ZANDTRANSPORT DOOR GOLVEN
EN
DE INVLOED VAN STOORGOLVEN

Dit onderzoek is een deel van het onderzoekprogramma van de vakgroep Kustwaterbouwkunde op het gebied van zandtransport door golven en stroming.
In dit onderzoekprogramma wordt alleen het zandtransport loodrecht op de golfkammen in beschouwing genomen.
Het onderzoek staat onder begeleiding van prof.dr.ir. E.W.Bijker; medewerkers aan het onderzoekprogramma waren achtereenvolgens J.Stuip, A.de Best, J.E.W.Wichers, E.van Hyum en de onderzoeker.

- alles golft -

P.Vellinga
november 1975

INHOUDSOPGAVE

		blz.
	Lijst met gebruikte symbolen	
1.	Inleiding	1
2.	Golfbewegingsvariatie	2
3.	Zandtransportvariatie	4
4.	De relatie tussen $\hat{u}_2$ - variatie en s - variatie	5
5.	Het instationaire karakter van de golfbeweging	7
6.	Ontwikkeling van een zandtransportformule	9
7.	Toetsing van de formule aan de meetresultaten	12
8.	Herziene formule	16
9.	Evaluatie van de formules	24
10.	Relatie zandtransportvariatie - Ursell parameter HL^2/h^3	25
11.	Relatie zandtransportvariatie - basisgolf	27
12.	Nauwkeurigheid van de gevolgde meetmethode	27
13.	Beschouwing over schaal	27
14.	Extra waarnemingen	28
15.	Samenvatting	29
16.	Aanbevelingen voor verder onderzoek	30
17.	Literatuurlijst	31
18.	Tabellen	33
	Bijlagen (in aparte banden)	
19.	Bijlagenlijst	32

Lijst met gebruikte symbolen

		eenheid
a_1	fasehoek	rad
a_2	fasehoek	rad
b_1	fasehoek	rad
$c, c_1, \ldots$	constanten	---
D	korreldiameter	10^{-6} m
$g(x)$	$\hat{u}_1$(versn - vertr) als functie van x	cm^2/sec^3
$\hat{g}$	$(\hat{u}_1(\text{versn - vertr})_{max} - \hat{u}_1(\text{versn - vertr})_{min})/2$	cm^2/sec^3
h	waterdiepte	m
H	golfhoogte	m
H_r^*	ribbelhoogte gemeten met de provo	cm
H_r gec.	gecorr. ribbelhoogte vanwege afwijking provo	cm
k	fasehoek	rad
L	golflengte	m
L_{ov-2}	herhalingsafstand $\hat{u}_2(x)$	m
L_{ov-s}	herhalingsafstand S(x)	m
L_{ov-g}	herhalingsafstand g(x)	m
p	constante	--
S(x) s(x)	zandtransport als functie van x	10^{-7} $m^3/m'sec$
S_a	aanvangszandtransport	10^{-7} $m^3/m'sec$
$\hat{S}$ $\hat{s}$	$S(x)_{max} - S(x)_{min}) / 2$	10^{-7} $m^3/m'sec$
t	tijd	sec
T	golfperiode	sec
u(x,t)	orbitaalsnelheid als functie van x en t	cm/sec
$\bar{u}_1$	$\hat{u}_1$ gemiddeld over de lengte van de goot	cm/sec
$\hat{u}_1 g(x)$	$(\hat{u}_1)^2$(versn-vertr) als functie van x	cm/sec
$\hat{u}_1$	1-ste harm. component van het snelh. sign.	cm/sec

w	hoeksnelheid	rad/sec
x	afstand vanaf het golfschot	m
$\overline{\Delta \frac{du}{dt}}$	gemiddelde van versn-vertr over x	cm/sec^2
$\overset{\frown}{\Delta \frac{du}{dt}}$	$((\text{versn-vertr})_{max} - (\text{versn- vertr})_{min}) / 2$	cm/sec^2

Inleiding

Zandtransport door golven treedt op wanneer de concentratie van de suspensie afhankelijk is van de fase van de golfbeweging. Door van Hyum (1) is beschreven dat er zandtransport tegen de golfvoortplantingsrichting in ontstaat omdat de zandconcentratie tijdens de teruggaande beweging groter is dan de concentratie tijdens de heengaande beweging. Wanneer golven worden opgewekt door een verticaal golfschot, en de waarde van de Ursell parameter (HL^2/h^3) is groter dan 13, dan manifesteren zich stoorgolven. Door het optreden van deze stoorgolven is de waterbeweging niet alleen afhankelijk van de golfperiode, de golfhoogte en de waterdiepte, maar ook van de afstand vanaf het golfschot.

Door C.H.Hulsbergen (2) is aangetoond dat door het optreden van stoorgolven ook het zandtransport afhankelijk is van de afstand vanaf het golfschot. Om inzicht te krijgen in deze afhankelijkheid zijn 27 proeven gedaan met de volgende combinaties van de onafhankelijke parameters:

periode	T sec	1.50	1.70	1.90
waterdiepte	h m	0.20	0.25	0.30
rel. golfhoogte	Hh^{-1}	0.2	0.3	0.4

Bij al deze combinaties is de waarde van de Ursell parameter groter dan 13. Om de bovengenoemde afhankelijkheid zo goed mogelijk vast te leggen is om de 0.50 m. zowel de waterbeweging als het zandtransport gemeten. Voor de weergave hiervan wordt verwezen naar bijlage I.

De proeven zijn uitgevoerd in de Leidse Goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Deze goot is totaal 15 m. lang, 0.50 m. breed en 0.50 m. diep. In deze goot worden de golven opgewekt door een horizontaal-translerend verticaal golfschot. De zandbodem (D50=250u) wordt in het midden onderbroken door een vlak stuk waarop geen zand ligt. Deze onderbreking dient als randvoorwaarde bij de bepaling van het zand-

transport met behulp van de continuïteitsvergelijking.
De waterbeweging is gemeten met een micromolen op 1/3 h boven de bodem. De tijdsduur van de proeven bedraagt ca. 30 min. Voor verdere bijzonderheden wordt verwezen naar bijlage II.

Golfbewegingsvariatie

De golfbeweging varieert over de lengte van de goot. Bij een harmonische analyse van het snelheidssignaal blijkt duidelijk dat de variatie zich na een bepaalde afstand in de zelfde vorm herhaalt. Deze herhalingsafstand is gelijk aan de lengte waarover de stoorgolf (periode T/2) wordt ingehaald door de hoofdgolf (2). Deze herhaling manifesteert zich vooral in het verloop over de lengte van de goot van de amplitude van de tweede harmonische snelheidscomponent (zie fig. 1).

Harmonische analyse van de Eulerse snelheid:

$$u(x,t) = u_0(x) + \hat{u}_1(x)\cos(wt+a_1) + \hat{u}_2(x)\cos(2wt+a_2) + \ldots$$

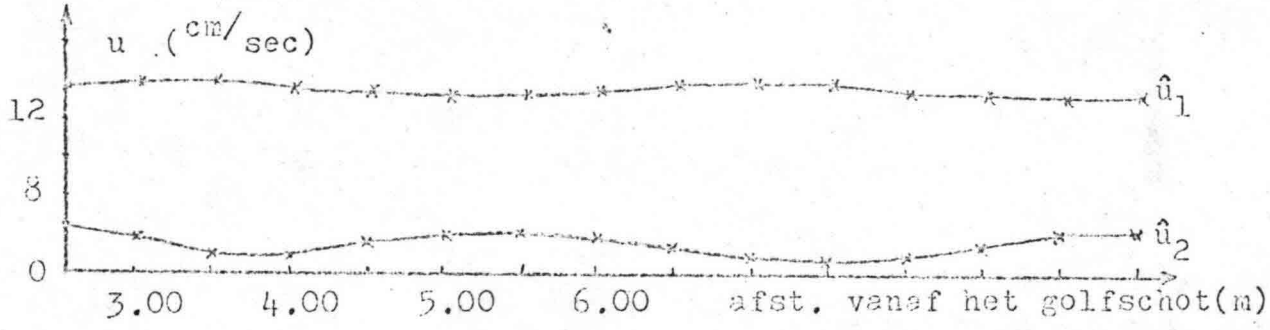


fig. 1

Om een indruk te krijgen van de herhalingsafstand is bij iedere proef de afstand tussen twee opvolgende maxima van de $\hat{u}_2(x)$ gemeten en is deze afstand uitgezet tegen de waterdiepte (zie fig. 2). Tevens zijn in deze figuur de meetresultaten van Hulsbergen ingevuld.
Mede gezien de goede overeenstemming van deze resultaten mag worden aangenomen dat de theorie over stoorgolven zoals beschreven door Hulsbergen(2) ook van toepassing is op de proeven welke in de Leidse Goot zijn gedaan.

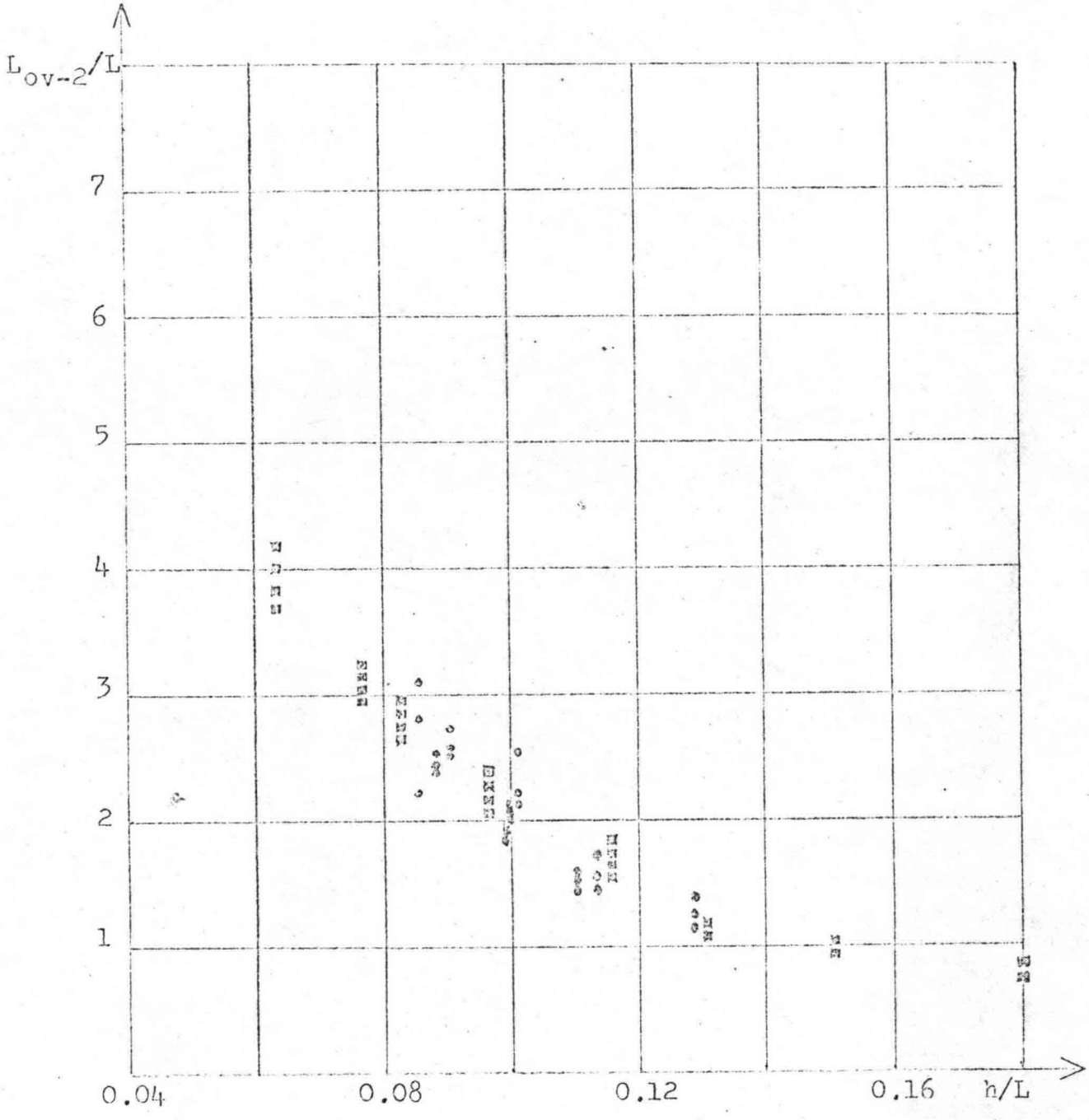

L_{ov-2}/L
7
6
5
4
3
2
1
0.04
0.08
0.12
0.16
h/L
gemeten in de Leidse goot
gemeten door Hulsbergen

fig. 2

Zandtransportvariatie

Uit de proeven blijkt (zie bijlage I) dat het zandtransport eveneens varieert met de afstand vanaf het golfschot. Over de lengte van de goot wordt afwisselend zandtransport gevonden in de golfvoortplantingsrichting en er tegen in. Door deze afwisseling in transportrichting worden banken gevormd (zie fig. 3).

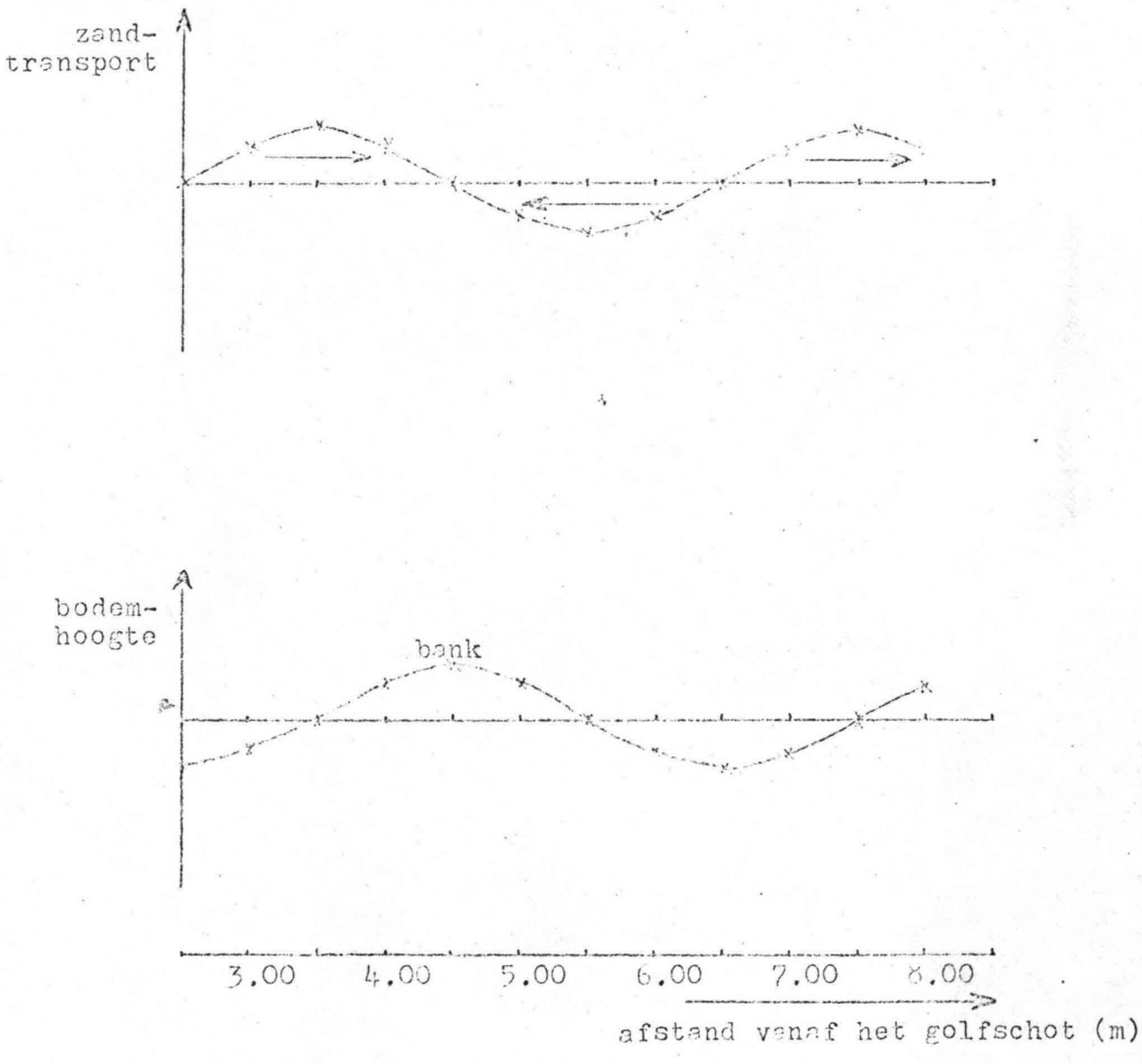
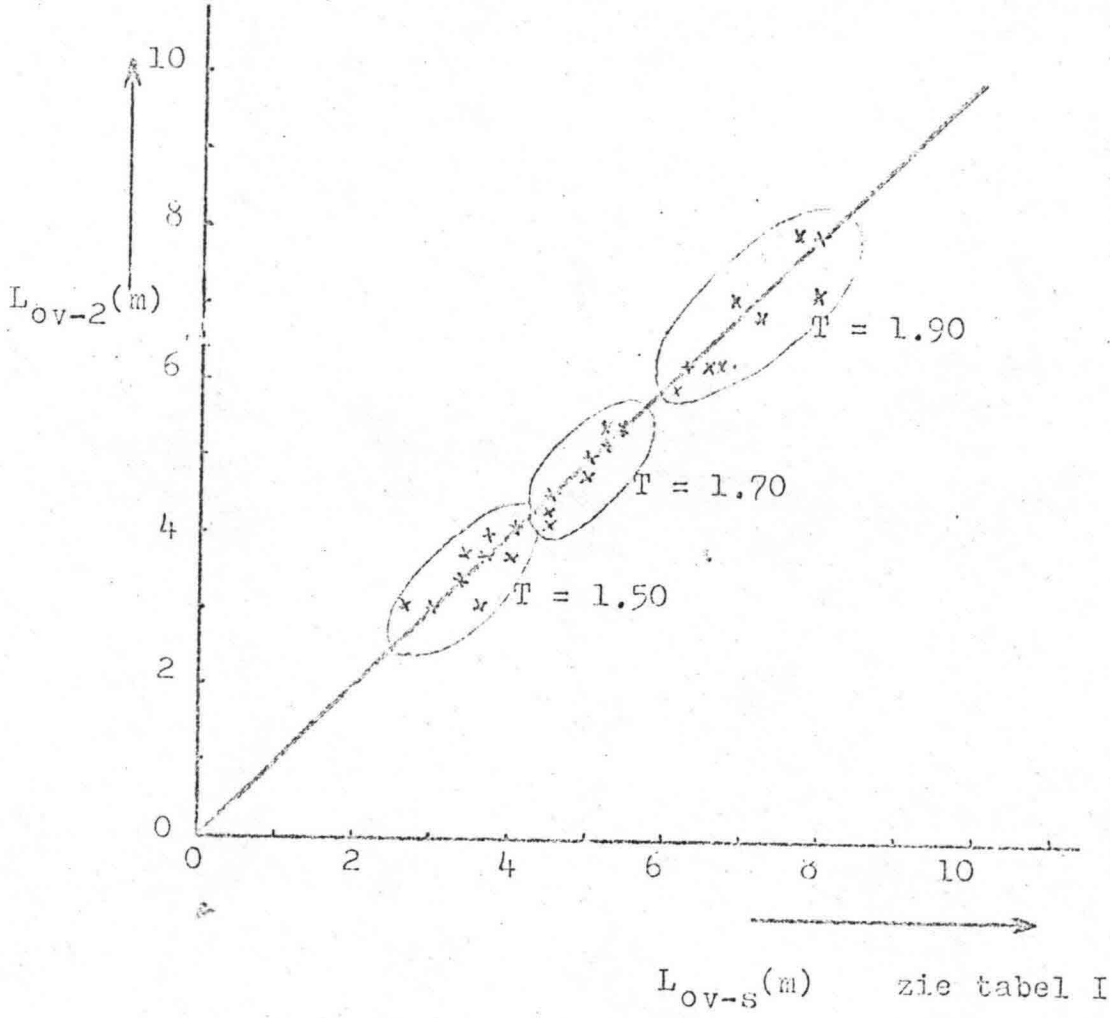


fig. 3

De relatie tussen $\hat{u}_2$-variatie en S-variatie

Om aan te tonen dat het ontstaan van deze banken samenhangt met het optreden van stoorgolven wordt voor alle proeven de afstand tussen twee plaatsen waar het zandtransport maximaal is (L_{ov-s}) uitgezet tegen de herhalingsafstand van de tweede harmonische snelheidscomponent (L_{ov-2}) (zie fig.4).



zie tabel I

fig. 4

Uit deze grafiek blijkt dat de afstanden nagenoeg gelijk zijn. Hieruit mag worden geconcludeerd dat de variatie in het zandtransport wordt veroorzaakt door het optreden van stoorgolven.

Om de variatie naar de plaats van deze beide grootheden te vergelijken is het mogelijk de waarnemingenkromme bij elke proef te benaderen door een harmonische functie (zie fig.5 , proef 5).

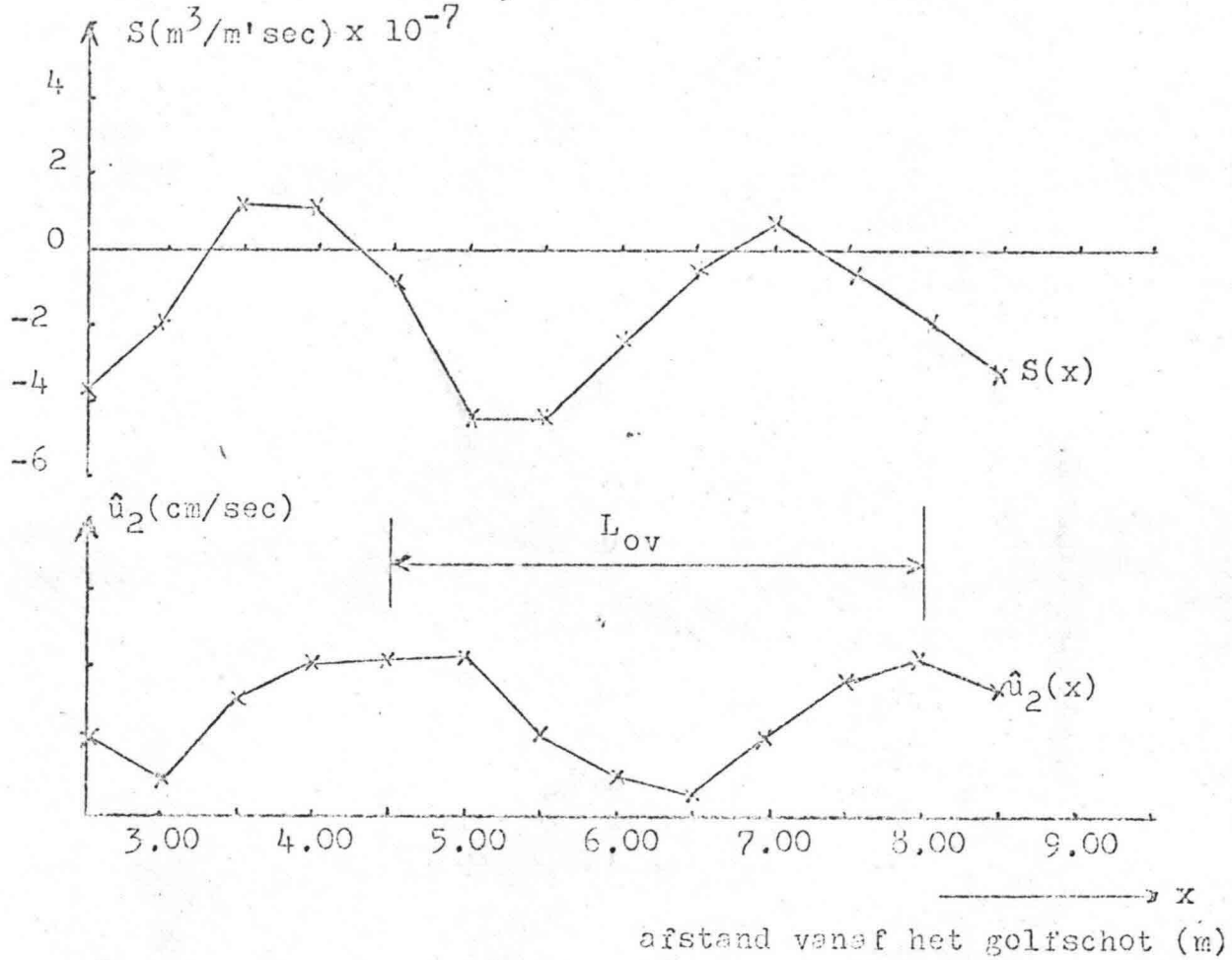


fig. 5 zie ook proef 5 bijlage I

$$s(x)=\overline{s_0}+\hat{s}_1\cos(2\pi x/L_{ov}+a_1)$$

$$\hat{u}_2(x)=\overline{(\hat{u}_2)_0}+\widehat{(\hat{u}_2)}_1\cos(2\pi x/L_{ov}+b_1)$$

Bij de analyse van de 27 proeven blijkt dat het faseverschil tussen s(x) en $\hat{u}_2(x)$ bij alle proeven nagenoeg $\pi/2$ bedraagt: $a_1 = b_1 + \pi/2$.

Nu kan voor al deze proeven een relatie gevonden worden tussen de $(\hat{u}_2)_1$ en de $\hat{s}_1$. Het is echter niet mogelijk uitgaande van de waterbeweging op een bepaalde plaats x_1 het zandtransport op deze plaats te berekenen omdat bij een gemeten $\hat{u}_2(x_1)$ twee verschillende waarden van s mogelijk zijn. Dus voor vastleggen van een relatie tussen s en $\hat{u}_2$ is niet alleen de grootte van de $\hat{u}_2$ nodig, maar ook de fase van de u_2 ten opzichte van de fase van de u_1. Vanwege de moeilijkheid om deze informatie op eenvoudige en doorzichtige wijze in een formule onder te brengen ligt het voor de hand te zoeken naar een andere parameter om de golfbewegingsvariatie vast te leggen.

Het instationaire karakter van de golfbeweging

Aanvankelijk werd in het onderzoek naar zandtransport door golven en stroming voornamelijk gebruik gemaakt van de formules welke ontwikkeld waren voor de beschrijving van het sedimenttransport door eenparige stroming. Bij de bepaling van de schuifspanning en de opwoeling werd op de eenparige stroomsnelheid v een gedeelte van de u_{max} gesuperponeerd. De snelheidsverandering in de tijd werd niet in beschouwing genomen. Wel wordt duidelijk dat voor de beschrijving van het begin van bewegen niet volstaan kan worden met de u_{max} maar dat de periode mede bepalend is. Vergelijk hiervoor de formule welke ontwikkeld is door Komar en Miller (3): voor het begin van bewegen geldt de relatie

$$\frac{u_m^2}{(\rho_s - \rho) g D} = 0{,}30 \left(\frac{d_o}{D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$u_m = u_{max}$

d_o = orbitale diameter = $u_m \, T/\pi$

bij een bepaalde zandsoort geldt dan dat
ρ_s en D liggen vast en zijn constant

$c_1 u_m^2 = (d_o)^{\frac{1}{2}} \Longrightarrow$ c_1, c_2 en c_3 constanten

$c_2 u_m^4 = d_o \Longrightarrow$

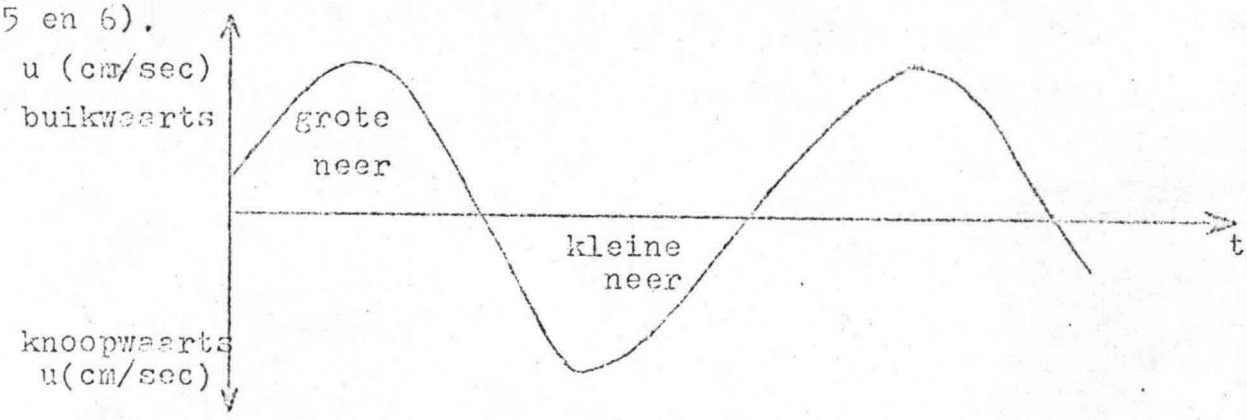
$u_m^4/d_o = c_2$

$d_o = u_m \; T/\pi$ $\Longrightarrow u_m^3/T = c_3$

Dat wil zeggen dat voor het begin van bewegen de waarde u_m^3/T een bepaalde waarde moet overschrijden.
Als nu wordt aangenomen dat u_m/T een maat is voor de versnelling, dan blijkt dat voor het begin van bewegen moet gelden dat $c_4 (u_m^2) du/dt$ een bepaalde waarde bereikt.

Ook bij visuele waarneming blijkt dat de snelheidsverandering in grote mate bepalend is voor de waterbeweging aan de bodem. Bij een geleidelijke snelheidsverandering kan de "turbulente grenslaag" zich over een grotere hoogte ontwikkelen dan bij een grote snelheidsverandering. De neerdiameter bij een kleine du/dt is dan ook groter dan bij een grote du/dt.

Ook bij staande golven is het zelfde verschijnsel waargenomen door de Best en Wichers. De versnelling in de richting van de knoop is groter dan de versnelling in de richting van de buik (zie fig.6). Tijdens de knoopwaartse beweging wordt daarom een neer gevormd die kleiner is dan de neer die gevormd wordt tijdens de buikwaartse beweging (zie bijlage II en 4, 5 en 6).



snelheidsverdeling in een staande golf zoals gemeten door Wichers

fig. 6

Om de golfbeweging op eenduidige wijze te karakteriseren met behulp van een snelheidsveranderingsparameter is het nodig dat de snelheidsverdeling in de tijd enigszins wordt geschematiseerd (zie fig.7). Zie ook fig. 7-a op blz. 9-a.

u is positief: gericht in de golfvoortplantingsrichting

u is negatief: gericht tegen de golfvoortplantingsrichting in

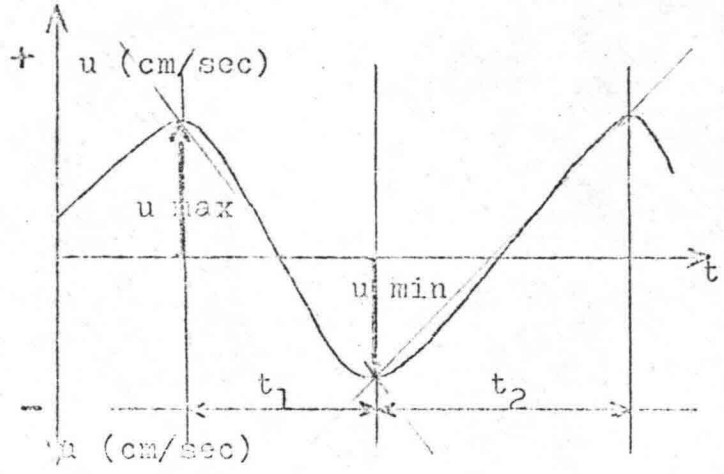


fig. 7

versnelling = $(u_{max}-u_{min}) / t_2$

vertraging = $(u_{max}-u_{min}) / t_1$

In de verdere beschouwing wordt de geschematiseerde max. versnelling en max. vertraging altijd aangeduid met versnelling resp. vertraging.

Ontwikkeling van een zandtransportformule

In dit onderzoek is door visuele waarneming een relatie geconstateerd tussen de neervorming en de optredende snelheidsverandering. In het volgende wordt uitgaande van deze relatie en door rangschikking van de onafhankelijke parameters een zandtransportformule ontwikkeld. Later wordt deze formule getoetst aan de gemeten waarnemingen.

Het water voert een oscillerende beweging uit boven de zandbodem. Bij alle proeven treedt daarbij ribbelvorming op. Aan weerszijden van de ribbel wordt afwisselend een neer opgewekt. De zandinhoud van de neer wordt door de omkering van de stroomrichting in suspensie gebracht. Bij toenemende diameter en bij toenemende draaisnelheid neemt ook de zandinhoud toe.

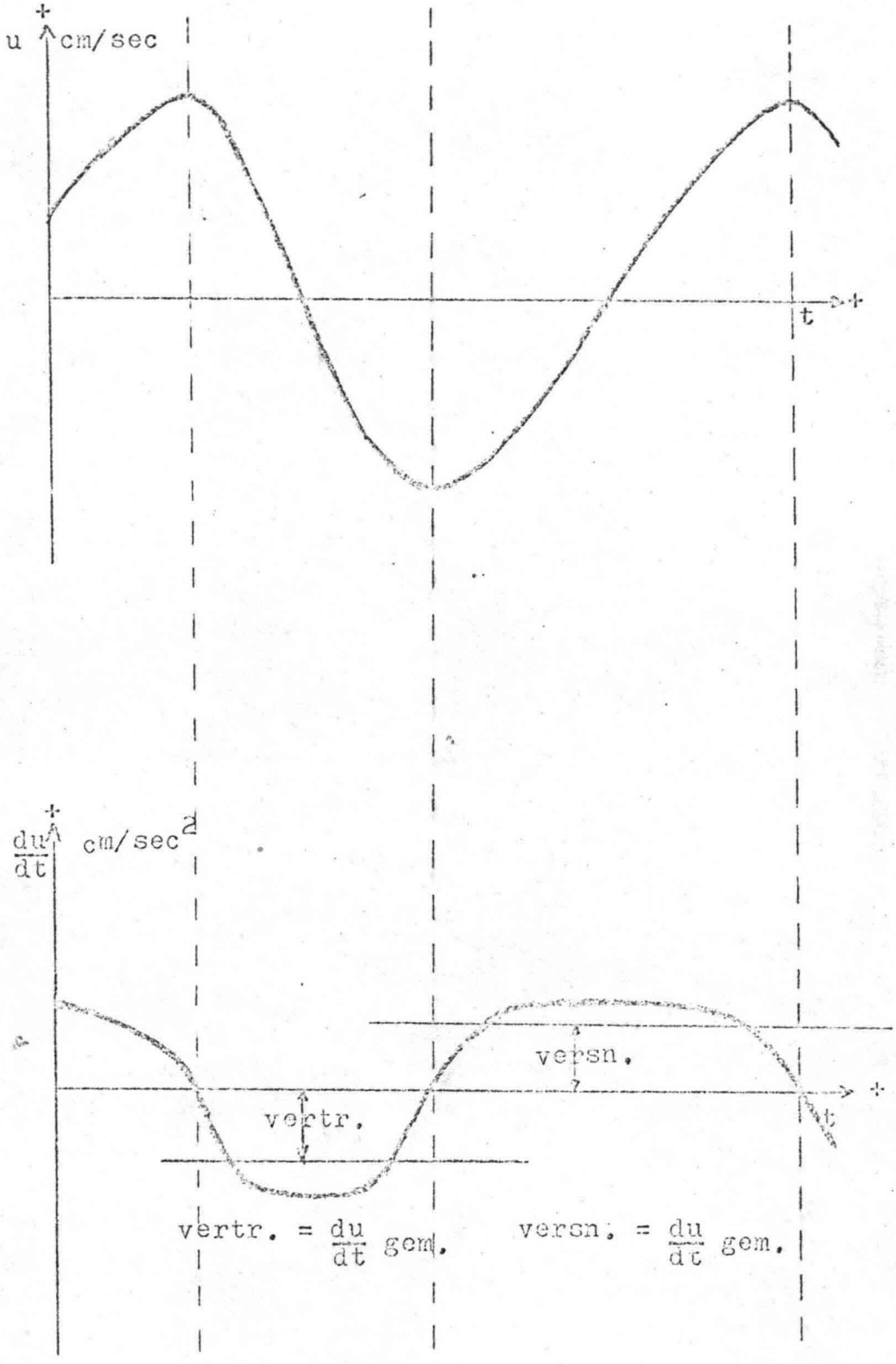

+
u
cm/sec
t
+
+
du/dt
cm/sec²
versn.
vertr.
t
vertr. = du/dt gem.
versn. = du/dt gem.

fig. 7a

Tijdens de heengaande beweging wordt een neer gevormd aan de voorzijde van de ribbel; de diameter van deze neer neemt af bij toenemende versnelling. De draaisnelheid van deze neer neemt toe bij toenemende u_{max}. De zandhoeveelheid in de neer neemt dus toe bij afnemende versnelling en bij toenemende draaisnelheid.
Wanneer de stroomrichting omdraait wordt de neer omhooggeduwd. De hoogte welke de uiteenvallende neer bereikt neemt toe met de vertraging, dus de concentratie van de suspensie neemt toe bij toenemende vertraging'). De zanddeeltjes die nu in suspensie zijn worden getransporteerd door de u_{min}, zie fig. 7 b.
Totaal wordt op deze wijze gevonden dat het zandtransport tijdens de teruggaande beweging op de volgende wijze met de onafhankelijke parameters samenhangt:
zandtransport in neg. richting :: 1/versn., u_{max}, vertr., $|u_{min}|$.
Analoog geldt voor het zandtransport tijdens de heengaande beweging:
zandtransport in pos. richting:: 1/vertr., $|u_{min}|$, versn., u_{max}.
Om tot een eerste benadering te komen wordt vooronderstelld dat voor alle relaties een lineair verband geldt. Het resulterend zandtransport in positieve richting gedurende een golfperiode wordt dan weergegeven door de volgende betrekking:

$$s' = c_1\left(u_{max}|u_{min}|\frac{versn}{vertr} - |u_{min}|u_{max}\frac{vertr}{versn}\right) =$$

$$c_1 u_{max}|u_{min}|\frac{(versn^2 - vertr^2)}{versn \cdot vertr} =$$

$$c_1 u_{max}|u_{min}|\frac{(versn + vertr)(versn - vertr)}{versn \cdot vertr}$$

Volgens de schematisatie op blz. 9 geldt

$$versn = \frac{u_{max} - u_{min}}{t_2}$$

$$vertr = \frac{u_{max} - u_{min}}{t_1}$$

Ingevuld in de vergelijking levert dit

$$c_1 u_{max}|u_{min}|\frac{(u_{max} - u_{min})(1/t_2 + 1/t_1)(versn - vertr)}{(u_{max} - u_{min})^2/(t_2 \cdot t_1)} =$$

') zie blz. 11

$$S' = c_1 \frac{u_{max}|u_{min}|}{(u_{max}-u_{min})} \cdot \frac{t_2 + t_1}{t_2 \cdot t_1} \cdot \frac{(versn - vertr)}{1/(t_2 \cdot t_1)} =$$

$$s' = c_1 \frac{u_{max}|u_{min}|}{(u_{max}-u_{min})} \cdot T \cdot (versn - vertr)$$

Het zandtransport per seconde is S=S'/T

$$S = c \frac{u_{max}|u_{min}|}{(u_{max}-u_{min})} \quad (versn - vertr)$$

Als nu wordt aangenomen dat

$$u_{max}|u_{min}| = (\hat{u}_1)^2$$

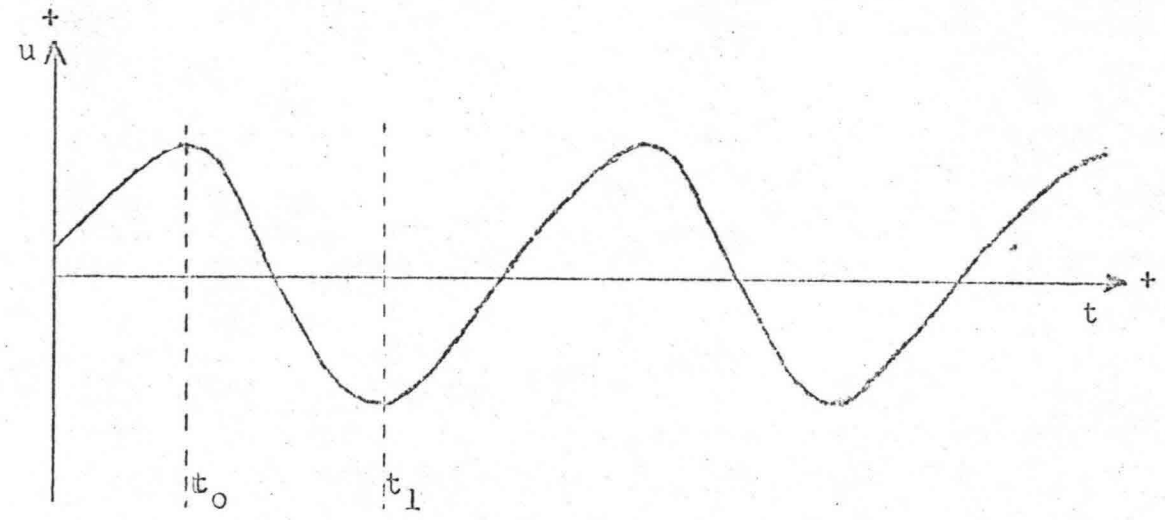
$$u_{max}-u_{min} = 2\hat{u}_1$$

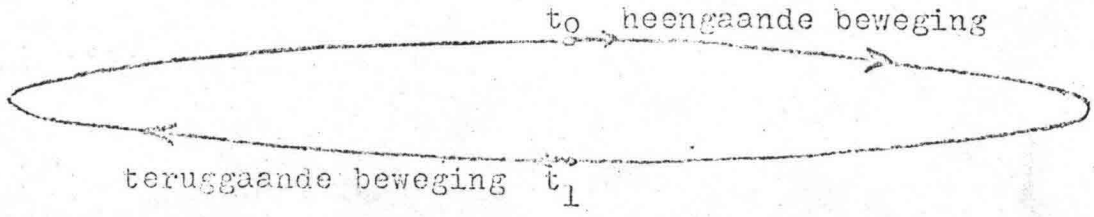
dan gaat de vergelijking over in

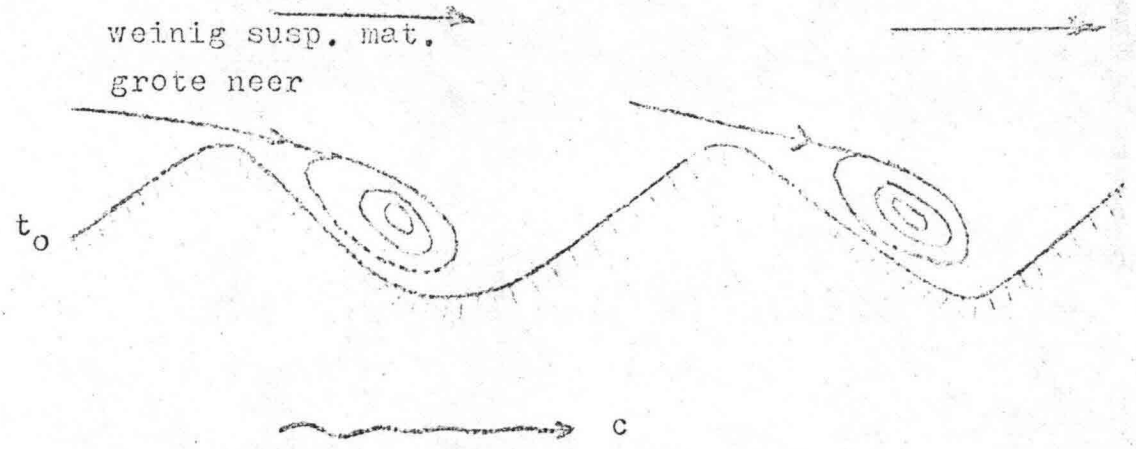
$$S = c_2 \cdot \hat{u}_1 \cdot (versn - vertr)$$

Deze formule geeft aan dat, bij een bepaalde zandsoort, een lineaire relatie bestaat tussen de $\hat{u}_1(versn - vertr)$ en het resulterend zandtransport. In de formule is de dimensie van het linkerlid niet gelijk aan de dimensie van het rechterlid omdat de materiaaleigenschappen en de versnelling van de zwaartekracht niet in de afleiding zijn betrokken.

') De draaiende neer bezit een bepaalde traagheid. Bij snelheidsomkering wordt deze neer met inhoud uit het ribbeldal gelicht. Hoe groter de vertraging deste groter is de kracht waarmee de neer wordt op-geduwd, het zwaartepunt van de neer-inhoud zal een hoger niveau bereiken. Het suspensiemateriaal zal dan ook verder worden meegevoerd.


+
u
+
t
t_o
t_1


t_o heengaande beweging
teruggaande beweging t_1


weinig susp. mat.
grote neer
t_o

c

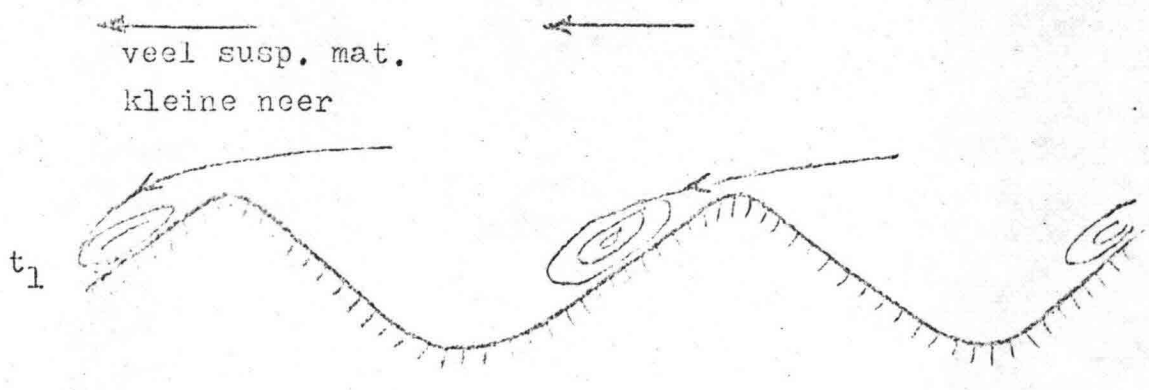

veel susp. mat.
kleine neer
t_1

fig. 7b

Toetsing van de formule aan de meetresultaten

Bij alle proeven is om de 0.50 m. het zandtransport en de waterbeweging gemeten. Om de formule te toetsen is het mogelijk bij elke proef op elke plaats, het gemeten zandtransport S te vergelijken met de waarde van $\hat{u}_1$(versn - vertr). Aangezien per proef de $\hat{u}_1$ weinig varieert is om een eerste indruk te krijgen van de betrouwbaarheid van de formule de waarde van de (versn - vertr), bij elke proef voor elke plaats, uit het gemeten snelheidsverloop berekend en uitgezet als functie van de afstand vanaf het golfschot (zie bijlage I). Hierbij blijkt dat het verloop naar de plaats van het gemeten zandtransport overeenkomt met het verloop van de gemeten waarde van (versn - vertr). Ook blijkt dat bij 80% van de metingen het teken van S overeenkomt met het teken van de (versn - vertr).

Gezien de aard van het verloop ligt het voor de hand beide waarnemingenkrommen te benaderen door middel van een harmonische functie.

$$S(x) = \overline{S(x)} + \hat{S}\sin\left(\frac{2\pi x}{L_s} + K_1\right)$$

$$g(x) = \overline{g(x)} + \hat{g}\sin\left(\frac{2\pi x}{L_g} + K_2\right)$$

waarbij

x is de afstand vanaf het golfschot

S(x) is zandtransport als functie van x

g(x) is de $\hat{u}_1$(versn - vertr) als functie van x

$\overline{S(x)}$ is het gemiddelde van S(x) naar de plaats

$\overline{g(x)}$ is het gemiddelde van g(x) naar de plaats

$\hat{S} = (S_{max} - S_{min})/2$

$\hat{g} = (\left[\hat{u}_1(\text{versn} - \text{vertr})\right]_{max} - \left[\hat{u}_1(\text{versn} - \text{vertr})\right]_{min})/2$

K_1 is fase hoek

K_2 is fase hoek

L_s is herhalingsafstand s-variatie

L_g is herhalingsafstand g-variatie

In plaats van de formule te toetsen aan alle 540 gemeten waarnemingen is het nu mogelijk de twee harmonische functies met elkaar te vergelijken. Voor het vergelijken van twee enkelvoudige harmonische functies is het alleen nodig de golflengte, de fase, het gemiddelde en de amplitude te vergelijken.

Golflengte.

De golflengte van de functie S-gemet.is in fig.8 uitgezet tegen de golflengte van de functie $\hat{u}_1$(versn - vertr)-gemeten. Vanwege de goede overeenkomst mag worden aangenomen dat de golflengten van de beide harmonische functies aan elkaar gelijk zijn. Als deze golflengte wordt vergeleken met de inhaallengte van de stoorgolf (fig.4) dan blijkt duidelijk dat het verloop in de (versn - vertr) wordt veroorzaakt door het optreden van stoorgolven.

Fase.

Noem de afstand tussen de plaats waar S een maximum (of minimum) bereikt en de plaats waar de waarde van versnelling minus vertraging een maximum (of minimum) bereikt Δx. Δx varieert; zowel positief als negatief. de variatie is bij alle proeven echter kleiner dan 1/4 golflengte (L_{ov-s}). Op grond hiervan mag worden aangenomen dat de afwijkingen worden veroorzaakt door meetfouten.

Gemiddelde.

Bij de toetsing van het gemiddelde naar de plaats, van S-gemeten en $\hat{u}_1$(versn - vertr)-gemeten blijkt dat deze beide grootheden bij alle proeven een negatieve waarde hebben. Wanneer $\overline{S(x)}$ wordt uitgezet tegen $\overline{g(x)}$ (zie fig. 9) blijkt dat de spreiding nogal groot is. $\overline{S(x)} = -1.15 + 0.019\ \overline{g(x)}$ $r = 0.47$ (volgens de linear least squares methode).

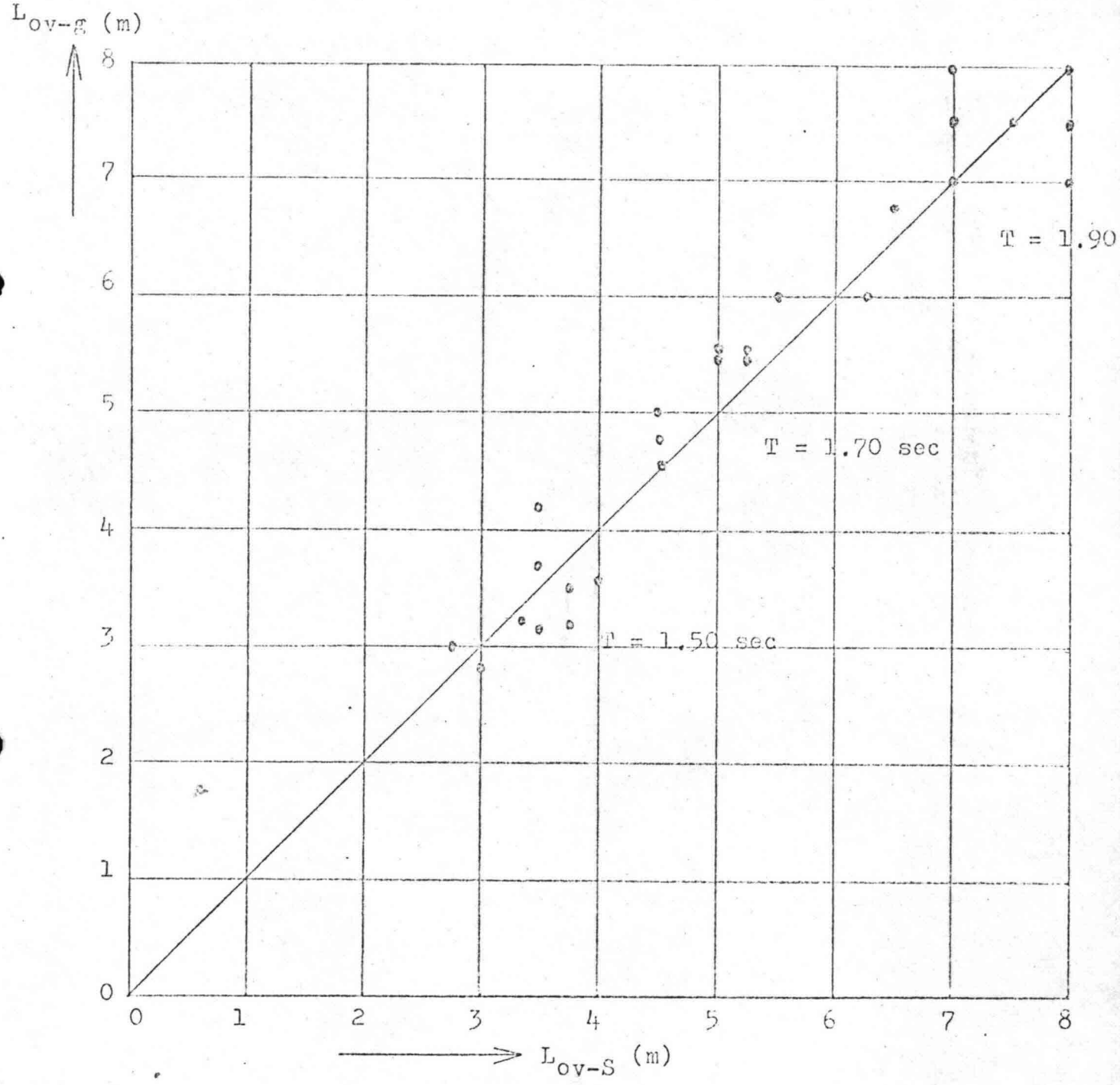


fig. 8

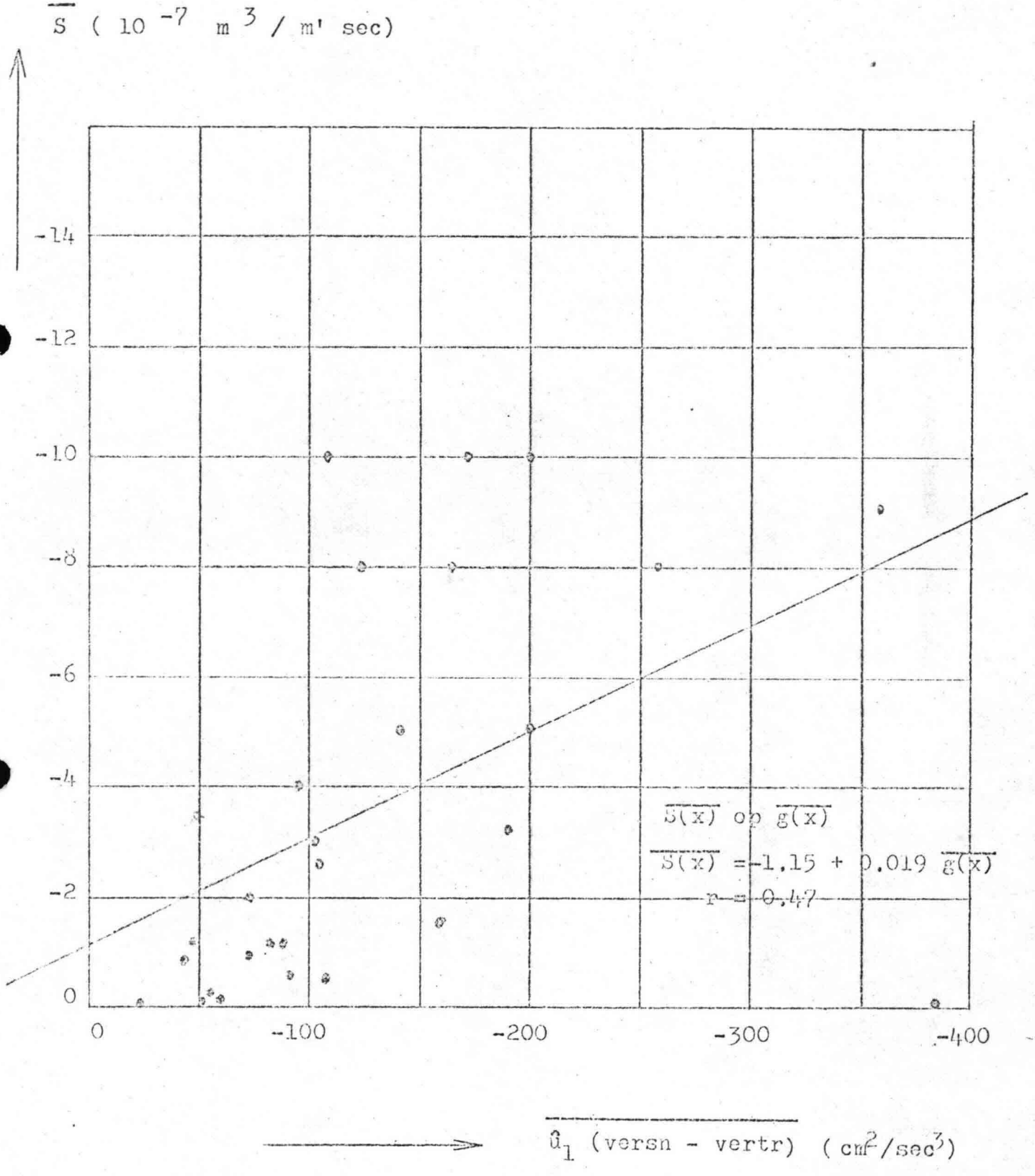

$\overline{S}$ (10 $^{-7}$ m ^{3} / m' sec)
-14
-12
-10
-8
-6
-4
-2
0
0
-100
-200
-300
-400
$\overline{S(x)}$ op $\overline{g(x)}$
$\overline{S(x)}$ = -1,15 + 0,019 $\overline{g(x)}$
r = 0,47
$\overline{\hat{u}_1 \text{ (versn - vertr)}}$ (cm^2/sec^3)

fig. 9

Amplitude.

Hierbij moet $\hat{S}=(S_{max}-S_{min})/2$ worden vergeleken met $\hat{g} = (\hat{u}_1(versn - vertr)_{max} - \hat{u}_1(versn - vertr)_{min})/2$.
In fig.10 ,11 en 12 zijn deze grootheden tegen elkaar uitgezet voor de perioden T = 1.50 resp. 1.70 en 1.90 sec.

Bij de periode T = 1.50 sec (fig.10) blijkt dat er tussen de gemeten amplitude en de berekende amplitude een duidelijk lineair verband bestaat. ~ ook gemeten!

Bij de periode T = 1.70 sec (fig.11) bestaat er een geringe spreiding maar de evenredigheidsconstante heeft een hogere waarde dan bij T = 1.50 sec.

Bij de periode T = 1.90 sec (fig.12) zijn de afwijkingen van een lineair verband nog groter dan bij de periode T = 1.70 sec. Het verband is duidelijk niet lineair.
In fig 13zijn alle waarnemingen van de gemeten zandtransportamplitude uitgezet tegen de gemeten amplitude van $\hat{u}_1(versn - vertr)$. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat er wel een verband bestaat tussen de twee grootheden, maar dat het verband niet lineair is.

Herziene formule

Bij de ontwikkeling van de zandtransportformule is als eerste benadering een lineair verband aangenomen tussen de waarde van $\hat{u}_1(versn - vertr)$ en de grootte van het resulterend zandtransport. Bij de toetsing van de formule blijkt dat de lineaire betrekking niet voor de proevenserie als geheel opgaat. Gezien de voorwaarde voor het begin van bewegen: $u^2 \times du/dt > c_5$ (zie blz. 8) wordt onderzocht of de lineaire betrekking $S = c(\hat{u}_1)^2(versn - vertr)$ een betere overeenkomst vertoont met de gemeten waarnemingen.

Bij de toetsing van deze formule geldt voor de golflengte, de fase en het gemiddelde hetzelfde als bij de voorgaande formule (zie blz.13). Bij de toetsing van de amplitude blijkt dat er voor elke periode afzonderlijk een lineair verband bestaat (zie fig.14 ,15 en 16). De evenredigheidsconstante c heeft echter voor elke periode een andere waarde:

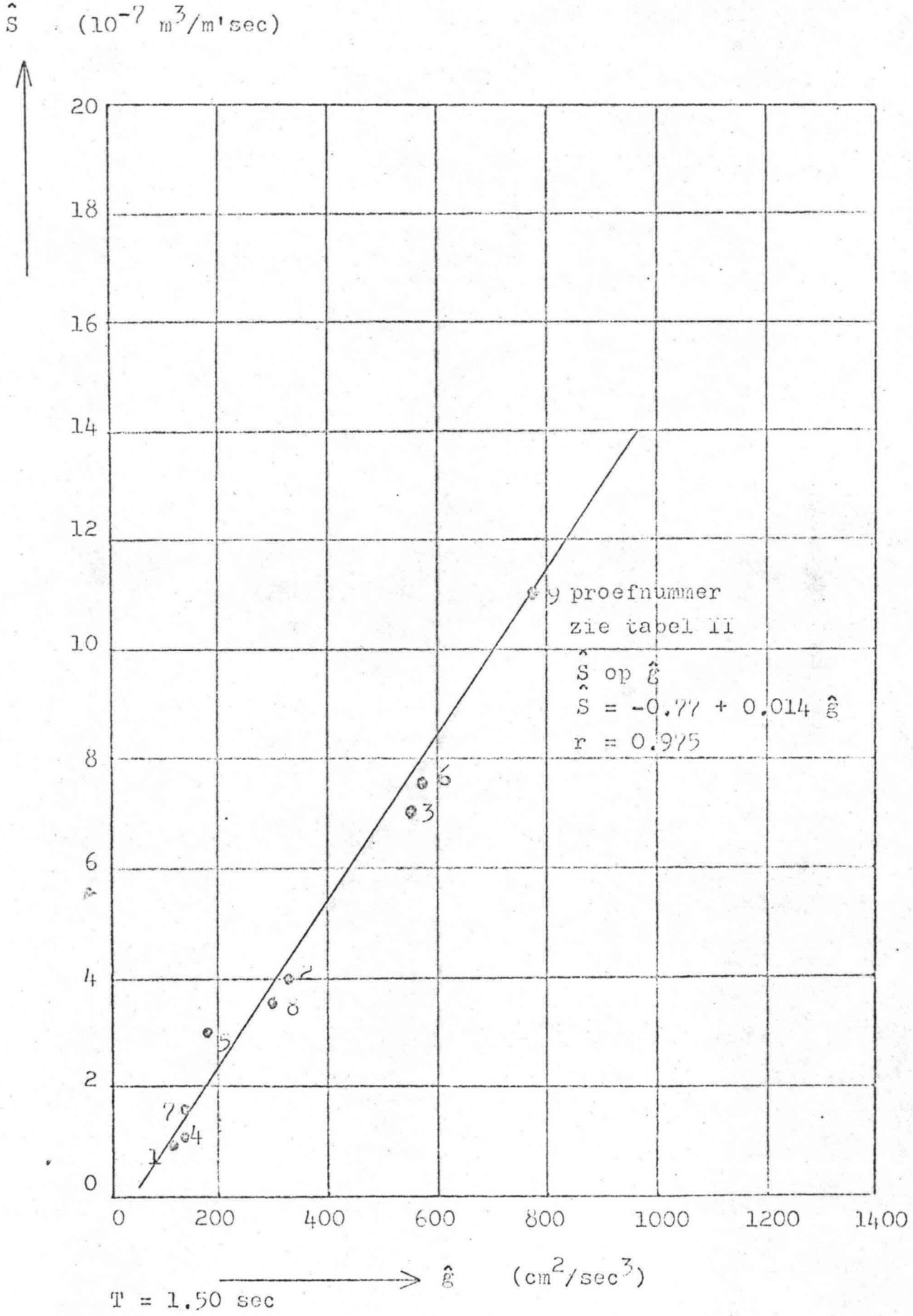
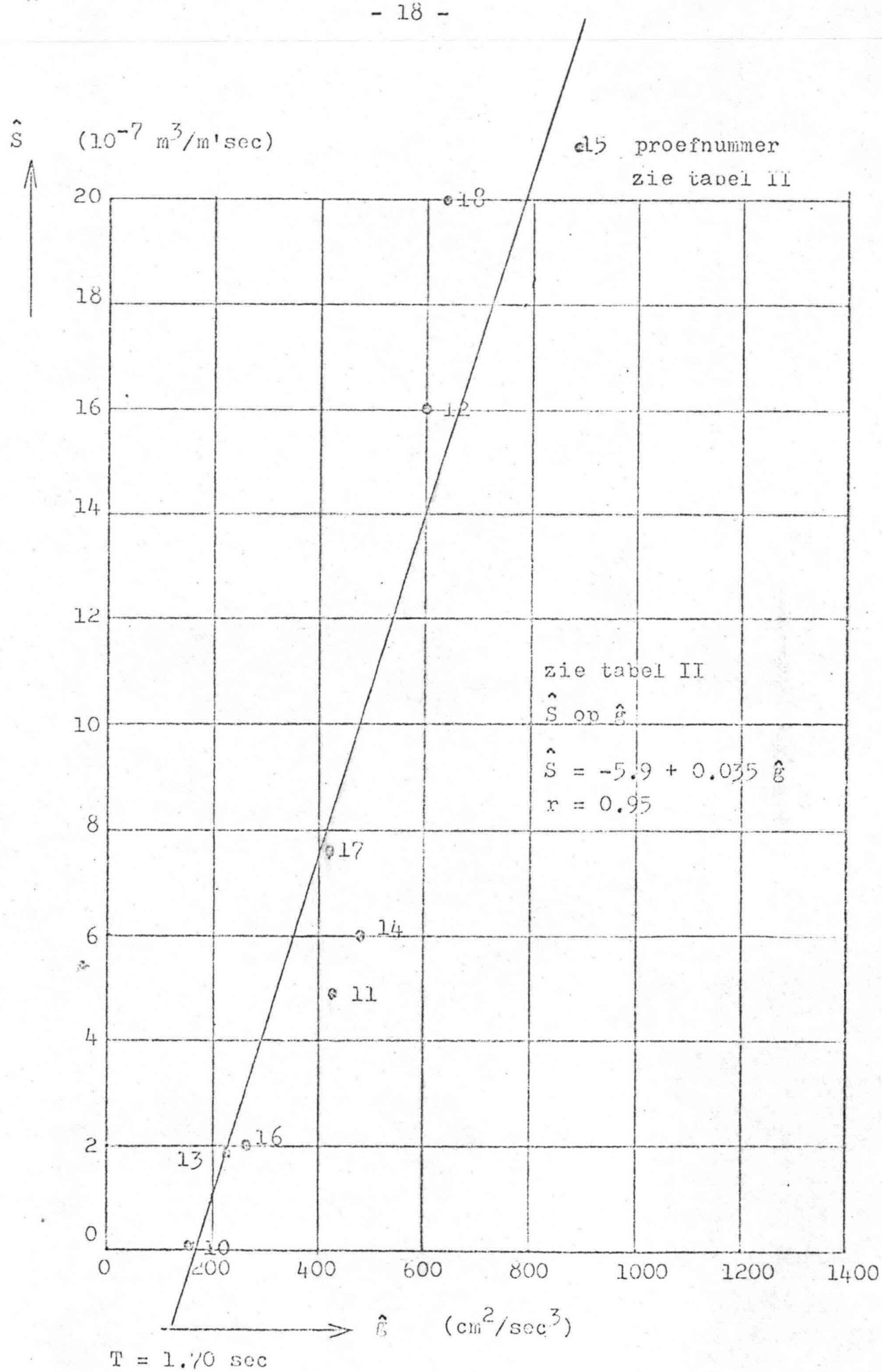
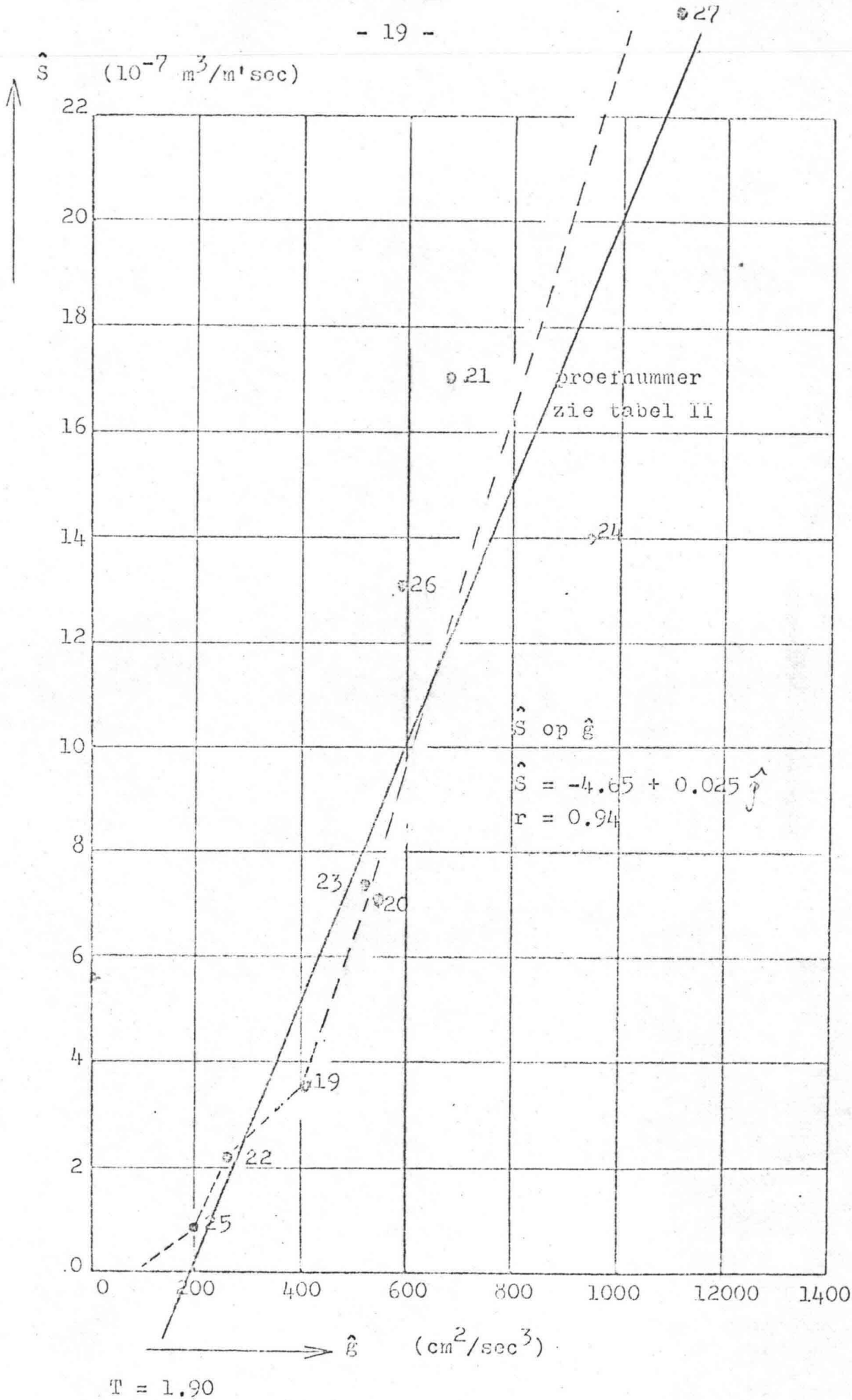

$\hat{S}$ (10^{-7} $m^3/m'sec$)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
$\hat{g}$ (cm^2/sec^3)
proefnummer
zie tabel II
$\hat{S}$ op $\hat{g}$
$\hat{S} = -0.77 + 0.014\ \hat{g}$
r = 0.975
T = 1.50 sec

fig. 10



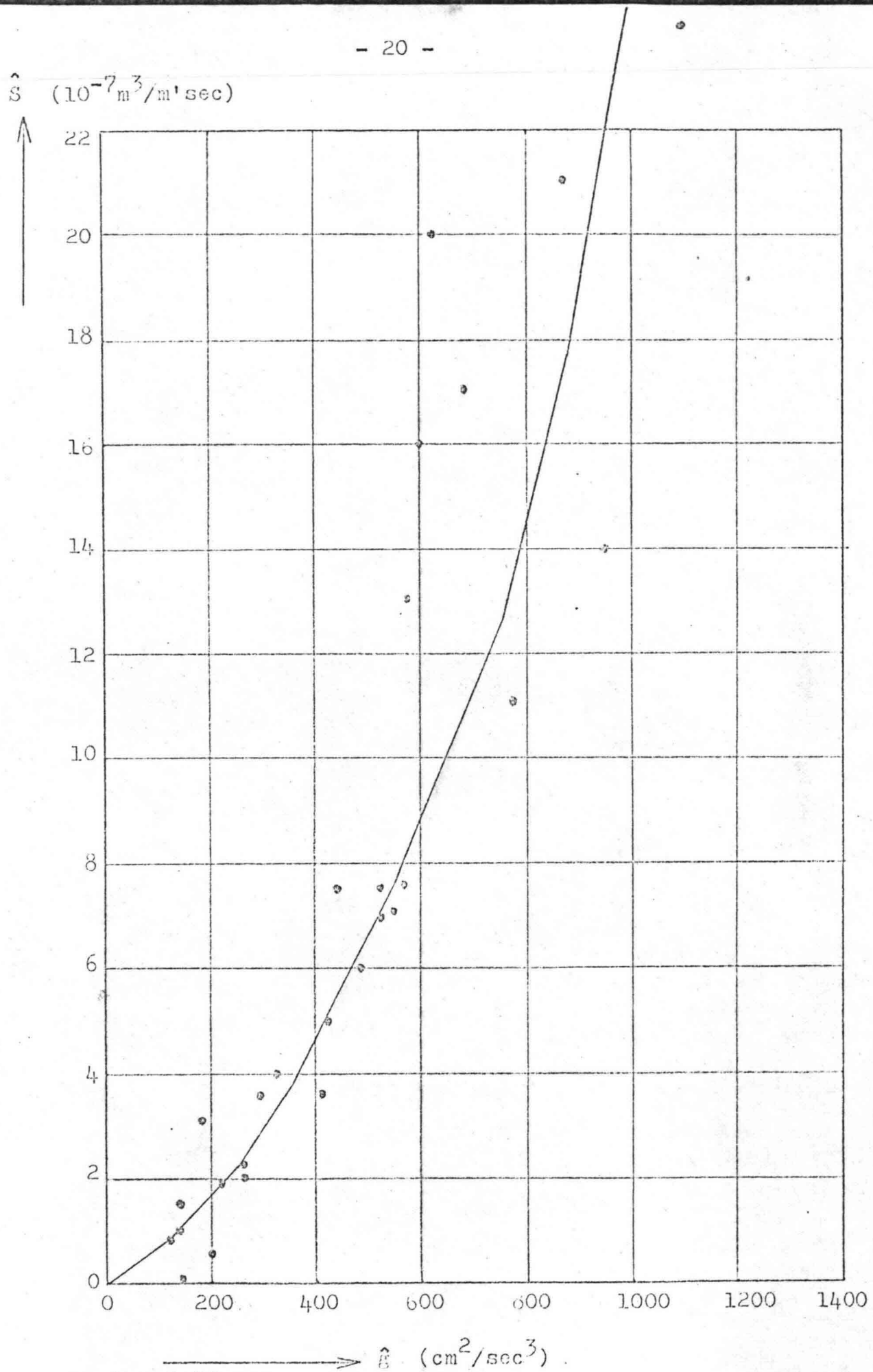
T = 1.70 sec

fig. 11


Ŝ (10⁻⁷ m³/m'sec)
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
200
400
600
800
1000
12000
1400
ĝ (cm²/sec³)
proefnummer
zie tabel II
Ŝ op ĝ
Ŝ = -4.65 + 0.025 ĝ
r = 0.94
27
21
24
26
23
20
19
22
25

T = 1.90

fig. 12



T = 1.50 sec
T = 1.70 sec
T = 1.90 sec

fig. 13

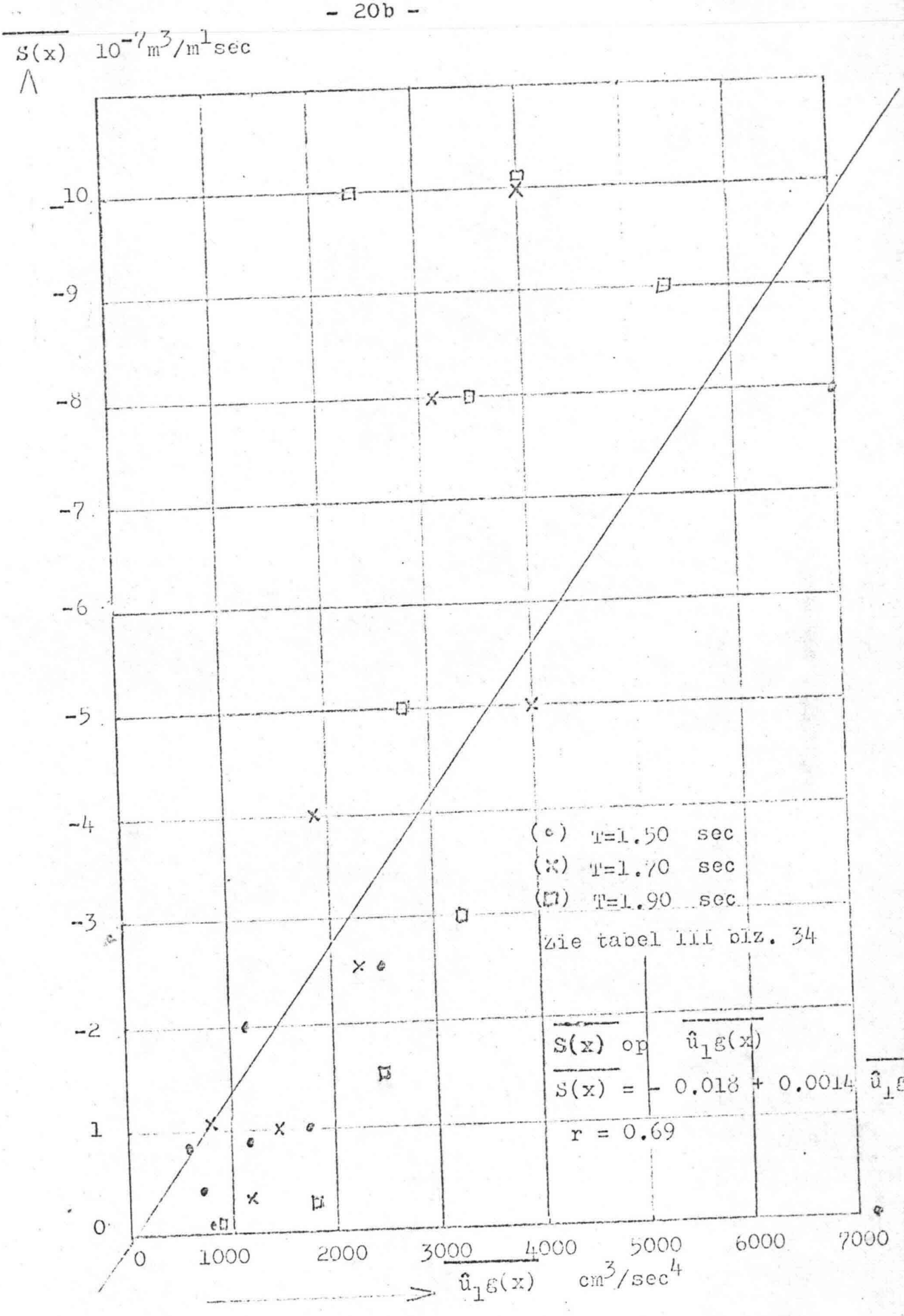
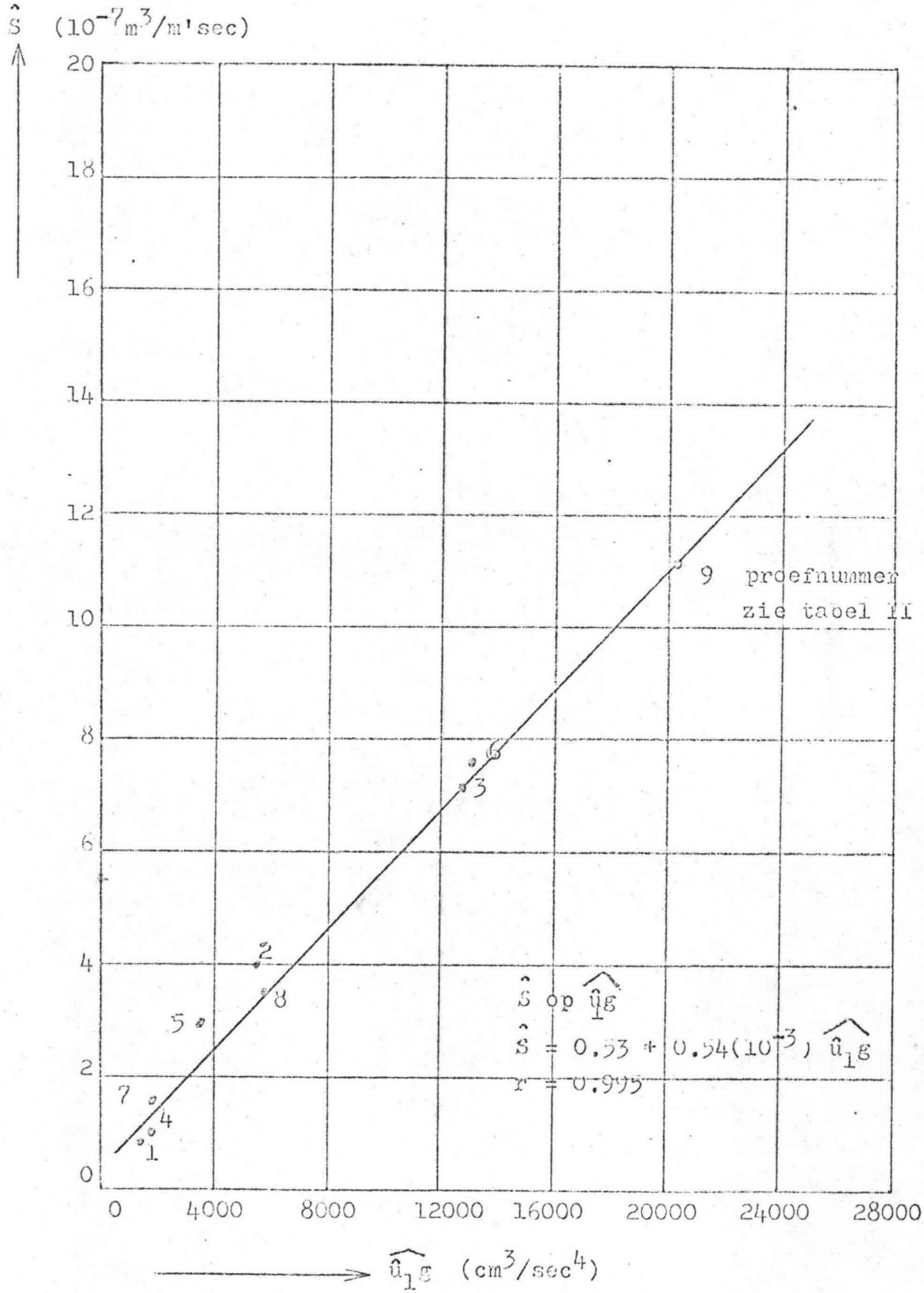
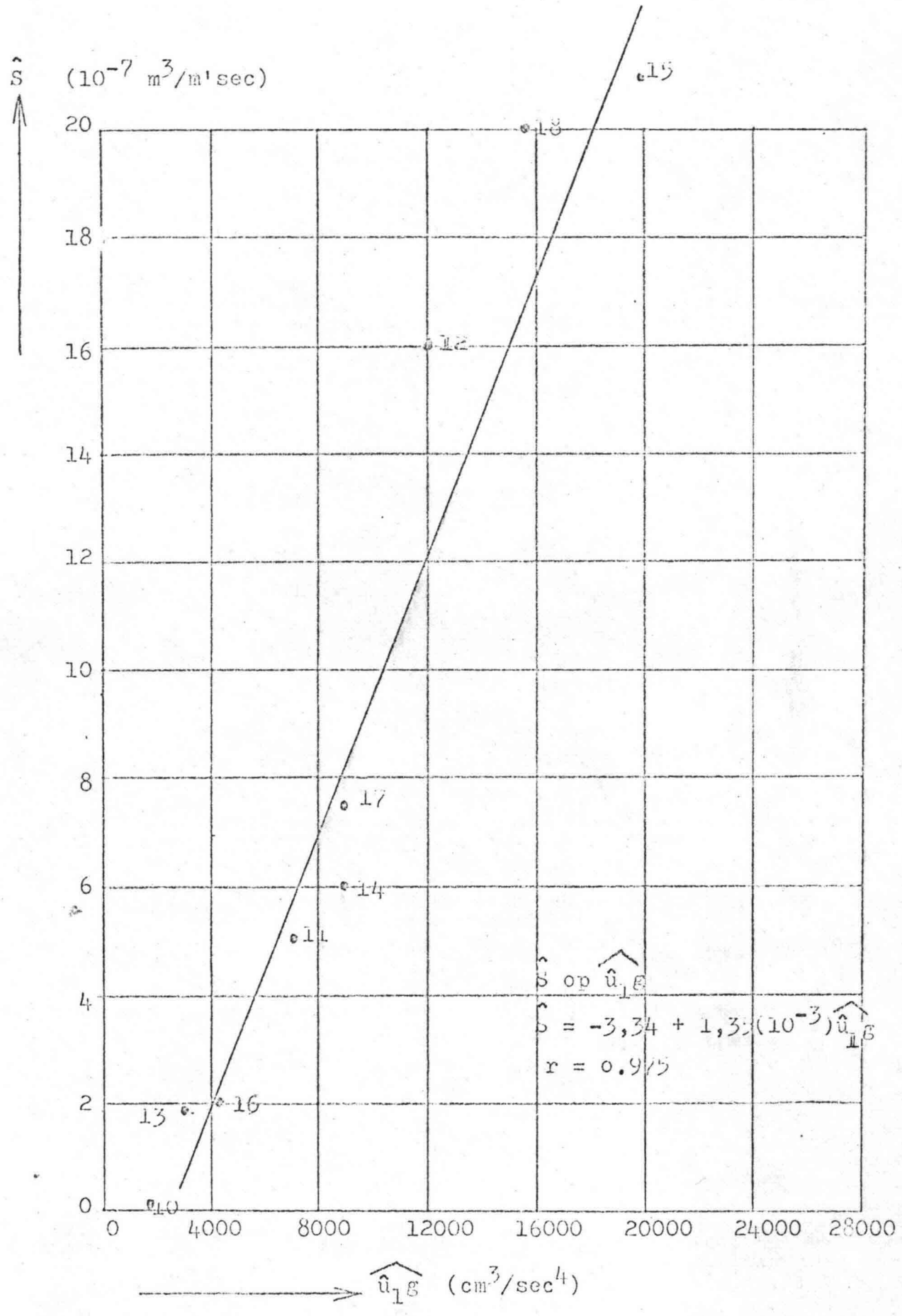

$\overline{S(x)}$ 10^{-7} m^3/m^{1}sec
-10
-9
-8
-7
-6
-5
-4
-3
-2
1
0
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
$\overline{\hat{u}_1 g(x)}$ cm^3/sec^4
(o) T=1.50 sec
(x) T=1.70 sec
(□) T=1.90 sec
zie tabel III blz. 34
$\overline{S(x)}$ op $\overline{\hat{u}_1 g(x)}$
$\overline{S(x)}$ = - 0.018 + 0.0014 $\overline{\hat{u}_1 g(x}$
r = 0.69

fig. 13a



T = 1.50 sec

fig. 14



T = 1.70 sec

fig. 15

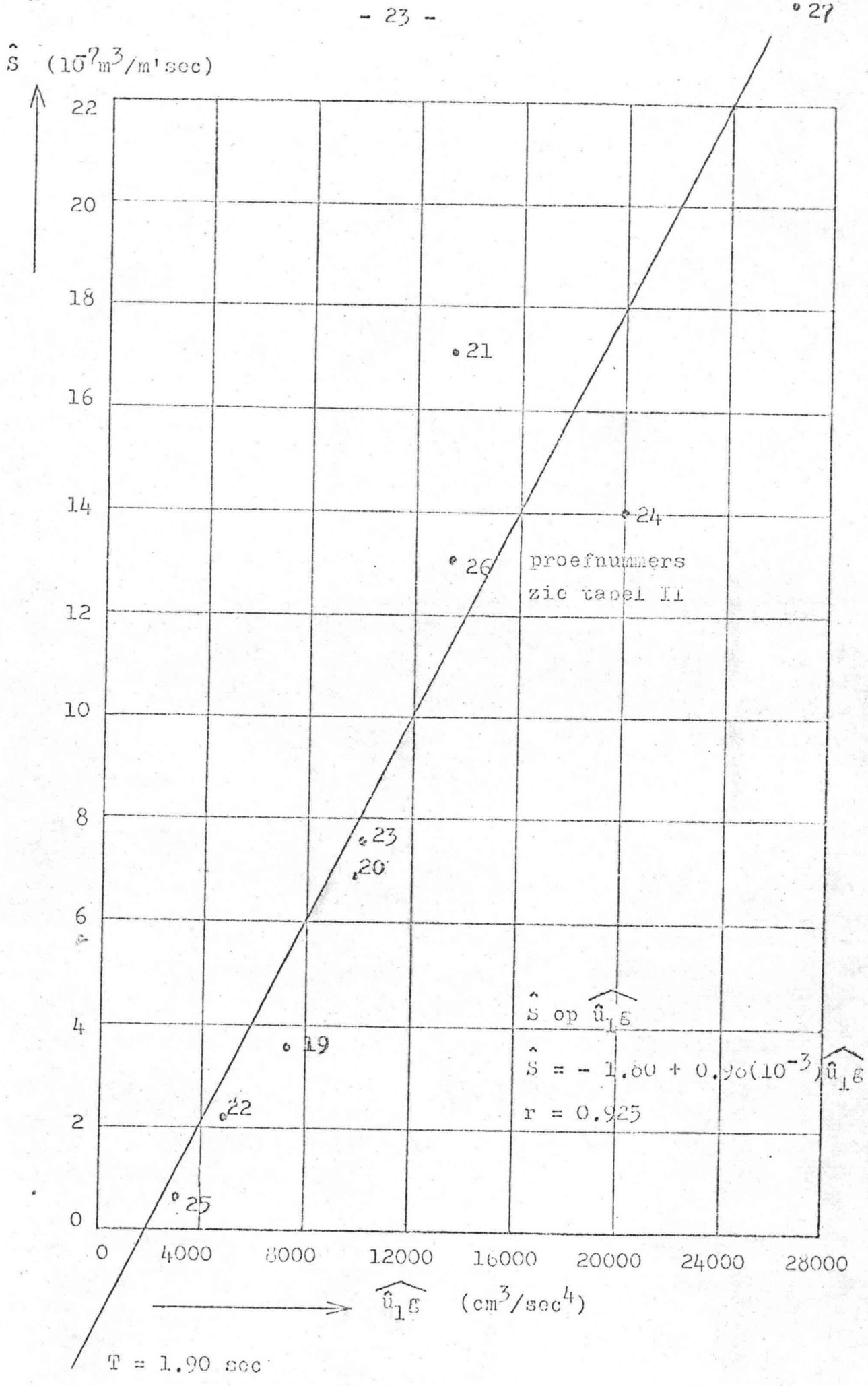

$\hat{S}$ (10^{7}m^3/m'sec)
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
28000
$\hat{u}_1\varepsilon$ (cm^3/sec^4)
27
21
24
26
23
20
19
22
25
proefnummers
zie tabel II
$\hat{S}$ op $\hat{u}_1\varepsilon$
$\hat{S}$ = - 1.80 + 0.96(10^{-3}) $\hat{u}_1\varepsilon$
r = 0.925
T = 1.90 sec

fig. 16

$\hat{S} = c_1(\widehat{\hat{u}_1 g}) + Sa$ waarbij:

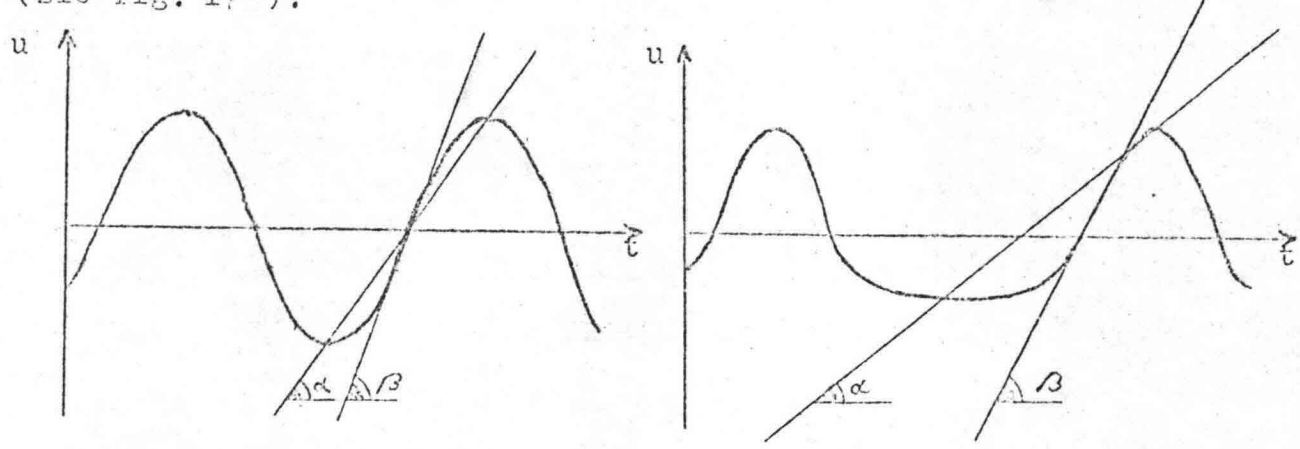
T	sec	1.50	1.70	1.90
c_1	10^{-4} sec^2/m	0.54	1.35	0.98
Sa	10^{-7} m^3/m^{1}sec	0.53	-3.34	-1.80
r	----	0.995	0.975	0.925

r is de regressie-coefficient.

Evaluatie van de formules

Bij elke proef blijkt dat er een duidelijke relatie bestaat tussen het gemeten zandtransport en de waarde van de (versn - vertr). Deze relatie kan als volgt worden weergegeven: $S(x) = p(versn(x) - vertr(x))$, waarbij de waarde van p onafhankelijk is van de afstand vanaf het golfschot. Bij de ontwikkeling van de eerste formule is ervan uitgegaan dat er een lineaire betrekking bestaat tussen S en $\hat{u}_1$. Bij toetsing blijkt echter dat deze betrekking niet lineair is (zie fig. 13). Bij de tweede formule is aangenomen dat er een lineaire relatie bestaat tussen S en $(\hat{u}_1)^2$: $S :: c(\hat{u}_1)^2(versn - vertr)$. Bij de toetsing van deze formule blijkt dat de waarde van c afhankelijk is van de periode (zie fig. 14 , 15 en 16). Ook is de lijn die deze relatie aangeeft verschoven t.o.v.de oorsprong.

Het is mogelijk dat deze afhankelijkheid wordt veroorzaakt door de schematisatie van de versnelling en de vertraging (zie fig. 7). Bij de korte perioden komt de waarde van de geschematiseerde versnelling ongeveer overeen met de maximale du/dt, bij de langere perioden gaat deze overeenkomst niet meer op (zie fig. 17).



T = 1.50 versn $\simeq$ (du/dt)max $tg\alpha \simeq tg\beta$

T = 1.90 versn $\ll$ (du/dt)max $tg\alpha \ll tg\beta$

fig. 17

Ook de formule van van Hyum(1) duidt er op dat deze vereenvoudigde weergave van de vloeistofbeweging niet voldoende is bij de beschrijving van de relatie tussen waterbeweging en zandtransport. Uit deze formule blijkt dat vooral de waarde van t_{top}/T van grote betekenis is:

$$S = \beta(1-\beta)u_{min} \exp(7{,}89 - 38{,}9\,\Delta\, g\, D90\, u_{max}^{-2})$$

waarbij

$\beta = t_{top}/T$ (zie fig. 18)

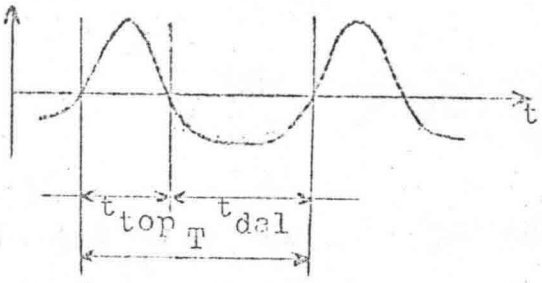


fig. 18

Bovengenoemde tekortkomingen in de vereenvoudiging van de waterbeweging maken het zeer ingewikkeld om de relatie tussen c en T analytisch vast te leggen. Ook is het aantal metingen niet voldoende om de relatie empirisch vast te leggen.
De beste benadering wordt nu gegeven door :

$$S(x) = \overline{S(x)} + \hat{S} \sin(2\pi x/L_{ov} + k_1) \qquad \text{waarbij:}$$

$\overline{S(x)} = 0.0014\ \overline{\hat{u}_1 g(x)}$ (zie blz. 20b, fig 13a)

$\hat{S} = c_1\ \widehat{\hat{u}_1 g} + Sa$ (zie blz. 21, 22, 23, fig. 14, 15 en 16)

Relatie zandtransportvariatie - Ursell parameter ($Ur = HL^2/h^3$)

In de literatuur over stoorgolven wordt het optreden hiervan in verband gebracht met de waarde van de Ursell parameter. Wanneer de Ur-waarde groter is dan 13 wordt de invloed van de stoorgolf zichtbaar in de golfvorm (2). In dit onderzoek blijkt dat het optreden van stoorgolven een variatie in het zandtransport tot gevolg heeft. De grootte van deze variatie wordt weergegeven door de $\hat{S} = (S_{max}-S_{min})/2$.

In fig. 20 is de Ursell parameter uitgezet tegen de bijbehorende waarde van $\hat{S}$. Uit deze figuur blijkt dat er bij een bepaalde diepte wel enig verband bestaat tussen de beide groot-

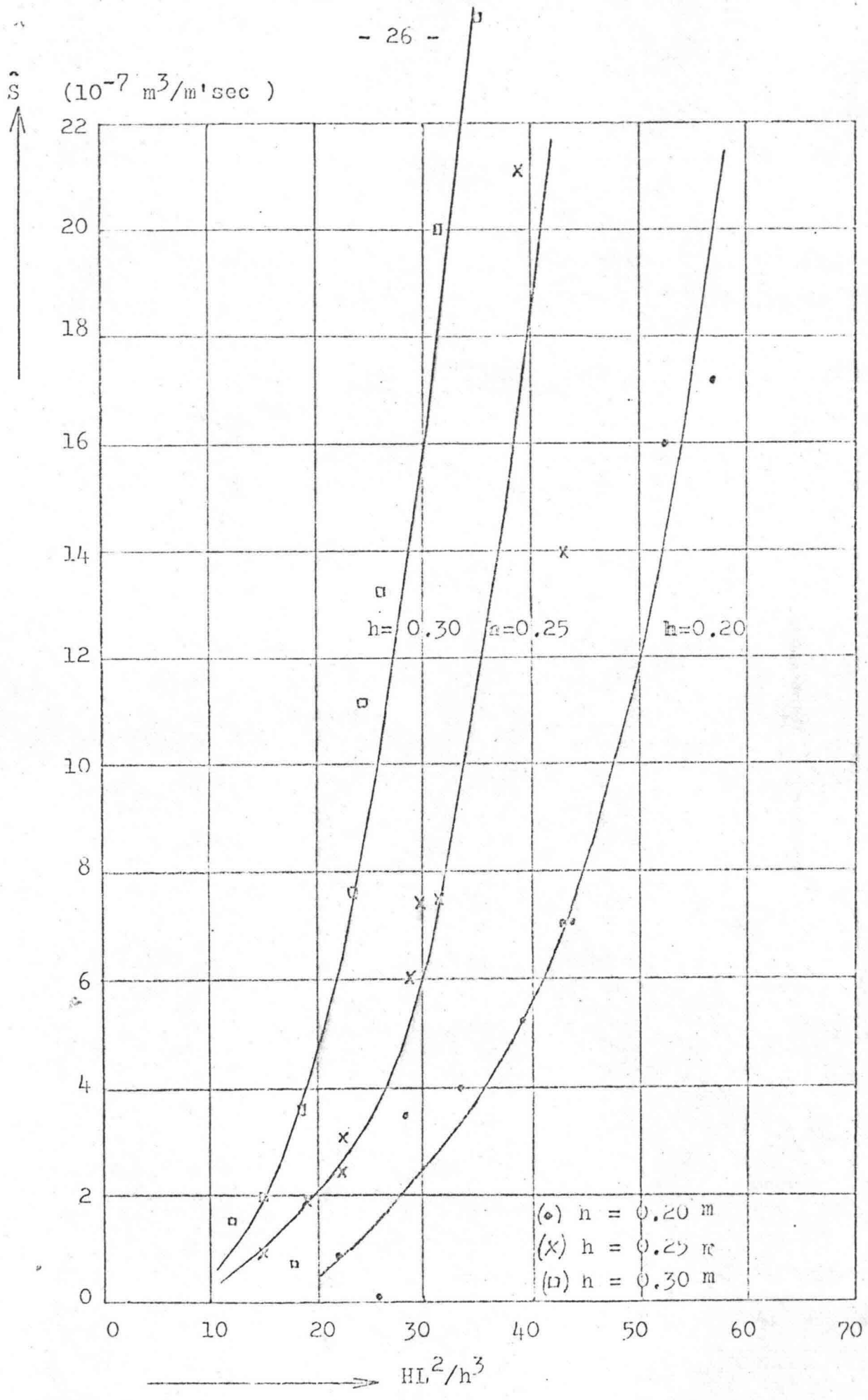

$\hat{S}$ (10^{-7} m^3/m'sec)
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
10
20
30
40
50
60
70
HL^2/h^3
h= 0.30
h=0.25
h=0.20
(•) h = 0.20 m
(X) h = 0.25 m
(□) h = 0.30 m

fig. 20

heden. Voor de proevenserie als geheel bestaat echter nauwlijks enig verband tussen de Ur-waarde en de zandtransportvariatie.

Relatie zandtransportvariatie - basisgolf

Om te onderzoeken hoe de invloed van de stoorgolven verband houdt met de orbitaalbeweging van de basisgolf is voor elke proef de gemiddelde waarde van $\hat{u}_1$ uitgezet tegen de bijbehorende waarde van $\hat{s}$; zie bijlage I blz 28, 29 en 30. Uit de figuren blijkt dat de zandtransportvariatie toeneemt bij toenemende orbitaalsnelheid. Het verloop van deze toename is echter afhankelijk van de periode en de waterdiepte. Aangezien voor elke periode - waterdiepte combinatie slechts drie proeven zijn verricht is het niet mogelijk het verband tussen $\hat{u}$, T, h en $\hat{s}$ op eenduidige wijze te beschrijven.

Nauwkeurigheid van de gevolgde meetmethode

Om de nauwkeurigheid van de gevolgde meetmethode te onderzoeken zijn twee willekeurig gekozen proeven twee keer uitgevoerd. Bij een zelfde waterbeweging werd het optredende zandtransport opnieuw gemeten. Bij vergelijking van de resultaten, zie bijlage I proef 17 en 23, blijkt dat het verschil tussen een proef en de contrôleproef een orde kleiner is dan het verschil tussen twee opvolgende proeven*). Gezien de voorgaande interpretatie van de waarnemingenisde gevolgde meetmethode voldoende nauwkeurig. De verschillen in gemeten zandtransport bij eenzelfde waterbeweging worden voornamelijk veroorzaakt door de gevoeligheid van de meetinstrumenten.

*) $\hat{S}$ (proef 17) - $\hat{S}$(...17a) $\simeq$ 0.1($\hat{S}$(..17) - $\hat{S}$(18))

$\hat{S}$ (proef 23) - $\hat{S}$(...23a) $\simeq$ 0.2($\hat{S}$(..23) - $\hat{S}$(24))

Beschouwing over schaal

Bij het onderzoek naar zandtransport door golven en stroming (bijlage IV) is het transport naar mechanisme verdeeld over twee lagen.

In de eerste laag wordt de beweging van de deeltjes beheerst door de neerwerking. In deze laag treedt zandtransport op omdat de concentratie afhankelijk is van de fase van de orbitaalbeweging.

In de tweede laag is de zandconcentratie onafhankelijk

van de tijd. In deze laag treedt zandtransport op omdat de deeltjes worden meegevoerd door een netto watertransport.

Vanwege de relatief zware korrels is het transportmechanisme volgens de eerste laag veruit dominant. Bij interpretatie van de waarnemingen op een andere schaal moet eerst worden onderzocht welke vorm van transport het grootste is.

Zandtransport door golven wordt beheerst door het neermechanisme. De neervorming wordt bepaald door de ruwheid van de bodem en door de snelheid en de versnelling van de waterbeweging. Vergeleken bij het prototype heeft elk van deze grootheden een andere schaal. Daarom is voorzichtigheid geboden bij interpretatie op andere schaal.

Extra waarnemingen

Met behulp van een profielvolger is het bodemprofiel geregistreerd. Uitdeze registratie zijn de ribbelhoogte en de ribbellengte opgemeten. Voor de verhouding ribbellengte/waterdiepte wordt een waarde gevonden van 0.16 opklimmend met de periode en de golfhoogte tot 0.36 . Voor de verhouding orbitale diameter/ribbellengte wordt een waarde gevonden varierend tussen 1.42 en 1.94 (zie tabel III blz. 39).

Bij de uitvoering van de proeven werd op bepaalde plaatsen in de goot, over de gehele hoogte, een verzameling van vuildeeltjes gesignaleerd. Bij elke proef was de afstand tussen deze troebele plaatsen gelijk aan de bijbehorende herhalingsafstand. De plaats viel ongeveer samen met de plaats waar maximaal positief zandtransport werd gemeten.

Bij het toevoegen van kleurstof vlak boven de bodem, tijdens de waterbeweging, op verschillende plaatsen in de goot , werd in alle gevallen geconstateerd dat de kleurvlek zich voornamelijk uitbreidde in de golfvoortplantingsrichting.

Van proef no17 (T = 1.7 0 sec, h = 0.30 m., $Hh^{-1} \simeq 0.30$) is een filmpje gemaakt. Hierbij is duidelijk te zien dat de zandconcentratie afhankelijk is van de fase van de golfbeweging. Ook is te zien dat de neervorming afhankelijk is van de golfvorm (archief van de vakgroep kustwaterbouwkunde).

De ribbelafmetingen zijn onafhankelijk van de afstand vanaf het golfschot.

Samenvatting.

Door Hulsbergen(2) en Swart(7) wordt gewezen op de invloed van stoorgolven bij het modelonderzoek naar kustontwikkeling. Door Byrne(8) wordt aangetoond dat ook in het prototype stoorgolven voorkomen. Bij het modelonderzoek worden stoorgolven opgewekt door het verschil tussen de orbitaalbeweging van een vrije zwaartekrachtsgolf en de beweging van een verticaal golfschot. In het prototype en het model kunnen stoorgolven worden opgewekt door de vorm van de bodem.

In dit modelonderzoek zijn gegevens verzameld over de invloed van stoorgolven op de waterbeweging van de hoofdgolf. Tevens is de relatie tussen de resulterende waterbeweging en het optredende zandtransport geanalyseerd. Tot slot is onderzocht of er een relatie bestaat tussen het optreden van banken door stoorgolven en de waarde van de Ursell parameter HL^2/h^3.

Door het optreden van stoorgolven is de waterbeweging afhankelijk van de afstand vanaf het golfschot. Deze afhankelijkheid blijkt, bij harmonische analyse van het snelheidssignaal, duidelijk uit het verloop van de amplitude van de tweede harmonische snelheidscomponent $\hat{u}_2$ over de lengte van de goot.

Bij analyse van het zantransport als functie van de waterbeweging blijkt dat er een relatie bestaat tussen de snelheidsverandering van de waterbeweging en het resulterende zandtransport (zie fig. 21 en 22).

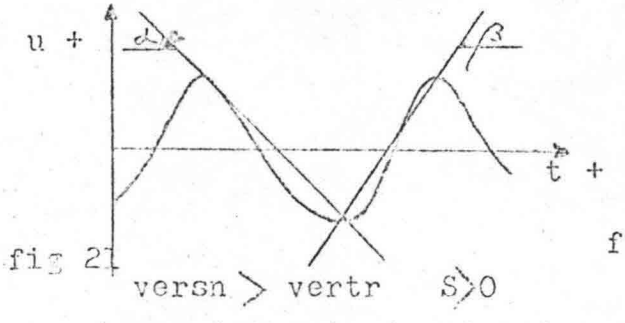


fig 21

versn > vertr S>0

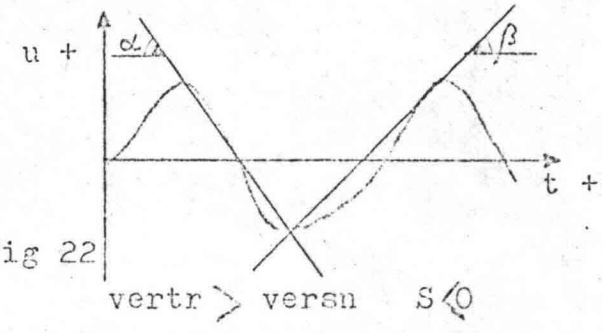


fig 22

vertr > versn S<0

u is positief in de richting van de golfvoortplanting.
S is positief in de richting van de golfvoortplanting.
versnelling = tg β
vertraging = tg α

De vergelijking $\hat{S} = c\overline{(\hat{u}_1)^2(versn - vertr)} + S_a$ met c en S_a afhankelijk van de golfperiode, geeft een goede benadering van de relatie tussen waterbewegings variatie en (resulterend) zandtransport - variatie.

Door de variatie van het zandtransport over de lengte van de goot ontstaan banken. Bij het uitzetten van de grootte van deze variatie tegen de waarde van de Ursellparameter blijkt geen direct verband. Bankvormingssnelheid :: $4\hat{S}/L_{ov}$ ')

Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Bij het onderzoek naar zandtransport door staande golven is aangetoond dat het zandtransportmechanisme sterk afhankelijk is van de korreldiameter, (zie bijlage II en 4,5 en 6). Om deze afhankelijkheid te onderzoeken bij de invloed van stoorgolven op de bankvorming, is het nodig een aantal proeven-series te doen met verschillende zandsoorten. Mede gezien de locale verzameling van zwevende vuildeeltjes (zie "Extra waarnemingen") ligt het voor de hand het onderzoek te beginnen met een kleinere korreldiameter (bijv. $\mu = 150$).

- Om inzicht te verkrijgen in de schaalregels die gelden voor snelheid en versnelling is het nodig een serie proeven te doen in een groter model.

- Aan de hand van de resultaten van de bovengenoemde onderzoeken kan een verder meetprogramma worden opgesteld voor het onderzoek naar zandtransport door golven en stroming.

- Om na te gaan in hoeverre de ontwikkelde theorieën over neervorming van Wichers en van de onderzoeker juist zijn is het gewenst een onderzoek te doen naar de relatie snelheidsverandering-neervorming bij een geribbelde bodem.

- Naast bovengenoemde model onderzoeken is het zeer gewenst litteratuuronderzoek te doen naar de golfvormvariatie bij een kust met banken en bij een ondiepe zee met megaribbels.

') Als z is de bodemhoogte dan is de snelheid waarmee een bank groeit $\partial z/\partial t \quad 4\hat{S}/L_{ov}$ (Ook bestaat er geen direct verband tussen deze waarde en de Urs.-parameter).

Literatuurlijst

1. E. van Hyum — Bijdrage tot de bestudering van het bodemtransport t.g.v. lopende golven in ondiep water en over een horizontale bodem. Afstudeerrapport T.H.-Delft afd. W.en W., nov. 1972.

2. C.H.Hulsbergen — Origin, effect and suppression of secondary waves. Delft Hydraulics Laboratory publication no 132, sept. 1974.

3. P.D.Komar, M.C.Miller — The threshold of sediment movement under oscillatory water waves, in Journal of Sedimentary Petrology, 43, 1973, no 4, Dec pp.1101 - 1110.

4. E.W.Bijker, A. de Best — Scouring of a sanbed in front of a vertical breakwater, in Communications on Hydraulics Delft University of Technology, Department of Civil Engineering report no 71 - 1.

5. A. de Best, E.W.Bijker, J.E.W.Wichers — Scouring of a sandbed in front of a vertical breakwater, in Proc. 1st conf. on Port and Ocean Engineering under arctic conditions, Trondheim 1971, vol. 2, pp. 1077 - 1086.

6. J.E.W.Wichers — Zandtransport door staande golven. Afstudeerrapport T.H.-Delft afd. W. en W., sept. 1972.

7. D.H.Swart — Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles pp. 191 - 155. Delft Hydraulics Laboratory Publication no 131 1974.

8. J.Byrne — Field occurrences of induced multiple gravity waves, in Journal of Geophysical Research Vol 74, no 10, May 15, pp. 2590 - 2596.

Bijlagenlijst

Bijlage I — Meetresultaten

Bijlage II — Ontwikkeling van het onderzoekprogramma op het gebied van zandtransport door golven enstroming bij de vakgroep Kustwaterbouwkunde van 1971 tot 1976
P. Vellinga mei 1975.
Summary voor het 15 e Coastal Eng. Conf. 1976
prof. dr. ir. E.W. Bijker , P. Vellinga.

Bijlage III — Voortgangsrapport no 2 van het onderzoek naar zandtransport door golven en stroming, tevens vooronderzoek voor het onderzoek naar de invloed van stoorgolven.
P. Vellinga februari 1975.

Bijlage IV — Voortgangsrapport no 1 van het onderzoek naar zandtransport door golven en stroming.
P. Vellinga maart 1974.

Tabel I

proef	T	h	Hh^{-1}	L	HL^2/h^3	L_{ov-2}	L_{ov-2}/L	h/L	L_{ov-s}	L_{ov-g}
	sec	m		m		m			m	m
1	1.50	.2	.2	2.01	22	4.00	1.98	.099	4.00	3.60
2	1.50	.2	.3	2.01	33	3.60	1.79	.099	3.50	4.20
3	1.50	.2	.4	2.01	44	3.62	1.81	.099	3.75	3.50
4	1.50	.25	.2	2.17	15	2.95	1.36	.115	3.75	3.20
5	1.50	.25	.3	2.17	22	3.25	1.51	.115	3.25	3.20
6	1.50	.25	.4	2.17	30	3.38	1.55	.115	3.50	3.70
7	1.50	.3	.2	2.35	12	2.90	1.26	.127	3.50	3.20
8	1.50	.3	.3	2.35	18	3.00	1.27	.127	3.00	2.80
9	1.50	.3	.4	2.35	24	3.33	1.43	.127	2.75	3.00
10	1.70	.2	.2	2.28	26	5.75	2.50	.088	--	6.00
11	1.70	.2	.3	2.28	39	5.50	2.41	.088	5.50	6.00
12	1.70	.2	.4	2.28	52	5.50	2.41	.088	5.25	5.50
13	1.70	.25	.2	2.46	19	5.00	2.03	.102	5.00	5.50
14	1.70	.25	.3	2.46	29	5.25	2.13	.102	5.25	5.50
15	1.70	.25	.4	2.46	39	5.00	2.03	.102	5.00	5.50
16	1.70	.3	.2	2.64	15	4.75	1.80	.114	4.50	5.00
17	1.70	.3	.3	2.64	23	4.00	1.51	.114	4.50	4.50
18	1.70	.3	.4	2.64	31	4.25	1.61	.114	4.50	4.75
19	1.90	.2	.2	2.54	29	8.00	3.18	.083	8.00	7.50
20	1.90	.2	.3	2.54	43	7.00	2.77	.083	8.00	7.00
21	1.90	.2	.4	2.54	57	7.00	2.35	.083	8.00	8.00
22	1.90	.25	.2	2.74	22	7.00	2.57	.092	7.00	8.00
23	1.90	.25	.3	2.74	32	7.00	2.57	.092	7.50	7.50
24	1.90	.25	.4	2.74	43	7.50	2.73	.092	7.00	7.50
25	1.90	.3	.2	2.94	17	7.50	2.54	.102	7.00	7.00
26	1.90	.3	.3	2.94	26	6.75	2.28	.102	6.25	6.00
27	1.90	.3	.4	2.94	35	6.50	2.21	.102	6.50	6.75

Tabel II

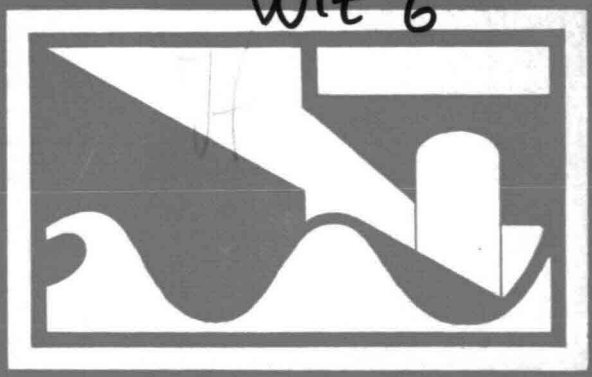
proef	$\overline{\hat{u}_1}$	$\Delta\overline{\frac{\partial u}{\partial t}}$	$\Delta\overline{\frac{\partial \hat{u}}{\partial t}}$	$\overline{\varepsilon(x)}$	$\hat{\varepsilon}$	$\overline{S(x)}$	$\hat{S}$	$\overline{\hat{u}_1 \varepsilon(x)}$	$\overline{\hat{u}_1 \varepsilon}$
	cm/sec	cm/sec^2		cm^2/sec^3		10^{-4}m^3/m' sec		cm^3/sec^4	
1	13	-4	9	-52	117	-0.3	0.8	-670	1520
2	17	-4	19	-68	324	-0.8	4.0	-1160	5500
3	19	-20	35	-380	565	0.0	7.0	-7200	12700
4	14	-3	9	-52	125	-0.1	0.9	-730	1750
5	18	-3	10	-63	190	-2.0	3.0	-1130	3400
6	23	-5	25	-108	575	-2.5	7.5	-2480	13200
7	14	-3	9	-42	126	-0.7	1.5	-590	1750
8	21	-4	14	-84	294	-1.0	3.5	-1754	6200
9	26	-10	30	-260	780	-8.0	11.0	-6800	20200
10	11	-3	14	-33	154	--	--	-362	1700
11	17	-5	25	-85	425	-1.0	5.0	-1440	7200
12	20	-10	30	-200	600	-5	16.0	-4000	12000
13	15	-6	14	-90	210	-0.4	1.9	-1350	3140
14	19	-5	25	-95	475	-4.0	6.0	-1800	8700
15	24	-7	35	-168	840	-10.0	21.0	-4050	20000
16	16	-3	8	-48	256	-1.2	2.0	-770	4200
17	21	-5	20	-105	420	-2.5	7.5	-2200	8700
18	25	-5	25	-125	625	-8.0	20.0	-3110	15500
19	16	-10	30	-160	408	-1.5	3.5	-2530	7700
20	18	-10	30	-180	540	-3.0	7.0	-3240	9800
21	20	-10	33	-200	660	-10.0	17.0	-4000	13200
22	16	-7	17	-112	260	-0.3	2.2	-1790	4440
23	19	-7	27	-142	512	-5.0	7.5	-2700	9900
24	21	-5	45	-110	950	-10.0	14.0	-2310	20000
25	15	-4	13	-60	200	-0.1	0.6	-900	3000
26	21	-8	27	-168	590	-6.0	13.0	-3520	12800
27	24	-15	45	-360	1080	-9.0	24.0	-5400	26000

Tabel III

proef	T	h	Hh^{-1}	L_r	$\frac{\hat{u}_1 . T}{\pi L_r}$	L_r/h	H_r *)	H_r gecorrigeerd
	sec	m		cm			cm	cm
1	1.50	.2	.2	4.35	1.43	.218	0.65	0.85
2	1.50	.2	.3	5.40	1.50	.270	0.85	1.05
3	1.50	.2	.4	6.45	1.45	.317	1.05	1.25
4	1.50	.25	.2	4.35	1.54	.174	0.65	0.85
5	1.50	.25	.3	5.55	1.55	.222	0.90	1.10
6	1.50	.25	.4	6.65	1.65	.266	1.00	1.20
7	1.50	.3	.2	4.75	1.42	.158	0.65	0.85
8	1.50	.3	.3	6.05	1.65	.202	0.92	1.12
9	1.50	.3	.4	7.15	1.73	.238	1.10	1.30
10	1.70	.2	.2	--	--	--	--	--
11	1.70	.2	.3	5.40	1.70	.270	0.75	0.95
12	1.70	.2	.4	6.25	1.74	.312	0.95	1.15
13	1.70	.25	.2	4.65	1.75	.186	0.65	0.85
14	1.70	.25	.3	5.90	1.75	.236	0.95	1.15
15	1.70	.25	.4	6.90	1.94	.276	1.30	1.50
16	1.70	.3	.2	5.40	1.62	.180	0.95	1.15
17	1.70	.3	.3	6.70	1.68	.225	1.10	1.30
18	1.70	.3	.4	7.70	1.77	.256	1.20	1.40
19	1.90	.2	.2	5.70	1.70	.284	0.95	1.15
20	1.90	.2	.3	6.25	1.74	.312	1.20	1.40
21	1.90	.2	.4	7.15	1.70	.358	1.35	1.55
22	1.90	.25	.2	5.55	1.75	.222	0.95	1.15
23	1.90	.25	.3	6.45	1.79	.258	1.15	1.35
24	1.90	.25	.4	7.70	1.65	.308	1.30	1.50
25	1.90	.3	.2	5.70	1.60	.190	1.00	1.20
26	1.90	.3	.3	6.90	1.85	.230	1.20	1.40
27	1.90	.3	.4	8.00	1.82	.266	1.35	1.55

93

Wit 6

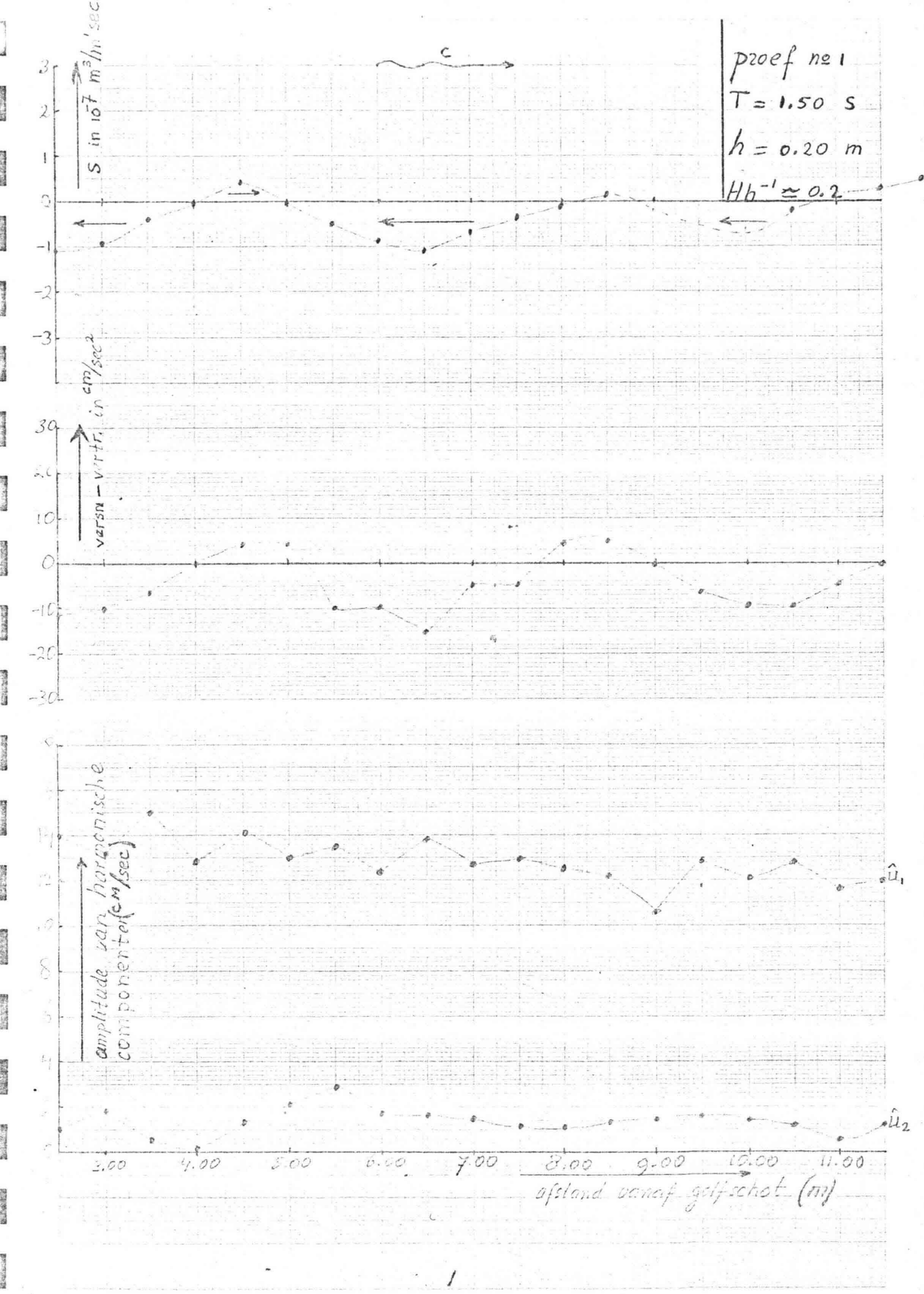


Bijlage I

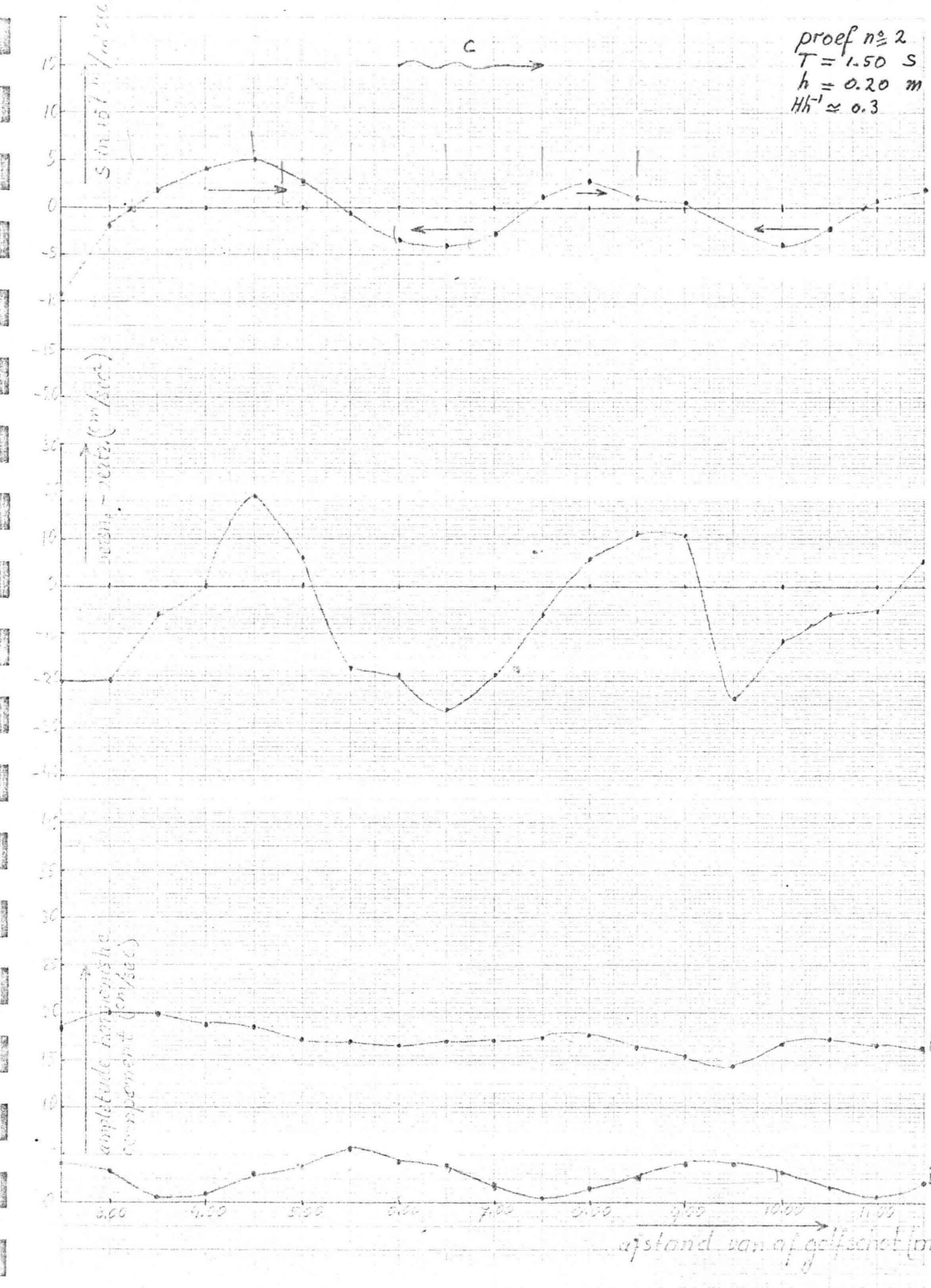
Meetresultaten

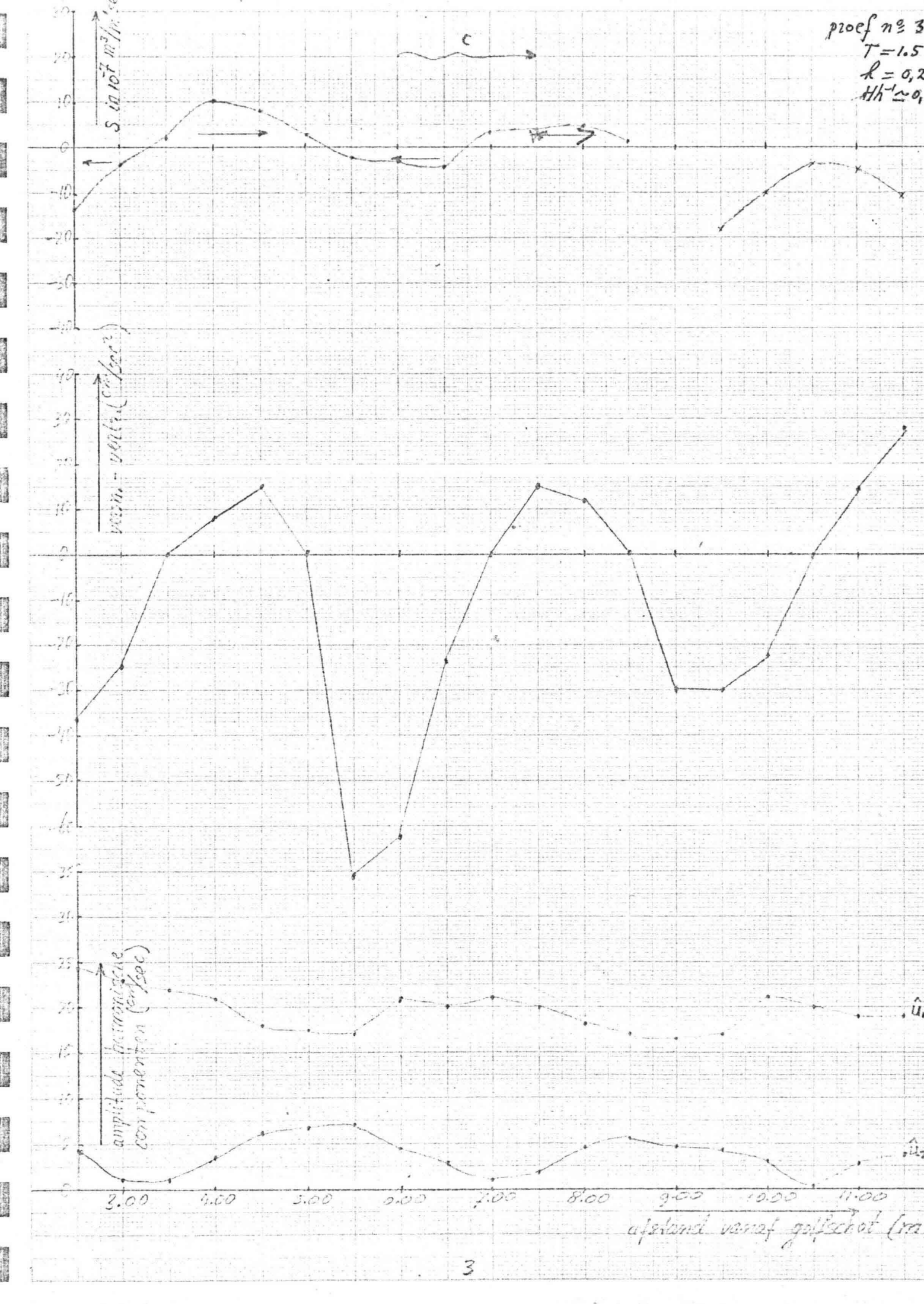
van het onderzoek naar zandtransport door golven en de invloed van stoorggolven

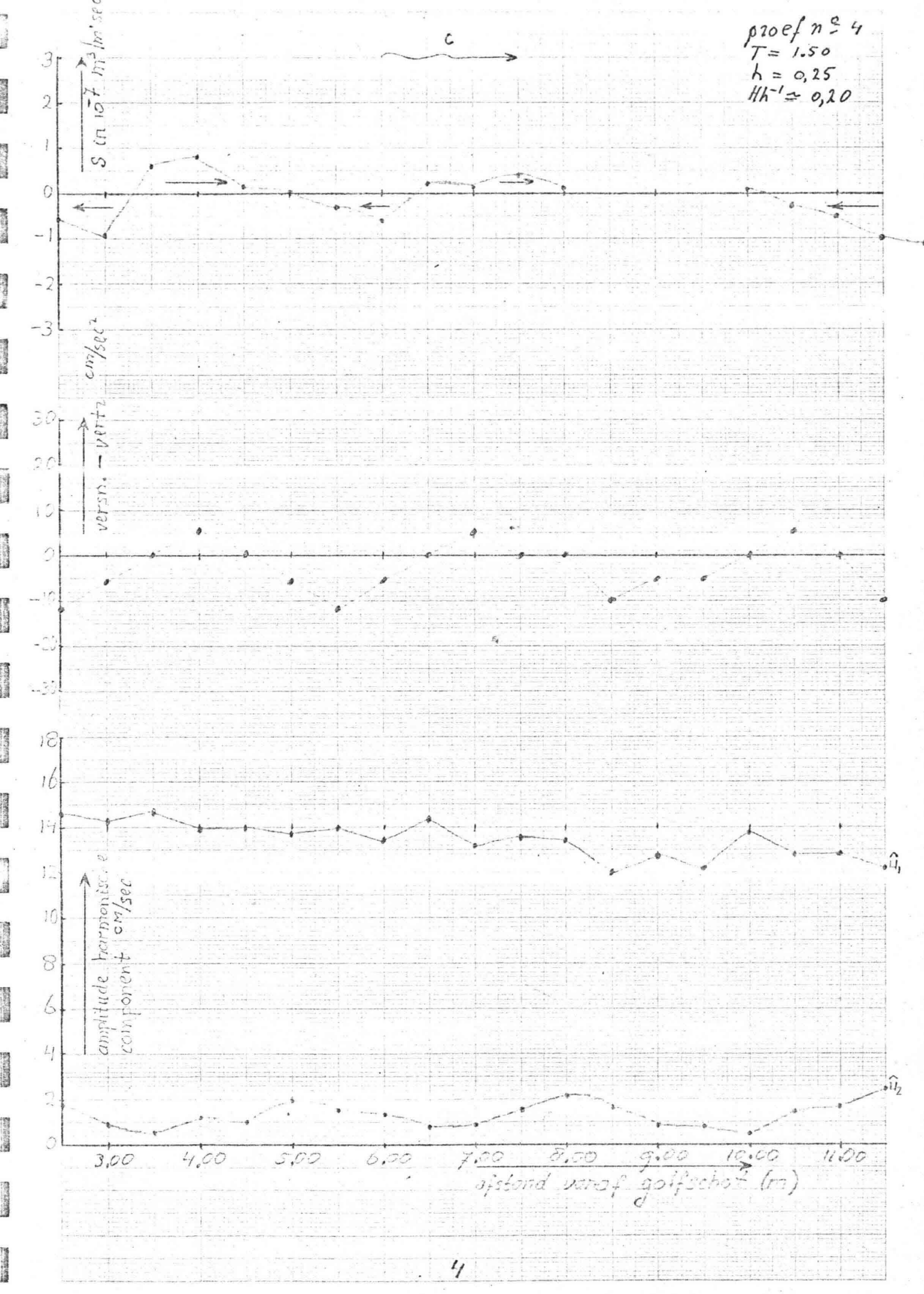
P. Vellinga
Kustwaterbouwkunde
Delft

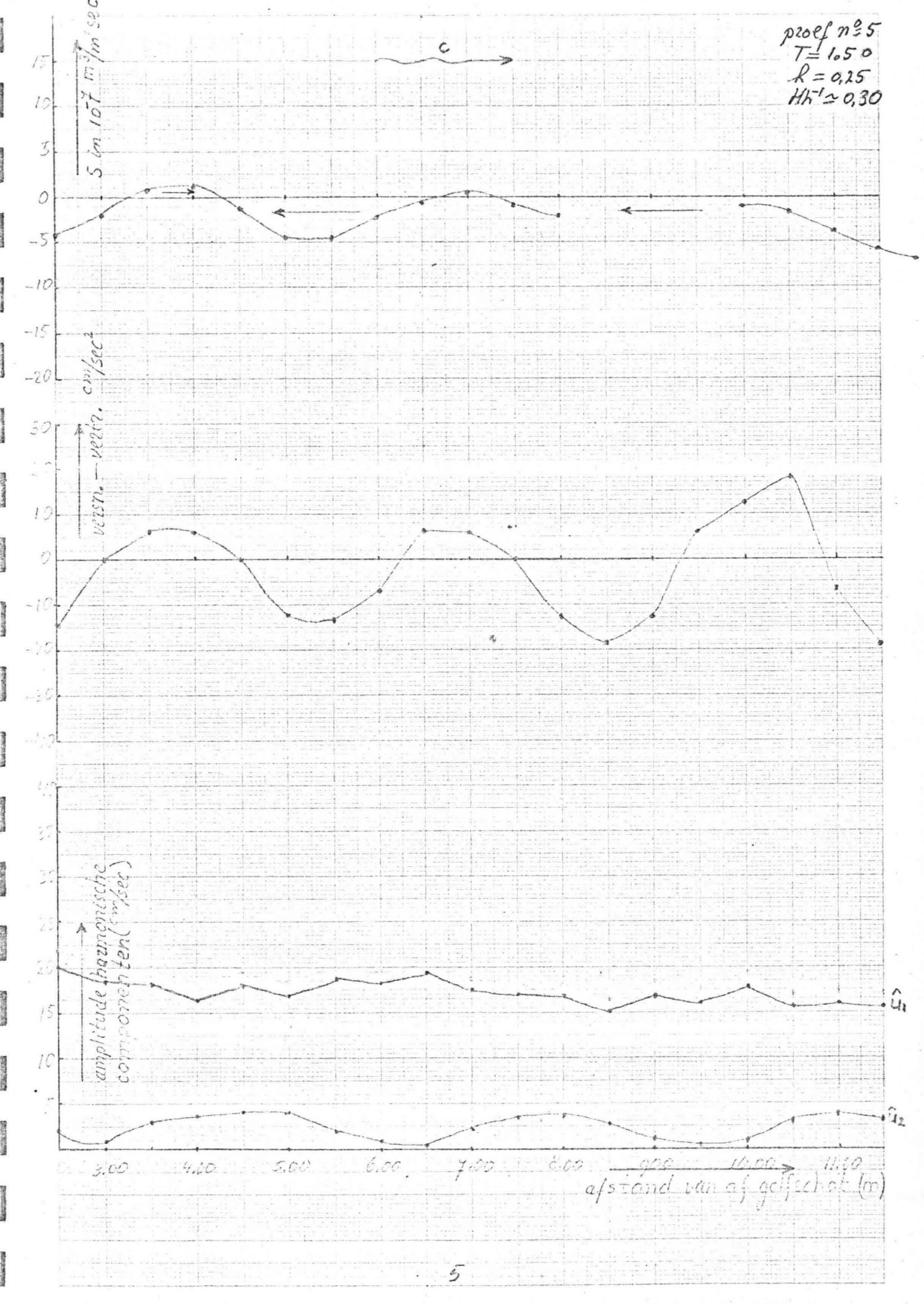


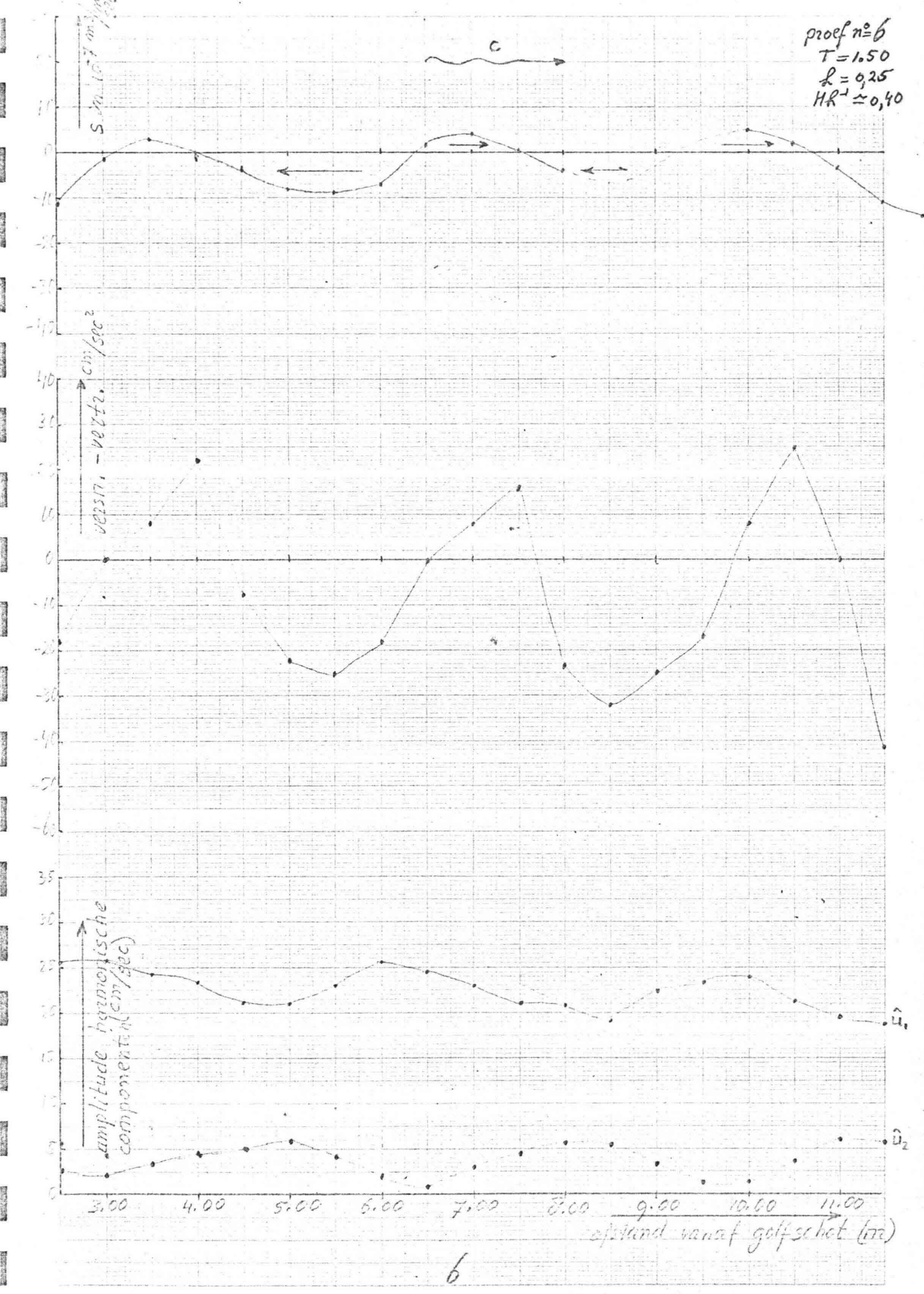
proef nº 1
T = 1.50 s
h = 0.20 m
Hb⁻¹ ≃ 0.2
c
S in 10⁻⁷ m³/m'sec
versn – vertr. in cm/sec²
amplitude van harmonische componenten (cm/sec)
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

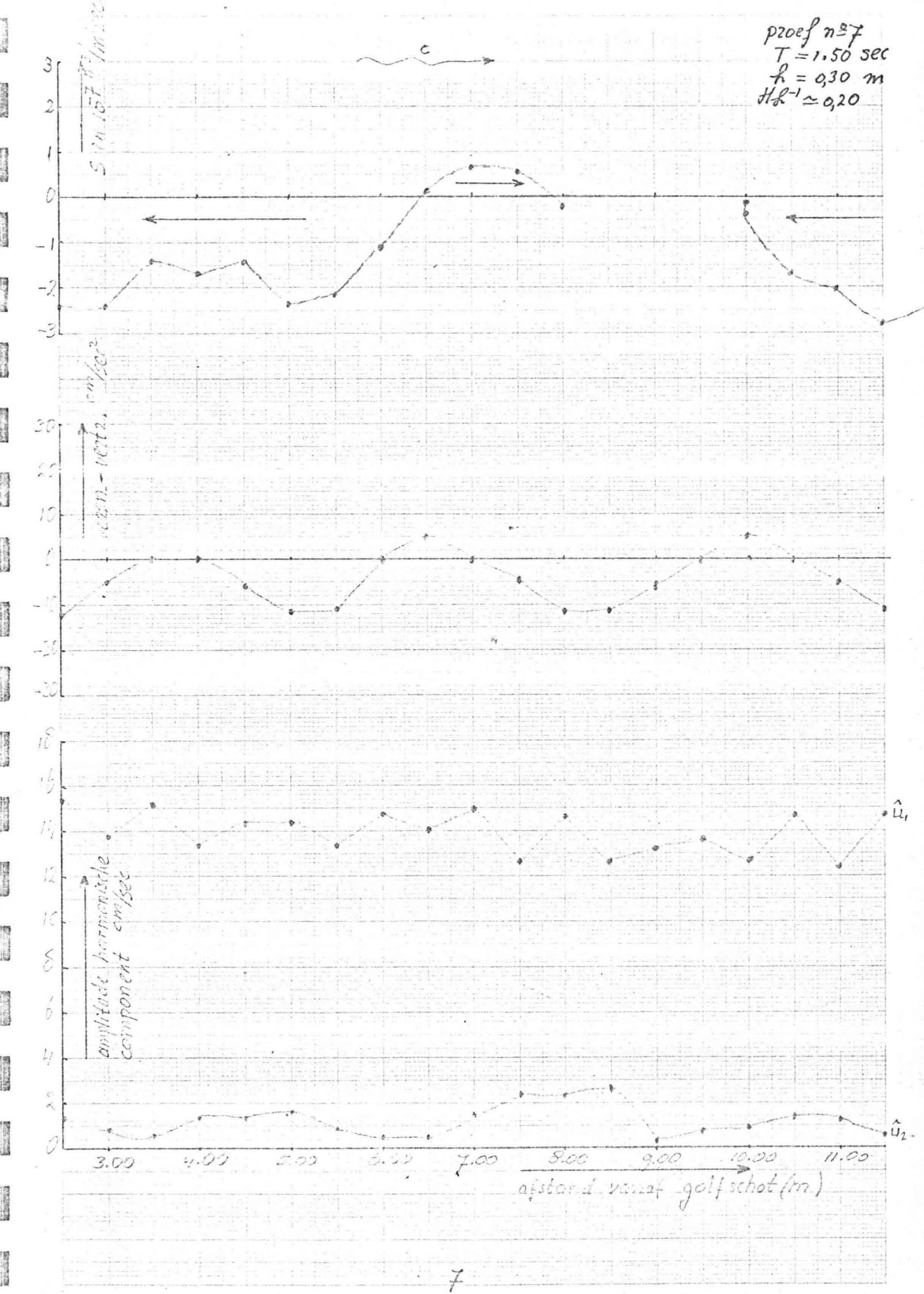

proef nº 2
T = 1.50 s
h = 0.20 m
Hh⁻¹ ≃ 0.3
c
afstand van golfschot (m.)

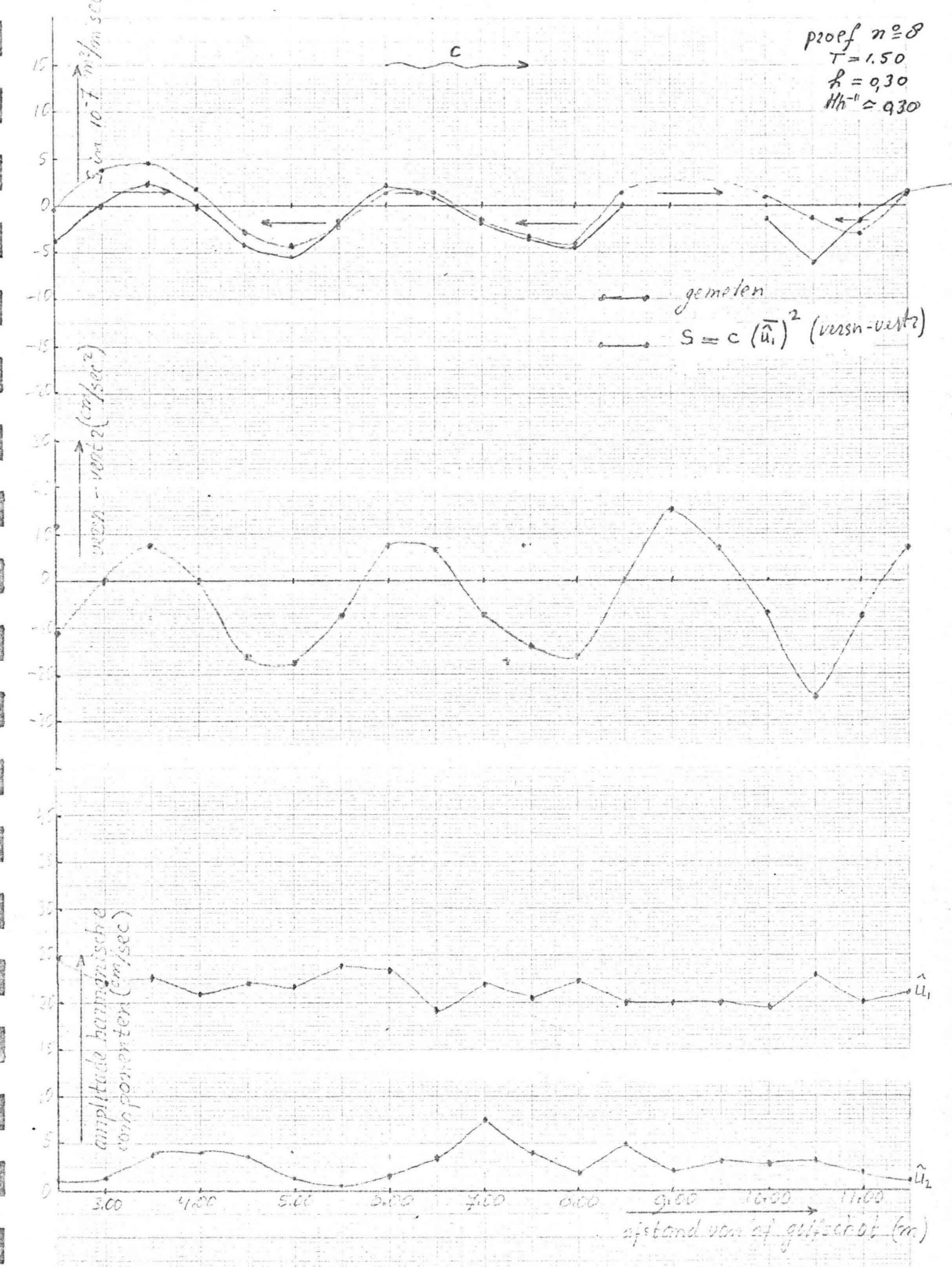

proef nº 3
T = 1.5
h = 0,2
Hh⁻¹ ≃ 0,
S in 10⁻⁷ m³/m'sec
c
verm. - vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m

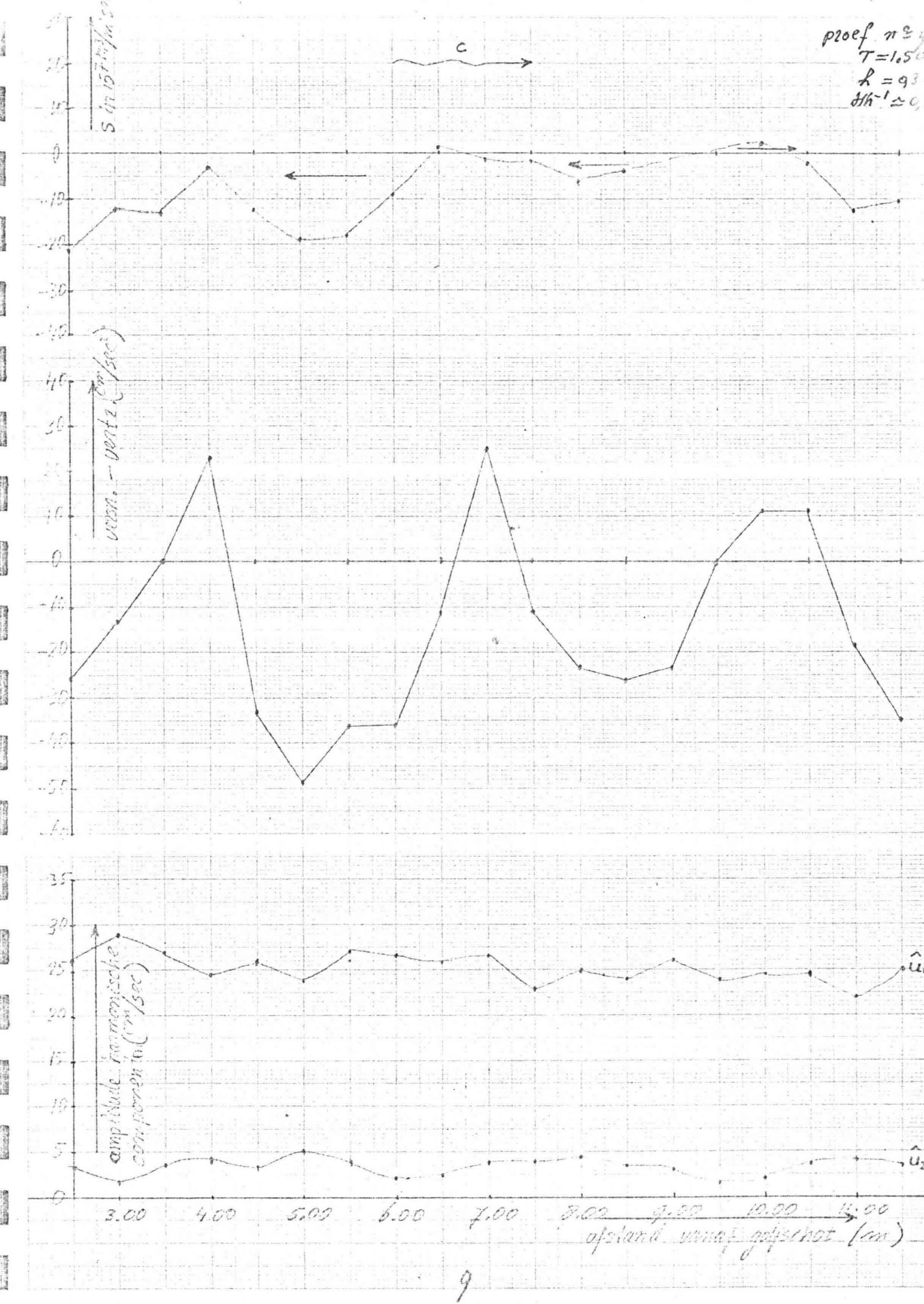

proef nº 4
T = 1.50
h = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
S in 10⁻⁷ m³/m'sec
versn. - vertz cm/sec²
amplitude harmonische component cm/sec
3,00
4,00
5,00
6,00
7,00
8,00
9,00
10,00
11,00
afstand vanaf golfschot (m)


proef n° 5
T = 1.50
h = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,30
c
5 in 10⁻⁷ m³/m² sec
versn. — vertr. cm/sec²
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand van af golfschot (m)

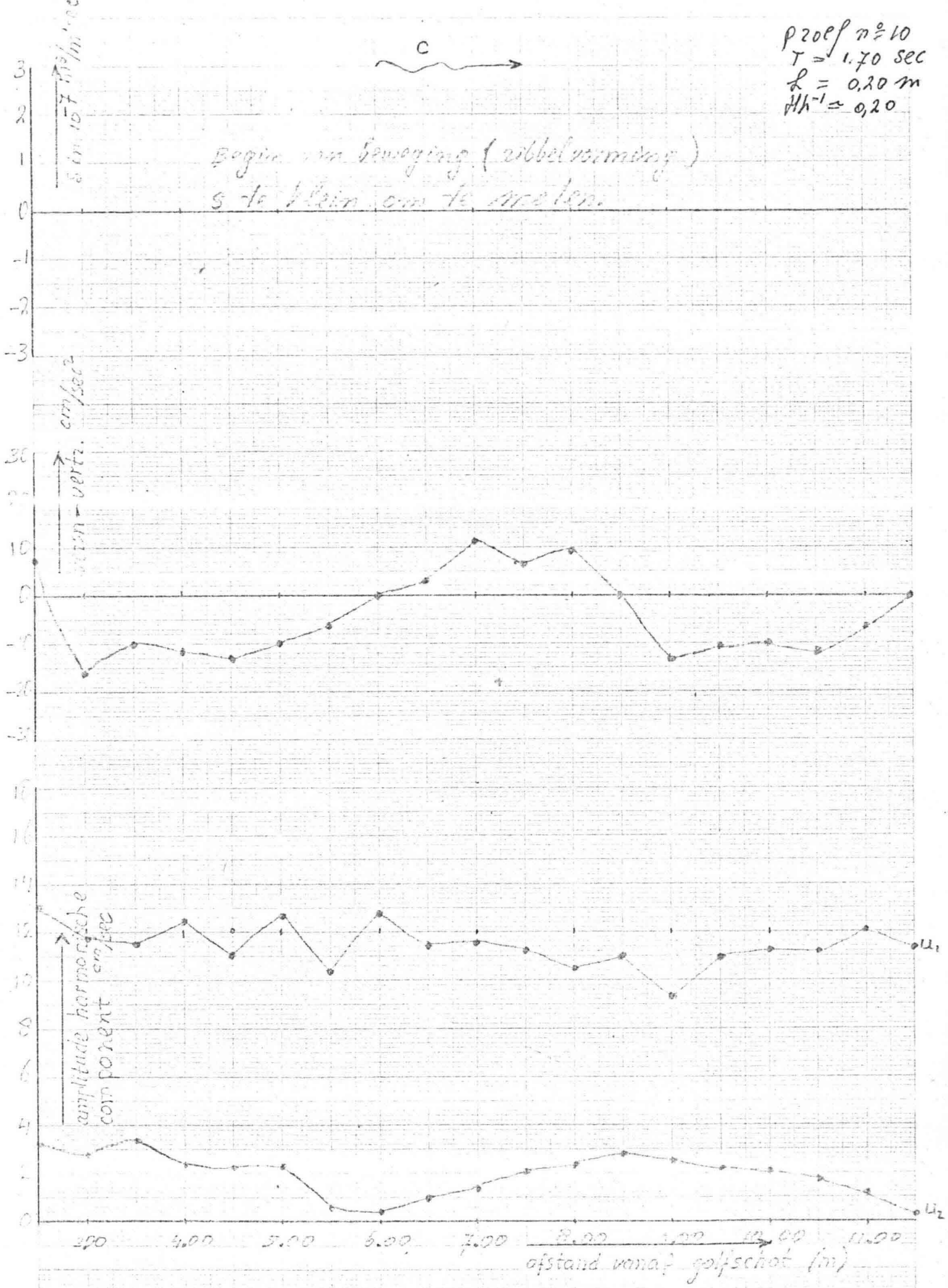

proef n° 6
T = 1.50
h = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,40
c
versn. - vertr. cm/sec²
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

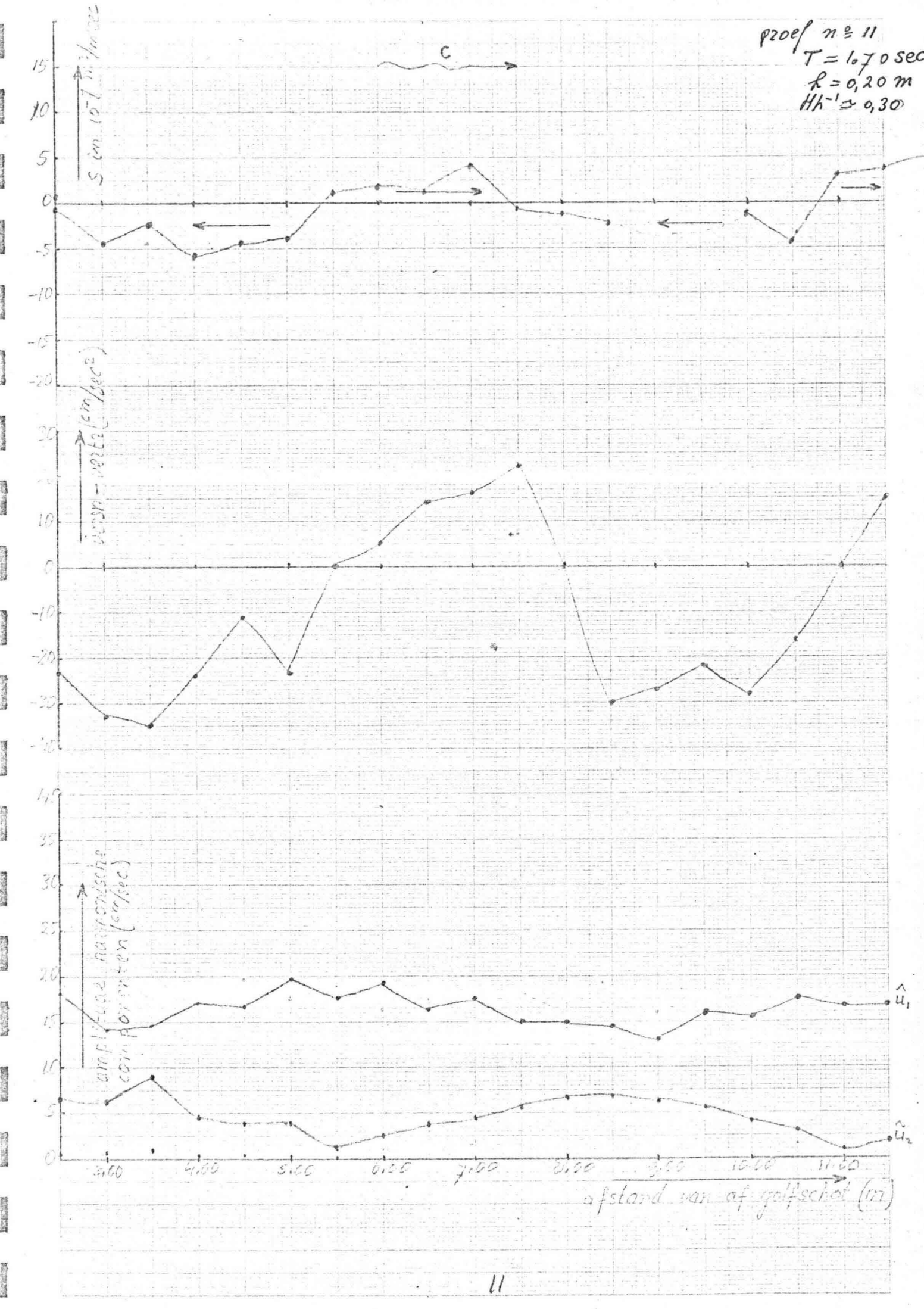

proef nº 7
T = 1.50 sec
h = 0,30 m
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
S in 10⁻⁷ m³/m sec
vers. - vert. cm/sec²
amplitude harmonische component cm/sec
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

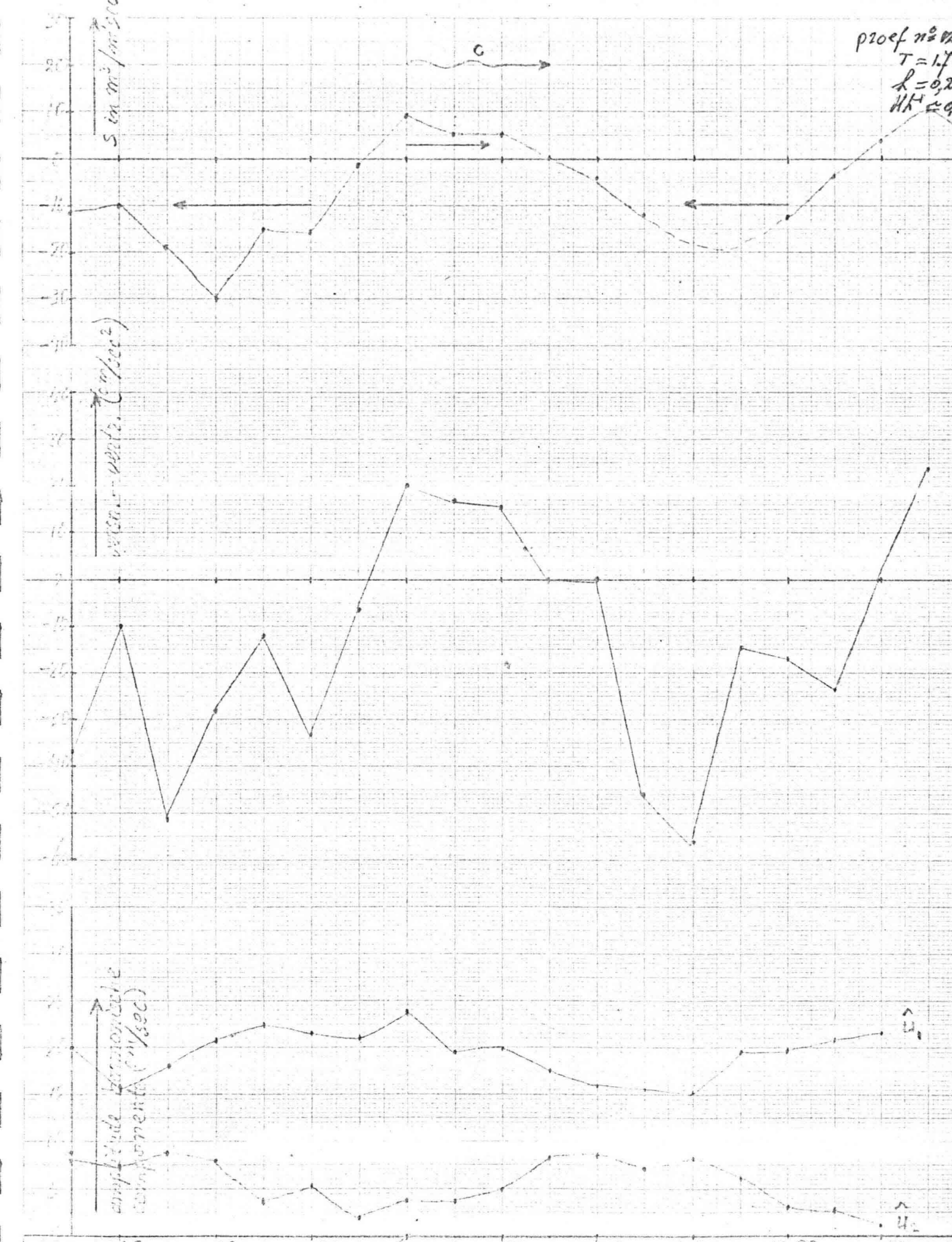

proef n°8
T = 1.50
h = 0,30
Hh⁻¹ ≈ 930
c
gemeten
S = c (ū₁)² (versn-vertr)
versn - vertr (cm²/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand van af golfschot (m)



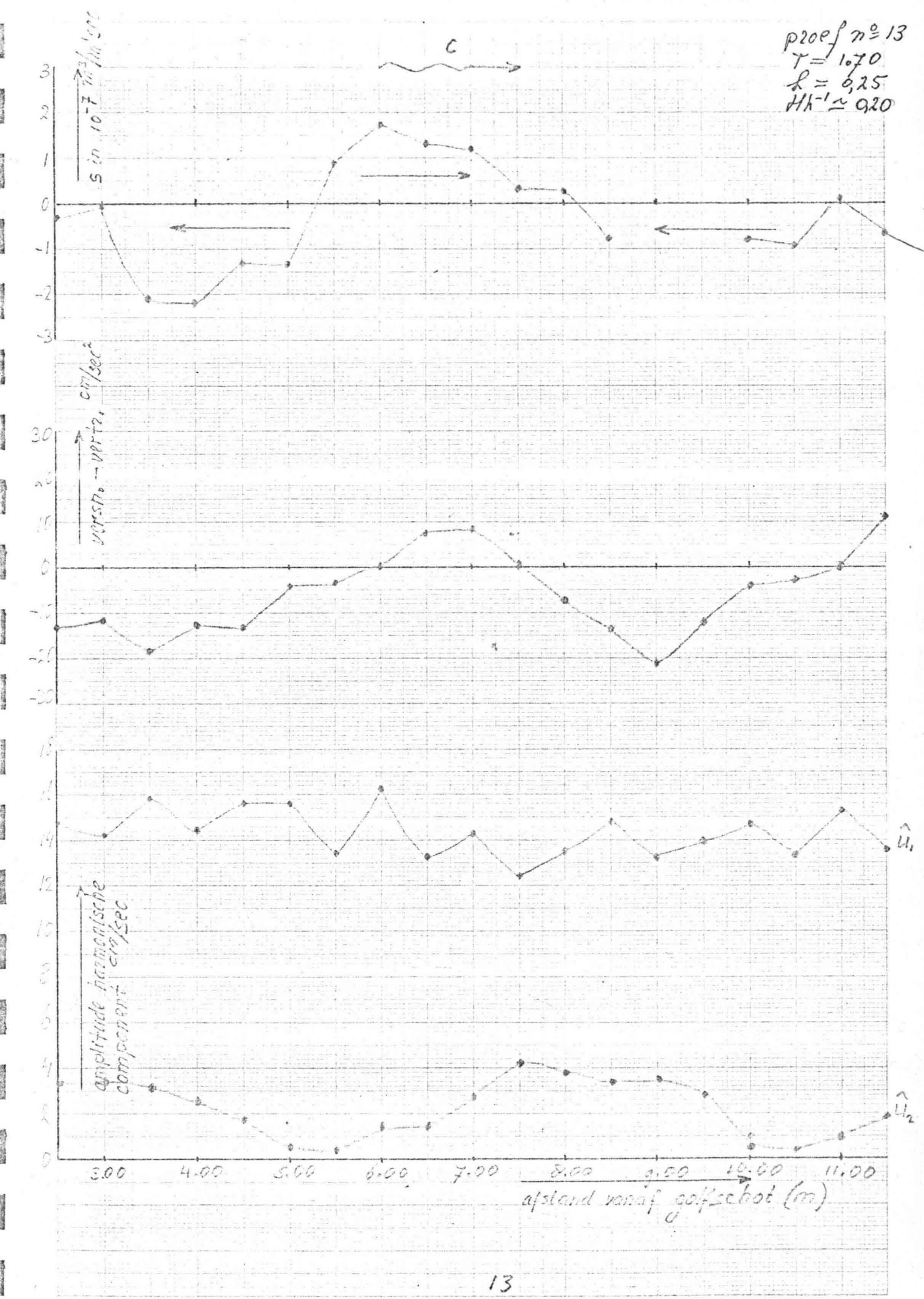
proef n°
T=1.5
h = 93
c
S in 10⁻⁷ m³/m
versn. - vertz. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (cm)

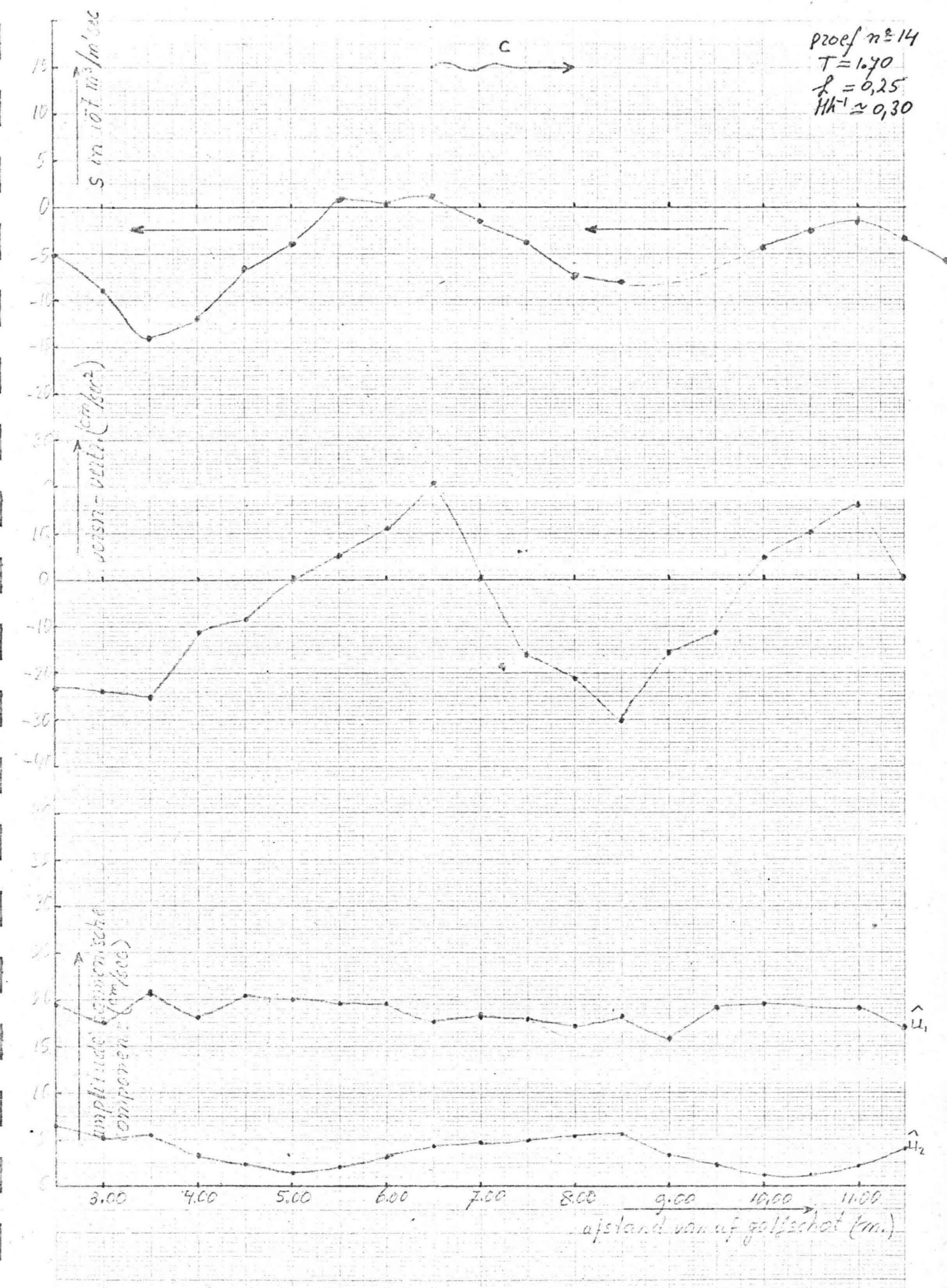

proef n° 10
T = 1.70 sec
L = 0,20 m
Hh⁻¹ = 0,20
C
Begin van beweging (ribbelvorming)
s te klein om te meten.
s in 10⁻⁷ m³/m sec
cm/sec²
vertr.
amplitude harmonische component cm/sec
u₁
u₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

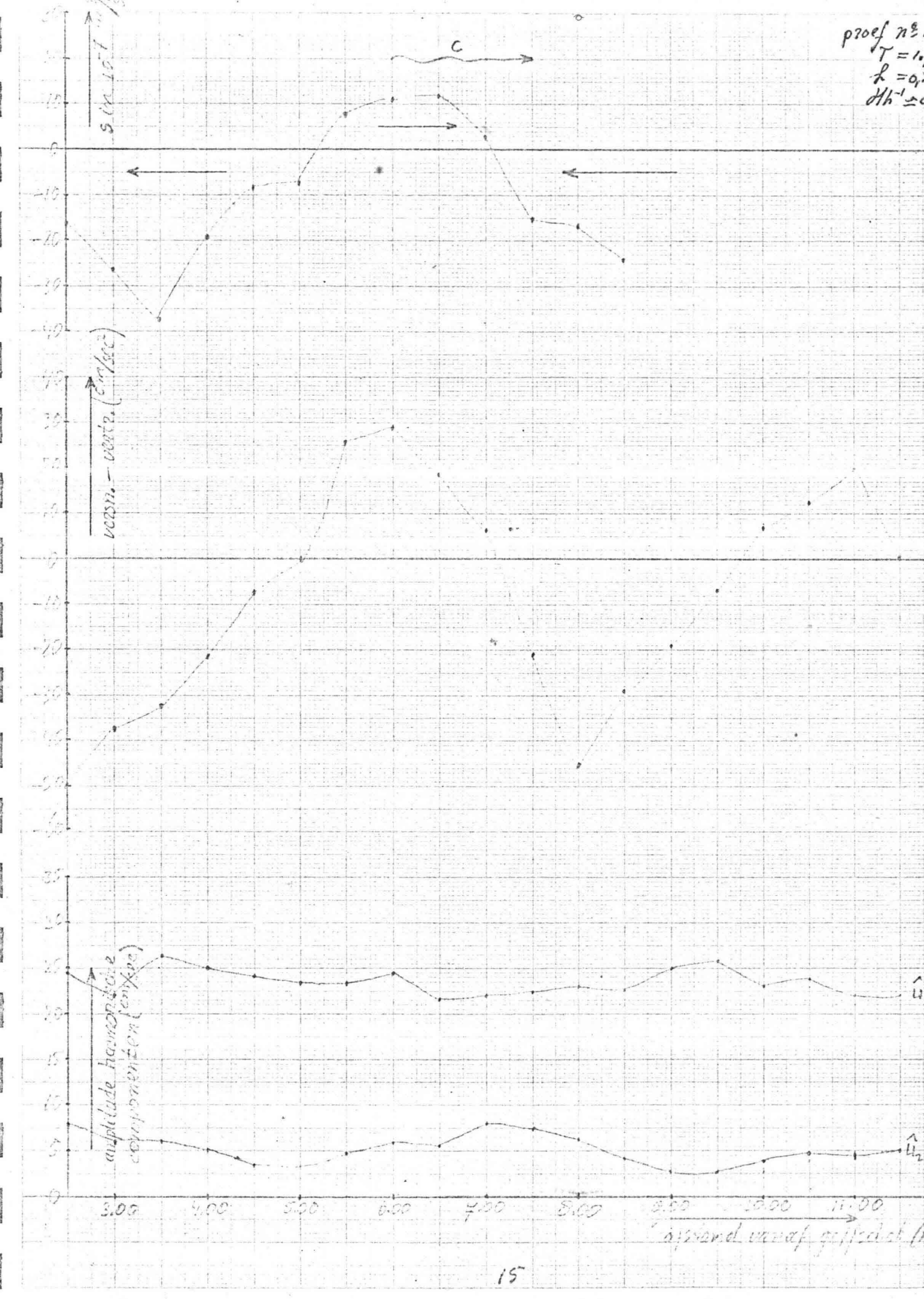

proef n° 11
T = 1,70 sec
h = 0,20 m
Hh⁻¹ ≈ 0,30
C
S in 10⁻⁷ m³/m sec
versn - vertr (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand van af golfschot (m)

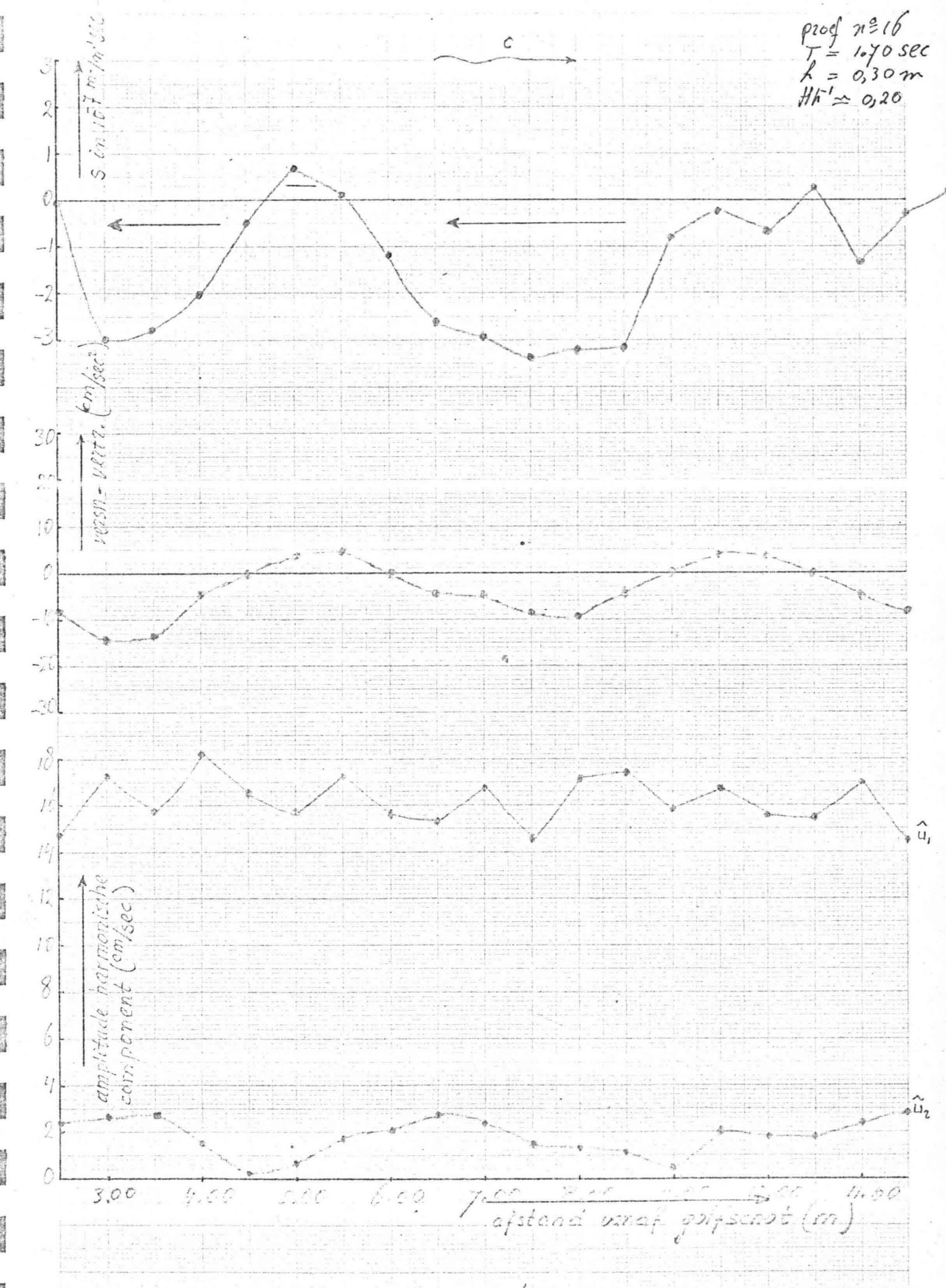


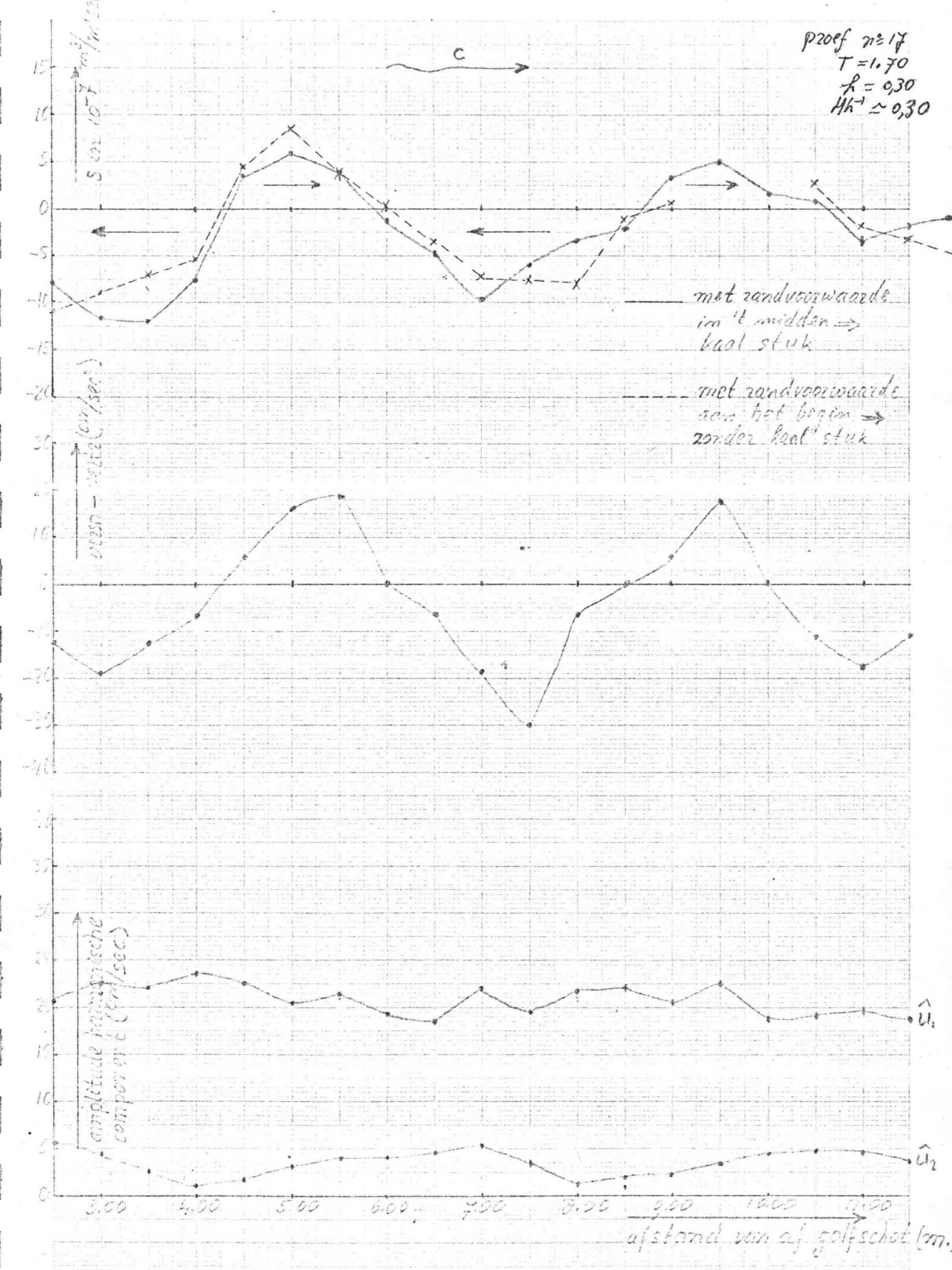
proef nº
T = 1.7
h = 0,2
c
S in m³/m/sec
vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componente (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m

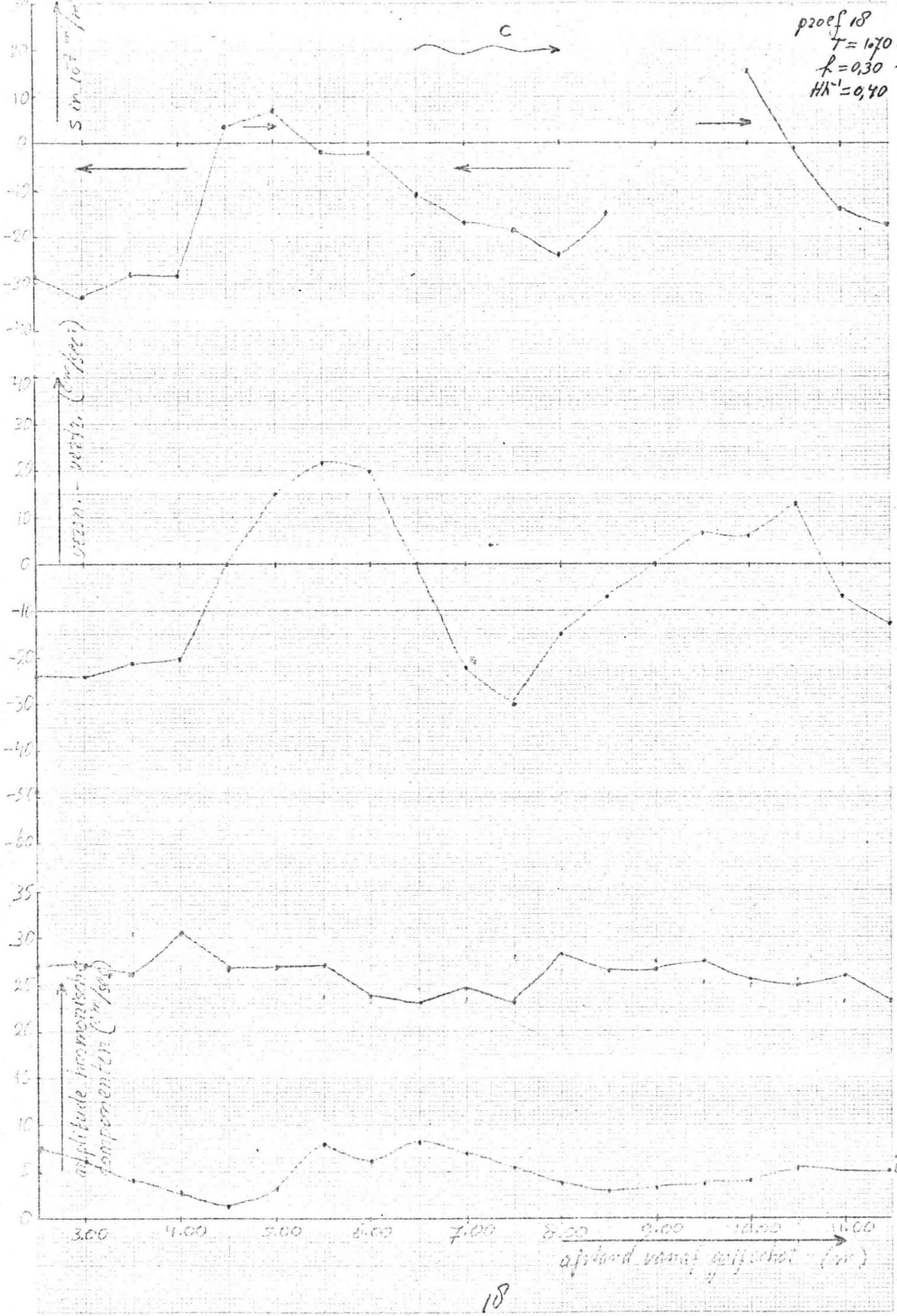

proef n° 13
T = 1,70
h = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
s in 10⁻⁷ m³/hh⁻¹sec
versn. - vertr. cm/sec²
amplitude harmonische component cm/sec
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

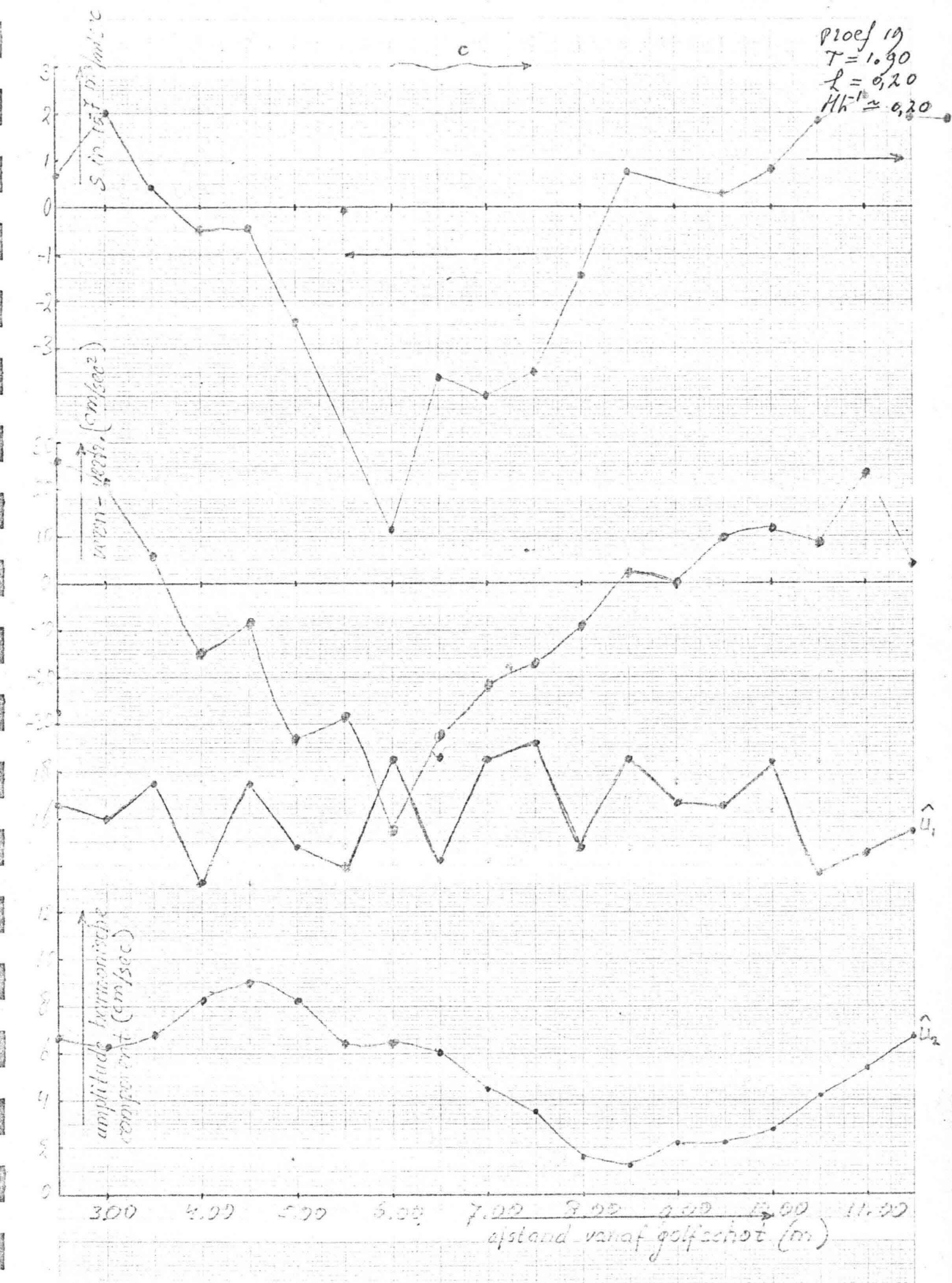

proef nº 14
T = 1.70
L = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,30
c
S in 10⁻⁷ m³/m'sec
volsn-vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
û₁
û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand van af golfschot (m.)


C
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00

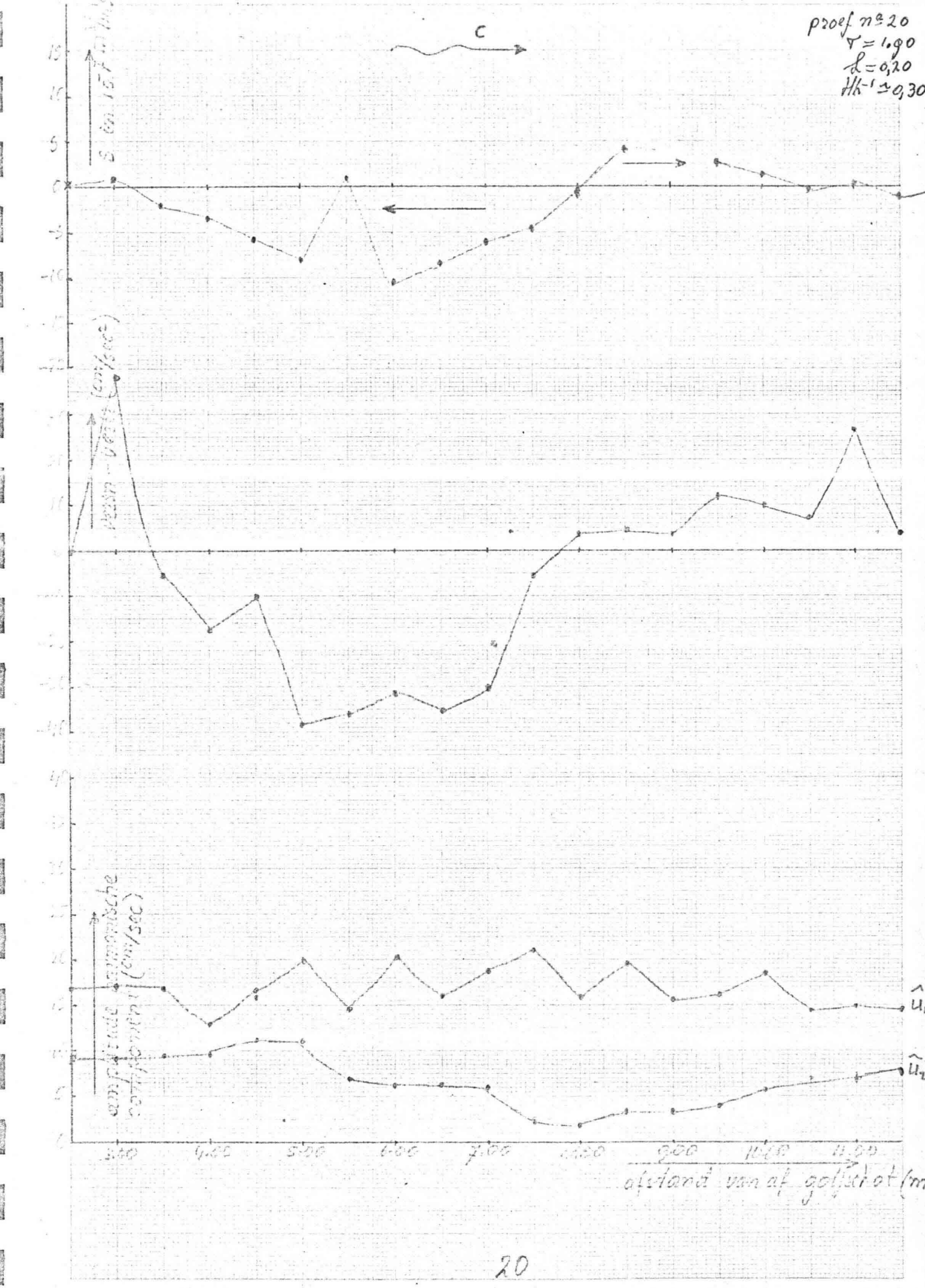

proef n° 16
T = 1.70 sec
h = 0,30 m
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
S in 10⁻⁷ m/m² sec
versn - vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische component (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
4.00
afstand vanaf golfschot (m)

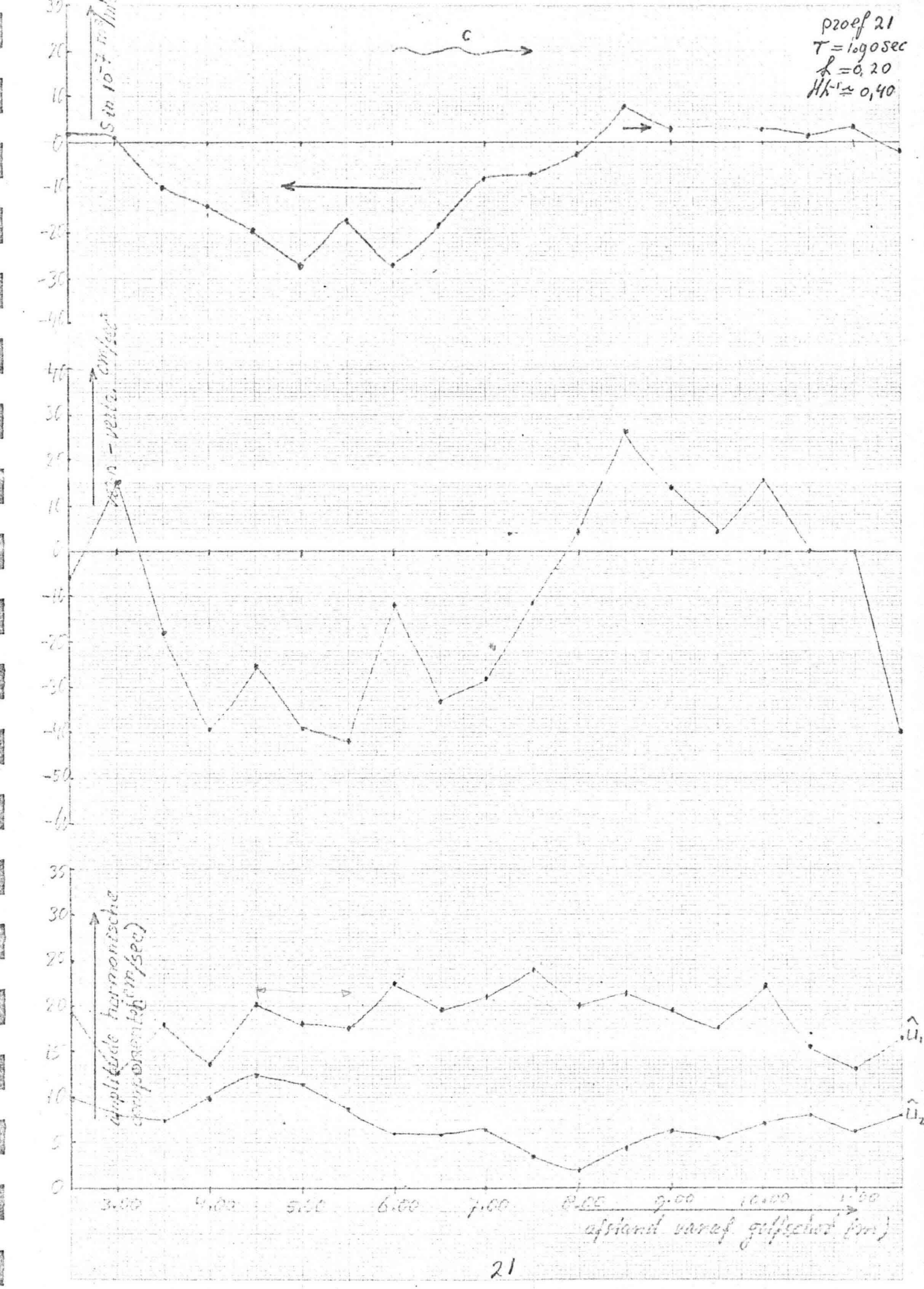

proef nº 17
T = 1.70
h = 0,30
Hh⁻¹ ≃ 0,30
c
met randvoorwaarde in 't midden ⇒ kaal stuk
met randvoorwaarde aan het begin ⇒ zonder kaal stuk
amplitude harmonische component (cm/sec)
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand van af golfschot (m.

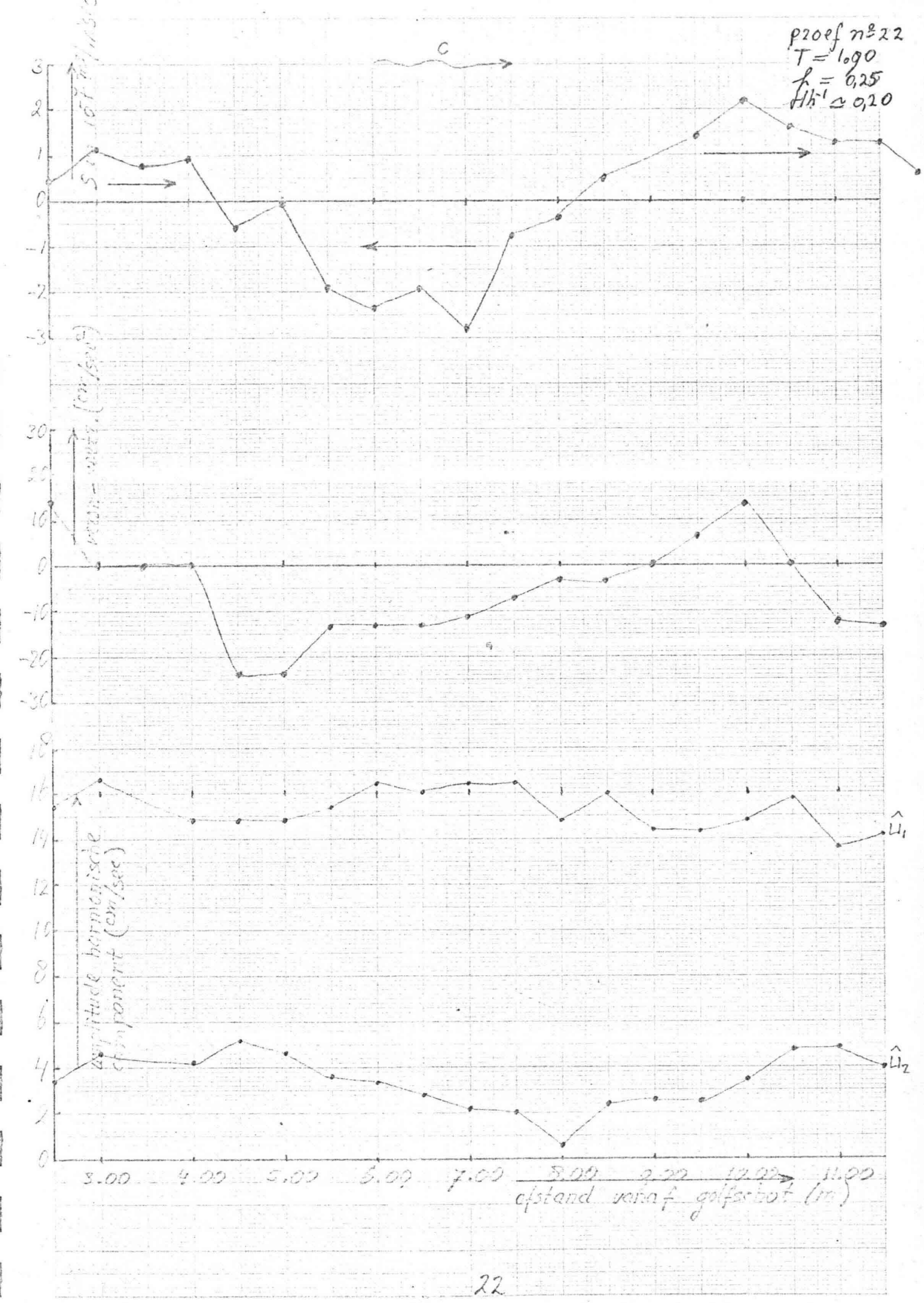

proef 18
T = 1.70 se
h = 0,30 m
Hh⁻¹ = 0,40
c
S in 10⁻⁷ m/m
verzn. - verdr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)
û₁
û₂

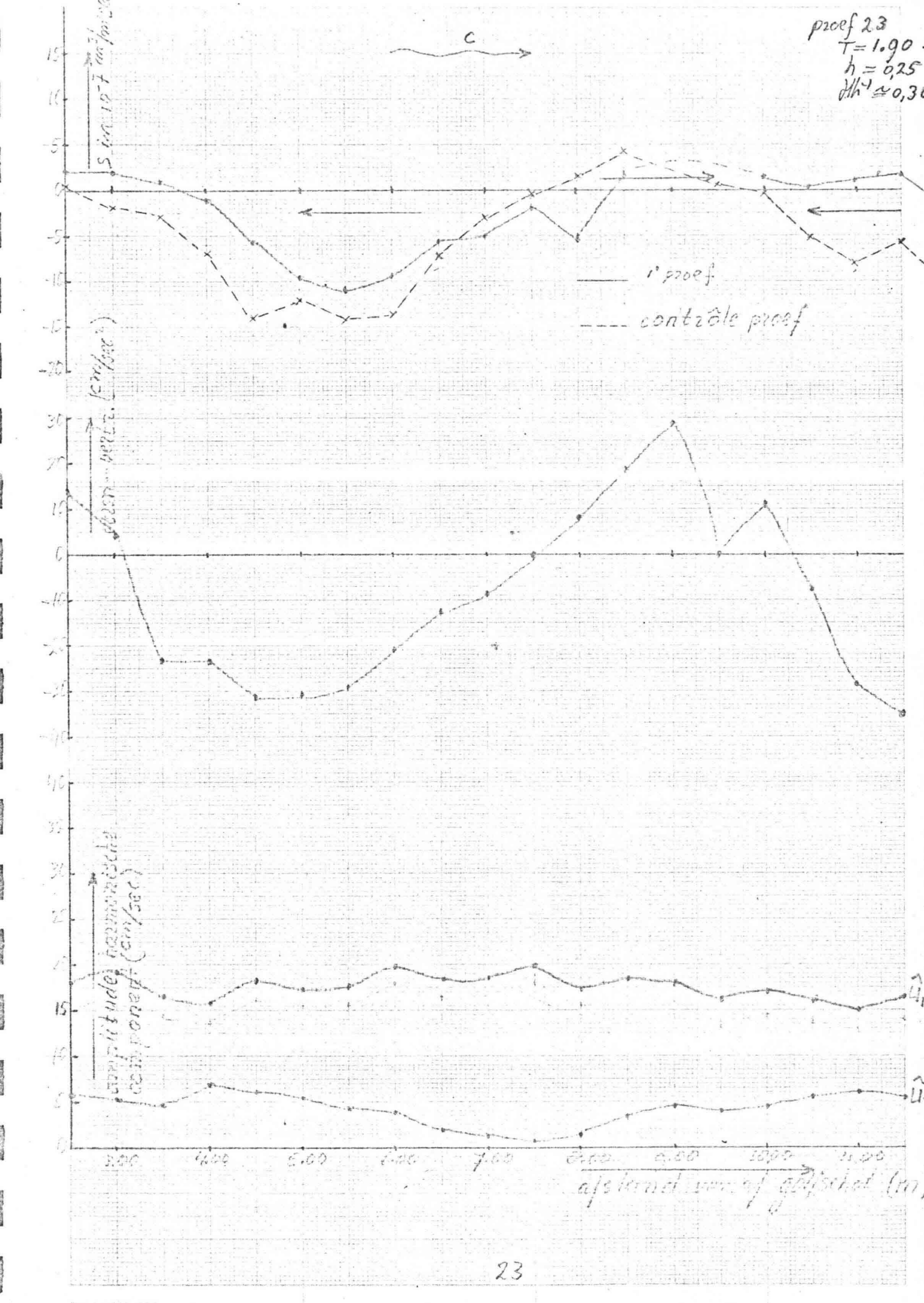


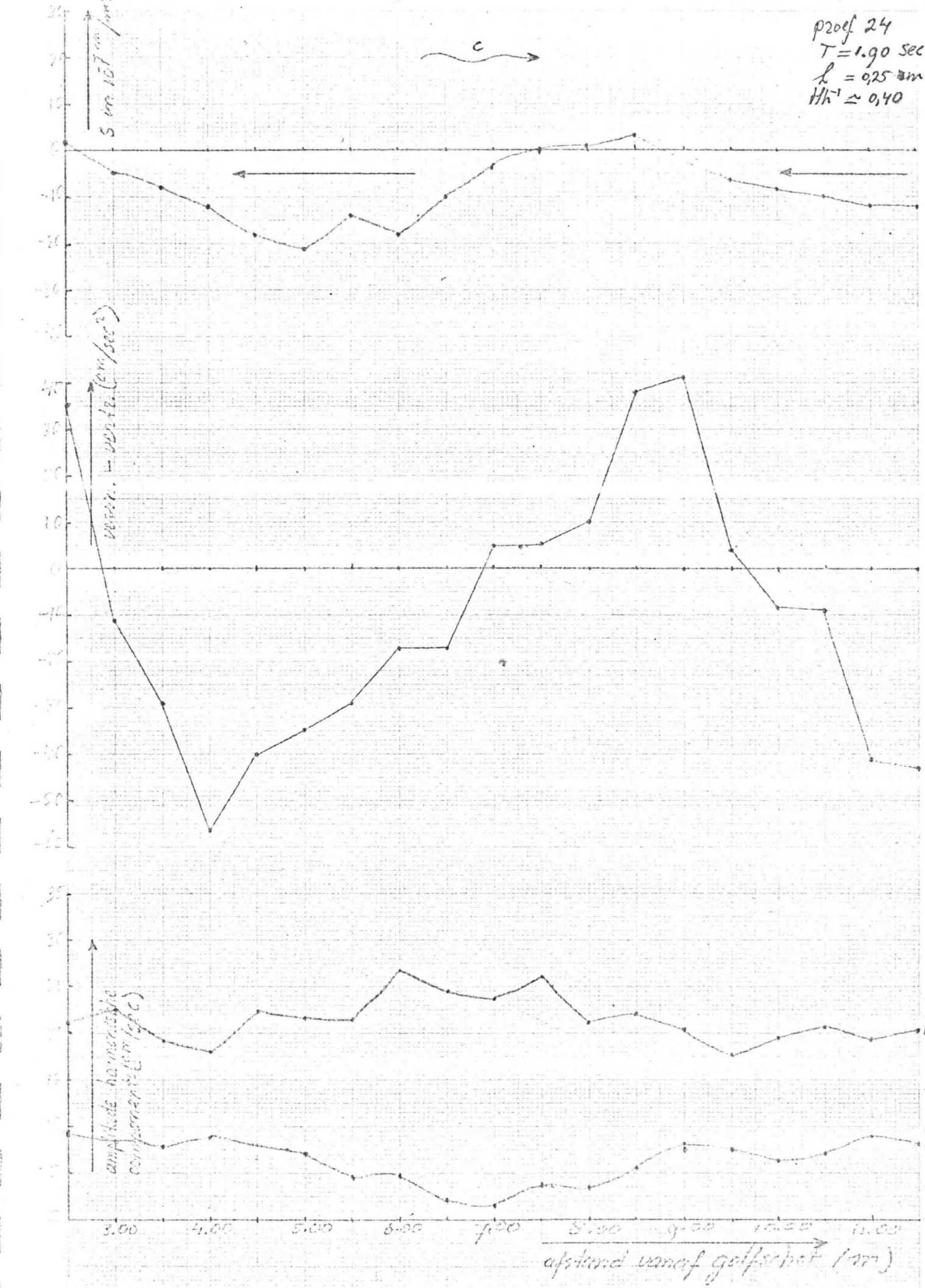
Proef 19
T = 1.90
L = 0,20
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
S in 10⁻⁷ m³/m/sec
versn - vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische component (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

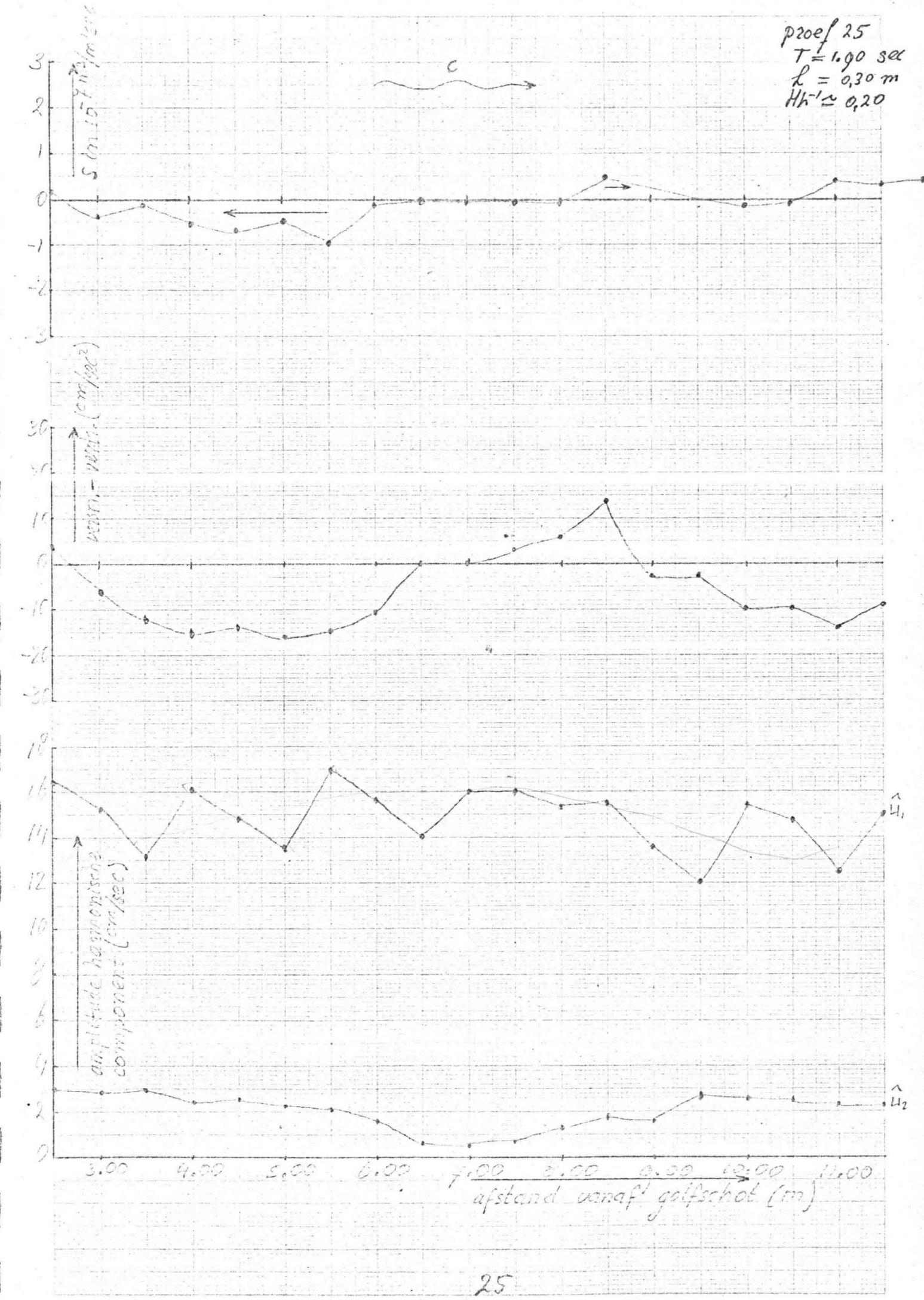

proef nº 20
τ = 1,90
L = 0,20
Hh⁻¹ ≃ 0,30
C
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
afstand van af golfschot (m
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00

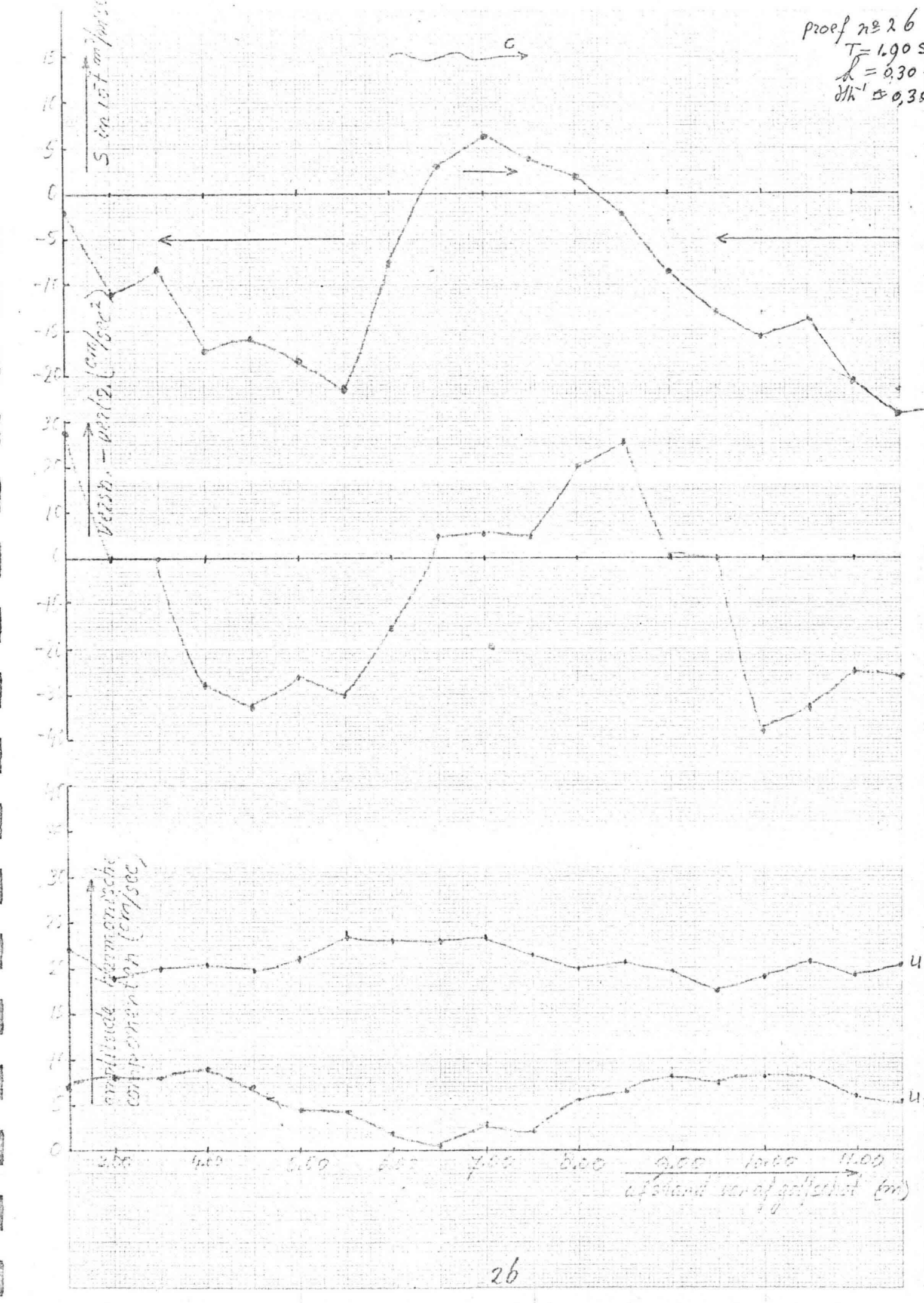

proef 21
T = 1.90 sec
h = 0,20
Hh⁻¹ ≈ 0,40
c
S in 10⁻⁷ m³/m
vert. cm/sec
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)


proef nº 22
T = 1,90
f = 0,25
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
3
2
1
0
-1
-2
-3
30
20
10
0
-10
-20
-30
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
amplitude harmonische component (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

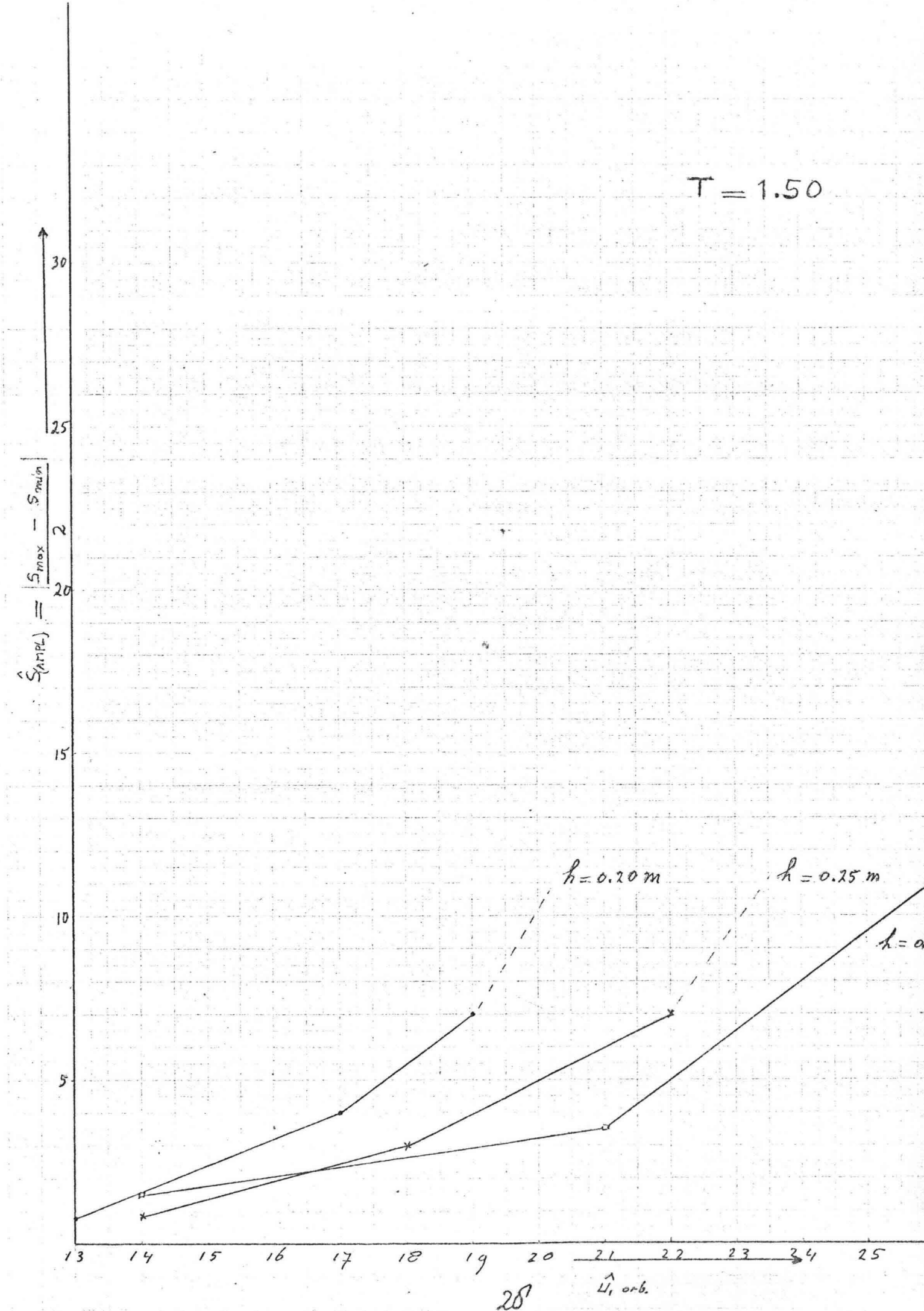

proef 23
T = 1.90
h = 0,25
c
1' proef
contrôle proef
amplitude harmonische component (cm/sec)
afstand van af golfschot (m)

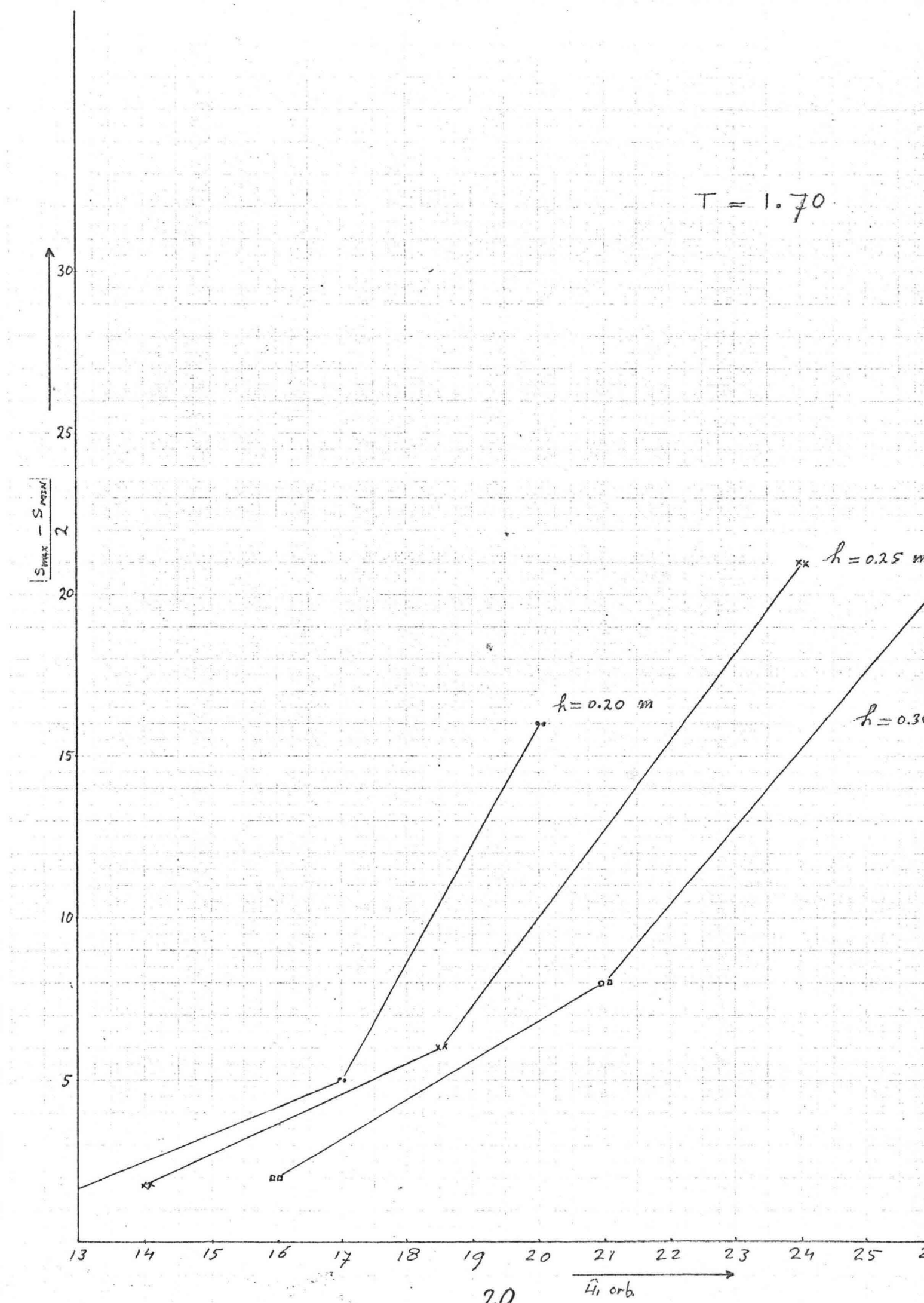

proef 24
T = 1.90 sec
l = 0,25 m
Hh⁻¹ ≃ 0,40
c
S in 10⁻⁷ m/m
vern. - vertr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
Û₁
Û₂
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)

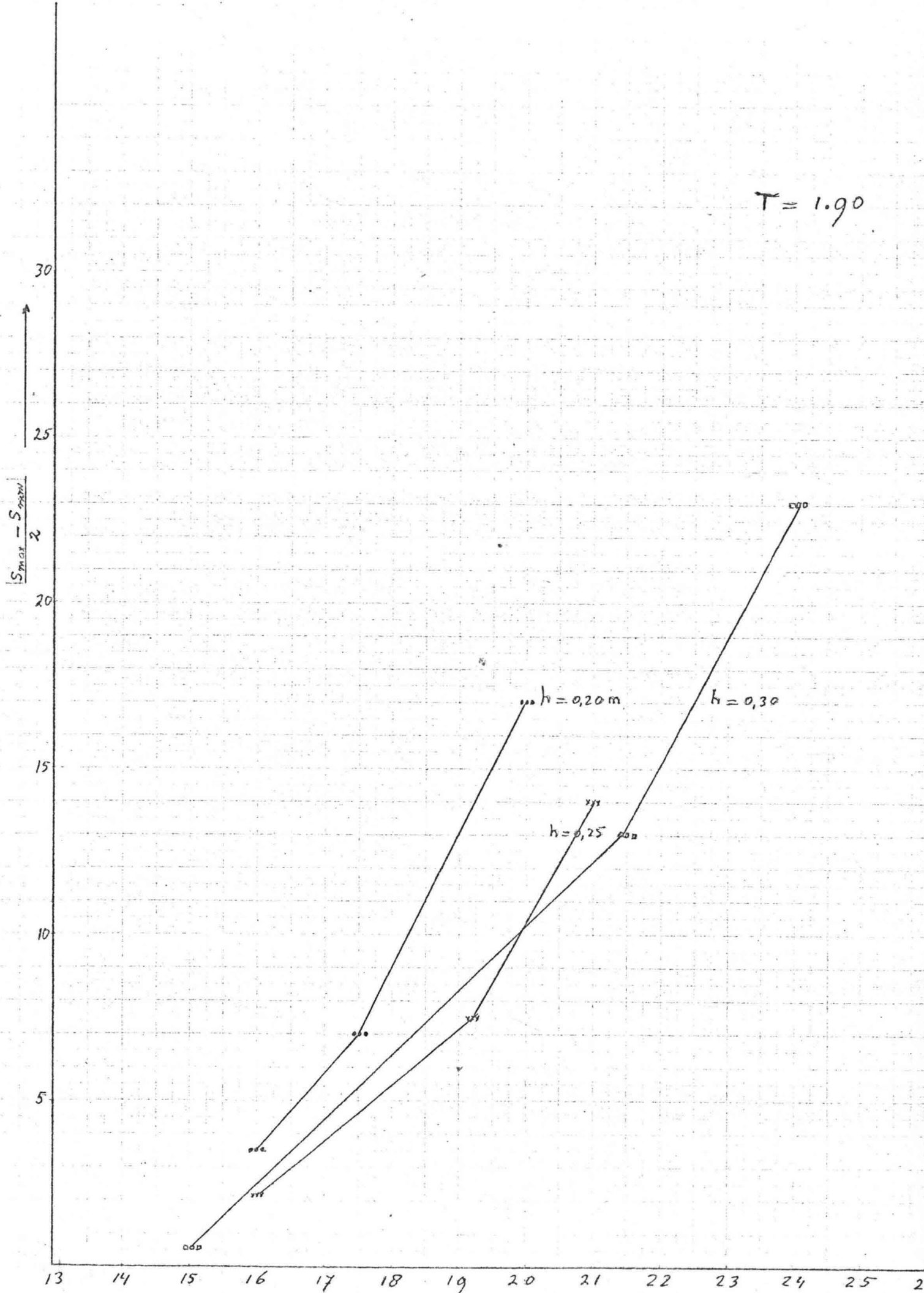

proef 25
T = 1.90 sec
h = 0,30 m
Hh⁻¹ ≃ 0,20
c
S (m 10⁻⁷ m³/m sec)
verm. - verm. (cm/sec²)
amplitude harmonische component (cm/sec)
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)


proef nº 26
T = 1.90 s
h = 0,30
S in 1st m/sec
Versn. - vert. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten (cm/sec)
u
u
2.00
4.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
afstand vor af golfschot (m)

proef 27
T = 1.90 sec
h = 0,30 m
Hh⁻¹ ≃ 0,40
c
5 in 10⁻⁴ m/s²
vorm. – wntr. (cm/sec²)
amplitude harmonische componenten cm/sec
$\hat{u}_1$
$\hat{u}_2$
6.00
7.00
9.00
10.00
11.00
afstand vanaf golfschot (m)


T = 1.50
$\hat{S}_{(AMPL)} = \frac{|S_{max} - S_{min}|}{2}$
30
25
20
15
10
5
h = 0.20 m
h = 0.25 m
h = 0
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
$\hat{U}_{1, orb.}$


T = 1.70
$\frac{|S_{max} - S_{min}|}{2}$
30
25
20
15
10
5
h = 0.25 m
h = 0.20 m
h = 0.3
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
$\hat{H}_1$ orb.


T = 1.90
30
25
20
15
10
5
$\frac{S_{max} - S_{min}}{2}$
h = 0,20 m
h = 0,30
h = 0,25
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
$\hat{4}$, orb.