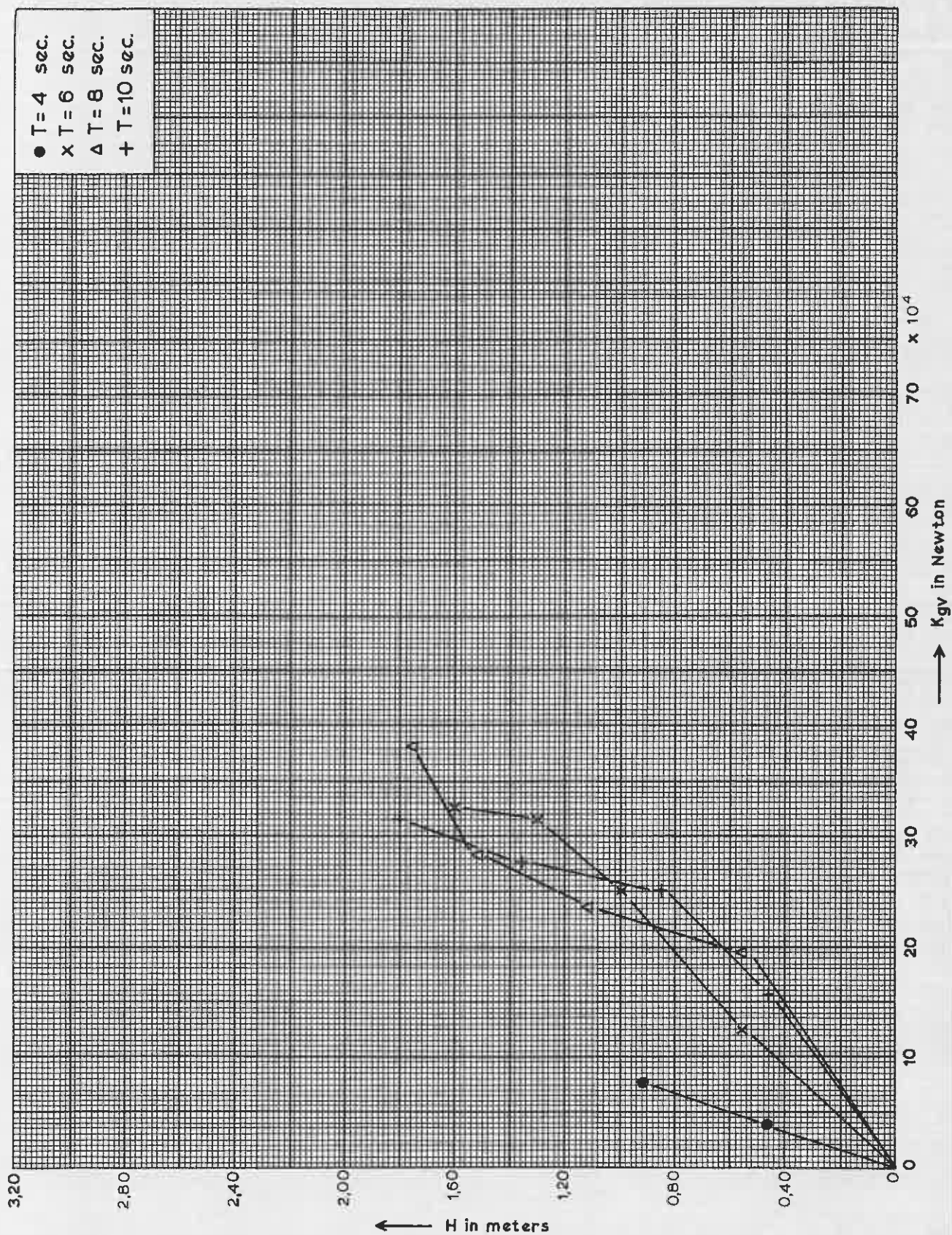
$h = 16 \text{ m}$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 74



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 15^\circ$

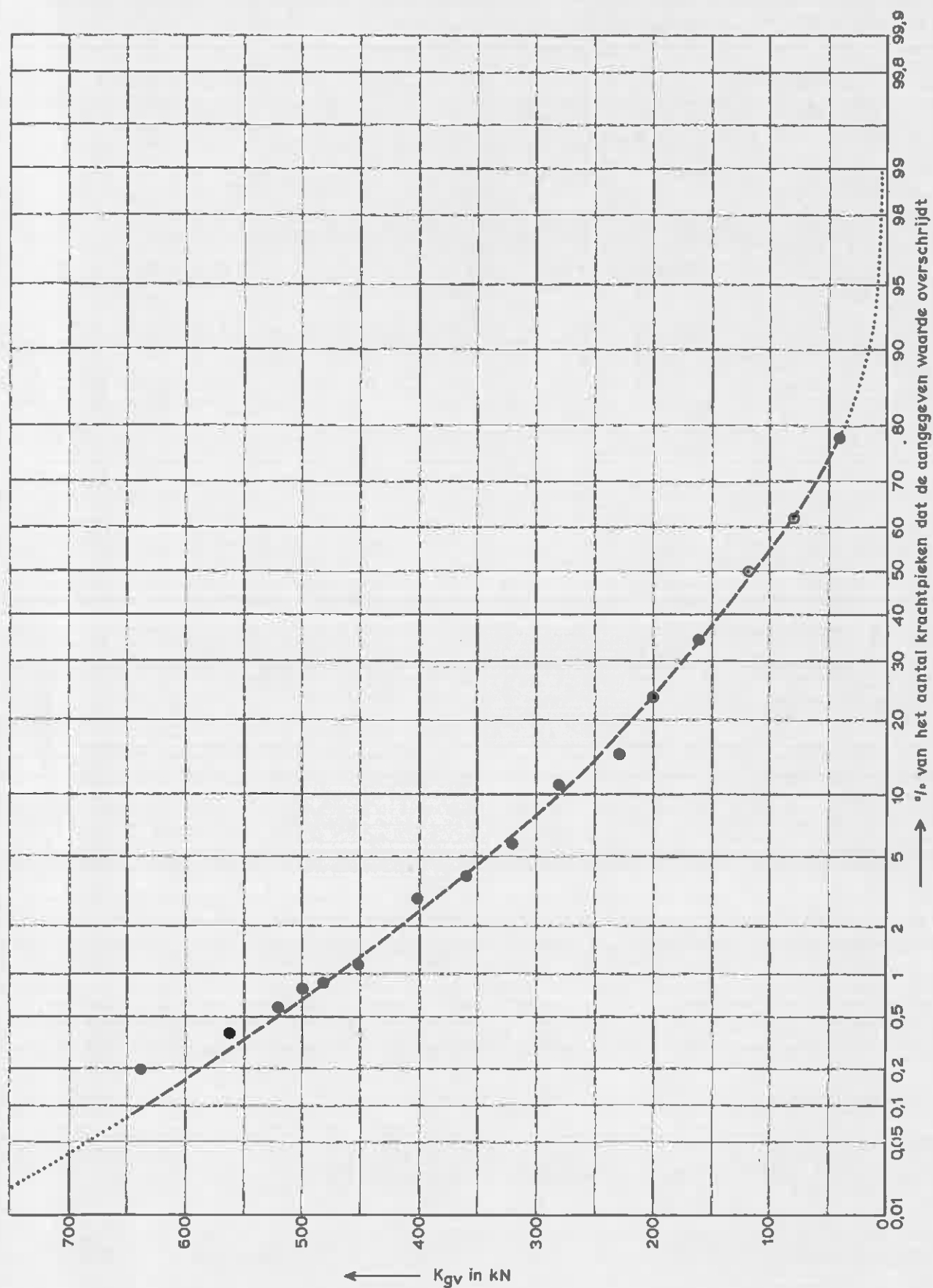
$h = 16m$

SERIE II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 75



KRACHTENVERDELING VAN K_{gv} BIJ
ONREGELMATIGE GOLVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

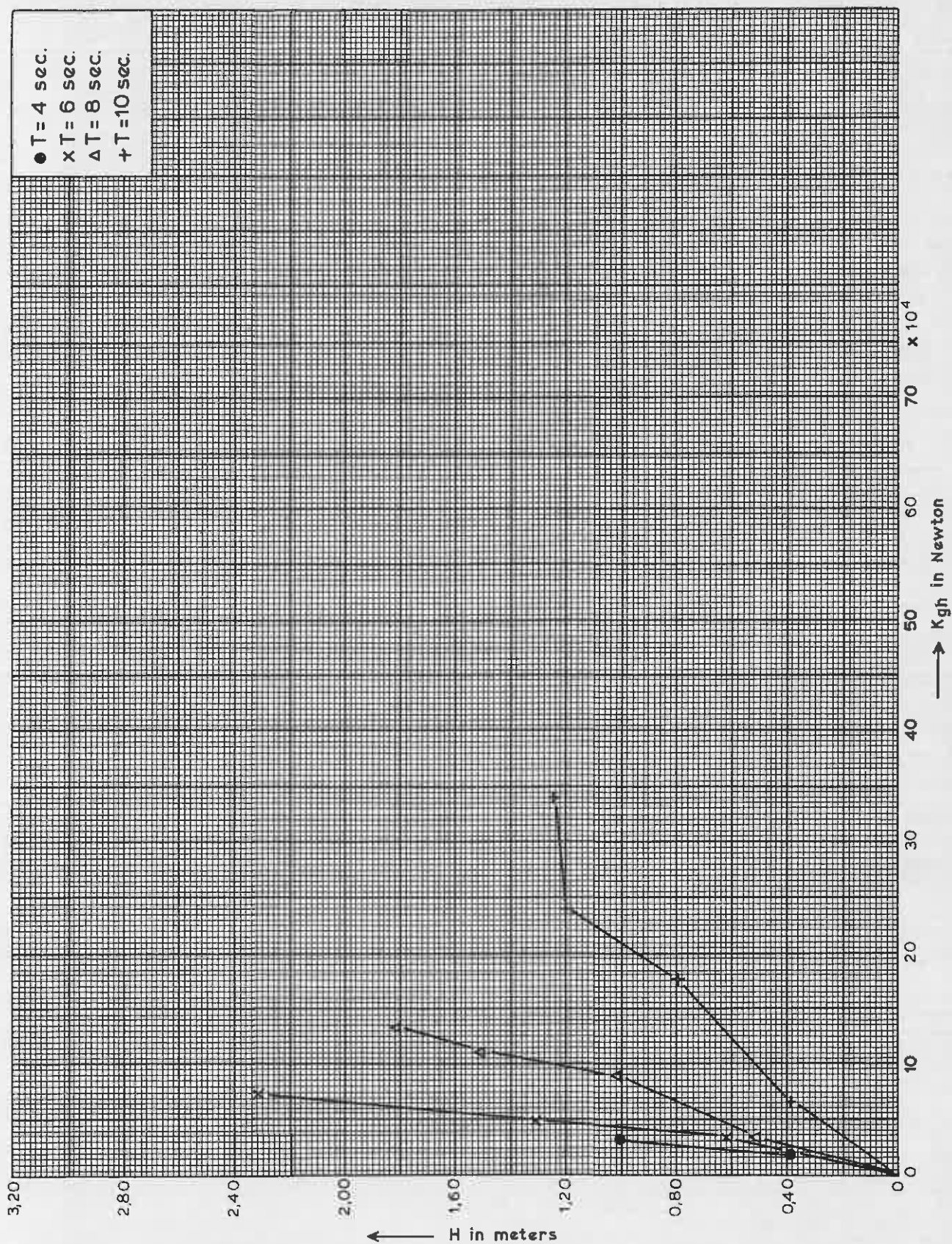
$\alpha = 15^\circ$

$h = 16\text{ m}$

SERIE II

M 1190

FIG. 76



VERBAND K_{gh} EN H

$\alpha = 15^\circ$

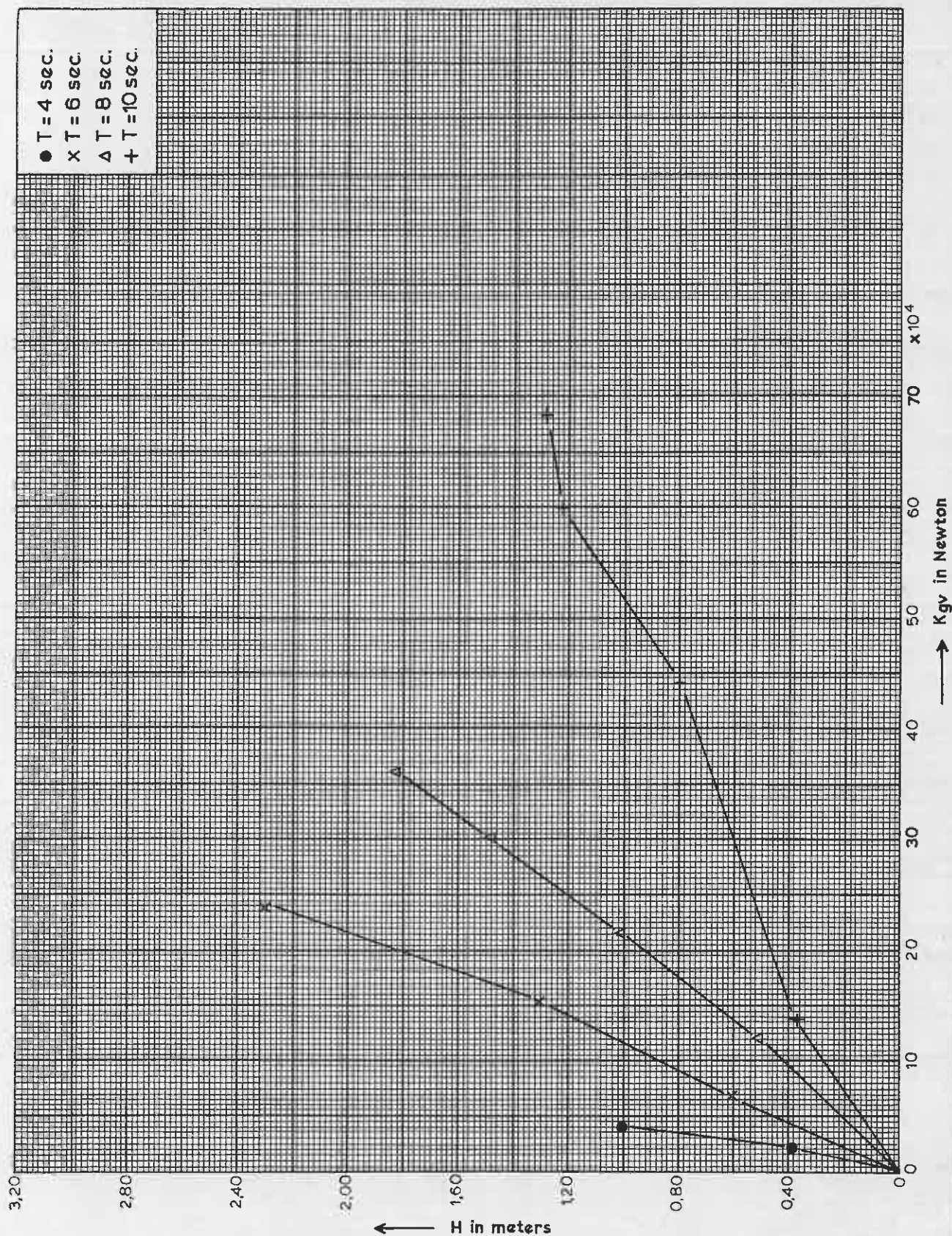
$h = 16 \text{ m}$

SERIE III

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 77



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 15^\circ$

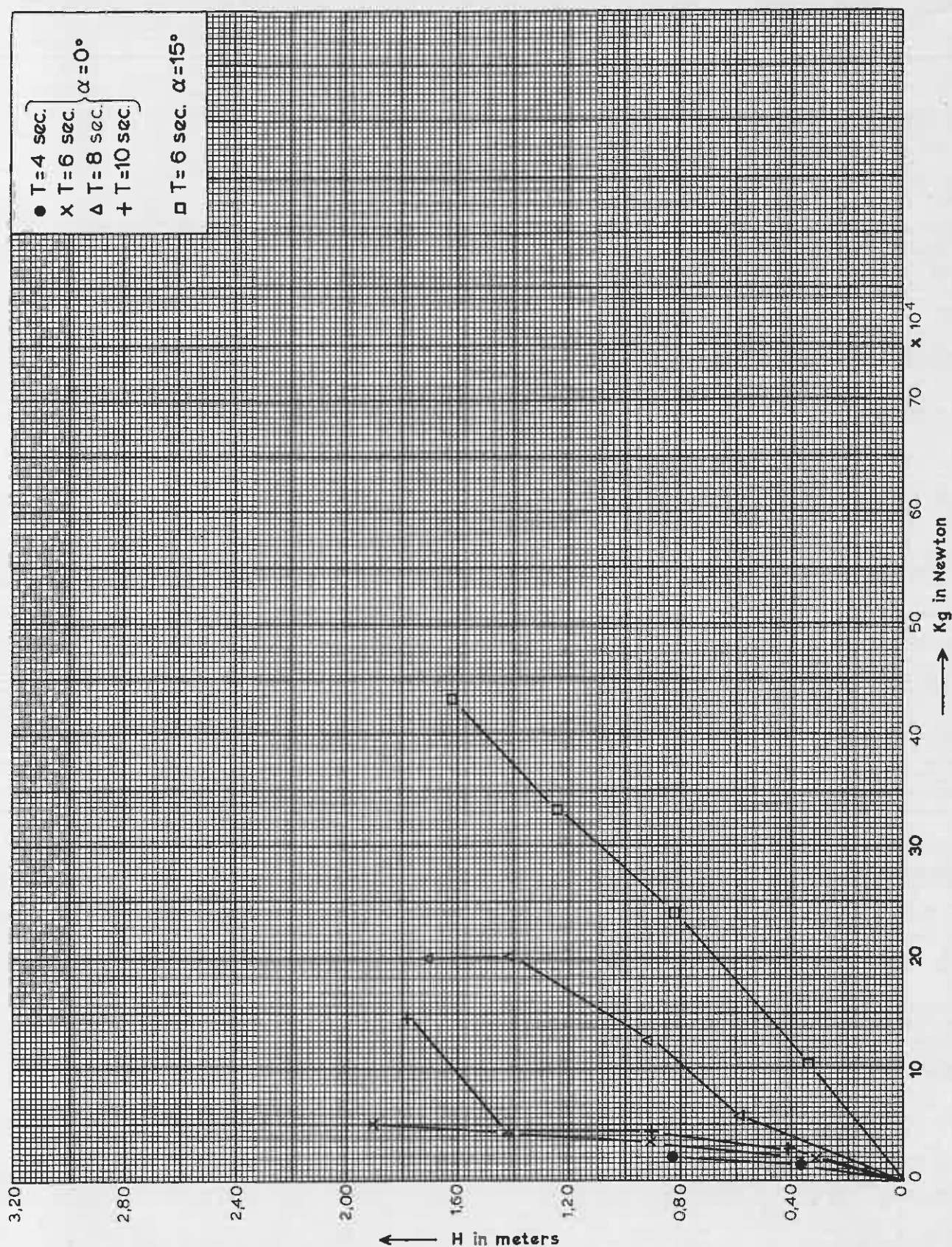
$h = 16 \text{ m}$

SERIE III

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 78



VERBAND K_g EN H

$\alpha = 0^\circ \text{ en } 15^\circ$

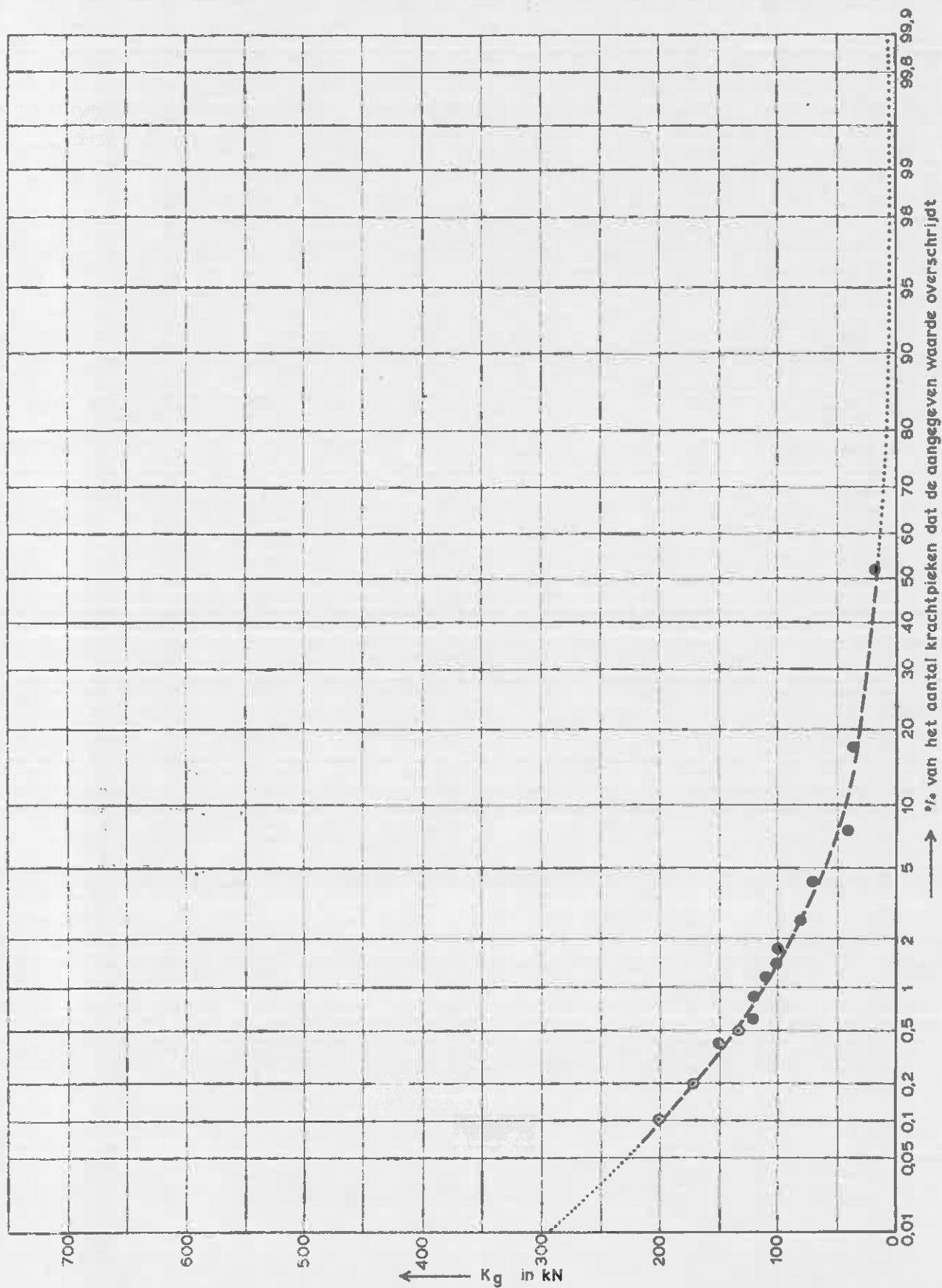
$h = 16 \text{ m}$

SERIE IV

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 79



KRACHTENVERDELING VAN K_g BIJ
ONREGELMATIGE GOLVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

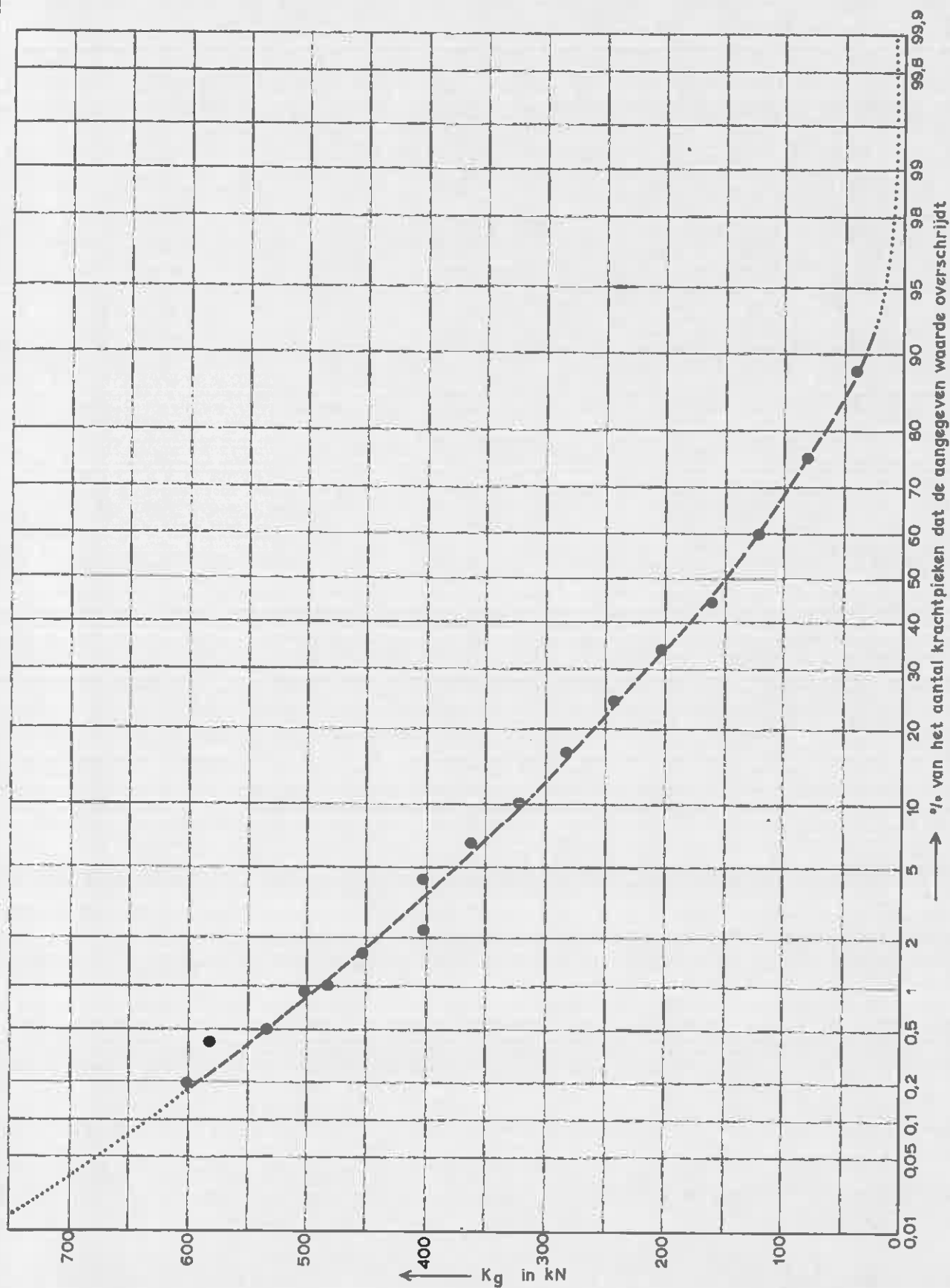
$\alpha = 0^\circ$

$h = 16 \text{ m}$

SERIE IV

M 1190

FIG. 80



KRACHTENVERDELING VAN K_g BIJ
ONREGELMATIGE GOLVEN

$\alpha = 15^\circ$

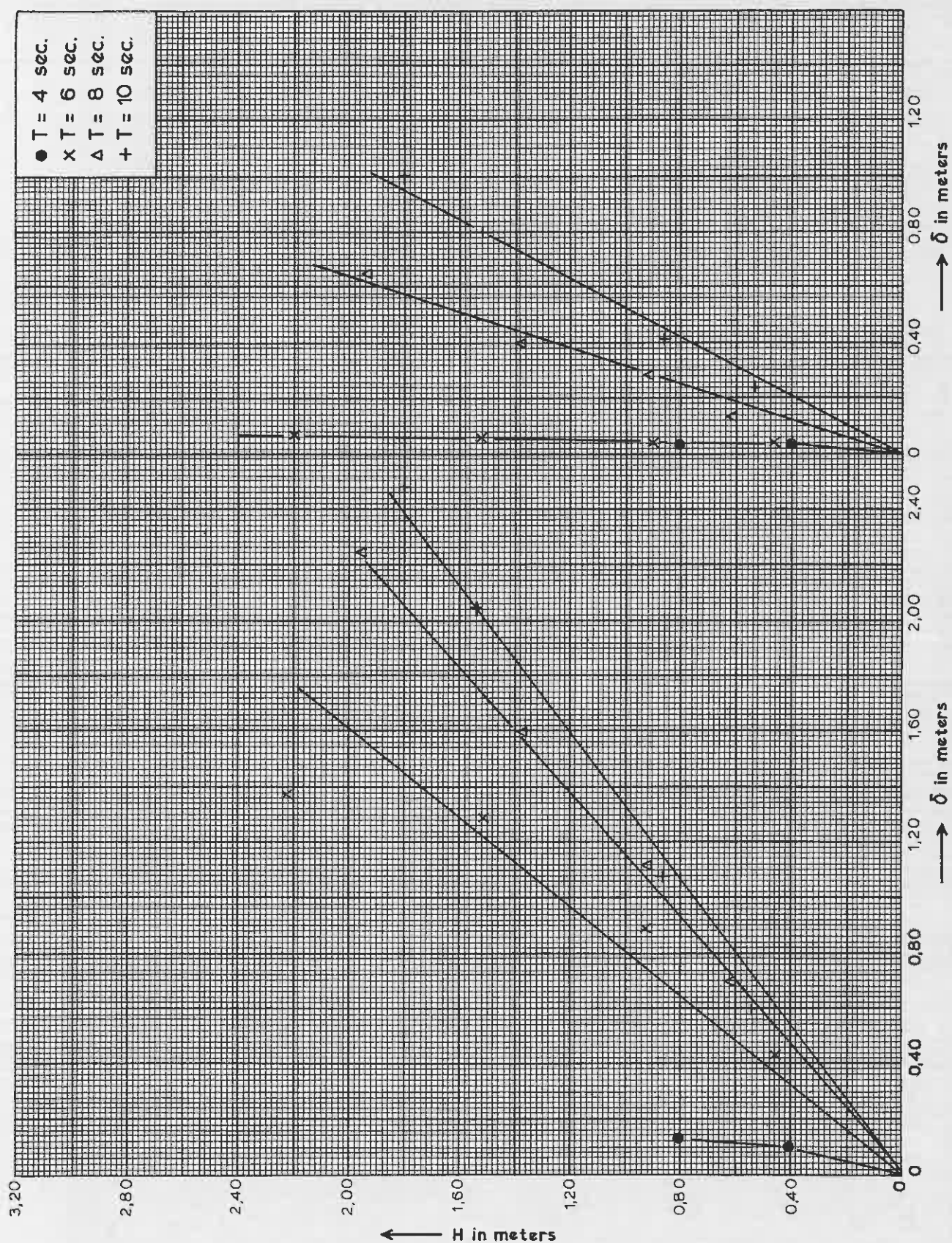
$h = 16\text{m}$

SERIE IV

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 81



VERBAND δ_a, δ_m EN H

$\alpha = 0^\circ$

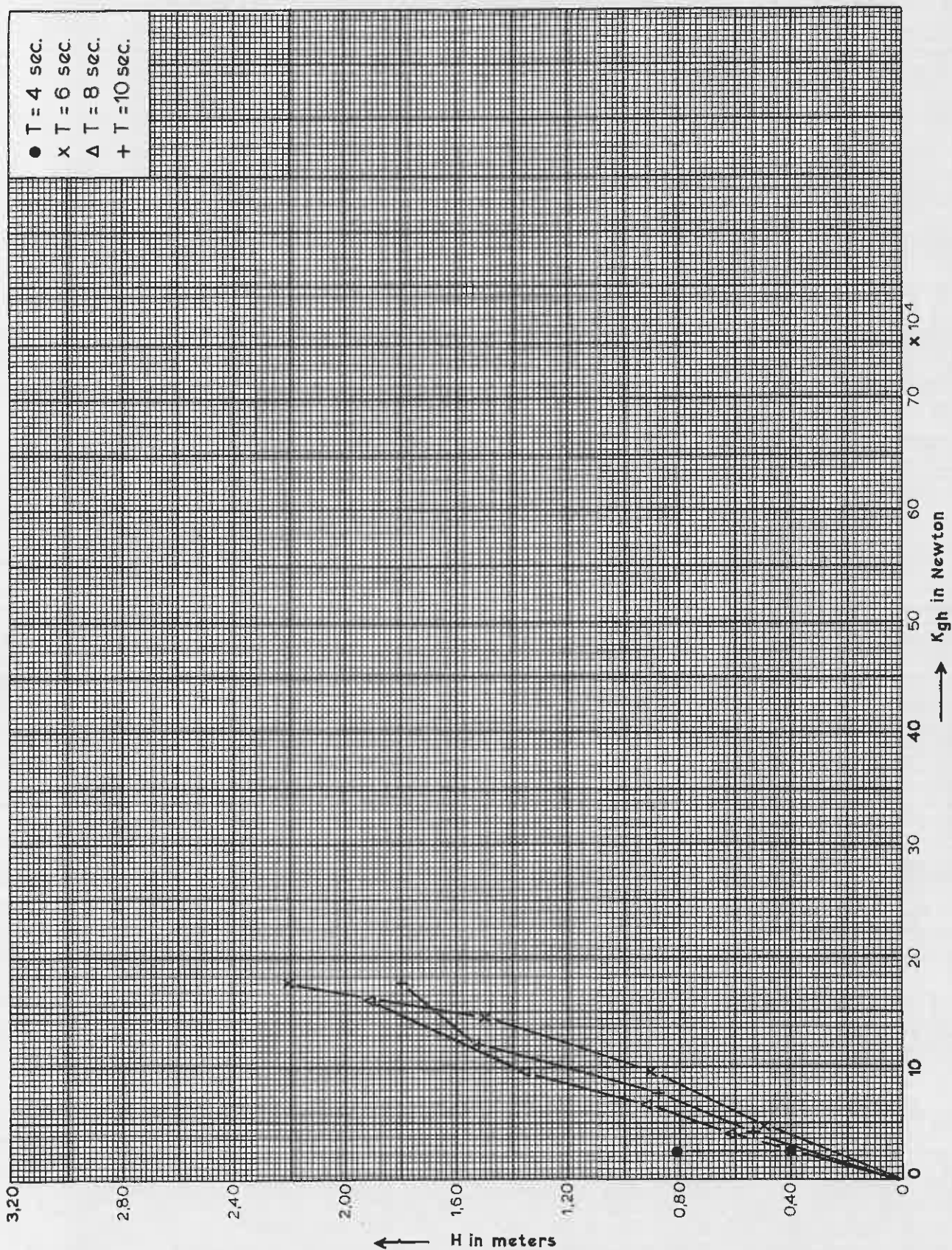
$h = 16\text{m}$

SERIE V

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 82



VERBAND K_{gh} EN H

$\alpha = 0^\circ$

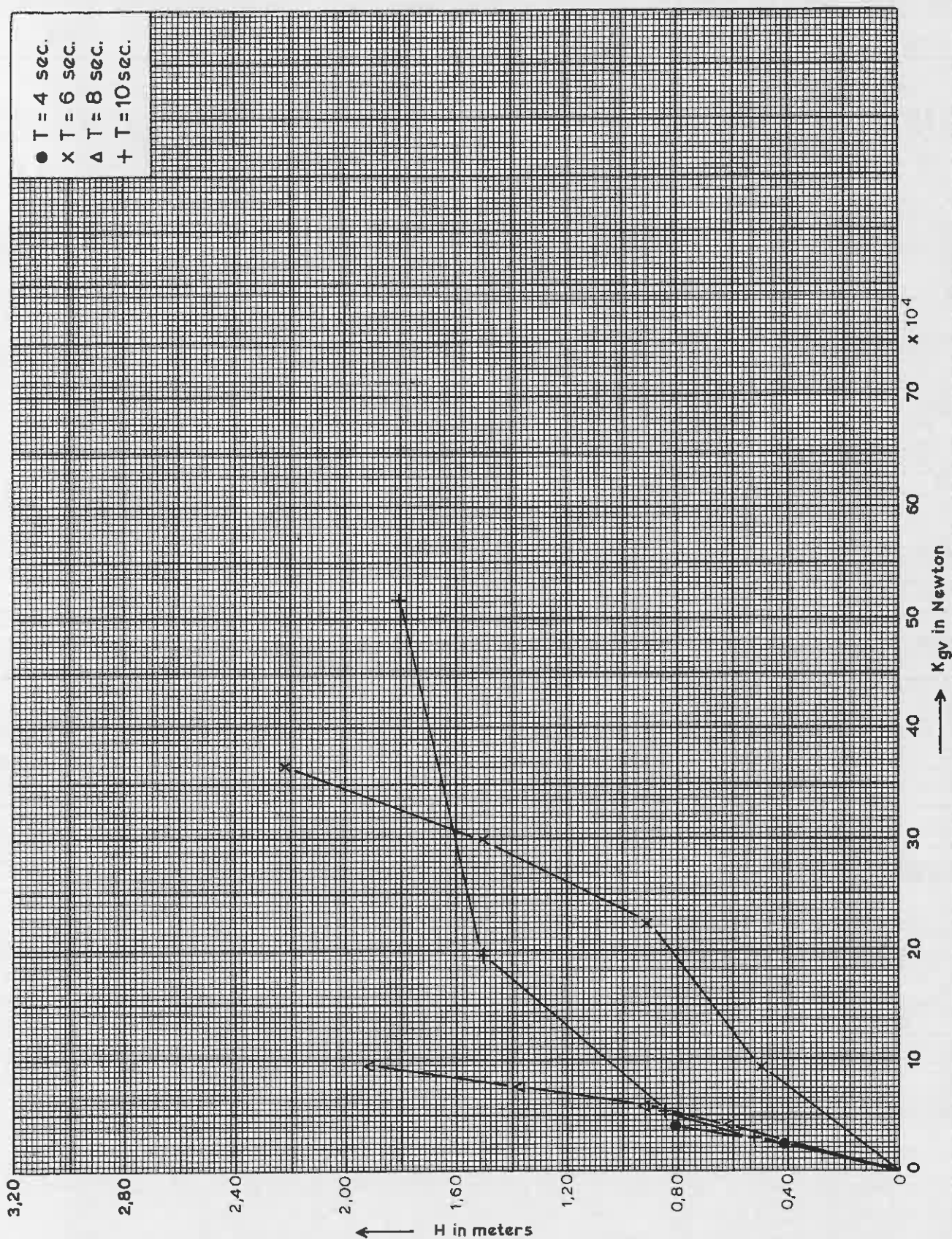
$h = 16 \text{ m}$

SERIE V

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 83



VERBAND K_{gv} EN H

$\alpha = 0^\circ$

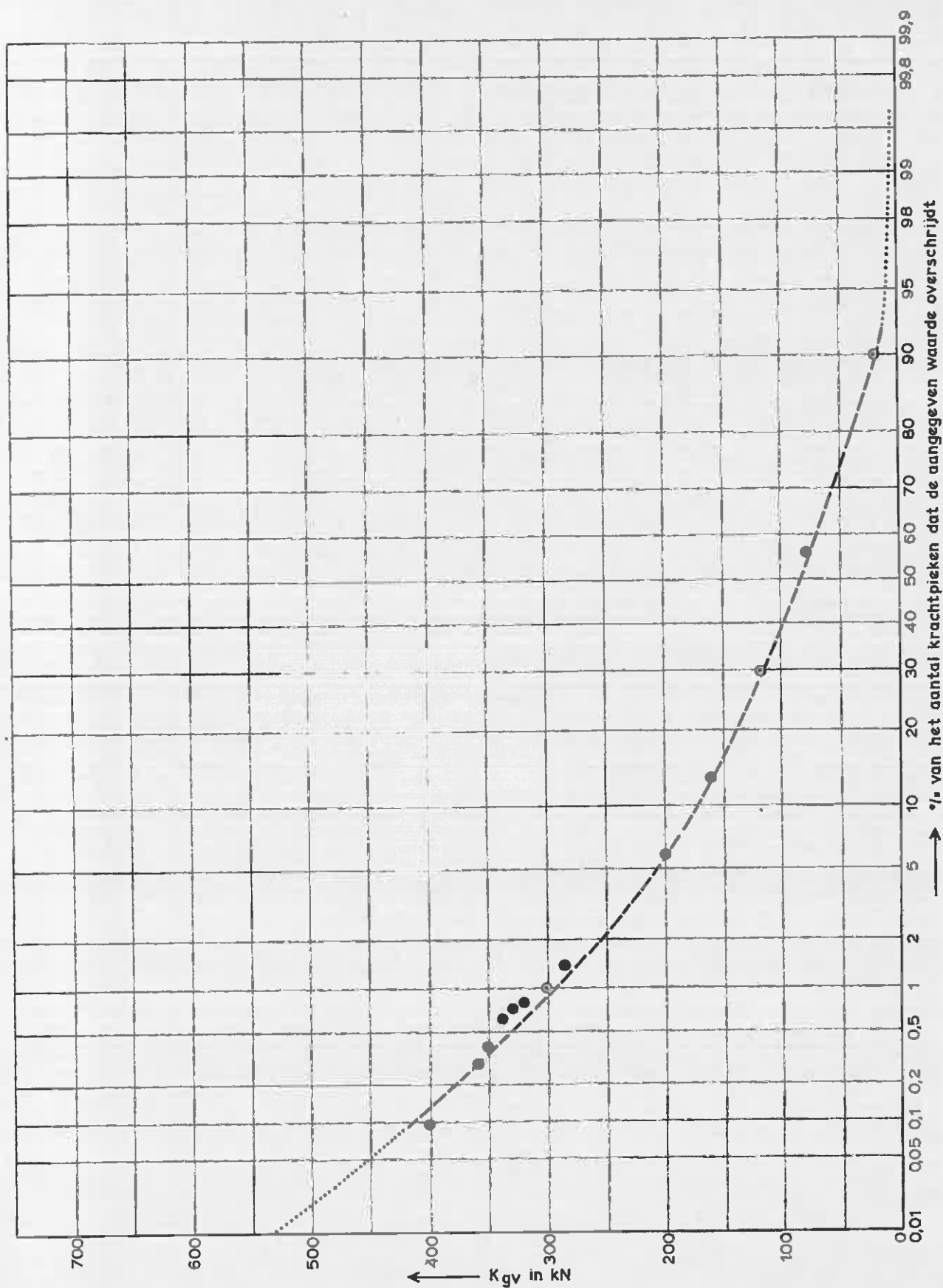
$h = 16 \text{ m}$

SERIE V

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1190

FIG. 84



KRACHTENVERDELING VAN K_{gv} BIJ
ONREGELMATIGE GOLVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$\alpha = 0^\circ$

$h = 16\text{m}$

SERIE V

M 1190

FIG. 85

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands