

SIMULERING AV STYRSYSTEM FÖR  
TANKFARTYG

BERTIL ASPERNÄS  
PER FOISACK

RE-154 Mars 1975  
Inst. för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola

SIMULERING AV STYRSYSTEM FÖR TANKFARTYG

B. ASPERNÄS

P. FOISACK

Handledare: C. KÄLLSTRÖM

## INNEHÅLL

	Sida
1. Sammanfattning .....	1
2. Abstract .....	2
3. Inledning .....	3
4. Båtdynamik .....	4
4.1 Koordinatsystem .....	4
4.2 Använda beteckningar .....	5
4.3 Båtmodell .....	7
4.4 Parametervärden .....	9
4.5 Simulering av vind- och sjöförhållanden ....	12
4.6 Simulering av mätfel .....	14
4.7 Överföringsfunktionen för linjär båtmodell .	14
4.8 Hastighetsprov .....	19
4.9 Standardprov .....	21
5. Manuell styrning .....	21
5.1 Beskrivning av program .....	21
5.2 Hur simulatoren användes .....	22
5.3 Ändring av banans utseende .....	26
5.4 Exempel .....	26
6. Styrning med PID-regulator .....	29
6.1 Beskrivning av program .....	29
6.2 Kriterier för optimering .....	29
6.3 Beskrivning av provserien .....	30
6.4 Optimal regulator .....	31
7. Styrning med adaptiv regulator .....	35
7.1 Beskrivning av den adaptiva regulatoren .....	35
7.2 Beskrivning av program .....	35
7.3 Kriterier för optimering .....	36
7.4 Beskrivning av strukturvariabler och provserier .....	36
7.5 Optimal och suboptimal regulator .....	48
8. Slutsatser .....	52
9. Referenser .....	53
Appendix A - Standardprov	A1
Appendix B - Simuleringar med PID-regulator	B1
Appendix C - Simuleringar med adaptiv regula- tor	C1
Appendix D - Program använda vid manuell styr- ning	D1
Appendix E - Program använda vid styrning med PID- och adaptiv regulator	E1

## 1. SAMMANFATTNING

Syftet med denna undersökning var, dels att genom simuleringar jämföra förmågan att med små roderrörelser hålla ett fartyg på önskad kurs med en adaptiv regulator och en PID-regulator, dels att göra en simulator med vars hjälp man kan få en uppfattning om möjligheten att styra manuellt genom olika trånga passager. Ett antal standardprov vid fartygsleveranser simulerades även. Dessa prov kunde sedan i viss utsträckning jämföras med registreringar av verkliga standardprov.

Den olinjära matematiska modell för fartyget som användes vid simuleringarna beskriver rörelsen i horisontalplanet. Parametervärdena i modellen är estimerade för en 255 000 dwt tankbåt. Stokastiska störningar för att beskriva inverkan från vind och vågor på fartyget infördes också.

Den adaptiva regulatorn estimerar parametrar enligt minsta-kvadrat-metoden och gör en styrlag som minimerar variansen av kursfelet. Denna styrlag visade sig medföra att kursavvikelsen blev mindre men roderrörelserna större, än om en väl injusterad PID-styrlag användes under samma förhållanden. Den adaptiva regulatorn har den stora fördelen framför PID-regulatorn att inga parametrar manuellt behöver injusteras för olika fartyg, lastförhållanden och vädertyper. En lämplig injustering av parametrarna i en PID-regulator har under vissa förhållanden på verkliga fartyg visat sig vara svår att utföra. En tänkbar vidareutveckling av den i detta examensarbete testade adaptiva regulatorn vore att även straffa roderrörelserna vid beräkningen av styringreppen.



## 2. ABSTRACT

The main purpose of this investigation was to compare, by simulations, the ability of an adaptive regulator and a PID-regulator to keep a ship on desired course with small rudder deflections. Manual steering in confined waters of the simulated ship was also performed. Recordings of delivery tests from real ships were compared to simulations.

The non-linear mathematical model of the ship, which was used in the simulations, describes the motion in the horizontal plane. The values of the model parameters are estimated for a 255 000 dwt tanker. Stochastic disturbances to describe the influence of wind and waves were also introduced in the ship model.

The adaptive regulator performs a least squares estimation of the parameters in a controller which minimizes the variance of the course error. This regulator gave smaller course errors but larger rudder deviations than a well tuned PID-regulator. The large advantage of the adaptive regulator compared to the PID-regulator is that no manual tuning of parameters for different speeds, loading conditions and weather types is necessary. The manual tuning of the parameters of a PID-regulator has sometimes proved to be difficult to perform on real ships. A conceivable development of the adaptive regulator, which is tested in this report, is to consider the rudder deviations too, when the control is computed.

### 3. INLEDNING

Dagens tankfartyg har så stora tidskonstanter, att de med manuell styrning blir mycket svåra att hålla på rak kurs. Om styrningen överlåtes åt en regulator kan både kursavvikelser och roderrörelser nedbringas väsentligt. Detta gör att frakten blir mer ekonomisk.

Båtsimulatorn inplementerades på processdatorn PDP-15 med hjälp av simuleringspaketet SIMNON, version 3B (se Elmqvist (1975)). Den matematiska fartygsmodell som användes finns beskriven i Norrbin (1971). Parametrarna i modellen gavs värden som estimerats för ett 255 000 dwt tankfartyg.

Vi vill framföra vårt varma tack till Statens Skeppsprovningsanstalt och till Kockums Mekaniska Verkstads AB för erhållet material.

4. BÅTDYNAMIK

## 4.1 KOORDINATSYSTEM

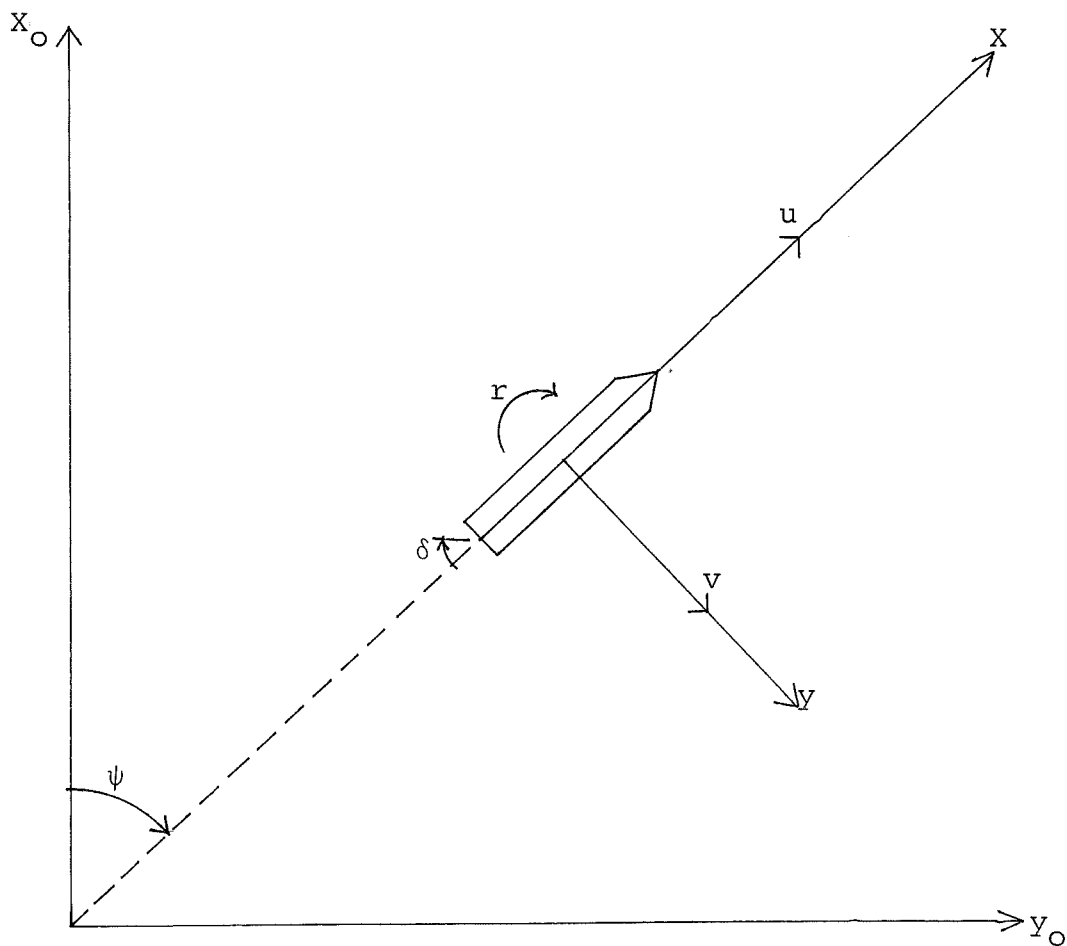


Fig. 4.1

Båtens tillstånd anges med koordinatsystemet i fig 4.1 som bas. Båten antages endast röra sig i horisontalplanet varför den bara har tre frihetsgrader: framåthastighet, tvärs-hastighet och girvinkelhastighet.

## 4.2 ANVÄNDA BETECKNINGAR

I detta avsnitt redogör vi för använda beteckningar i systemekvationerna och programmen. Då dessa skiljer sig åt, anger vi programbeteckningen inom parentes. Den använda matematiska modellen finns behandlad i Norrbin (1971), där också den införda normaliseringen ("bis"-systemet) finns beskriven. Nedanstående figur ger en översikt av insignaler, tillstånd och utsignaler.

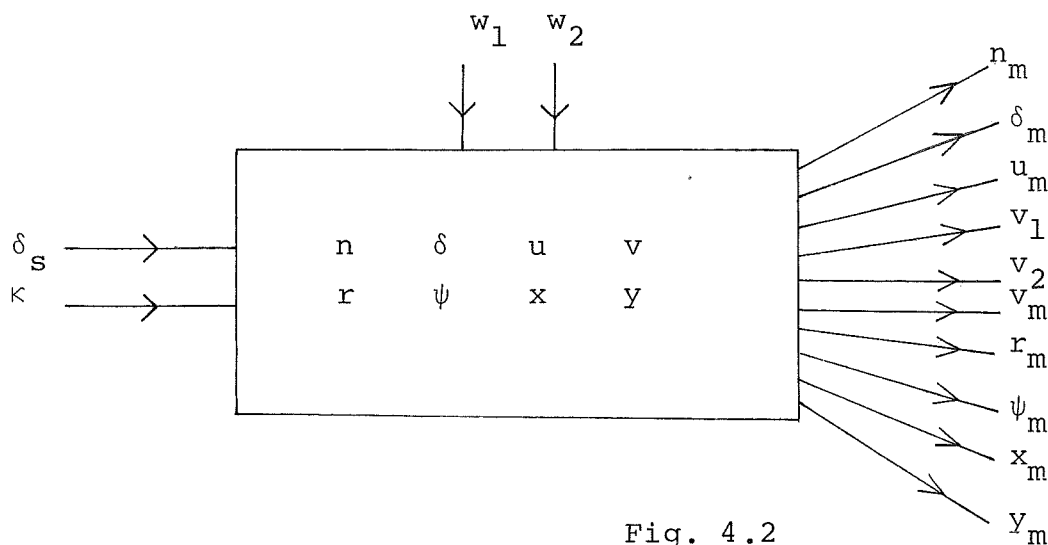


Fig. 4.2

Insignaler:	$\delta_s$	(DELTS)	grad	rodersignal
	$\kappa$	(KAPPA)	-	relativt ånginsläpp
Störningar:	$w_1$	(W1)	$m/s^2$	filtrerat brus, acceleration från vind- och sjökrafter
	$w_2$	(W2)	$rad/s^2$	filtrerat brus, vinkelacceleration från vind- och sjökrafter
Tillstånd:	$\delta$	(DELTA)	rad	rodervinkel
	$n$	(N)	$1/s$	varvtal
	$u$	(U)	$m/s$	hastighet framåt
	$v$	(V)	$m/s$	tvärshastighet
	$r$	(R)	$rad/s$	girvinkelhastighet
	$\psi$	(PSI)	rad	kurs
	$x$	(X)	m	x-koordinat
	$y$	(Y)	m	y-koordinat

Utsignaler:	$\delta_m$ (DELM)	grader	rodervinkel
	$n_m$ (NM)	rpm	varvtal
	$u_m$ (UM)	knop	hastighet framåt
	$v_m$ (VM)	knop	tvärshastighet masscentrum
	$v_1$ (V1)	knop	" för
	$v_2$ (V2)	knop	" akter
	$r_m$ (RM)	grad/s	girvinkelhastighet
	$\psi_m$ (PSIM)	grad	kurs
	$x_m$ (XM)	m	x-koordinat
	$y_m$ (YM)	m	y-koordinat

Utsignalerna beräknas ur tillstånden på följande sätt:

$$\begin{aligned}\delta_m &= \text{CRG} \cdot \delta \\ n_m &= 60 \cdot n \\ u_m &= \text{CMK} \cdot u \\ v_m &= \text{CMK} \cdot v \\ v_1 &= \text{CMK} \cdot l_1 \cdot r + \text{CMK} \cdot v + e_1 + b_1 \\ v_2 &= -\text{CMK} \cdot l_2 \cdot r + \text{CMK} \cdot v + e_2 + b_2 \\ r_m &= \text{CRG} \cdot r + e_3 + b_3 \\ \psi_m &= \text{CRG} \cdot \psi + e_4 \\ x_m &= x \\ y_m &= y\end{aligned}$$

där CMK är omvandlingsfaktor  $\text{m/s} \rightarrow \text{knop} = \frac{3600}{1852} = 1.9438$

CRG " rad  $\rightarrow$  grad = 57.2958

$l_1$ (L1)	m	avstånd från förlig dopplerlogg till masscentrum
$l_2$ (L2)	m	avstånd från akterlig dopplerlogg till masscentrum
$e_i$ (Ei)		vitt mätbrus $e \in N(0, \text{Re})$
$b_1$	knop	"Biasterm"
$b_2$	knop	"
$b_3$	grad/s	"

Övriga beteckningar i ekvationerna:

$g$	(G)	$\text{m/s}^2$	gravitationskonstant
$T_s$	(TS)	s	tidskonstant för roderservot
$K$	(K)	$\text{m/s}^2$	kraft per massenhet inducerad av vinden
$\alpha$	(ALFA)	grad	absolut vindriktning

$w_1$	(W1)	$m/s^2$	} störningar på v- och r-ekvationerna
$w_2$	(W2)	$rad/s^2$	
$\delta_{Lim}$	(LIM1)	$grad/s$	begränsning på roderhastigheten
L	(L)	m	båtens längd
$(T^P/m)$	(TPM)	$m/s^2$	kraft per massenhet från propellern
$C_{Lim}$	(CDLIM)	$m^2/s^2$	begränsning i X-ekvationen
TT	(TT)	m	djupgående
lv	(LV)	m	momentarm för vinden i v-ekvationen
c		m/s	vattenströmshastigheten vid rodret
$b_0$		grad	biasterm för rodersignalen

Indiceringarna 10.5 resp 20 anger för vilket djupgående som parametrarna gäller. Linjär interpolation företages mellan dessa två djupangivelser för åtta st parametrar enligt följande.

$$f_1 = \frac{20 - TT}{9.5} \quad f_2 = \frac{TT - 10.5}{9.5}$$

$$(1 - Y''_{\dot{v}}) = (1 - Y''_{\dot{v}})_{10.5} \cdot f_1 + (1 - Y''_{\dot{v}})_{20} \cdot f_2$$

$$Y''_{uv} = (Y''_{uv})_{10.5} \cdot f_1 + (Y''_{uv})_{20} \cdot f_2$$

$$(Y''_{ur} - 1) = (Y''_{ur} - 1)_{10.5} \cdot f_1 + (Y''_{ur} - 1)_{20} \cdot f_2$$

$$Y''_{|v|v} = (Y''_{|v|v})_{10.5} \cdot f_1 + (Y''_{|v|v})_{20} \cdot f_2$$

$$(k''_{zz} - N''_{\dot{r}}) = (k''_{zz} - N''_{\dot{r}})_{10.5} \cdot f_1 + (k''_{zz} - N''_{\dot{r}})_{20} \cdot f_2$$

$$N''_{uv} = (N''_{uv})_{10.5} \cdot f_1 + (N''_{uv})_{20} \cdot f_2$$

$$(N''_{ur} - x''_G) = (N''_{ur} - x''_G)_{10.5} \cdot f_1 + (N''_{ur} - x''_G)_{20} \cdot f_2$$

$$N''_{|v|r} = (N''_{|v|r})_{10.5} \cdot f_1 + (N''_{|v|r})_{20} \cdot f_2$$

#### 4.3 BÅTMODELL

Systemekvationerna är följande:

$$1) \quad \dot{\delta} = -\frac{1}{T_s} \delta + \frac{1}{T_s} \cdot \frac{1}{CRG} (\delta_s + b_0)$$

$$\text{Begränsning: } |\dot{\delta}| \leq \frac{1}{CRG} \cdot \delta_{Lim}$$

$$2) \quad (k_{TSP}'' - Q_n^{\dot{P}}) \cdot \dot{n} = (Q_F'') \frac{g}{L} \frac{n}{|n|} + \left(\frac{1}{2} Q_{uu}^{\dot{P}}\right) \frac{1}{L^2} u^2 + \\ + (Q_{un}^{\dot{P}}) \frac{1}{L} \cdot u \cdot n + (Q_{|n|n}^{\dot{P}}) |n|n + (Q_n^{\dot{T}}) \sqrt{\frac{g}{L}} n + (Q_k^{\dot{T}}) \frac{g}{L} \kappa$$

$$3) \quad (1 - X_u'') \dot{u} = \left(\frac{1}{2} X_{uu}''\right) \frac{1}{L} u^2 + (1 + X_{vr}'') v r + \\ + \left(\frac{1}{2} X_{vv}''\right) \frac{1}{L} v^2 + \left(\frac{1}{2} X_{c|c|\delta\delta}''\right) \frac{1}{L} c|c|\delta^2 + (1 - t_p) (T^{\dot{P}}/m)$$

Begränsningar:

$$a) \quad c|c|\delta^2 \leq c_{Lim}$$

$$b) \quad (1 + X_{vr}'') v r + \frac{1}{2} X_{vv}'' \frac{1}{L} v^2 + \frac{1}{2} X_{c|c|\delta\delta}'' \frac{1}{L} c|c|\delta^2 \leq 0$$

$$4) \quad (1 - Y_v'') \dot{v} + (x_G'' - Y_r'') L \dot{r} = Y_{uv}'' \frac{1}{L} u v + (Y_{ur}'' - 1) u r + \\ + Y_{|v|v}'' \frac{1}{L} |v|v + Y_{c|c|\delta}'' \frac{1}{L} c|c|\delta + k_{TY} (T^{\dot{P}}/m) + \\ + \frac{1}{2} Y_{nn}'' L n^2 - K \sin\left(\frac{1}{CRG} \cdot \alpha - \psi\right) + w_1$$

$$5) \quad (x_G'' - N_v'') \frac{1}{L} \dot{v} + (k_{zz}'' - N_r'') \dot{r} = N_{uv}'' \frac{1}{L^2} u v + (N_{ur}'' - x_G'') \frac{1}{L} u r + \\ + N_{|v|r}'' \frac{1}{L} |v|r + N_{c|c|\delta}'' \frac{1}{L^2} c|c|\delta + k_{TN} (T^{\dot{P}}/m) \frac{1}{L} + \\ + \frac{1}{2} N_{nn}'' n^2 + K \cdot l_v \frac{1}{L^2} \sin\left(\frac{1}{CRG} \cdot \alpha - \psi\right) + w_2$$

$$6) \quad \dot{\psi} = r$$

$$7) \quad \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi$$

$$8) \quad \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (T^{\dot{P}}/m) = \left(\frac{1}{2} T_{uu}^{\dot{P}}\right) \frac{1}{L} u^2 + (T_{un}^{\dot{P}}) u n + (T_{|n|n}^{\dot{P}}) L |n|n \\ c|c| = c_1 u^2 + c_2 \frac{n}{|n|} u^2 + c_3 u n + c_4 n^2 \end{array} \right.$$

## 4.4 PARAMETERVÄRDEN

Systemparametrarna nedan gäller för en 255 000 dwt supertanker. Parametervärdena är ursprungligen framtagna för en 210 000 dwt tankbåt, genom teoretiska beräkningar och anpassning till resultat från modellförsök med frifarande modell. Dessa parametervärden, som erhållits från Statens Skeppsprovingsanstalt (SSPA) i Göteborg, har sedan i vissa fall justerats så att standardprov, typ zig-zag-prov, cirkelprov och spiralprov, har någorlunda stämt överens mellan modell och 255 000 dwt fullskalebåt. Se även Åström o. Källström (1973).

$L$	329.18	m
$T_s$	5.0	s
$\delta_{Lim}$	2.0	gr/s
$k_{TSP}'' - Q_n^{P''}$	$0.70 \cdot 10^{-7}$	
$Q_F''$	$-0.95 \cdot 10^{-7}$	
$\frac{1}{2} Q_{uu}^{P''}$	$0.575 \cdot 10^{-4}$	
$Q_{un}^{P''}$	$0.423 \cdot 10^{-6}$	
$Q_{ n n}^{P''}$	$-0.695 \cdot 10^{-7}$	
$Q_n^{T''}$	$-0.431 \cdot 10^{-6}$	
$Q_K^{T''}$	$0.685 \cdot 10^{-5}$	
$1 - X_u''$	1.050	
$\frac{1}{2} X_{uu}''$	-0.0208	
$1 + X_{vr}''$	6.0	
$\frac{1}{2} X_{vv}''$	8.70	
$\frac{1}{2} X_{c c \delta\delta}''$	-0.220	



$1-t_p$	0.760	
$c_{Lim}$	7.9	$m^2/s^2$
$(1-Y''_{\dot{v}})_{10.5}$	1.67	
$(1-Y''_{\dot{v}})_{20}$	2.5	
$x_G''-Y''_{\dot{r}}$	0.050	
$(Y''_{uv})_{10.5}$	-1.21	
$(Y''_{uv})_{20}$	-1.083	
$(Y''_{ur}-1)_{10.5}$	-0.525	
$(Y''_{ur}-1)_{20}$	-0.625	
$b_0 = b_1 = b_2 = b_3 = 0$		
$c_1$	0.4225	
$c_2$	-0.224	
$c_3$	-0.81	m
$c_4$	29.1	$m^2$
$(Y''_{ v v})_{10.5}$	-0.58	
$(Y''_{ v v})_{20}$	-1.06	
$Y''_{c c \delta}$	0.197	
$k_{TY}$	0.040	
$\frac{1}{2} Y''_{nn}$	0.0	
$x_G''-N''_{\dot{v}}$	0.040	

$(k_{zz}'' - N_r'')$	10.5	0.100	
$(k_{zz}'' - N_r'')$	20	0.16	
$(N_{uv}'')$	10.5	-0.180	
$(N_{uv}'')$	20	-0.329	
$(N_{ur}'' - x_G'')$	10.5	-0.256	
$(N_{ur}'' - x_G'')$	20	0.2122	
$(N_{ v r}'')$	10.5	-0.23	
$(N_{ v r}'')$	20	-0.49	
$N_{c c \delta}''$		-0.092	
$K_{TN}$		-0.0000645	
$\frac{1}{2} N_{nn}''$		0.0	
$l_v$	25		m
$\frac{1}{2} T_{uu}^{P''}$		-0.0226	
$T_{un}^{P''}$		-0.000232	
$T_{ n n}^{P''}$		0.0000234	
$l_1$	148.7		m
$l_2$	131.1		m

## 4.5 SIMULERING AV VIND- OCH SJÖFÖRHÅLLANDEN

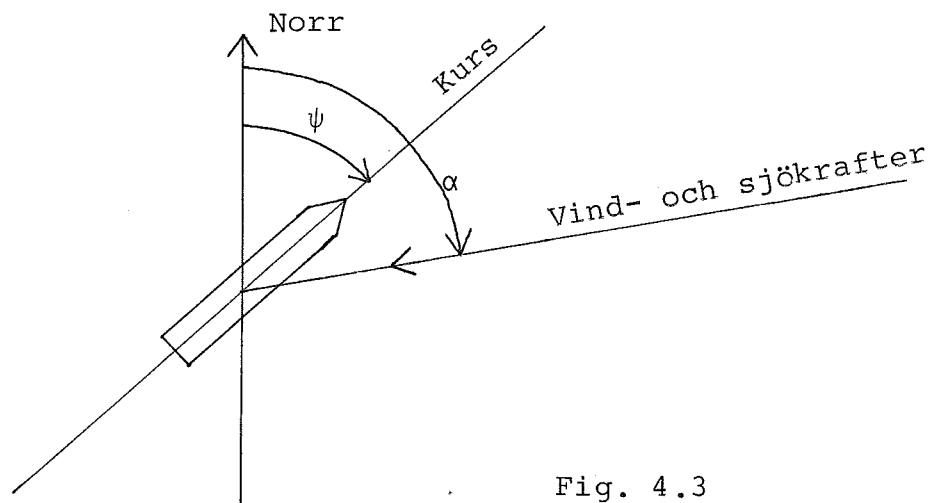


Fig. 4.3

Vinden ger en kraft i båtens tvärskeppsriktning och ett moment kring båtens masscentrum. Storleken på dessa är  $K$  resp  $K \cdot l_v$  där  $K$  är kraft per massenhet och  $l_v$  är momentarmen för vinden. Vind in på styrbords sida ger positiv rotation på båten. Detta kommer sig av att maskinöverbyggnaden är placerad akterut. Sinusfunktioner justerar krafterna och momenten efter absoluta vindriktningen.

Till dessa krafter och moment adderas sedan färgat brus  $w_1$  respektive  $w_2$  för att efterlikna vågornas på samma gång periodiska och stokastiska natur.

Test har visat att vågorna har en period av ca 8 sekunder vid en vindstyrka av 7 Beaufort (ca 15 m/s). Se fig 4.4.

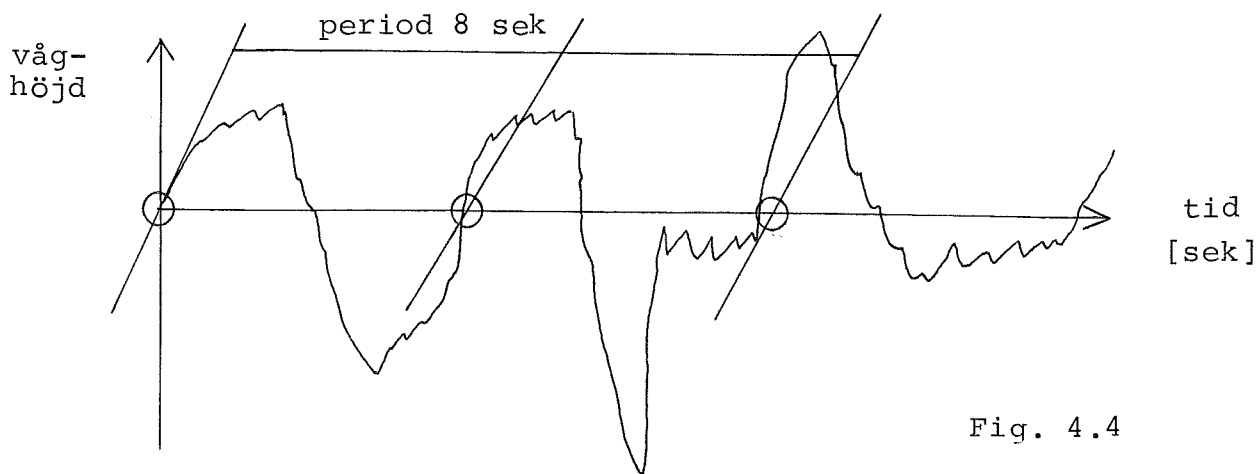


Fig. 4.4

För att generera en sådan signal göres på följande sätt. Vitt normalfördelat brus färgas i ett lågpasfilter med egenfrekvens av  $\frac{1}{8}$  sek. Bodediagram för detta filter finns i fig 4.5.

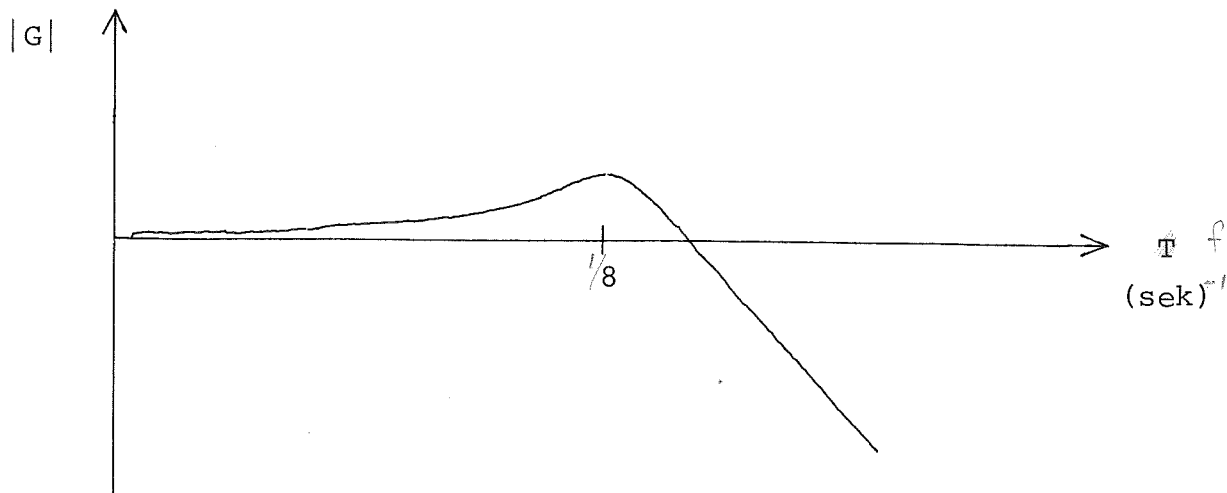


Fig. 4.5

Förstärkningen i resonansstoppen är 2.

Vi har valt att simulera två vindstyrkor, dels svag vind och dels hård vind. Nu återstår det att bestämma  $K$  och  $R_w$  för dessa två vindstyrkor.  $R_w$  står för kovariansmatrisen hos det normalfördelade bruset.

Svag vind:  $K = 0.002$

$$R_w = \begin{pmatrix} 10^{-9} & 0 \\ 0 & 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Hård vind:  $K = 0.004$

$$R_w = \begin{pmatrix} 4 \cdot 10^{-9} & 0 \\ 0 & 4 \cdot 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Dessa värden har erhållits genom att jämföra simuleringar med fullskale-försök under olika väderbetingelser.

#### 4.6 SIMULERING AV MÄTFEL

För att simulera verkliga mätsignaler pålägges vitt, normalfördelat brus på de utsignaler som används för styrning, det vill säga kurs och girvinkelhastighet. Förberedelse för användning av de två dopplerloggarna i för och akter göres också, men de användes ej i denna rapport.

Mätfelen har uppskattats ha följande kovariansmatris:

$$Re = \begin{pmatrix} 0.0025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0025 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0025 \end{pmatrix}$$

Variansen av mätfelen vid mätning av  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $r_m$  och  $\psi_m$  finns i diagonalen till  $Re$ . Vid vissa simuleringar sattes  $Re(4,4)$  till  $0.01 \text{ grad}^2$ . Genom införandet av "biastermerna"  $b_1$ ,  $b_2$  och  $b_3$  kan även mätningar med medelvärdesfel simuleras.

#### 4.7 ÖVERFÖRINGSFUNKTIONEN FÖR LINJÄR BÅTMODELL

De lineariserade kraft- och momentekvationerna för båtens rörelse i horisontalplanet ges av:

$$\begin{pmatrix} (m - Y_{\dot{v}}) & (m x_G - Y_{\dot{r}}) \\ (m x_G - N_{\dot{v}}) & (I_z - N_{\dot{r}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} Y_{uv} \cdot u & (Y_{ur} - m) u \\ N_{uv} \cdot u & (N_{ur} - m x_G) u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} Y_{c|c|\delta} \cdot c|c| \\ N_{c|c|\delta} \cdot c|c| \end{pmatrix} \delta$$

I detta avsnitt sattes farten  $u$  till 16 knop och propellervarvtalet  $n$  till 77 rpm vilket motsvarar full fart framåt.

Vi normaliserar dessa ekvationer enligt "bis"-systemet. I detta system sättes enheten längd = L

$$\begin{aligned} \text{"} \quad \text{hastighet} &= \sqrt{gL} \\ \text{"} \quad \text{tid} &= \sqrt{L/g} \\ \text{"} \quad \text{massa} &= m \end{aligned}$$

"Bis"-systemet introducerades ursprungligen av Norrbin (1971). Ekvationerna ovan har sorterna kraft respektive moment. Dessa ekvationer göres dimensionslösa genom division med (mg) och (mgL).

#### Kraftekvationen

$$\frac{(m - Y_{\dot{v}})}{m} \frac{\dot{v}}{g} + \frac{(m x_G - Y_{\dot{r}})}{Lm} \frac{L\dot{r}}{g} =$$

$$\frac{L Y_{uv}}{m} \frac{uv}{gL} + \frac{(Y_{ur} - m)}{m} \frac{ur}{g} + \frac{L Y_{c|c|\delta}}{m} \frac{c|c|\delta}{gL} \iff$$

$$(1 - Y_{\ddot{v}}) \frac{\dot{v}}{g} + (x_G'' - Y_{\ddot{r}}) \frac{L\dot{r}}{g} =$$

$$Y_{uv}'' \frac{uv}{gL} + (Y_{ur}'' - 1) \frac{ur}{g} + Y_{c|c|\delta}'' \cdot \frac{c|c|\delta}{gL}$$

#### Momentekvationen

$$\frac{(m x_G - N_{\dot{v}})}{Lm} \frac{\dot{v}}{g} + \frac{(I_z - N_{\dot{r}})}{L^2 m} \frac{L\dot{r}}{g} =$$

$$\frac{N_{uv}}{m} \frac{uv}{gL} + \frac{(N_{ur} - m x_G)}{Lm} \frac{ur}{g} + \frac{N_{c|c|\delta}}{m} \frac{c|c|\delta}{gL} \iff$$

$$(x_G'' - N_{\ddot{v}}) \frac{\dot{v}}{g} + (k_{zz}'' - N_{\ddot{r}}) \frac{L\dot{r}}{g} =$$

$$N_{uv}'' \frac{uv}{gL} + (N_{ur}'' - x_G'') \frac{ur}{g} + N_{c|c|\delta}'' \frac{c|c|\delta}{gL}$$

Vi överför dessa ekvationer på standardform

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix} \delta$$

$$\text{där } a_{11} = \frac{u \left[ (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') Y_{uv}'' - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') \cdot N_{uv}'' \right]}{L \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

$$a_{12} = \frac{u \left[ (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') (Y_{ur}'' - 1) - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (N_{ur}'' - x_G'') \right]}{\left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

$$a_{21} = \frac{u \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (N_{uv}'') - (x_G'' - N_{\dot{v}}'') Y_{uv}'' \right]}{L^2 \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

$$a_{22} = \frac{u \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (N_{ur}'' - x_G'') - (x_G'' - N_{\dot{v}}'') (Y_{ur}'' - 1) \right]}{L \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

$$b_{11} = \frac{c|c| \left[ (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') Y_{c|c|}'' \delta - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') N_{c|c|}'' \delta \right]}{L \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

$$b_{21} = \frac{c|c| \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') N_{c|c|}'' \delta - (x_G'' - N_{\dot{v}}'') Y_{c|c|}'' \delta \right]}{L^2 \left[ (1 - Y_{\dot{v}}'') (k_{zz}'' - N_{\dot{r}}'') - (x_G'' - Y_{\dot{r}}'') (x_G'' - N_{\dot{v}}'') \right]}$$

Systemmatriser och överföringsfunktioner för olika djupgående 10.5, 20 m och 25 m beräknas. Sista fallet anger vi för att se effekten av en instabil båt. Detta fall kan inte uppnås i verkligheten eftersom relingen bör vara ovanför vattenytan vid betryggande framfart av fartyget.

$$\underline{\underline{10.5}} \quad A = \begin{pmatrix} -0.01697 & -1.9802 \\ -0.0001161 & -0.06160 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0.02363 \\ -0.0004771 \end{pmatrix}$$

$$G_r(s) = \frac{-0.0133(1+44.0s)}{(1+81.1s)(1+15.1s)} \quad G_v(s) = \frac{2.94(1+9.84s)}{(1+81.1s)(1+15.1s)}$$


---

$$\underline{\underline{20}} \quad A = \begin{pmatrix} -0.009852 & -1.8489 \\ -0.0001487 & -0.03175 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0.01456 \\ -0.0002913 \end{pmatrix}$$

$$G_r(s) = \frac{-0.133(1+57.9s)}{(1+1073s)(1+24.6s)} \quad G_v(s) = \frac{26.4(1+14.5s)}{(1+1073s)(1+24.6s)}$$


---

$$\underline{\underline{25}} \quad A = \begin{pmatrix} -0.007773 & -1.7669 \\ -0.0001566 & -0.02356 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0.01185 \\ -0.0002418 \end{pmatrix}$$

$$G_r(s) = \frac{0.0399(1+64.7s)}{(1+29.3s)(1-362s)} \quad G_v(s) = \frac{-7.55(1+16.7s)}{(1+29.3s)(1-362s)}$$



Systemet kan nu skrivas på följande sätt:

$$\begin{pmatrix} \dot{v}'' \\ \dot{r}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v'' \\ r'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{21} \end{pmatrix} \delta''$$

$$\alpha_{11} = \frac{a_{11}}{\sqrt{g/L}}$$

$$\alpha_{12} = \frac{a_{12}}{\sqrt{gL}}$$

$$\alpha_{21} = \frac{a_{21}}{\sqrt{g/L^3}}$$

$$\alpha_{22} = \frac{a_{22}}{\sqrt{g/L}}$$

$$\beta_{11} = \frac{b_{11}}{g}$$

$$\beta_{21} = \frac{b_{21}}{g/L}$$

Alla parametrar och variabler är dimensionslösa. Nedan följer en förteckning över parametrarna vid gjupgående 10.5, 20 och 25 meter. Överföringsfunktionerna från rodervinkel till girvinkelhastighet och från rodervinkel till tvärshastighet redovisas också.

$$\underline{\underline{10.5}} \quad A'' = \begin{pmatrix} -0.09832 & -0.03485 \\ -0.2214 & -0.3569 \end{pmatrix} \quad B'' = \begin{pmatrix} 0.002410 \\ -0.01601 \end{pmatrix}$$

$$G_r''(s) = \frac{r''(s)}{\delta''(s)} = \frac{-0.0770(1+7.6s)}{(1+14.0s)(1+2.6s)} \quad G_v''(s) = \frac{v''(s)}{\delta''(s)} = \frac{0.0517(1+1.7s)}{(1+14.0s)(1+2.6s)}$$


---

$$\underline{\underline{20}} \quad A'' = \begin{pmatrix} -0.05708 & -0.03253 \\ -0.2832 & -0.1840 \end{pmatrix} \quad B'' = \begin{pmatrix} 0.001485 \\ -0.009779 \end{pmatrix}$$

$$G_r''(s) = \frac{-0.770(1+10.0s)}{(1+185s)(1+4.25s)} \quad G_v''(s) = \frac{0.465(1+2.50s)}{(1+185s)(1+4.25s)}$$


---

$$\underline{\underline{25}} \quad A'' = \begin{pmatrix} -0.04503 & -0.03110 \\ -0.2986 & -0.1365 \end{pmatrix} \quad B'' = \begin{pmatrix} 0.001209 \\ -0.008115 \end{pmatrix}$$

$$G_r''(s) = \frac{+0.231(1+11.1s)}{(1+5.06s)(1-62.5s)} \quad G_v''(s) = \frac{-0.133(1+2.88s)}{(1+5.06s)(1-62.5s)}$$


---

#### 4.8 HASTIGHETSPROV

För att bestämma det  $\kappa$ -värde som ger marschfarten 16 knop, har vi gjort hastighetsprov, det vill säga bestämt värden på framåthastigheten vid olika ångpådrag.

Resultatet av dessa prov ges i fig 4.6 där också stationära värden på propelleravtalet medtagits.

I alla standardprov i nästa avdelning ges  $\kappa$ -värdet 0.8, som vi låter motsvara full fart framåt.

Observera dock att dessa stationära värden inte beror på djupgåendet vilket är en approximation.

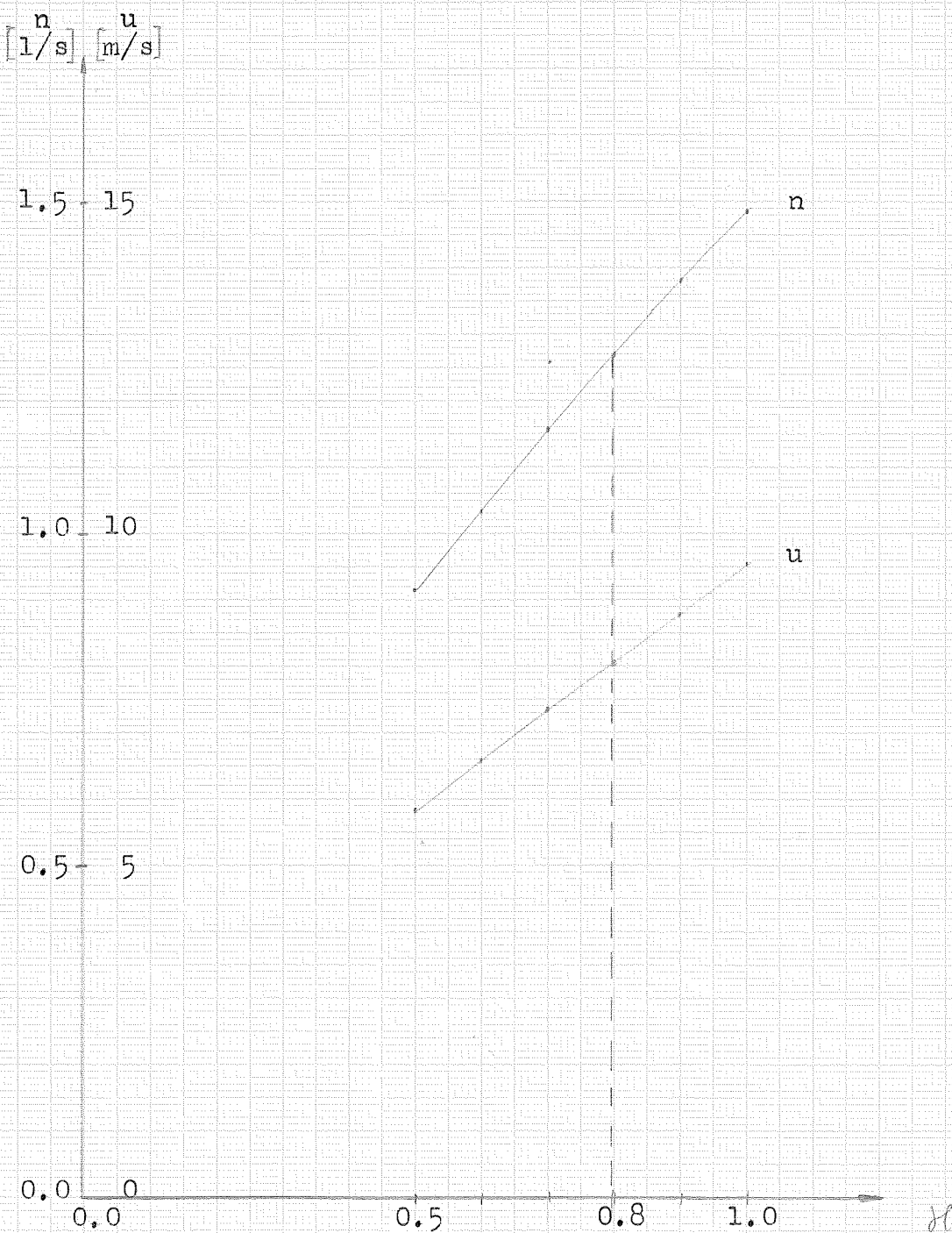


Fig 4.6 Propellervarvtal  $n$  och framåthastighet  $u$  som funktion av relativt ångpådrag  $J$ .

#### 4.9 STANDARDPROV

För att se hur bra modellen stämmer överens med verkligheten har vi gjort en serie standardprov bestående av spiralprov, cirkelprov, zig-zag-prov, impulssvar och "crash-stop"-prov. "Crash-stop" innebär fullt roderutslag och full back.

Vi har sedan jämfört dessa prov med motsvarande prov utförda med verklig båt, och vidtagit de justeringar av parametervärdena i modellen som behövdes för en god överensstämmelse mellan simulering och verklighet. Observera dock att dessa simuleringar är gjorda utan påverkan av störningar från vind och vågor, något som inte gäller för de verkliga proven.

För att se hur en instabil båt reagerar, har även djupgåendet 25 m medtagits.

Alla proven finns samlade i appendix A.

### 5. MANUELL STYRNING

#### 5.1 BESKRIVNING AV PROGRAM

Vid manuell styrning av fartygsmodellen användes följande program:

BOAT3	"Fartygsmodell	se appendix D
NABOT	"Totalsystem	se appendix D
NOISE	"Brusgenerator (standardsystem i SIMNON)	
NOIS1	"Kopia av NOISE	
LPFI1	"Lågpassfilter	se appendix D
LPFI2	"Kopia av LPFI1	
ANIN	"Analog in- och ut-matning	se appendix D
FIG	"Genererar fartygsbild	se appendix D
BANA	"Genererar bana	se appendix D

För simuleringen genererar BANA en av de två standardbanorna, som finns i programmet, på dataskärmen. Banorna kan lätt ändras om så önskas.

Vid simulering läser ANIN in spänningar som motsvarar önskat roderläge och ångventilinställning.

NOISI genererar brus, som filtreras i LPF11 för att efterlikna störningar från vind och vågor.

Totalsystemet NABOT ger alla dessa signaler till fartygsmodellen BOAT3 samt ger utsignalerna från BOAT3 till ANIN och FIG. De utsignaler som antas erhållna från mätinstrument, förses med mätbrus från NOISE.

ANIN omvandlar signalerna som motsvarar hastighet, kurs och girvinkelhastighet till lämpliga spänningar och ställer ut dessa.

FIG genererar en fartygsbild, som är skalriktig mot de axlar som finns på dataskärmen.

## 5.2 HUR SIMULATORN ANVÄNDES

Simulatorn består av följande delar:

Display Tektronix

En digitalvoltmeter 0-20 V DC

Två st voltmetrar 0-10 V DC

"Kontrollbox" för inställning av rodervinkel och ångpådrag.

En speciell version av SIMNON (dectape 7.1) används.

Instrument	Signalen anger	Kopplas till	Kanal	Spänning-signal
DVM	Hast. framåt	Analog out	2	0 V - 0 m/s 5 V - 5 m/s 10 V - 10 m/s
VM	Girvinkelhast.	Analog out	1	0 V - -0,75 grad/s 5 V - 0 10 V - +0,75 grad/s
VM	Kurs	Analog out	3	0 V - -180 <sup>+</sup> 360 <sup>o</sup> 5 V - 0 10 V - +180 <sup>+</sup> 360 <sup>o</sup>
Kontroll- box	Rodersignal	Analog in	0	Se märkning
	Ångpådrag	Analog in	1	på
	Referens	-10 V		sladdarna

Inläsning av programmen

De erforderliga programmen läses in från dectape 7.1 enl. följande. Utgångspunkt är monitorn i DOS.

```

§ PIP
  DOSPIP V6C
>T DK←DT2 SIMNON XXX(D)
>T DK←DT2 SIMNON XCT(B)
>T DK,←DT2 BOAT3, NABOT (A)
>T DK,←DT2 LPFIL, LPFI2 (A)
>↑C
§ A DK 3/NONE 4,5,7
§ E SIMNON
>

```

Kommandon före simulering

Följande kommandon i SIMNON förbereder simulering i svag vind, med djupgåendet 20 m, standardbana nr 1 och initialhastighet 8.2 m/s. 15 st variabler mätes varannan sekund och lagras på en fil EXP. Efter simuleringen kan dessa variabler plottas på dataskärmen. Varje ny simulering påverkas av samma brus.

```

>SET NOUT:15
>SET NNOI:4
>SET NNOI1:2
>TURN WARN OFF
>SYST NOISE NOIS1 BOAT3 LPFIL LPFI2 CFILE ANIN FIG NABOT
>SET FILEO:EXP
>PAR DT [CFILE]:2
>PAR R11 [NOIS1]:1.E-9
>PAR R22 [NOIS1]:1.E-11
>PAR K [BOAT3]:0.002
>PAR R11 [NOISE]:0.0025
>PAR R22 [NOISE]:0.0025
>PAR R33 [NOISE]:0.0004
>PAR R44 [NOISE]:0.0025
>PAR DT [NOIS1]:5
>PAR DT [NOISE]:5

```

```
>PAR SAME [NOIS1]:1  
>PAR SAME [NOISE]:1  
>PLOT C7 (C8)  
>AXES H -500 4000 v -500 3000
```

Simulering kan nu startas med kommandot

```
>SIMU 0 2000
```

och avbrytas genom att "1-ställa" data-switcharna 0 och 1.

Ändring av simuleringsförhållanden

Önskat tillstånd	Kommando
Hård vind	>PAR R11 [NOIS1]:4.E-9 >PAR R22 [NOIS1]:4.E-11 >PAR K [BOAT3]:0.004
Svag vind	>PAR R11 [NOIS1]:1.E-9 >PAR R22 [NOIS1]:1.E-11 >PAR K [BOAT3]:0.002
Standardbana nr 1	>PAR BAN:1 >AXES H -500 4000 V -500 3000 >PLOT C7 (C8)
Standardbana nr 2	>PAR BAN:2 >AXES H -500 6000 V -500 4000 >PLOT C7 (C8)
Ingen bana	>PAR BAN:0
Asterisk/ingen asterisk (i bildens tyngdpunkt)	>PAR AST:1/ PAR AST:0
Fartygets djupgående x m	>PAR TT:x
Fartygets initialhastighet x m/s	>INIT U:x
Tid mellan generering av fartygsbilder x s	>PAR DT [FIG]:x
Fartygsbildens roderstorl. x m (standardvärde 50 m)	>PAR LANGD:x



### 5.3 ÄNDRING AV BANANS UTSEENDE

Om en speciell bana skall genereras på dataskärmen måste källkoden till programmet BANA hämtas från dectape 7.1.

De inledande DATA-satserna i BANA anger, i sorten km, koordinaterna för banans hörn, i förhållande till axelgraderingen på dataskärmen.

Beroende på parametern BAN's värde vid simuleringen, 1 resp 2, genereras banan av vektorerna XB, YB resp XC, YC.

Efter editering av BANA länkas en ny version av simulatorn enligt SIMNON's anvisningar.

Listningar av SIMBAT och SYSTS finns i appendix D.

Följande program skall finnas på disken vid länkningen:

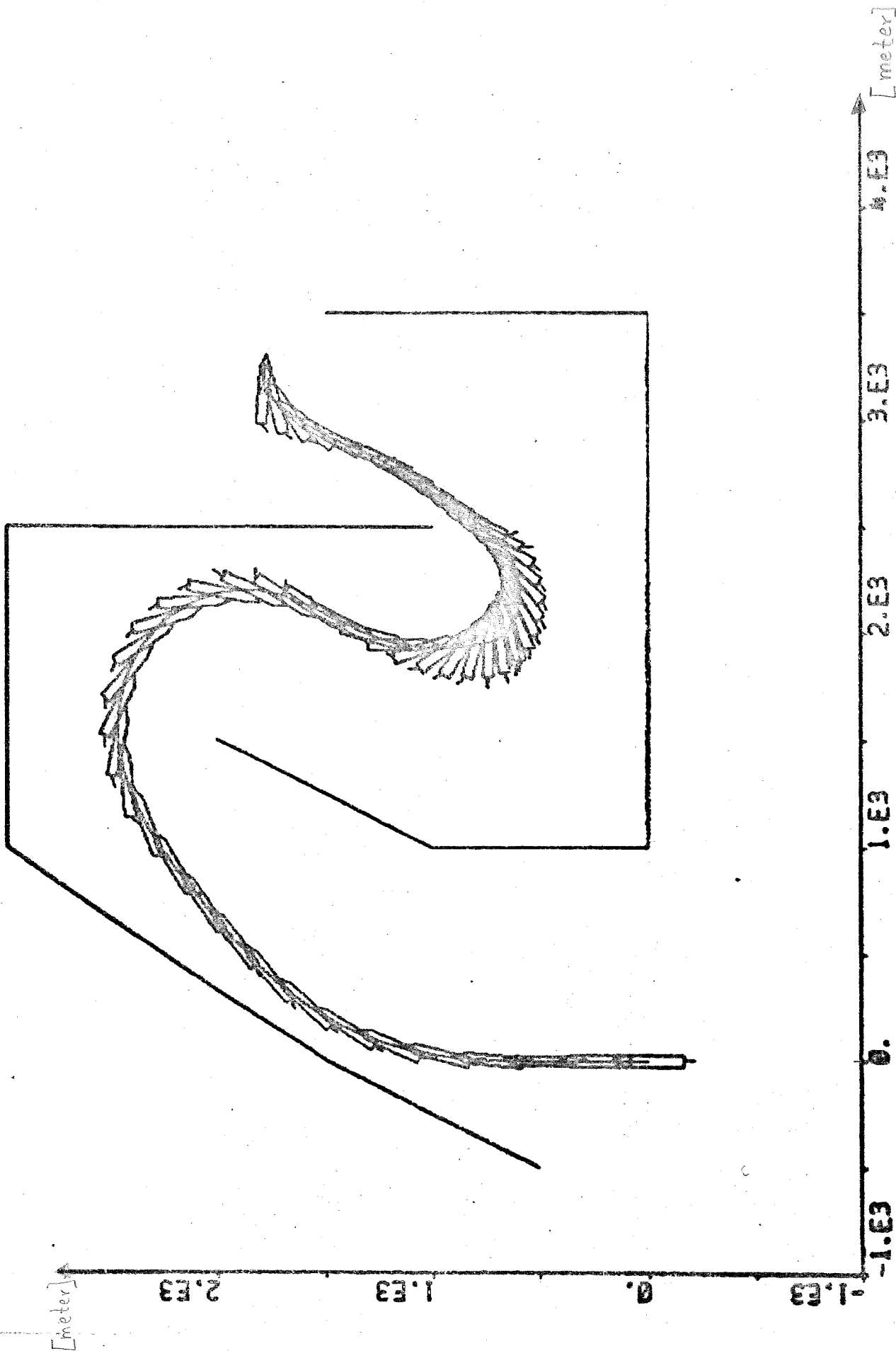
```
.LIBR5 SIMNON SETNAM SETVAR SYSTS ANIN MNODI3  
ADREAD DARITE BANA FIG MRK PLOT PLOT1 NOIS1
```

### 5.4 EXEMPEL

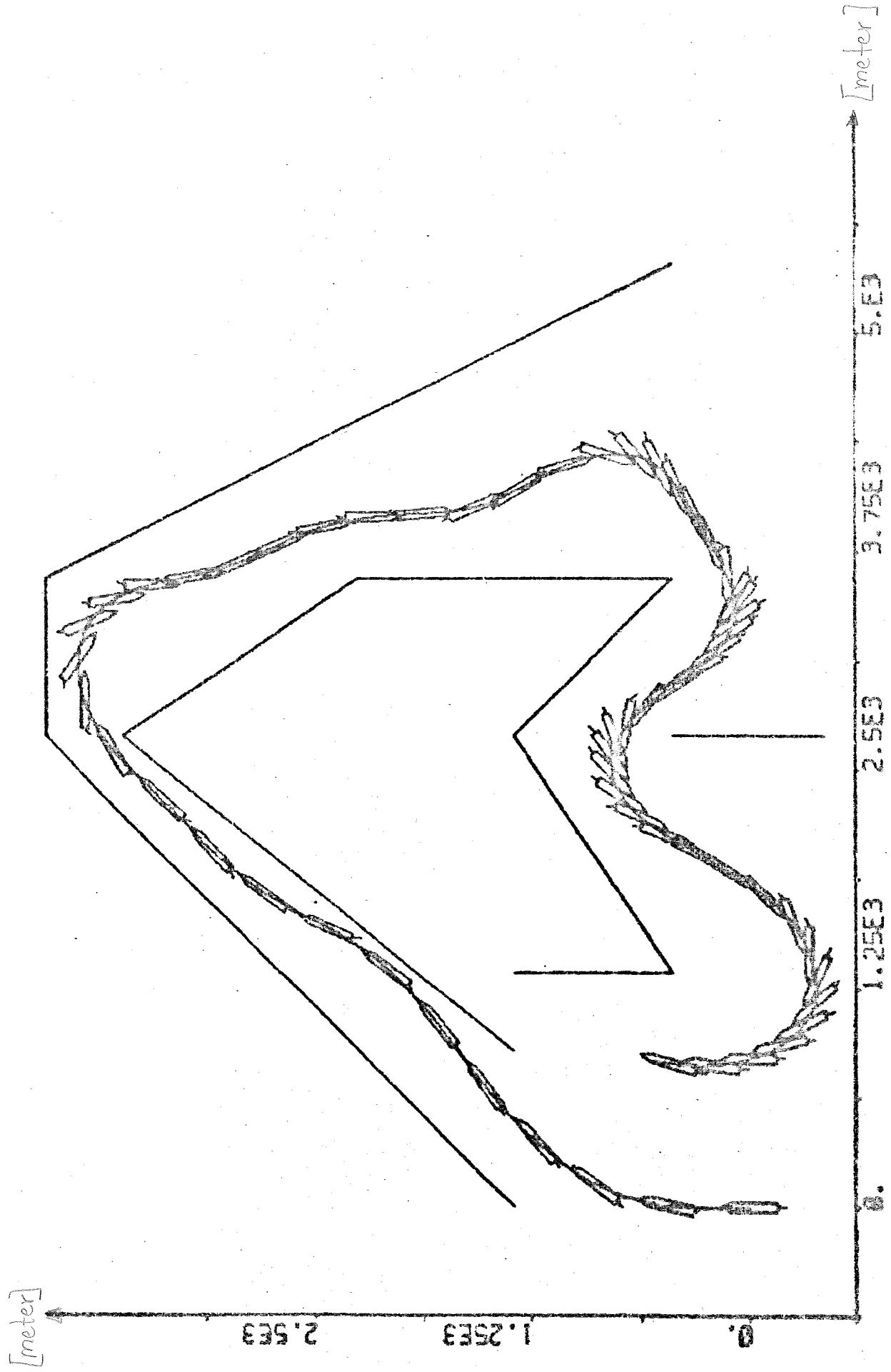
Följande sidor visar vilka bilder som växer fram vid användning av simulatorn med standardbanor.

Observera att fartygsbildens storlek är proportionell mot axelgraderingen och att bilden av rodret anter rodrets läge i det ögonblick bilden genereras.

PLOT C7(C8) BAN=1 DT[FIG]=30



PLOT C7(C8)      BAN=2      DT [FIG]=60



## 6. STYRNING MED PID-REGULATOR

### 6.1 BESKRIVNING AV PROGRAM

Vid simulering med PID-regulatorstyrning av fartygsmodellen användes följande program:

BOAT4	"Fartygsmodell	se appendix E
RTOT	"Totalsystem	se appendix E
REG	"Regulator	se appendix E
LOSS	"Beräknar förluster	se appendix E
NOISE och NOIS1	"Brusgenerator (standardsystem i SIMNON)	
LPFI1 och LPFI2	"Lågpassfilter	se appendix E

Fartygsmodellen BOAT4 är något förenklad jämfört med BOAT3. Sålunda har t ex varvtal och framåthastighet konstanta värden för att minska simuleringstiden. REG innehåller förutom en komplett diskret PID-regulator.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_s(t_k) = K_1[\psi_m(t_k) - \psi_{ref}] + K_2 r_m(t_k) + K_3 T_s \sum_{n=0}^k [\psi_m(t_n) - \psi_{ref}] \\ k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{array} \right.$$

där  $T_s$  är samplingsintervallet, även för anrop av STURE nödvändiga satser. Se kap. 7. LOSS beräknar förlustfunktionen ur kursavvikelse och roderutslag, samt beräknar medelvärde och standardavvikelse av flera variabler.

### 6.2 KRITERIER FÖR OPTIMERING

Vi använde en förlustfunktion

$$V = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [(\psi_m(s) - \psi_{ref})^2 + \lambda \cdot \delta_m^2(s)] ds$$

vilken vi approximerade med

$$V = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} [(\psi_m(t_o + n \cdot T_s) - \psi_{ref})^2 + \lambda \cdot \delta_m^2(t_o + n \cdot T_s)]$$

där  $T_s$  är samplingsintervallet för regulatorn och  $\lambda=1/8$ .

I de fall då regulatorn innehåller en integrerande term användes förutom förlustfunktionen även medelvärdet av kursavvikelsen som kriterium för optimeringen, ty det är väsentligt att i medeltal hålla korrekt kurs.

### 6.3 BESKRIVNING AV PROVSERIEN

#### Samplingsintervall

Först bestämdes lämpligt samplingsintervall  $T_s$  genom att regulatorn ställdes in på standardvärden, varefter  $T_s$  varierades. Se Fig. 6.1 och Tabell 6.1. Eftersom kortare samplingsintervall ger större slitage på rodermaskineriet, valdes  $T_s=10$  s för de fortsatta undersökningarna trots att  $T_s=5$  s gav något mindre värde på förlustfunktionen.

#### Struktur

Med samplingsintervallet 10 s enl ovan optimerades följande regulatorer med olika struktur för ett fartyg med 20 m djupgående, utsatt för hård vind.

- 1a P-regulator
- 1b PD-regulator
- 1c PD-regulator, där den uppmätta girvinkelhastigheten filtrerats enligt:

$$r_{\text{filt}}(t+1) = r_{\text{filt}}(t) + (b+S(t)) \cdot (r_m(t) - r_{\text{filt}}(t))$$

$$\text{där } S(t+1) = \frac{(1-b) \cdot S(t)}{1-b+S(t)}$$

$$S(1) = 1-b$$

$$b = 0,7$$

- 1d PD-regulator, där ett approximativt värde på girvinkelhastigheten beräknats enligt:

$$r_{\text{ber}} = \frac{\psi_m(t) - \psi_m(t-T_s)}{T_s}$$

- le PD-regulator som i ld, men med sämre noggrannhet i mätningen av kursen dvs  $R_e(4,4)$  ändras från 0.0025 till 0.01.
- lf Samma som lb men även integrerande del
- lg Samma som lc men även integrerande del
- lh Samma som ld men även integrerande del
- li Samma som le men även integrerande del

Resultaten redovisas i tabell 6.2 och i appendix B.

#### 6.4 OPTIMAL REGULATOR

Den optimala regulatorn, med hänsyn tagen både till förlustfunktion och kursavvikelsens medelvärde, var enligt provserien i föregående avsnitt, en PID-regulator där ett beräknat värde på girvinkelhastigheten använts i stället för det uppmätta, dvs struktur enl lh.

Parametrarna i denna regulator ställdes in för olika värden på båtens djupgående (TT) och vindens styrka.

Resultaten redovisas i tabell 6.3 och i appendix B.

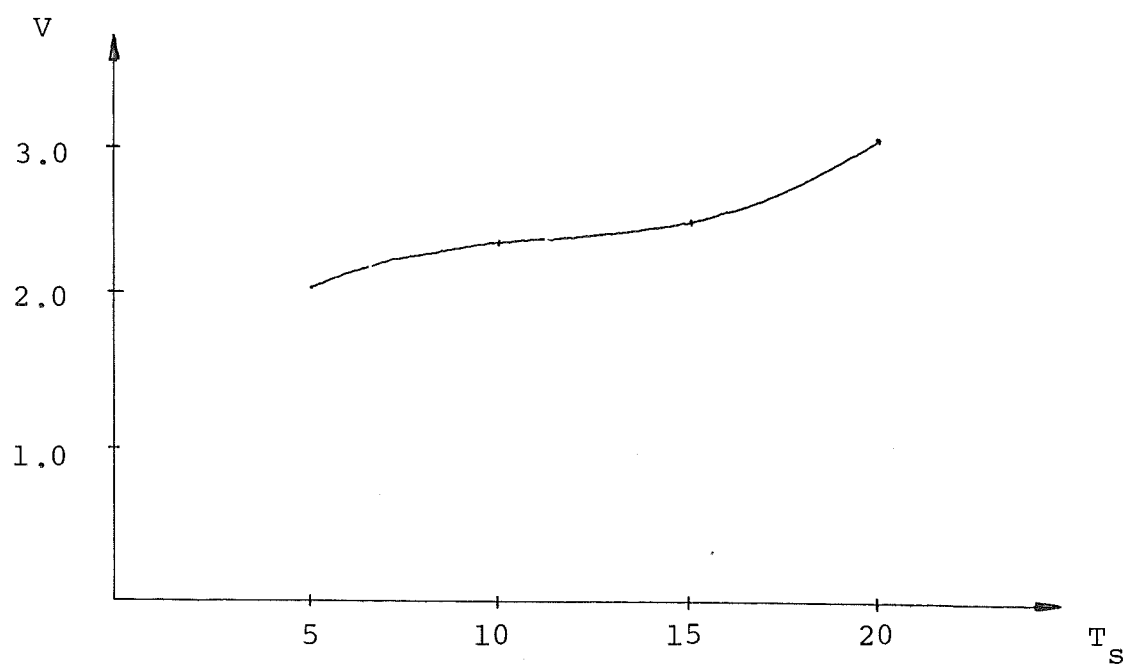


Fig. 6.1

Förlustfunktionen  $V$  som funktion av samplingsintervall  $T_s$

$T_s$	$V$
5	2.06
10	2.40
15	2.50
20	3.02

Tabell 6.1

Tabell 6.2

Olika regulatorers optimala inställning  
 Simuleringstid 30 min

Bet.	Girv. hast.	Mät * nogg.	Regulator parametrar		Förl. funk. V	Kurs		Roder		
			P	D		I	medel värde	stand avv.	medel värde	stand avv
la	uppmätt	god	5	0	0.0	2.86	0.339	0.773	1.695	3.803
lb	uppmätt	god	4	60	0.0	2.07	0.459	0.612	1.776	2.967
lc	filtrerad	god	4	70	0.0	2.11	0.461	0.600	1.771	3.042
ld	beräknad	god	4	60	0.0	2.11	0.442	0.639	1.766	3.008
le	beräknad	dålig	4	60	0.0	2.20	0.440	0.646	1.764	3.119
lf	uppmätt	god	4	100	0.04	2.53	0.023	0.634	1.770	3.743
lg	filtrerad	god	4	100	0.04	2.53	0.022	0.647	1.754	3.726
lh	beräknad	god	4	100	0.04	2.52	0.014	0.675	1.748	3.688
li	beräknad	dålig	4	100	0.04	2.73	0.013	0.689	1.745	3.890

\* god -  $R_e(4,4) = 0.0025$

dålig -  $R_e(4,4) = 0.01$



Tabell 6.3

Den optimala PID-regulatorns optimala inställning  
vid olika djupgående (TT) och vindstyrka

Regulator av typ 1h enl föregående

Simuleringstid 30 min

Djup- gående	Vind	Regulatorer			Förl. funk. V	Kurs		Roder	
		P	D	I		medel värde	stand avv.	medel värde	stand avv.
10.5 m	svag	4	20	0.02	0.427	0.00793	0.347	0.492	1.492
10.5 m	hård	4	30	0.02	1.636	0.0213	0.658	1.084	2.917
20 m	svag	4	80	0.02	0.581	0.0167	0.341	0.800	1.760
20 m	hård	4	100	0.04	2.525	0.0146	0.675	1.748	3.688
25 m	svag	4	100	0.02	0.703	0.0204	0.362	0.932	1.932
25 m	hård	4	120	0.02	2.581	0.0504	0.638	2.055	3.639

## 7. STYRNING MED ADAPTIV REGULATOR

### 7.1 BESKRIVNING AV DEN ADAPTIVA REGULATORN

Den använda regulatorn finns beskriven i Wittenmark (1973). Grundidén är i korthet att göra en minsta-kvadrat-estimering av parametrarna i en minimalvariansstyrlag. Följande modell används:

$$(\psi(t) - \psi_{ref}) + a_1(\psi(t-k-1) - \psi_{ref}) + \dots + a_{NA}(\psi(t-k-NA) - \psi_{ref}) = \\ b_0(\nabla\delta(t-k-1) + b_1\nabla\delta(t-k-2) + \dots + b_{NB}\nabla\delta(t-k-NB-1)) + \\ c_1r(t-k-1) + \dots + c_{NC}r(t-k-NC) + \varepsilon(t)$$

Minimalvariansstyrlagen blir då

$$\nabla_s \delta(t) = \hat{a}_1(\psi(t) - \psi_{ref}) + \dots + \hat{a}_{NA}(\psi(t-NA+1) - \psi_{ref}) - \\ \hat{b}_1 \nabla_s \delta(t-1) - \dots - \hat{b}_{NB} \nabla_s \delta(t-NB) - \\ \hat{c}_1 r(t) - \dots - \hat{c}_{NC} r(t-NC+1)$$

där  $\nabla_s \delta(t) = (\delta(t) - \delta(t-1))b_0$  och

där  $r$  är den framkopplade girvinkelhastigheten.

$\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{NA}$ ,  $\hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{NB}$ ,  $\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{NC}$  är estimerade värden av  $a_1, \dots, a_{NA}$ ,  $b_1, \dots, b_{NB}$ ,  $c_1, \dots, c_{NC}$ .

Då minimalvariansstyrlagen endast minimerar kursfelet i kvadrat, kan roderutslagen bli alltför stora. Detta kan avhjälpas genom att införa några extra tidsfördröjningar  $k$  i regulatorn.

### 7.2 BESKRIVNING AV PROGRAM

Samma program REG används vid simulering med självinställaren som med PID-regulatorn. Vilken regulator som används bestäms av en switch som man själv bestämmer värde på innan simuleringen börjar. Kursen och girvinkelhastigheten läggs i bestämda element i en vektor kallad DAT och man får ut roder-

signalen i ett annat element i samma vektor. Detta sker genom att anrop till subrutinen STURE. Denna får all information om kursen, framkopplingstermer, parametrar, P-matris för minsta-kvadrat identifiering och självinställarens struktur via namnanrop.

Rodersignalinkrementet förs tillbaka till huvudprogrammet REG, där det adderas till föregående rodersignal. Här sätter vi också in en begränsning på 20 grader. I praktiken styr man ogärna ut rodret mer än till denna vinkel vid full fart ty materialpåkänningarna skulle bli för höga och slitaget på rodermaskineriet bli för stort.

För övrigt hänvisas till appendix E.

### 7.3 KRITERIER FÖR OPTIMERING

Samma förlustfunktion  $V$  som vid PID-regulering används.

$$V = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ (\psi_m(t_o + nT_s) - \psi_{ref})^2 + \lambda \delta_m^2(t_o + nT_s) \right]$$

Medelvärde på kursen hålles i alla simuleringar inom tillåtna gränser dvs 0.04-0.07 grader. Dessa gränser har erhållits under långtidstest 10000 sekunder (3 timmar). För att utvärdera styrningen ses främst på förlustfunktionen men intressanta storheter är även standardavvikelse för kurs och rodersignal.

### 7.4 BESKRIVNING AV STRUKTURVARIABLER OCH PROVSERIER

Den adaptiva regulatorn anpassar själv parametrar för optimal styrning av fartyget. Det återstår dock flera parametrar. Dessa måste förutbestämmas, t ex antalet A,B,C-parametrar, samplingsintervall och tidsfördröjningar. Då systemet är olinjärt, framtages strukturen på regulatorn bäst genom så verkligstrogna simuleringar som möjligt.

Dessa har utförts med användandet av programpaketet SIMNON be-

skriven i H. Elmquist (1975).

Båtmodell, regulator och reglersignaler visas i nedanstående figur 7.1

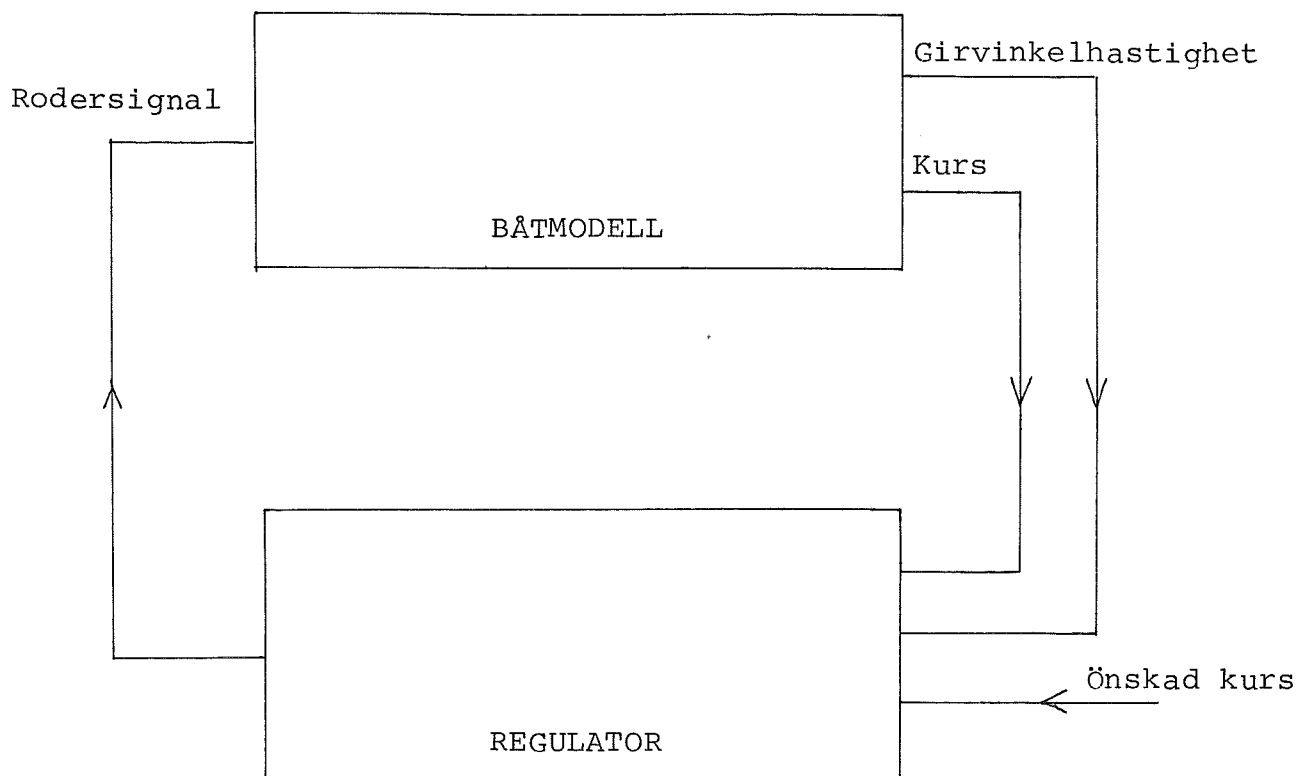


Fig. 7.1

Utöver ovannämnda parametrar, som måste förutbestämmas, finns det en exponentiell glömskefaktor och en skalfaktor, parametrar som indikerar huruvida vi vill ha filtrering och differenssignaler. Här följer en sammanfattning över nödvändiga parametrar.

NA	antal A-parametrar
NB	" B "
NC	" C "
IRDIF	{ 0 ej differenssignaler på framkopplingen
	{ 1 differenssignaler                    "-"
	{ 2 differenssignaler                    "-"
FIL	{ 1 ej filtrering
	{ 2 filtrering
	{ 3 derivering av kurs som ger girvinkelhastigheten

K	antal tidsfördröjningar
$T_s$	samlingsintervall
$\lambda$	exponentiell glömskefaktor vid processidentifiering
BO	skalnfaktor

Transponera denna kolonnvektor så fås strukturvektorn  $S=(NA,NB,NC,IRDIF,FIL,K,T_s,\lambda,BO)$ . Detta för att underlätta framställningen nedan.

Sökandet efter en optimal kombination kan liknas vid en teknologs vandring i tät dimma utför ett berg i nio dimensioner (9 st parametrar) ivrigt sökande efter lägsta punkten. Se fig. 7.2.

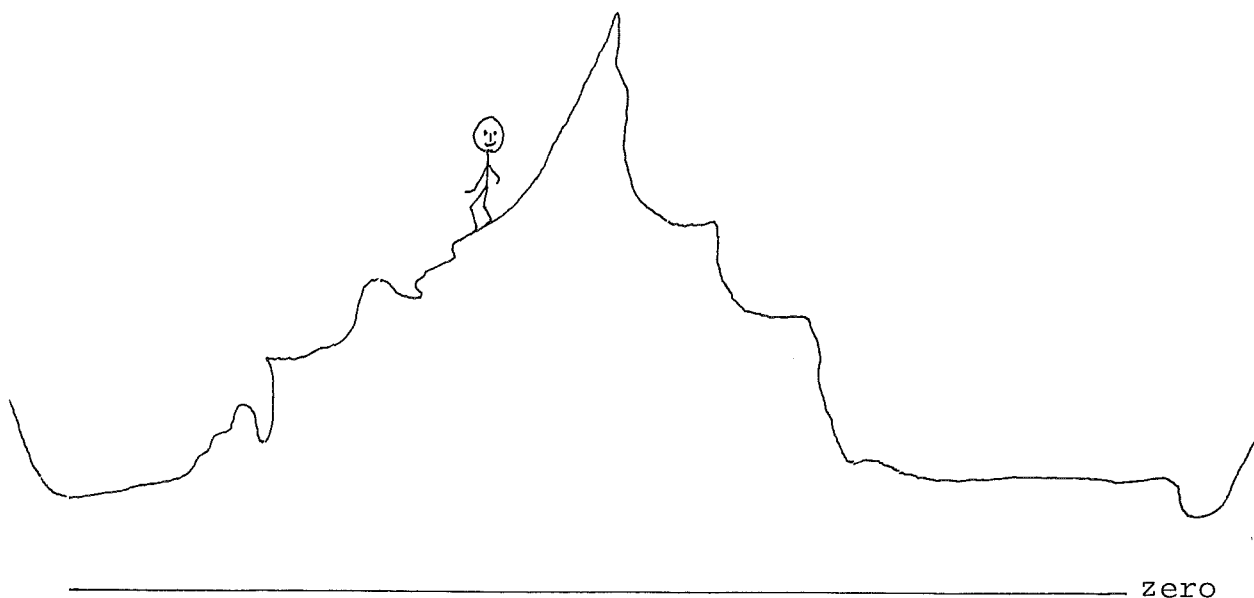


Fig. 7.2

De parametrar som estimeras av regulatorn är  $NA$  st A-parametrar,  $NB$  st B-parametrar och  $NC$  st C-parametrar. Till dessa är knutna en symmetrisk P-matris av ordning  $(NA+NB+NC) \cdot (NA+NB+NC)$ , som anger osäkerheten i parametrarna.

För att ha någonstans att börja gissar vi en startstruktur  $S_{start}=(3,2,3,0,1,2,10,0.99,-1)$ . Vid alla simuleringars början sättes P-matrisen lika med  $100 \cdot I$ , där  $I$  är enhetsmatrisen. Detta får till följd att parametervärdena svänger relativt snabbt i början, vilket är önskvärt för att få hög konvergensthastighet. A,B,C-parametrarna sättes lika med noll, vilket kan tolkas som att regulatorn inte vet någonting om den process den skall reglera.

Mätbruset och regulatorn samplas samtidigt vilket medför att regulatorn får samma sekvens brussignaler oberoende av samplingsintervall.

Vi startar med alla tillstånd lika med noll utom varvtal och fart framåt som sättes till 77 rpm resp 16 knop (full fart). Djupgåendet är i standardfallet 20 meter (motsvarar fullt lastad båt) och båten seglar slör för styrbords halsar i hård vind (16-19 m/s). Se fig. 7.3.

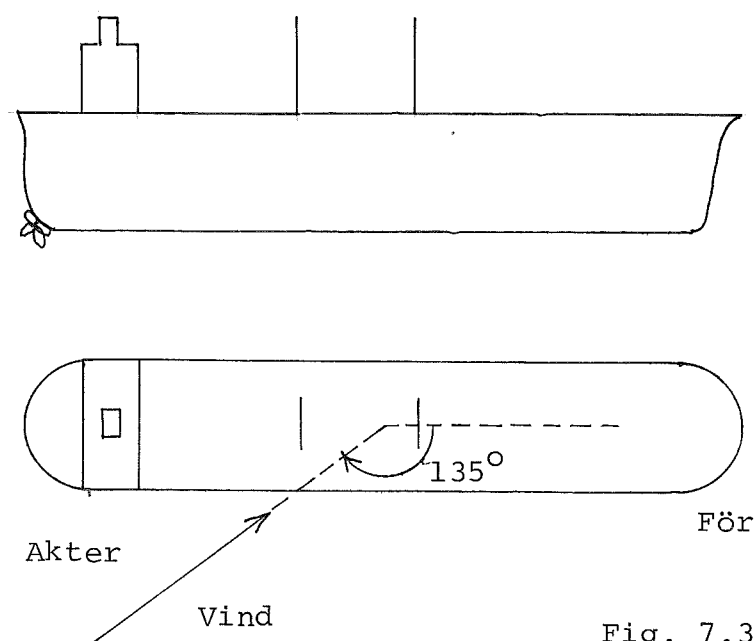


Fig. 7.3

Simuleringarna körs 1000 sek varefter vi startar om igen från början dock med nya parametervärden och ny P-matris. Denna procedur upprepas två gånger till. Sammanlagt köres alla test i 3000 sek där alla delkörningar har exakt samma brus. Alla test kan därför jämföras med varandra. Dock krävs försiktighet vid jämförelse mellan test av olika samplingsintervall. Vid  $T_s=15$  och 20 sekunder är konvergenshastigheten något lägre varför parametrarna ej hunnit växa upp till full storlek på 3000 sek och dessa har därför givit för små rodersignaler. Detta har medfört att förlustfunktionen blivit något mindre än den borde. Detsamma gäller för simuleringarna utan framkoppling men alla dessa kan alltid jämföras sinsemellan.

Under simuleringens gång beräknar vi en förlustfunktion, som nollställes vid varje simuleringens början. Denna funktion visar alltså kvalitén på regleringen, ju lägre ju bättre. Förlustfunktionen hinner dock ej konvergera på 1000 sek även om para-

metrarna är injusterade. Efter 1000 sek befinner den sig i en svacka men alla 3 x 1000 sek testen kan jämföras med varandra med undantag av ovan sagda.

Bestämning av  $K, T_s, \lambda, B_0$  går till på följande sätt.

1) Bestämning av antalet tidsfördröjningar  $K$ .

Båtmodellen har ej några tidsfördröjningar men då systemet är olinjärt måste vi införa fiktiva tidsfördröjningar i regulatorn. Regulatorn vill slå ned reglerfelet på ett samplingsintervall  $t$  ex 10 sek om  $K=0$ , vilket medför enorma rodersignaler och initierar självsvängningar i båtens rörelser. För att uppnå moderata rodersignaler ökas värdet på  $K$ .

2) Bestämning av samplingsintervallet  $T_s$ .

$T_s$  dn sättes till 5, 10 och 15 sekunder och  $K$  varieras på så sätt att dead-beat tiden  $DB=(K+1)T_s = \text{konst}$ .

3) Bestämning av exponentiell glömskefaktor.

Man vill att regulatorn skall "komma ihåg" vind-, last- och andra avgörande förhållanden till 1/10 efter 20-30 min. Vid  $T_s=10s$  måste därför  $\lambda$  vara större än 0.98. Regulatorn minns då i 19 minuter.

4) Bestämning av skalfaktor  $B_0$ .

Simuleringar körs med  $B_0 = -0.1, -1, -10$ . Minutecknet härrör från teckenkonventionen negativt roderutslag för att få positiv kurs.

Resultatet från dessa bestämningar finns på följande sidor.

$\sigma(\psi)$  = Standardavvikelse på kursen utan mätbrus

$\sigma(\delta_s)$  = Standardavvikelse på rodersignalen

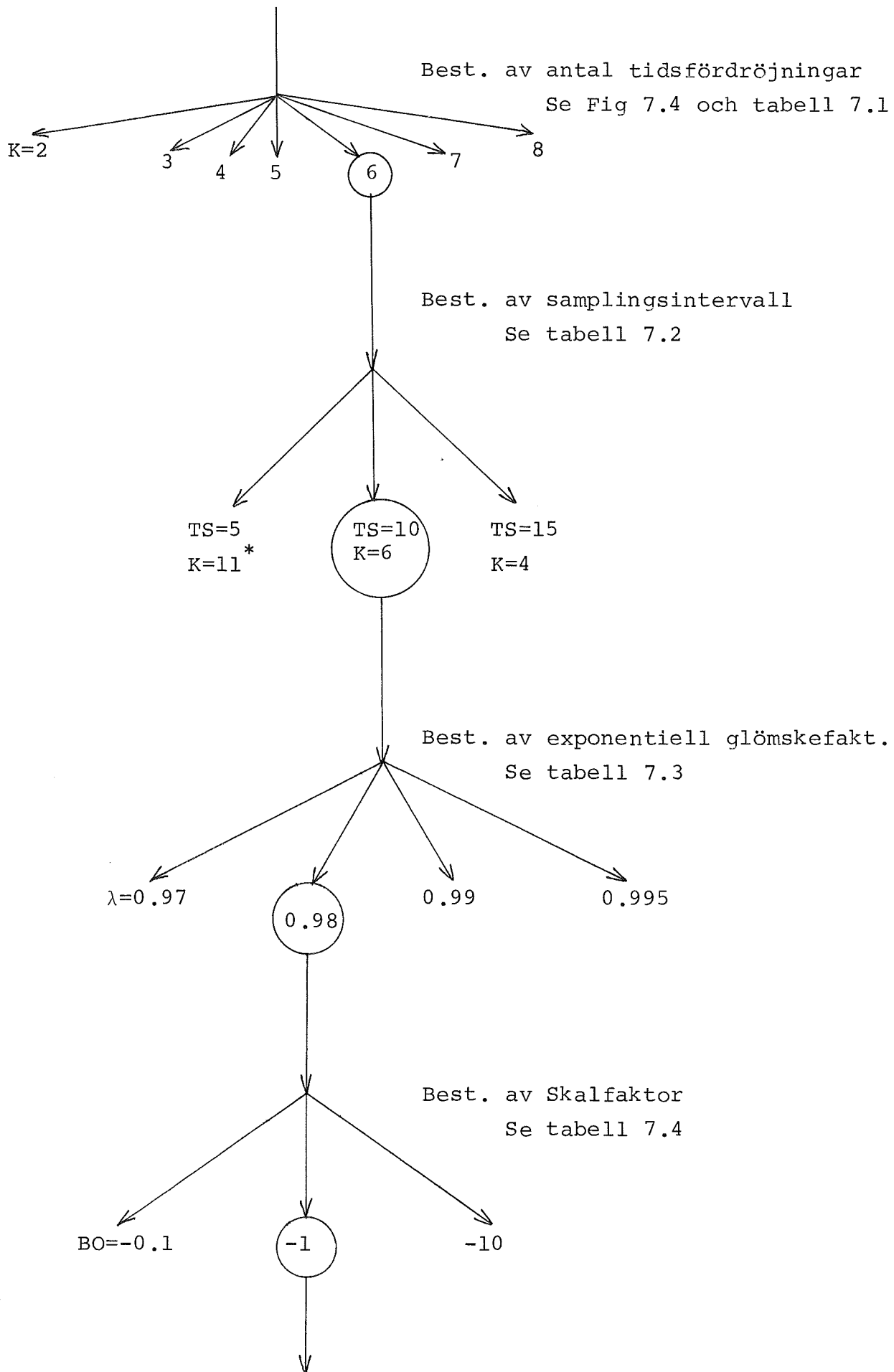
$V$  = Förlustfunktionen

Bästa regulator är hitintills (3,2,3,0,1,6,10,0.98,-1).

Ett schema över tillvägagångssättet visas på nästa sida.

Tabell 7.1 visar testkörningen.

Fig. 7.4 underlättar utvärderingen av testen.



\* K skulle egentligen vara 13 men begränsningar i subrutinen STURE maximerar i detta fall K till 11.



Tabell 7.1

K	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
2	0.77	10.22	12.78
3	0.741	5.57	4.42
4	0.555	5.11	3.28
5	0.567	4.45	2.84
6	0.526	4.31	2.63
7	0.483	4.56	2.76
8	0.626	4.46	2.79

(3,2,3,0,1,x,10,0.99,-1)

Tabell 7.2

K	$T_s$	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
11	5	0.45	5.63	3.69
6	10	0.526	4.31	2.63
4	15	1.036	4.57	3.73

(3,2,3,0,1,x,x,0.99,-1)

Tabell 7.3

$\lambda$	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
0.98	0.530	4.13	2.44
0.99	0.526	4.31	2.63
0.995	0.53	4.36	2.70
0.97	0.52	4.15	2.44

(3,2,3,0,1,6,10,x,-1)

Tabell 7.4

BO	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
-0.1	0.689	13.2	12.97
-1.0	0.530	4.13	2.44
-10.0	0.962	5.46	4.76

(3,2,3,0,1,6,10,0.98,x)

Vi vill nu bestämma strukturen på framkopplingen och har att välja på att använda girvinkelhastigheten direkt eller differenser på girvinkelhastigheten mellan samplingarna. För att få jämförbara test, tages en (1 st) mindre framkopplingsterm i fallet differenser. Vi testar alltså (3,2,3,0,---) mot (3,2,2,1,---) och finner en mycket liten minskning av förlustfunktionen varför vi väljer att i fortsättningen arbeta med differenser. Resultatet återfinns i tabell 7.5.

Vidare undersöker vi hur en filtrering av girvinkelhastigheten inverkar på förlustfunktionen. Filtret består av beräkning av glidande medelvärde med glömskefaktor lika med (1-B). Försöken visar att en mycket liten förbättring erhålls vid filtrering med B=0.9, som betyder mycket liten filtrering av den ursprungliga signalen. I fortsättningen blundar vi för detta faktum och använder inga filtrerade signaler vid regleringen. Resultatet återfinnes i tabell 7.6.

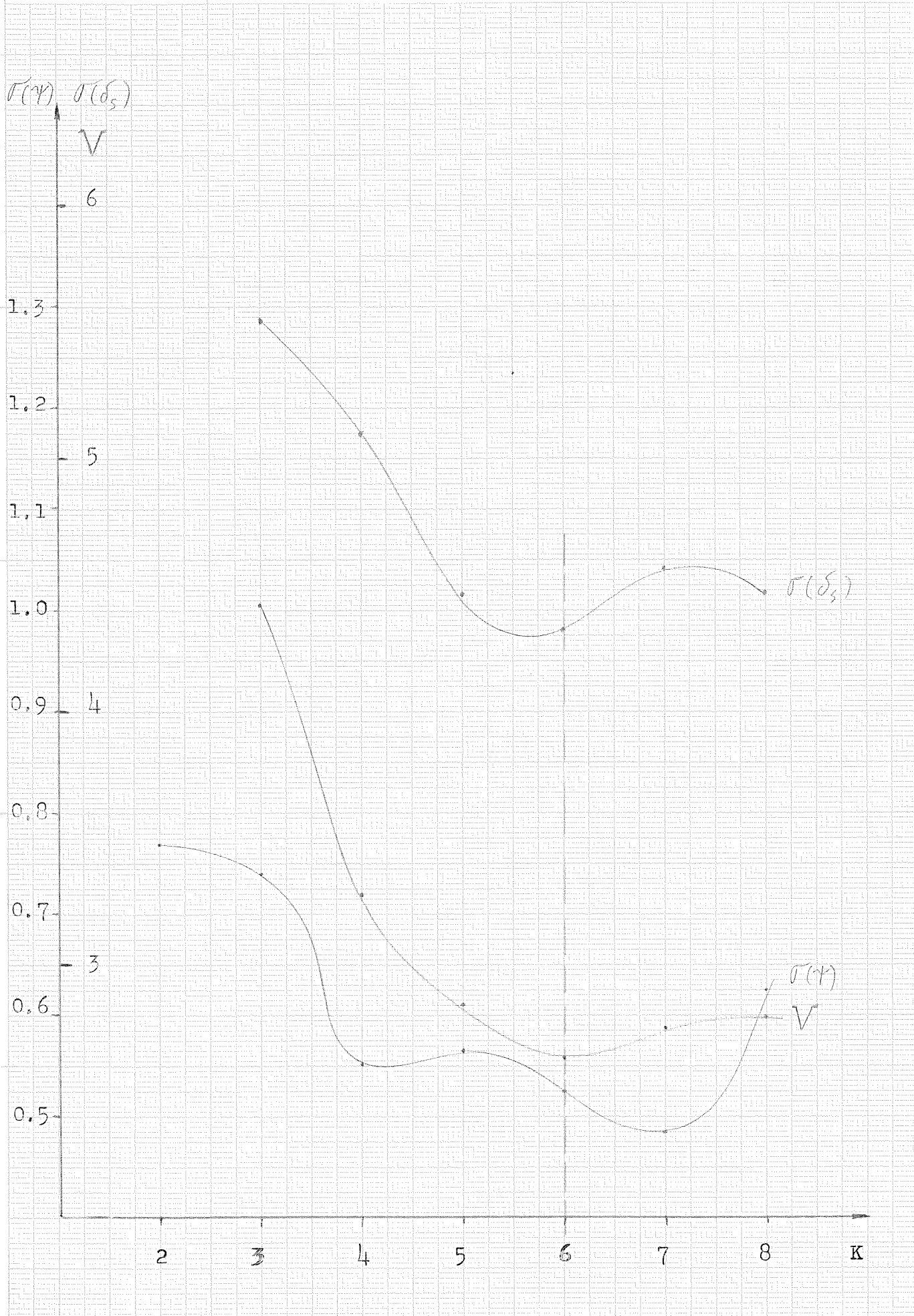
Vi testar också självinställaren med beräknad girvinkelhastighet ur kursen. Derivatans av kursen blir ju girvinkelhastigheten. Kursen har ju relativt liten varians och en derivering bör ge bra resultat vilket framgår av tabell 7.7. Låter man kursen ha större varians (sämre mätapparatur) fås naturligtvis sämre reglering. Resultatet finns i tabell 7.7.

Tabell 7.5

(3,2,x,x,1,6,10,0.98,-1)

NA	NB	NC	IRDIF	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
3	2	3	0	0.53	4.13	2.44
3	2	2	1	0.51	4.17	2.41

Figur 7.4



Tabell 7.6

(3,2,2,1,x,6,10,0.98,-1)

FIL	B	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
1	-	0.51	4.17	2.41
2	0.7	0.53	4.11	2.45
2	0.8	0.52	4.08	2.40
2	0.9	0.51	4.10	2.38
2	0.95	0.51	4.13	2.39

Tabell 7.7

(3,2,2,1,x,6,10,0.98,-1)

FIL	B	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
3	-	0.58	4.16	2.53
3*	-	0.68	5.64	4.10

\* Stort mätbrus på kursen:  $\text{Re}(4,4)=0.01 \text{ grad}^2$

Vi har alltså kommit fram till strukturen (3,2,2,1,1,6,10,0.98,-1). Nu återstår bestämning av antalet NA,NB,NC-parametrar. Vi ser av resultatet på nästa sida att detta inte är kritiskt för regleringen. Tilläggas kan att de fall där NA=4 visar genomgående större förluster än övriga. Detta beror på att en A-parameter är överflödig. Simulerar vi under längre tid, bör 4:e parametern bli relativt liten så att den inte bidrar till rodersignalen. Dessa fall kommer då att likna de fall då NA=3. Vi ser att strukturen (3,1,1,1,1,6,10,0.98,-1) är bättre än den hittills optimala. Resultatet visas i tabell 7.8.

Vi börjar nu om igen och undersöker om K och  $T_s$  är optimala även för denna struktur. Resultatet av dessa test återfinns i tabell 7.9 och 7.10.

Av tabell 7.8 ser vi att (3,1,1,---) och (3,2,2,---) är ganska lika varandra varför vi även här testar om K och  $T_s$ . Resultatet finns i tabell 7.11 och 7.12.

Tabell 7.8

(x,x,x,1,1,6,10,0.98,-1)

NA	NB	NC	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V	
2	1	1	0.58	4.30	2.67	
2	1	2	0.55	4.23	2.58	
3	2	1	0.50	4.18	2.41	
3	2	2	0.51	4.17	2.41	
3	2	3	0.54	4.98	3.27	
3	1	1	0.54	4.04	2.37	
4	3	3	0.54	5.04	3.23	
4	3	4	0.60	5.52	3.85	
4	2	2	0.50	5.90	4.36	
4	1	1	0.58	6.41	5.16	
3	1	2	0.67	4.70	3.24	IRDIF=0
3	1	1	0.53	4.08	2.40	FIL=2 B=0.9

Tabell 7.9

(3,1,1,1,1,1,x,10,0.98,-1)

K	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
5	0.49	4.97	3.30
6	0.54	4.04	2.37
7	0.46	4.74	2.94
8	0.51	5.86	4.43

Tabell 7.10

(3,1,1,1,1,1,x,x,0.98,-1)

K	$T_s$	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
6	10	0.54	4.04	2.37
4	15	0.80	5.04	3.65
3	20	0.81	4.64	3.47
5	15	0.57	4.25	2.68
4	20	0.69	4.15	2.79
6	15	0.61	4.87	3.37
5	20	0.69	4.75	3.43

Tabell 7.11 (3,2,2,1,1,x,10,0.98,-1)

K	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
5	0.54	4.19	2.57
6	0.51	4.17	2.41
7	0.46	4.87	3.06

Tabell 7.12 (3,2,2,1,1,x,x,0.98,-1)

K	$T_s$	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
4	15	0.86	4.33	3.16
3	20	0.89	5.72	4.87
3	15	0.60	4.50	3.01
2	20	0.95	6.78	6.50
5	15	0.56	4.35	2.76
4	20	1.12	4.59	4.02

Vi har också tagit fram optimal struktur på den adaptiva regulatorn där framkopplingen har slopats. I teorin tillkommer egentligen inte mer information om systemet vid framkoppling eftersom denna kan beräknas ur kursen. Informationen blir möjligen något säkrare. I tabellerna 7.13, 7.14 och 7.15 ses resultatet av dessa test.

I tabell 7.16 ges resultatet där framkopplingstermen beräknas ur kursen.

Tabell 7.13 (x,x,0,0,1,6,10,0.98,-1)

NA	NB	NC	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
2	1	0	0.85	5.08	4.00
3	2	0	0.59	4.13	2.50
4	3	0	0.56	5.30	3.75
5	4	0	0.70	5.30	3.95
3	1	0	0.58	4.27	2.59

Tabell 7.14 (3,2,0,0,1,x,10,0.98,-1)

K	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
5	0.58	4.42	2.81
6	0.59	4.13	2.50
7	0.47	5.04	3.24
10	0.55	4.43	2.74
12	0.75	7.80	7.93
9	0.56	4.56	2.92

Tabell 7.15 (3,2,0,0,1,x,x,0.98,-1)

K	$T_s$	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
6	10	0.59	4.13	2.50
4	15	0.93	4.13	3.12
5	15	0.59	4.64	3.07

Tabell 7.16 (x,x,x,1,3,6,10,0.98,-1)

NA	NB	NC	$\sigma(\psi)$	$\sigma(\delta_s)$	V
3	2	1	0.59	4.13	2.50
3	2	2	0.58	4.16	2.53
3	1	1	0.58	4.27	2.59

## 7.5 OPTIMAL OCH SUBOPTIMAL REGULATOR

Optimal regulator är alltså (3,1,1,1,1,6,10,0.98,-1). Då mätapparaturen för girvinkelhastigheten har en relativt hög kostnad, har även suboptimal regulator utan framkoppling tagits fram. Denna är (3,2,0,0,1,6,10,0.98,-1).

Vi simulerar nu olika lastfall och vindstyrkor och beräknar standardavvikelse och medelvärde för kursfelet och rodersignalen. Dessutom beräknas förlustfunktionen.

Ovanstående två regulatorer har före dessa standardtest simulerats under långtidstest om 10000 sekunder (ca 3 timmar) för att parametrarna skall ha ställt in sig. Under långtidstestet var vinden hård och djupgåendet 20 meter.

Vi har också tagit fram en regulator som beräknar girvinkelhastigheten ur kursen. Denna regulator är  $(3,2,1,1,3,6,10,0.98,-1)$ .

Dessa simuleringar med adaptiv regulator finns i appendix C och i tabell 7.17 och 7.18. I tabell 7.19 ges estimerade parametrar för optimal och suboptimal regulator vid olika vind- och lastförhållanden.

Tabell 7.19 Estimerade parametrar för adaptiv regulator.

Optimal regulator:  $a_1 a_2 a_3 b_1 c_1$

10.5 m	svag	-19.32	+30.18	-11.47	0.2673	68.43
"	hård	-19.37	+30.12	-11.38	0.2723	68.30
20 m	svag	-19.20	+30.35	-11.42	0.2682	68.12
"	hård	-19.27	+30.51	-11.52	0.2660	68.94
25 m	svag	-19.34	+30.66	-11.44	0.2672	68.27
"	hård	-19.54	+31.09	-11.66	0.2610	69.76

Suboptimal regulator:  $a_1 a_2 a_3 b_1 b_2$

10.5 m	svag	-22.42	+37.51	-15.48	$7.97 \cdot 10^{-3}$	0.1443
"	hård	-22.54	+37.44	-15.30	$18.12 \cdot 10^{-3}$	0.1443
20 m	svag	-22.10	+37.47	-15.52	$0.98 \cdot 10^{-3}$	0.1435
"	hård	-22.19	+37.69	-15.68	$1.07 \cdot 10^{-3}$	0.1426
25 m	svag	-22.20	+37.77	-15.60	$-2.18 \cdot 10^{-3}$	0.1447
"	hård	-22.54	+38.45	-15.96	$-6.38 \cdot 10^{-3}$	0.1461



Tabell 7.17

En jämförelse mellan adaptiv regulator och PID-regulator.  
 Simuleringstid före prov med adaptiv regulator: 10 000 sek  
 Simuleringstid 30 min/prov

Djupg.	Vind	Regulator	Förl. funk. V	Kurs		Roder	
				medel värde	stand. avv.	medel värde	stand. avv.
10.5 m	svag	AD(311----	0.92	0.01	0.21	0.52	2.95
10.5 m	svag	AD(320----	1.11	0.01	0.21	0.50	3.17
10.5 m	svag	PID(4,0.02,20)	0.43	0.01	0.35	0.50	1.49
10.5 m	hård	AD(311----	2.69	0.01	0.39	1.13	4.78
10.5 m	hård	AD(320----	3.83	0.03	0.42	1.07	5.78
10.5 m	hård	PID(4,0.02,30)	1.64	0.02	0.66	1.08	2.92
20 m	svag	AD(311----	0.95	0.01	0.24	0.83	2.83
20 m	svag	AD(320----	0.92	0.02	0.23	0.81	2.70
20 m	svag	PID(4,0.02,80)	0.58	0.02	0.34	0.80	1.76
20 m	hård	AD(311----	2.78	0.01	0.45	1.79	4.46
20 m	hård	AD(320----	3.21	0.05	0.47	1.77	4.82
20 m	hård	PID(4,0.04,100)	2.53	0.01	0.67	1.75	3.80
25 m	svag	AD(311----	1.02	0.01	0.26	0.96	2.86
25 m	svag	AD(320----	0.91	0.02	0.25	0.95	2.61
25 m	svag	PID(4,0.02,100)	0.70	0.02	0.36	0.93	1.93
25 m	hård	AD(311----	3.03	0.01	0.48	2.08	4.51
25 m	hård	AD(320----	3.31	0.06	0.50	2.07	4.71
25 m	hård	PID(4,0.02,120)	2.58	0.05	0.64	2.05	3.64

Tabell 7.18

## Simuleringar under speciella förhållanden.

Simuleringstid 30 min. Djupgående 20 m. Hård vind.

	Regulator	Förl. funk. V	Kurs		Roder		
			medel värde	stand. avv.	medel värde	stand. avv.	
Bias:							
roder 5°							
girv.hast. 0.05°/s	AD(311----	3.07	-0.1	0.50	-3.18	4.70	
Dito	AD(320----	3.38	-0.1	0.49	-3.20	4.95	
Dito	PID(4,0.04,100)	2.76	-0.05	0.73	-3.23	3.97	
$R_e(4,4)=0.01$	AD(311----	3.23	0.01	0.46	1.79	5.02	
$R_e(4,4)=0.01$	AD(320----	3.81	0.05	0.48	1.76	5.46	
$R_e(4,4)=0.01$	AD(321----	3.68	0.05	0.64	1.78	5.13	
	AD(321----	3.26	0.05	0.64	1.78	4.64	
Samplingsintervall $T_s=20$ sek	AD(311----	8.16	0.1	0.53	1.78	7.94	

## 8 SLUTSATSER

Våra simuleringar visade att en omsorgsfullt inställd PID-regulator genomgående gav lägre värde på förlustfunktionen än den typ av adaptiv regulator som vi studerade. PID-regulatorns inställning måste dock ändras så fort som vädret ändras, för att fortfarande vara den bättre av de båda. Dessutom kan den adaptiva regulatorn modifieras till att ta hänsyn till roderutslaget också i stället för att endast minimera variansen på kursavvikelsen. Detta skulle emellertid kräva större minnesutrymme i datorn för regulatorn.

Den adaptiva regulator som vi studerat höll genomgående kursen bättre än PID-regulatorn, men gav större roderutslag. Om konstanten  $\lambda$  i förlustfunktionen inte ges värdet  $1/8$  som i våra simuleringar, utan ett mindre värde, skulle den adaptiva regulatorn hävda sig bättre. Vilket värde som är det lämpligaste för tankfartyg är inte helt klart, men  $\lambda=1/12$  finns t ex föreslaget.

9 REFERENSER

Elmqvist, H. (1975), "SIMNON - An interactive simulation program for nonlinear systems - Users guide."  
Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Norrbin, N.H. (1971) "Theory and Observations on the use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined waters." Report no. 68. Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, Gothenburg, Sweden.

Wittenmark, B. (1973) "A Self-tuning Regulator."  
Report no. 7311. Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Åström, K.J. and Källström, C. (1973) "Application of System Identification Techniques to the Determination of Ship Dynamics." Proc. 3rd IFAC symp. on Identification and System Parameter Estimation, the Hague/Delft, the Netherlands.

APPENDIX A

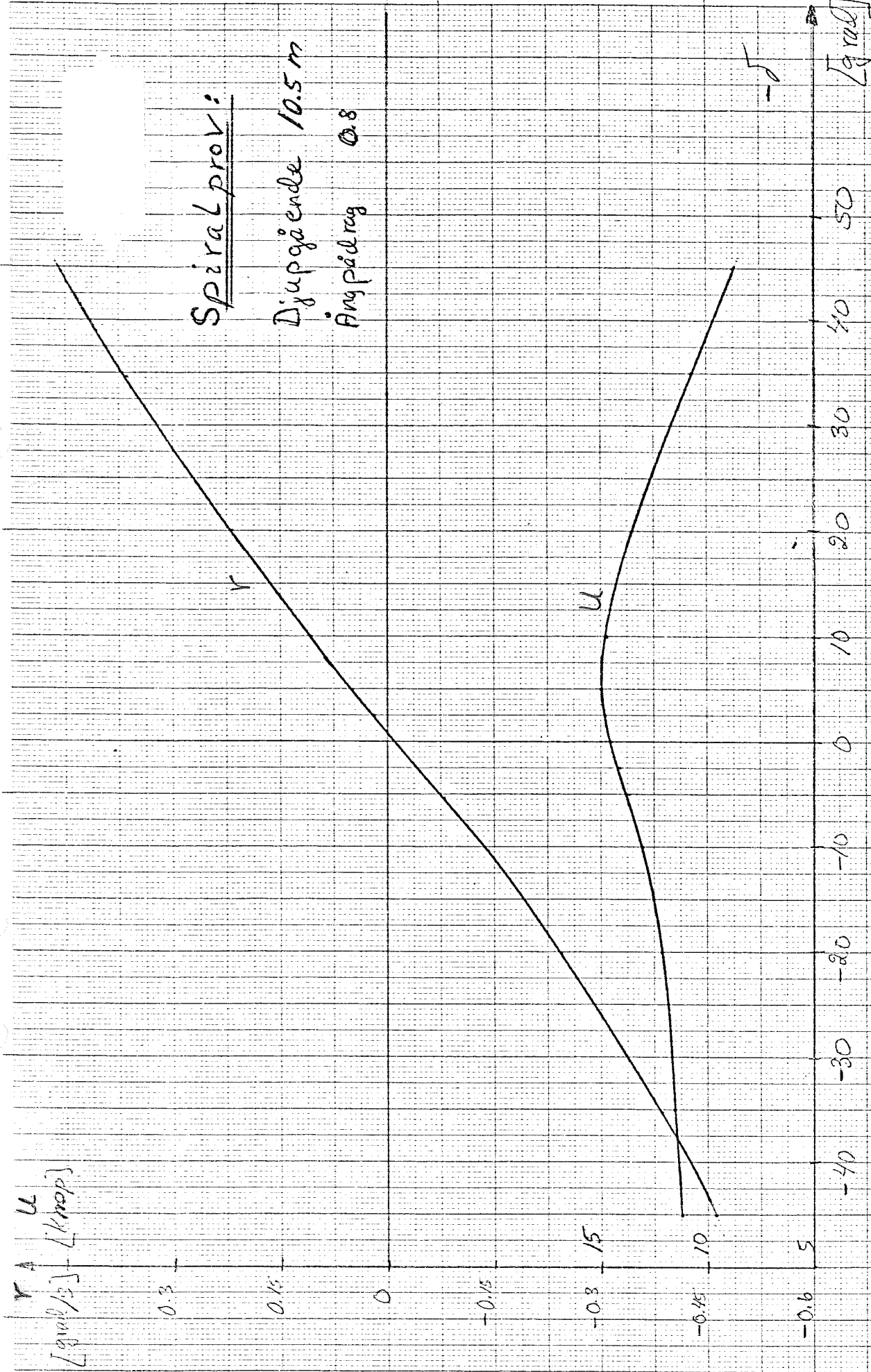
## Standardprov

Spiralprov	Djupgående	10.5m		A2
"	"	20 m		A3
"	"	25 m		A4
"	"	20 m	verklig båt	A5
Cirkelprov 35°	"	10.5m		A6
"	"	20 m		A8
"	"	25 m		A10
"	"	10.5m	verklig båt	A12
"	"	20 m	verklig båt	A13
Zig-zag-prov 10°/10°	"	10.5m		A14
"	"	20 m		A16
"	"	25 m		A18
"	"	20 m	verklig båt	A20
Zig-zag-prov 20°/20°	"	20 m		A21
"	"	20 m	verklig båt	A23
Impulssvar 20°	"	10.5m		A24
"	"	20 m		A25
"	"	25 m		A26
Crash-stop-prov	"	20 m		A27
"	"	20 m	verklig båt	A28

# Spiralprov:

Djupgående 10.5 m

Ångspådring 0.8



r u  
[grad/2] [krop]

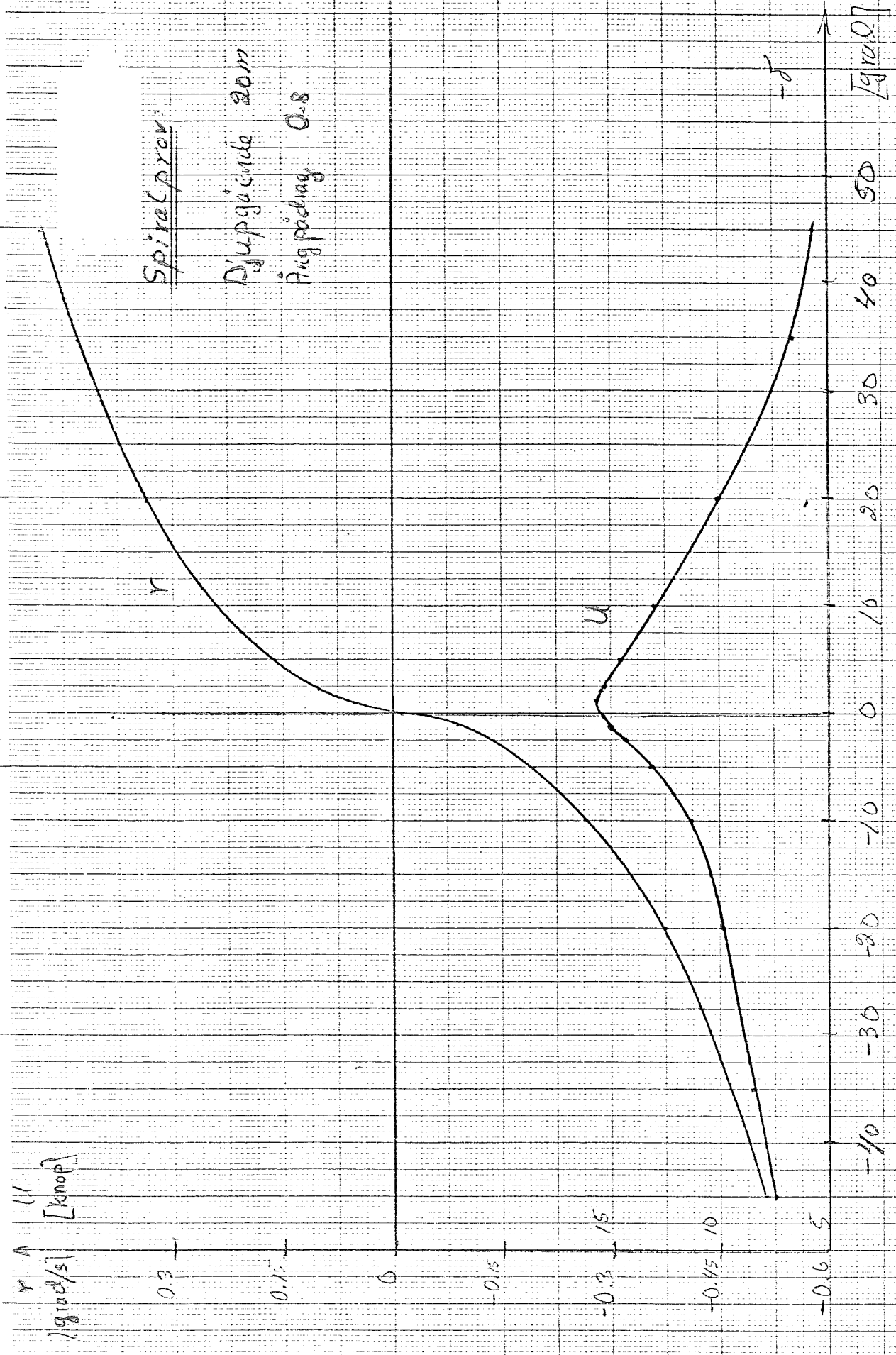
[grad]

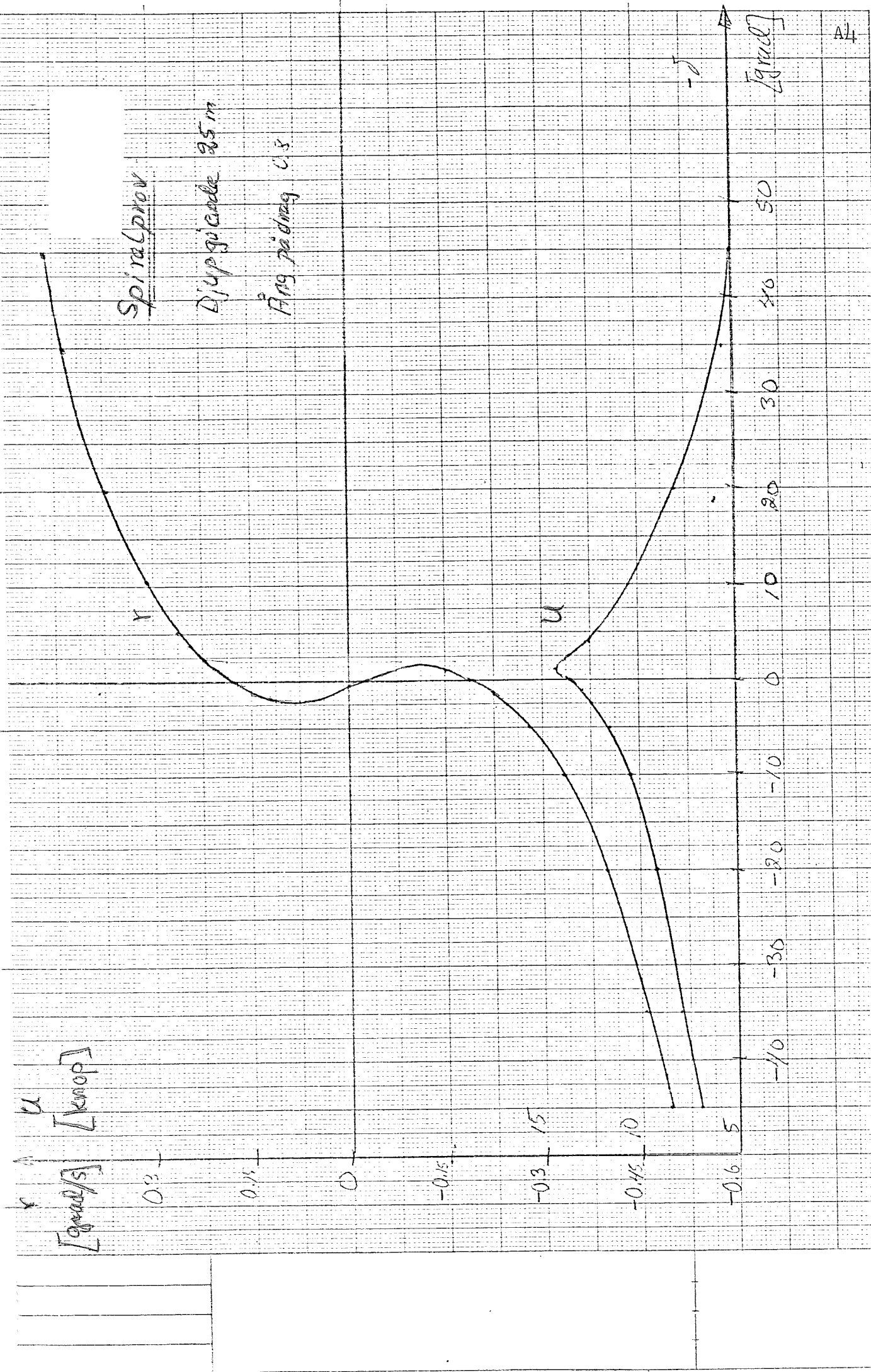
0001171 - 44 416 - 100201 - 010

Spiralprov

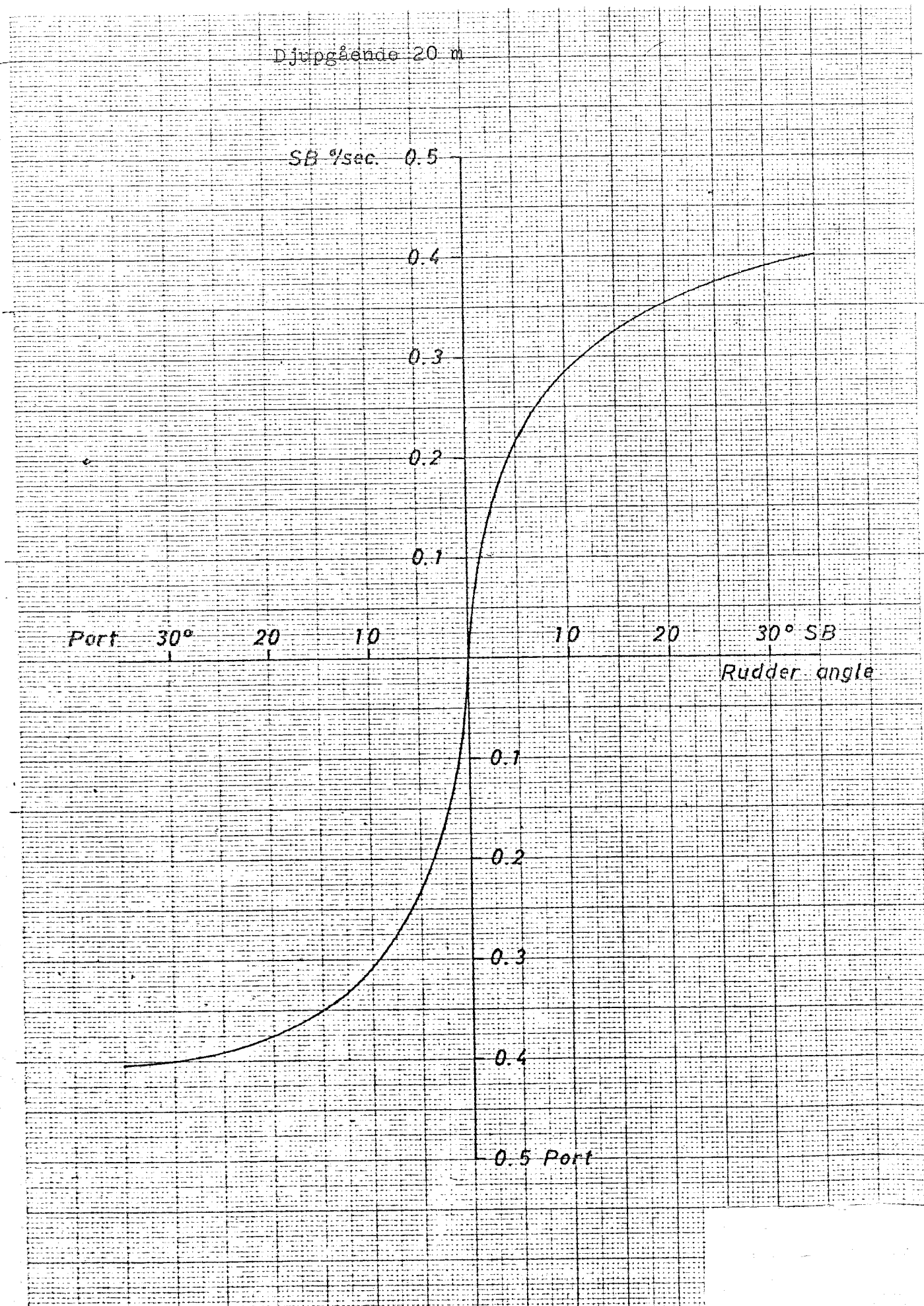
Djupgående 20m

Augspåning 0.8







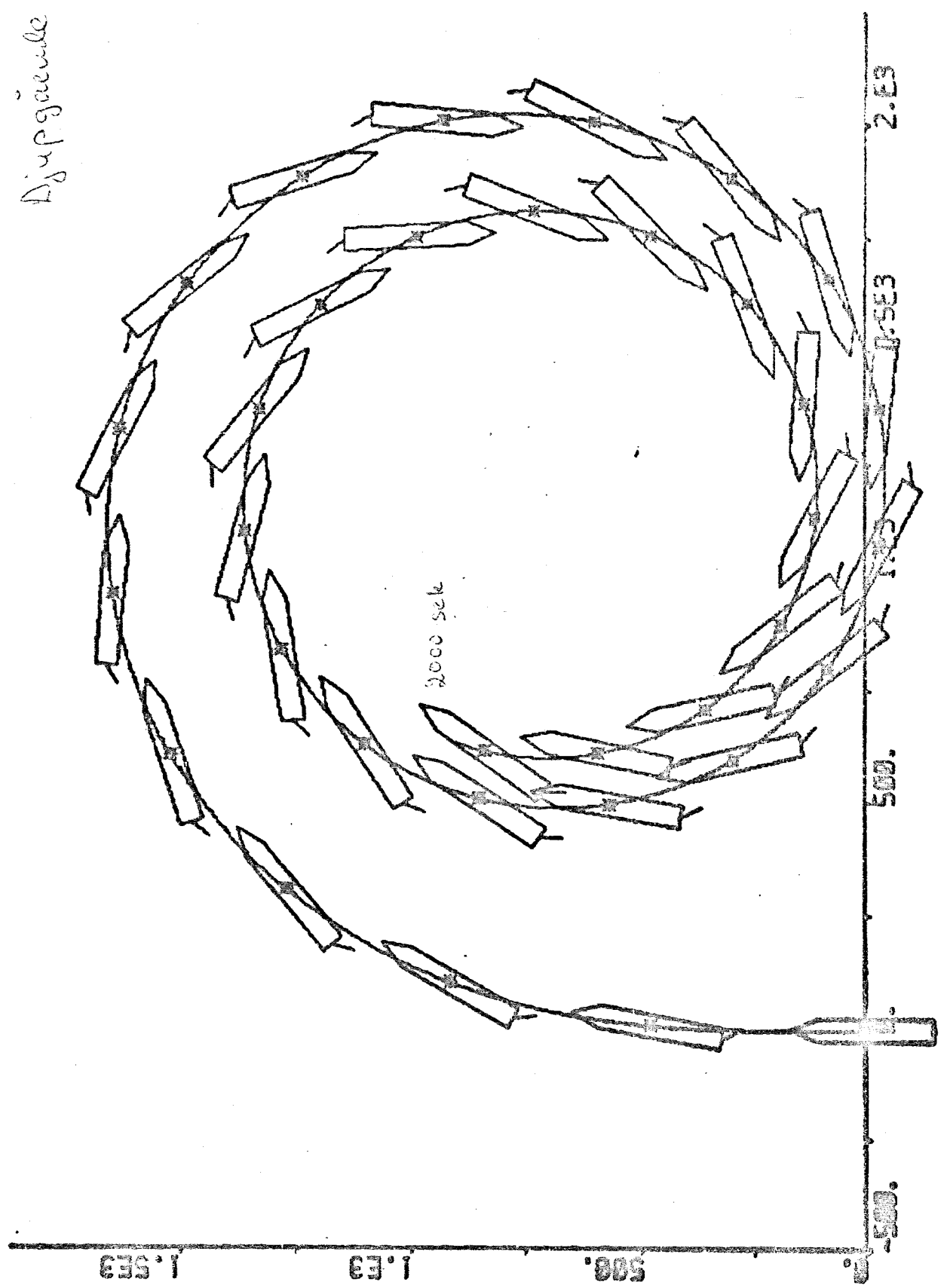


Ang påkrav 0.8

Rocka vinkel -35 grad

Djupgående 10.5 m

Cirkelprov



2.000

1.500

500.

0

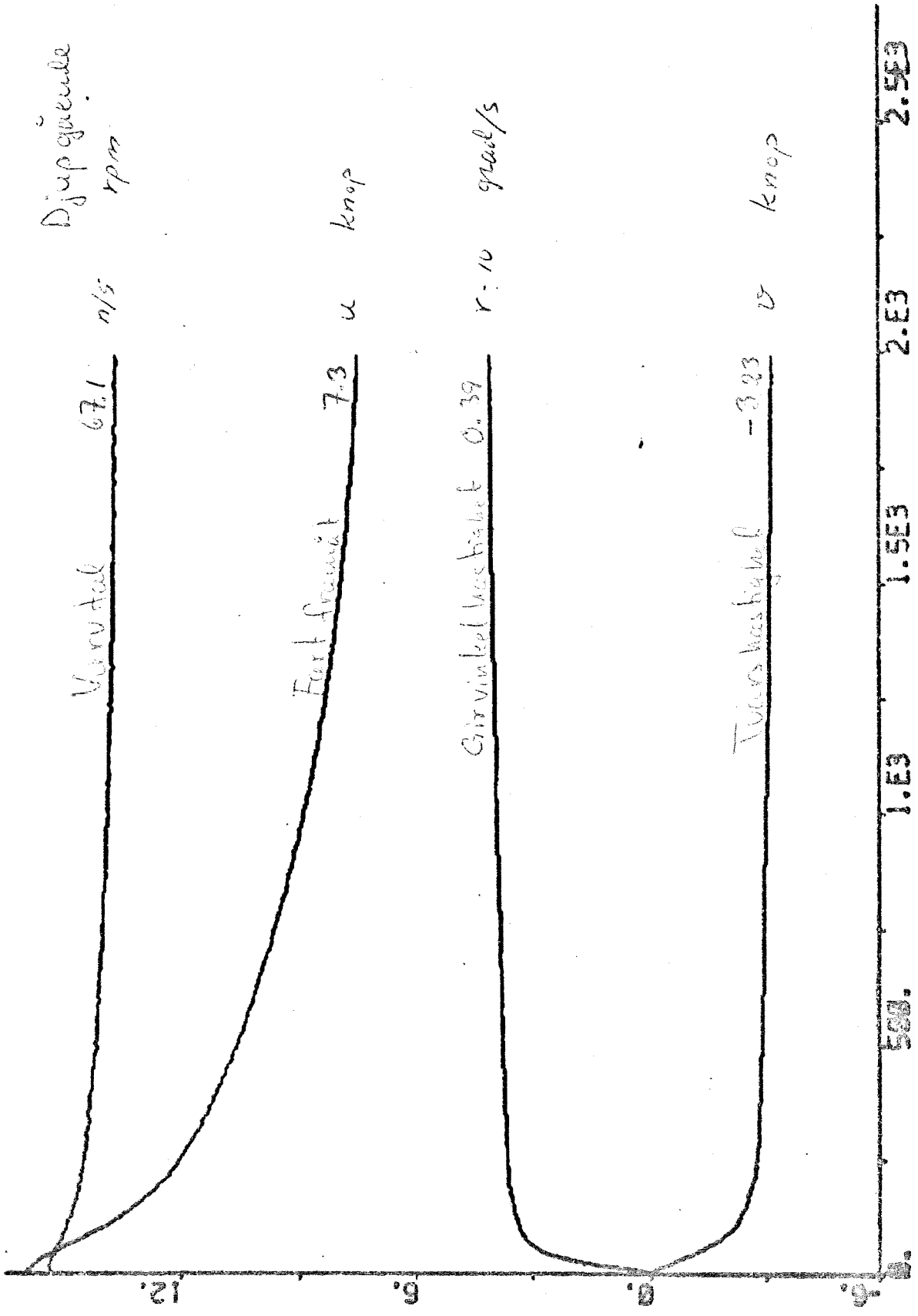
1.500

1.000

500.

PLOT C2 C3 C4 C5(C9)

Ang pådray 0.8  
 Roddevinkel - 35 grad  
 Djupgående 10.5 m  
 rpm



(Sek) 2.5E3  
 (min) 30

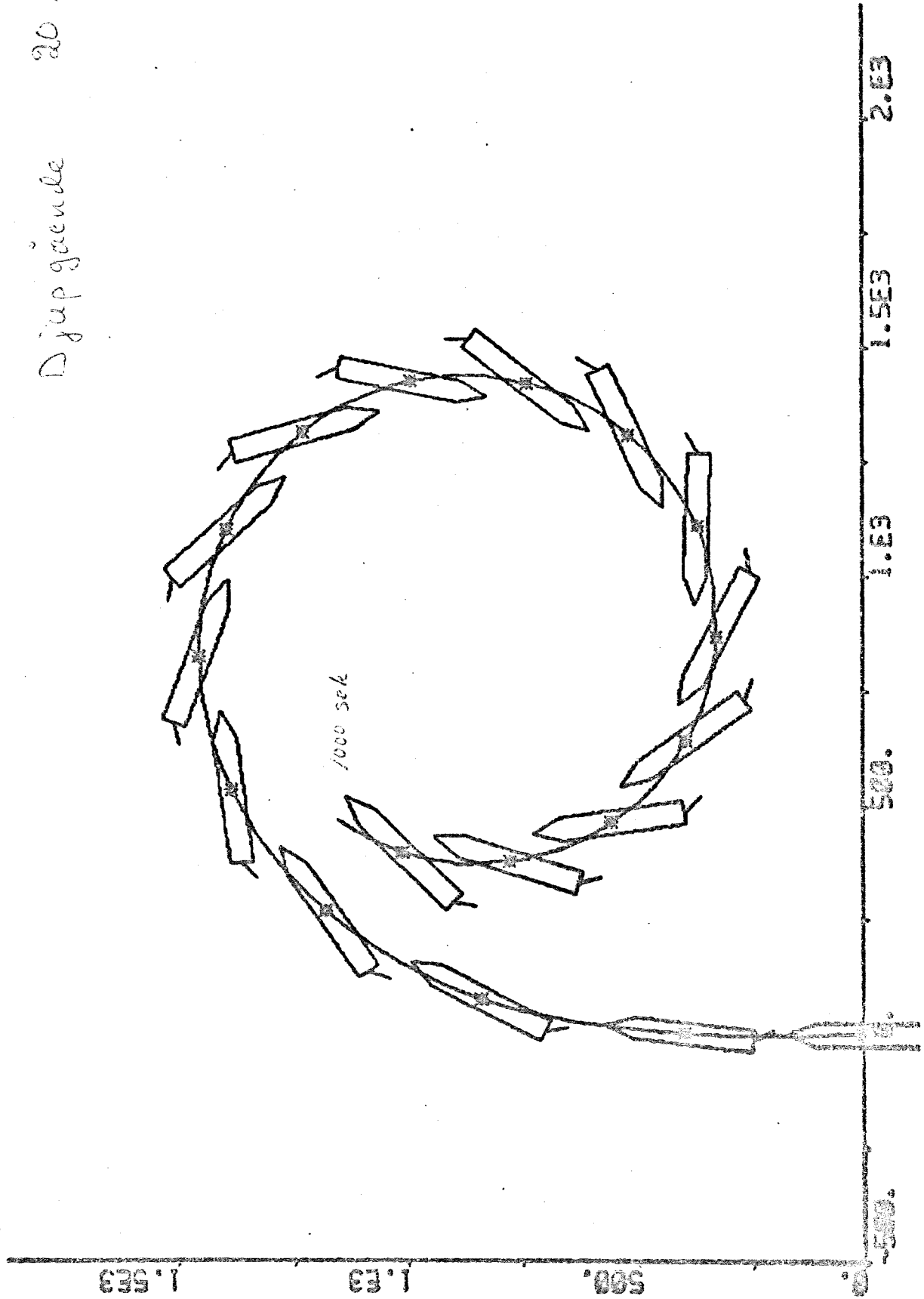
PLOT C7(C8)

Ång på drag 0.8

Cirkel prov

Rodervinkel -35 grad

Djupgående 20 m

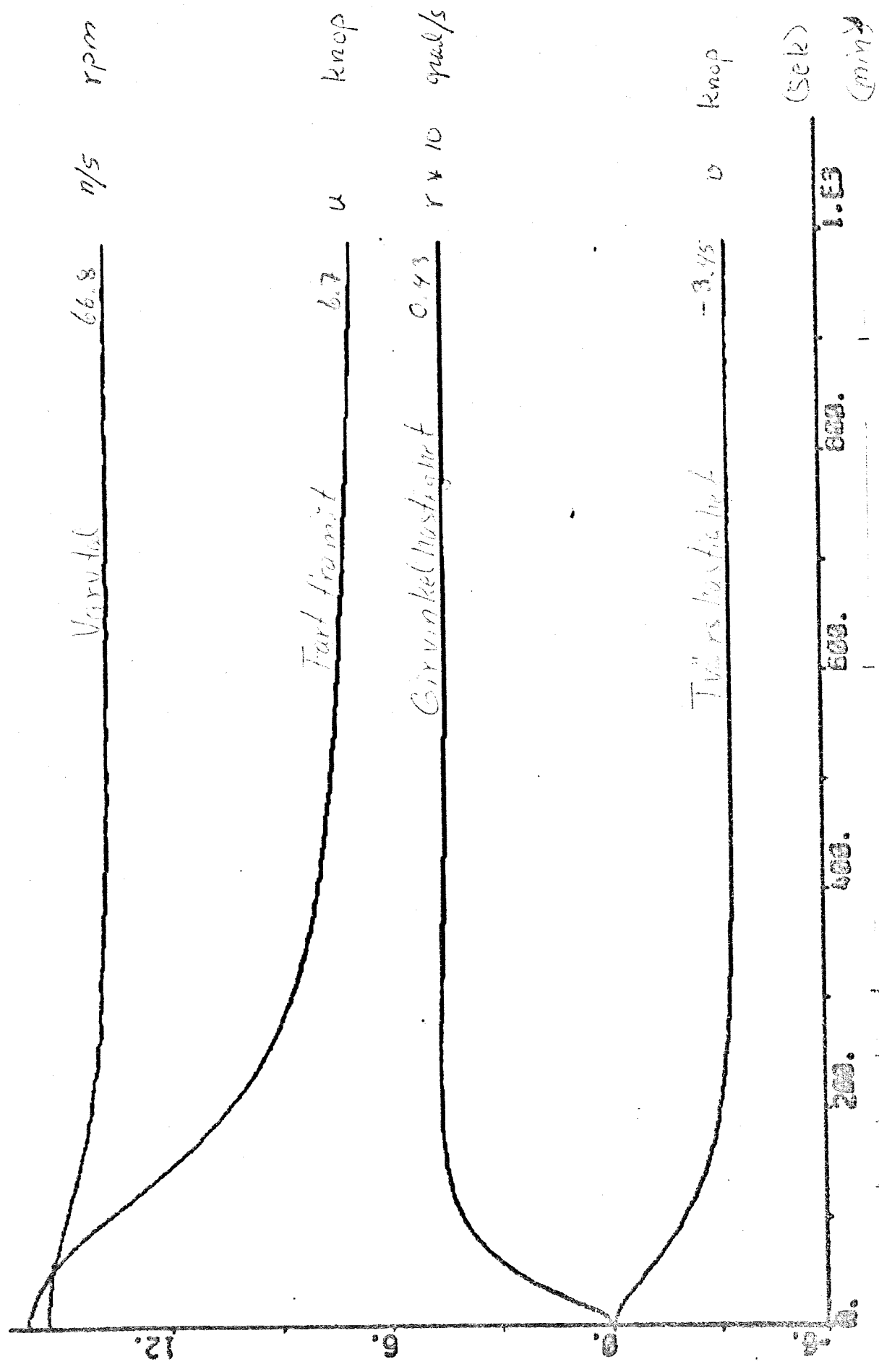


Flug på drag 0.0

Roder vinkel -35 grad

Djup gående 20 m

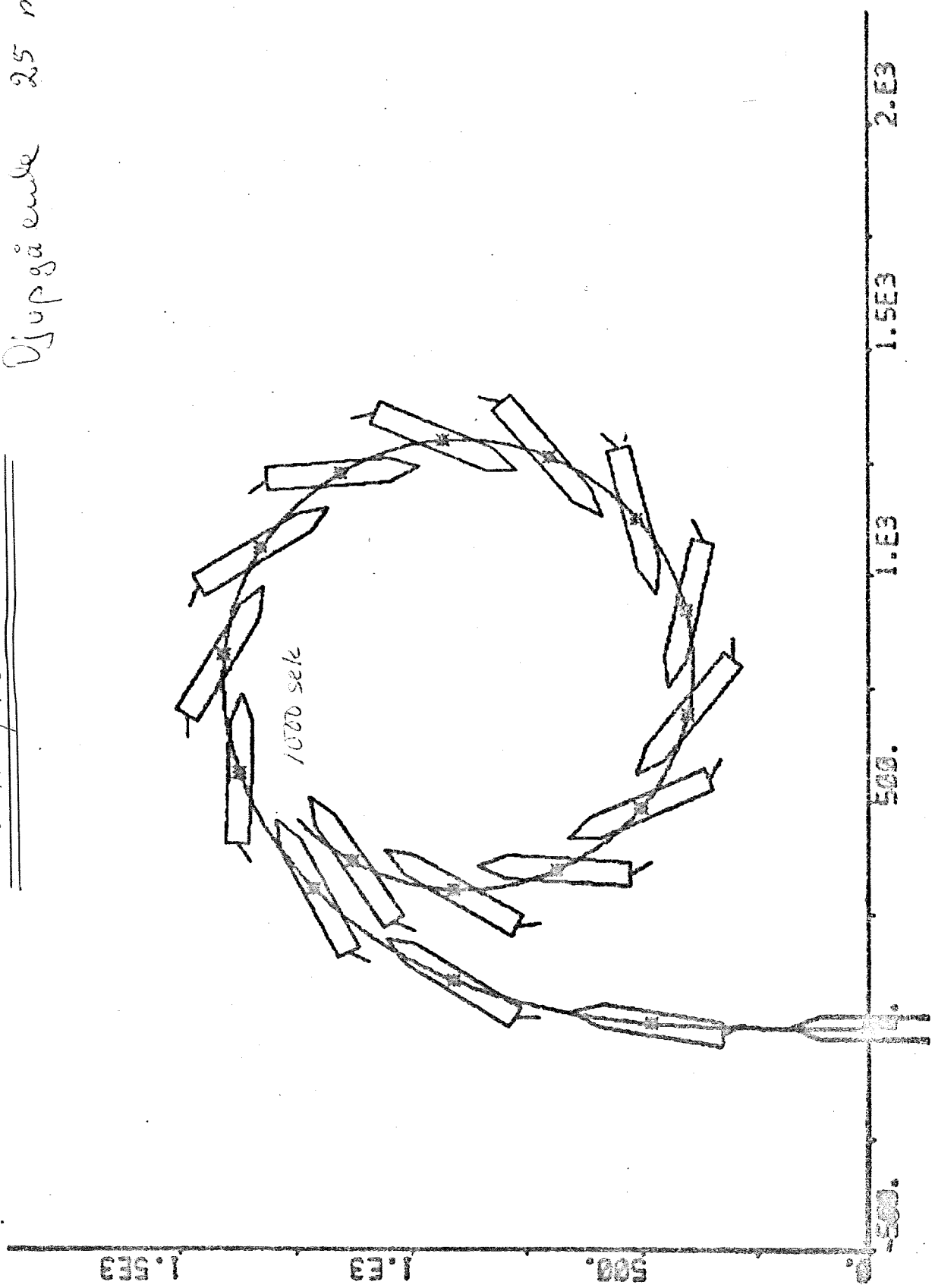
PLOT C2 C3 C4 C5(C9)



Rångfödring 0.8  
 Rodder vinkel -35 grad  
 Djupgående 25 m

Cirkelprov

PLOT C7(C8)



PLOT C2 C3 C4 C5(C9)

Ångpödring 0.8

Roder vinkel -35 grad

Djupgående 2.5 m

Varvtal 66.8 1/5 rpm

Fart framåt 6.4 u knop

Geir vinkel hastighet 0.43 1-10 grad/s

Tvårs hastighet -3.5 0 knop



0. 200. 400. 600. 1.00

1.00

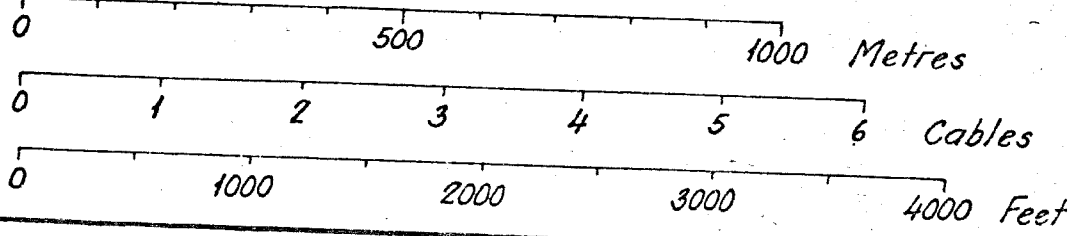
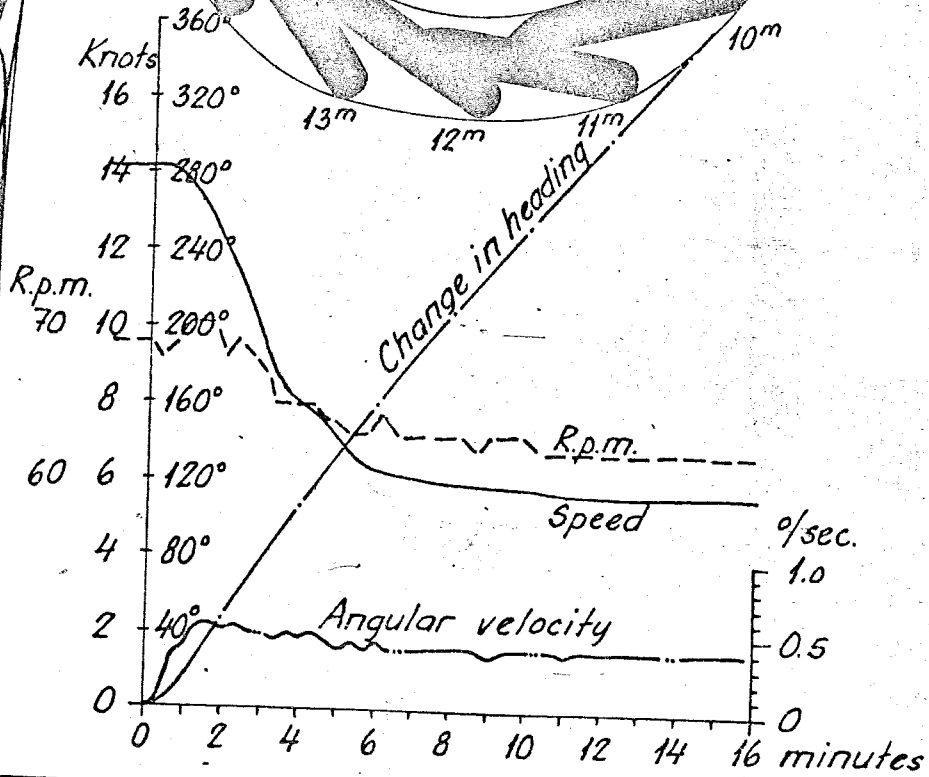
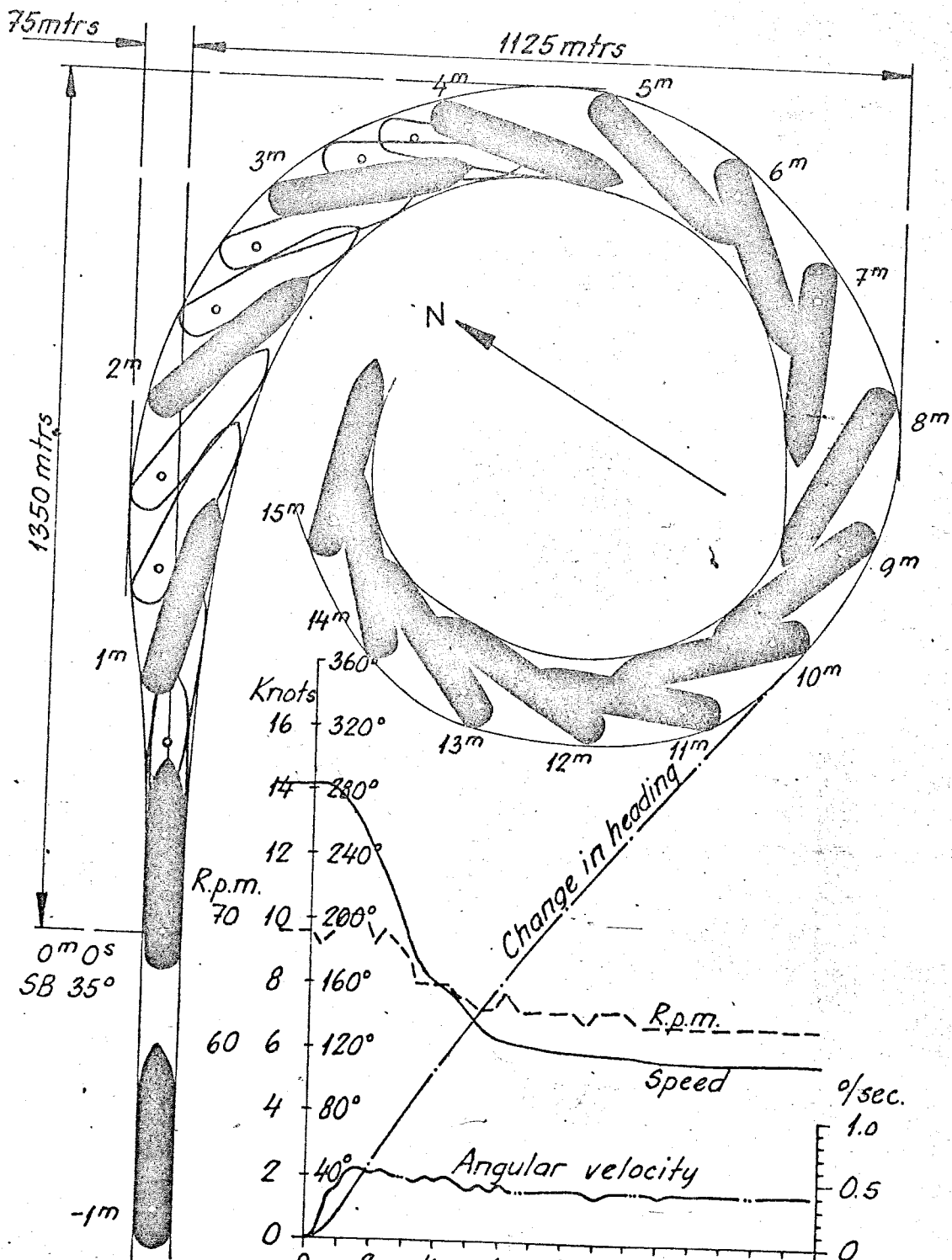
Waterdepth : 400 mtrs.

At 20<sup>25</sup> SB 35°

Wind : 0  
Sea : 1

F : 30' 2"  
A : 39' 2"

Djuggående 10.5 m



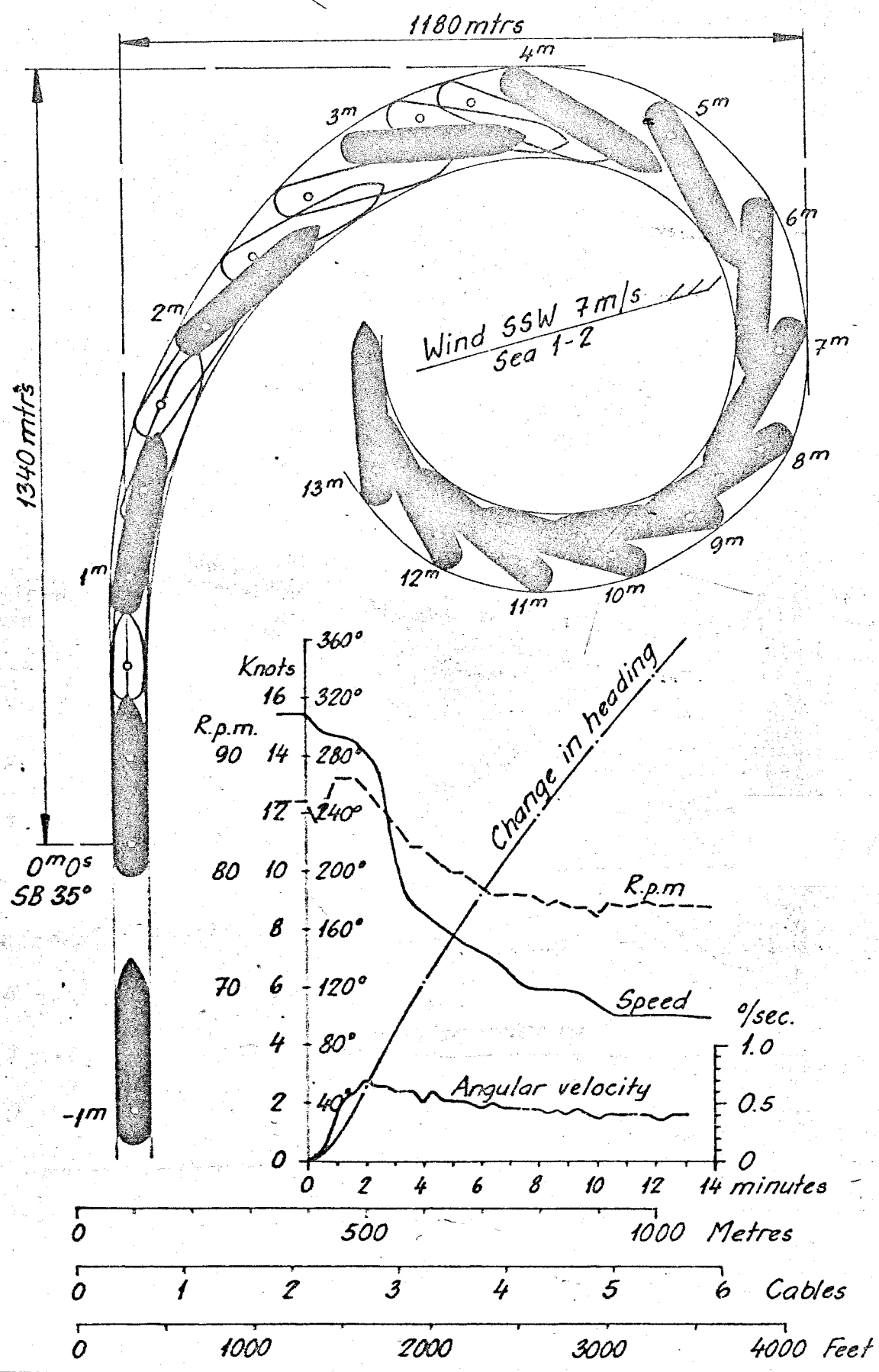
0m 0s  
SB 35°

-1m



Waterdepth: 350 mtrs.  
 F: 65' 10 1/2"  
 A: 65' 10 1/2"

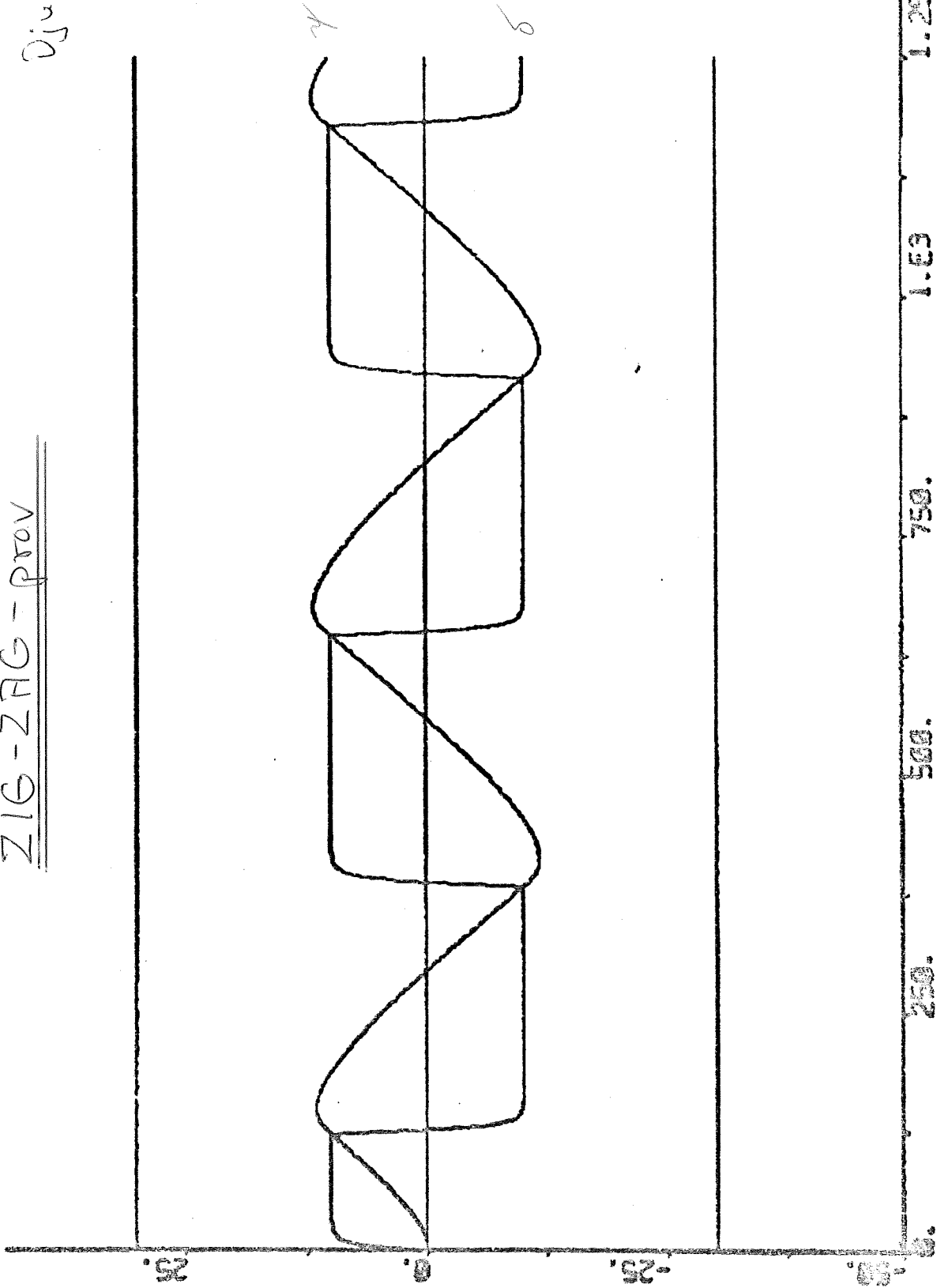
At 23<sup>15</sup> SB 35°  
 20.0 seconds to SB 40° rudder angle.  
 Djupgående 20 m



PLOT PSIN DELN ZERO LINEI LINE2

Ång på dray 0.3  
ZIGZAG 10"  
Djup gående 10.5m

ZIG-ZAG - PROV



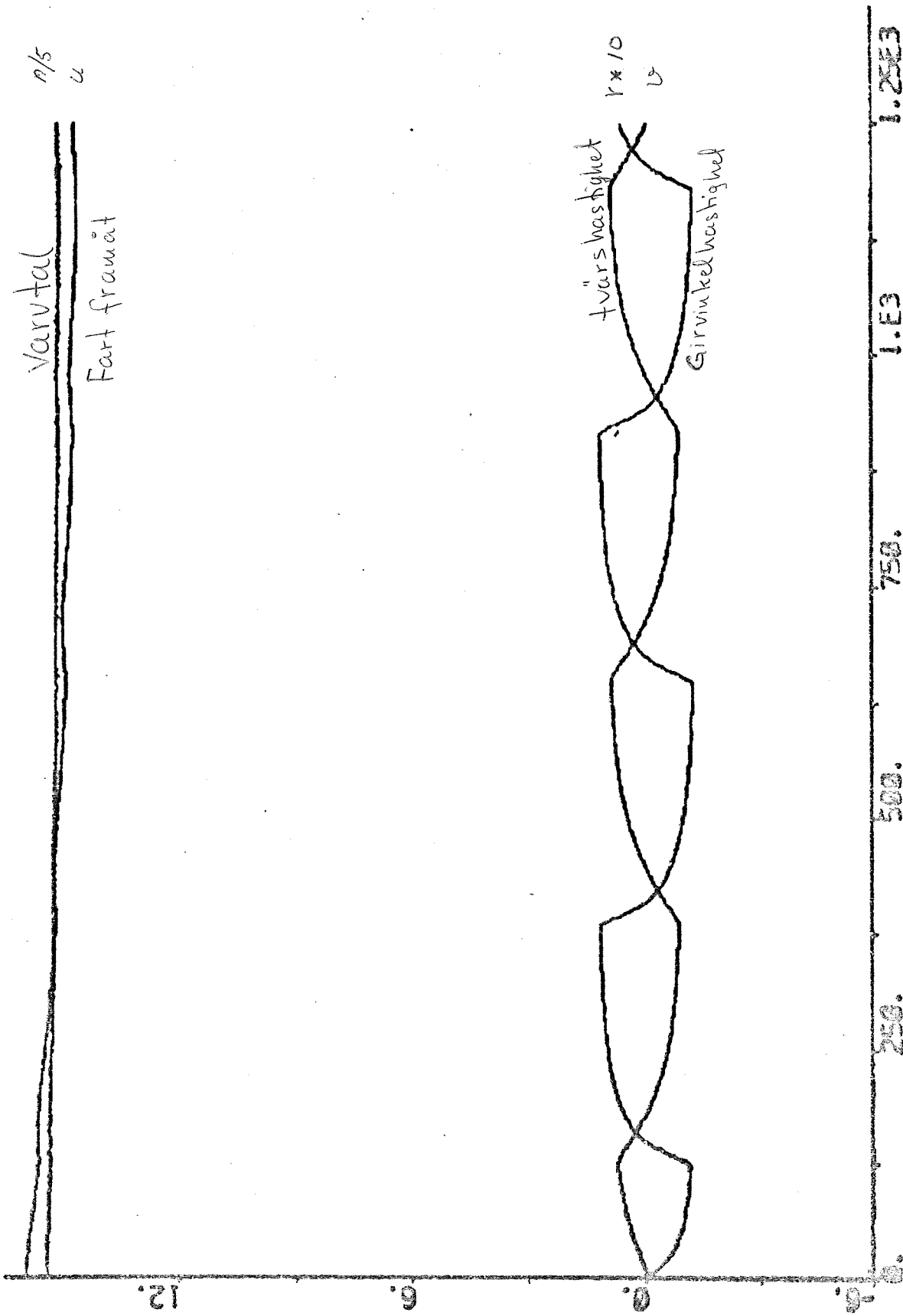
PLOT C2 C3 C4 C5(C9)

Äng pådray 0.8  
ZIGZAG 10°

Djupgående 10.5 m

Varvtal  
Fart framåt

n/s rpm  
u knop



grad/s  
knop

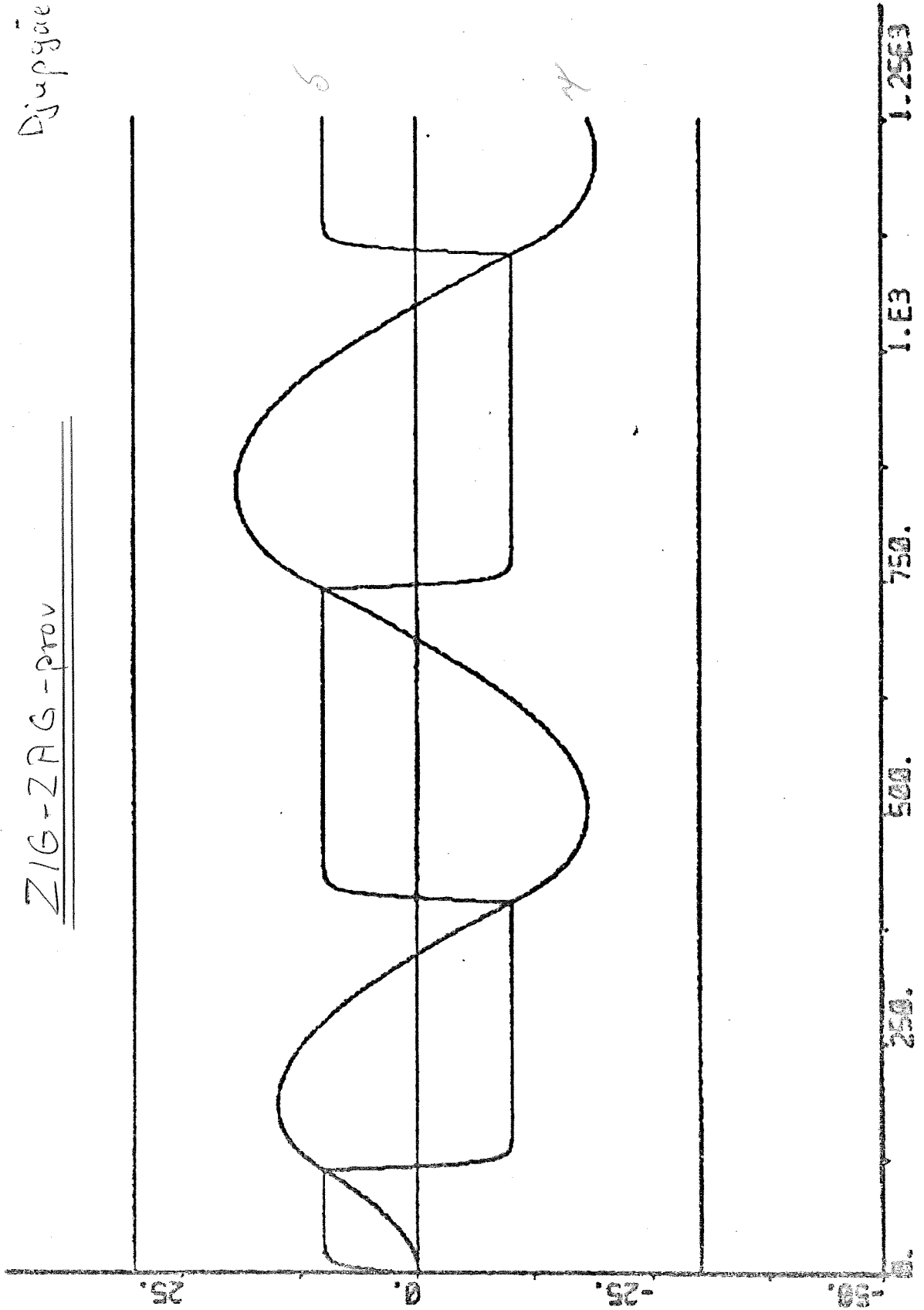
PLOT PSIN DELH ZERO LINE! LINE2

Ångpåkretaj 0.8

ZIG ZAG 10°

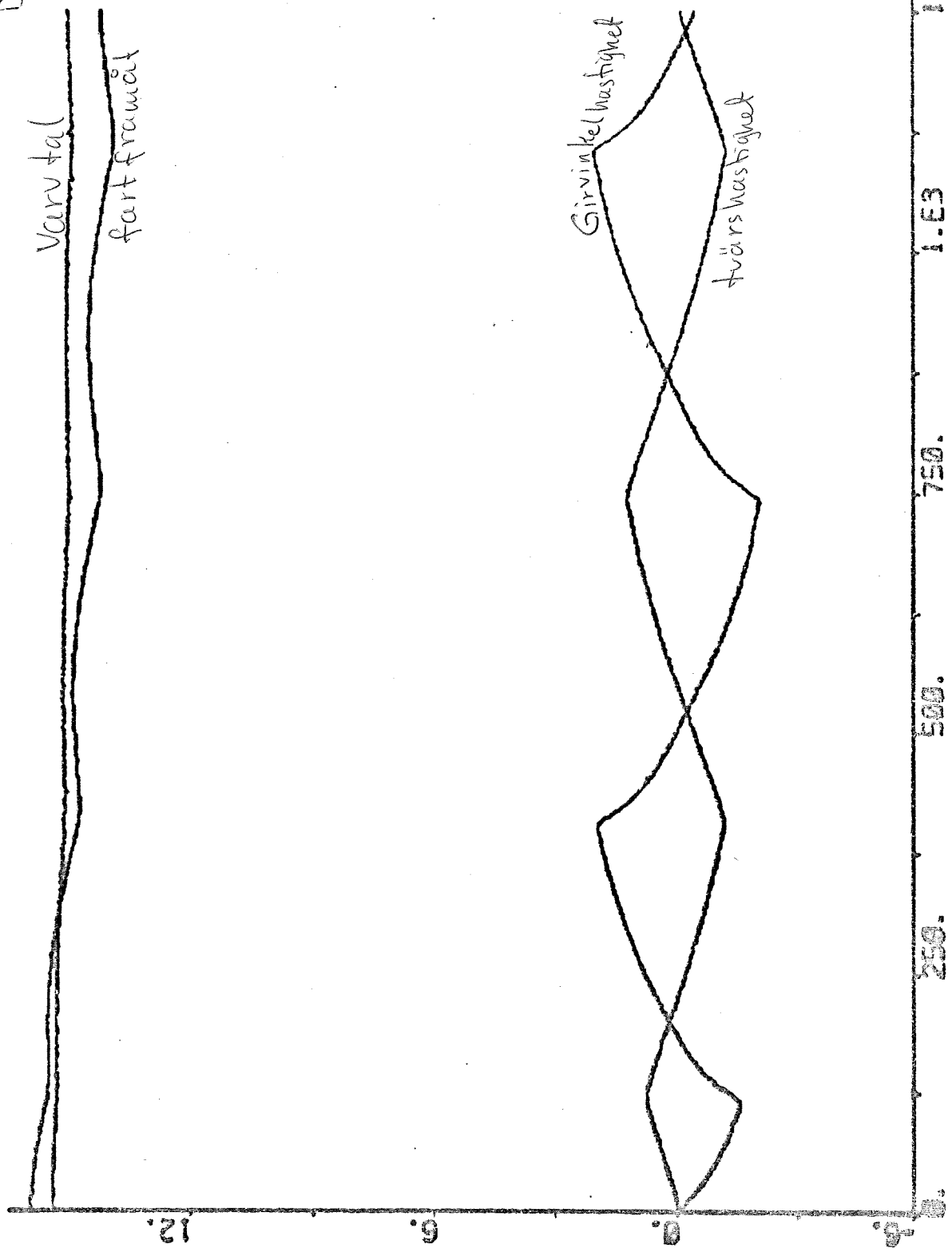
Djupgående 20m

ZIG-ZAG-prov



FLOT C2 C3 C4 C5(C9)

Ångpåkryg 0.8  
ZIGZAG 10°  
Djupgående 20m  
n/5 rpm  
u knop



u knop  
r\*10 grad/s

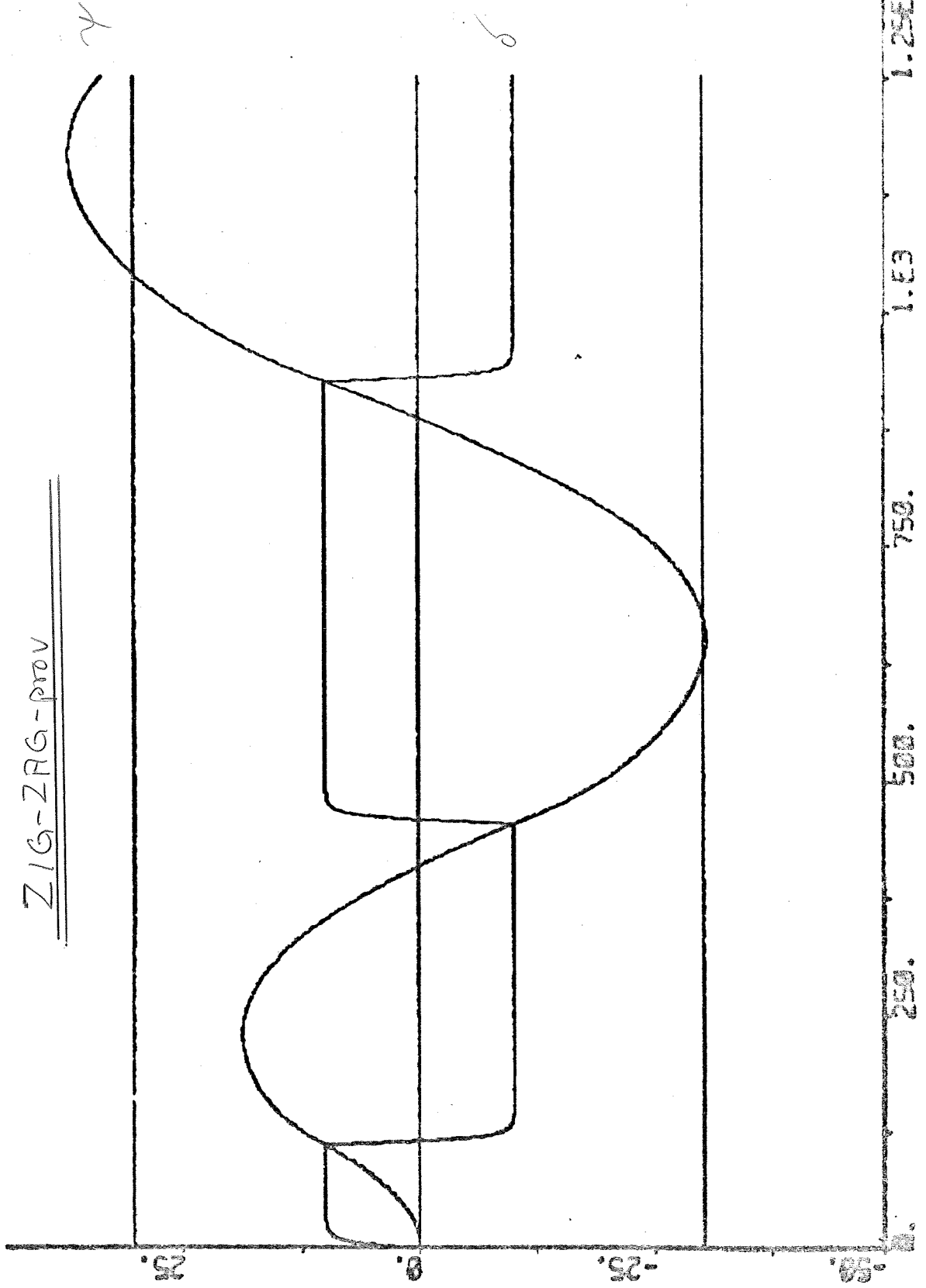
Ång pådrag 0.8

ZIGZAG 10°

Djup gående 25m

PLOT PSIN DELM ZERO LINE1 LINE2

ZIG-ZAG-PROV



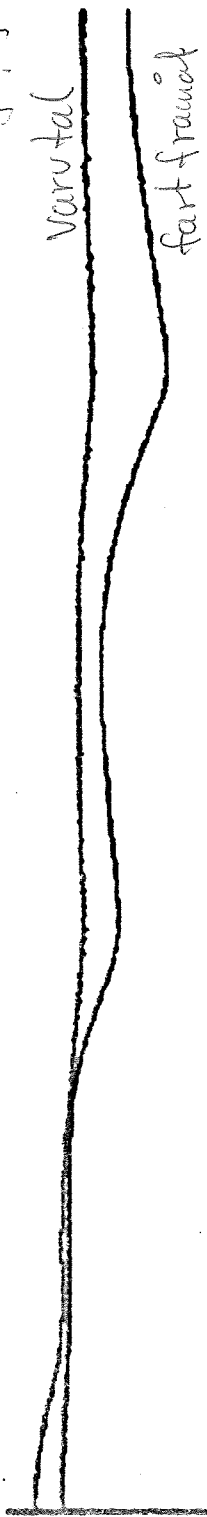
Ång på drag 0.8

ZIG ZAG 10°

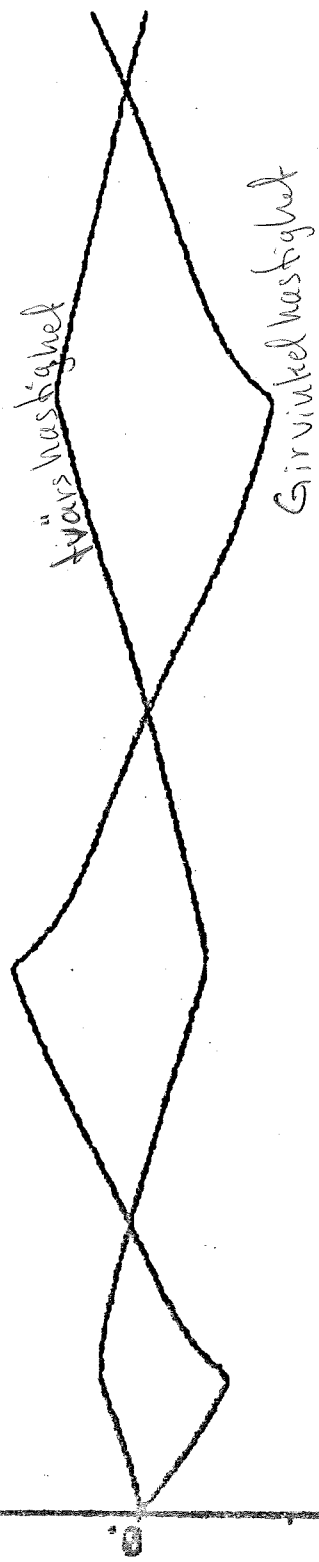
Djupgående 25 m

PLOT C2 C3 C4 C5 (C9)

Varvtal  
 n/s rpm  
 u knop  
 fart framåt



1x10  
 6  
 kval/s  
 knop



12.  
 9.  
 6.  
 250.  
 500.  
 750.  
 1. E3  
 1.25 E3

Djupgående 20 m

Rudder angle  
Course

170°

180°

Port  
10° 190°

Midsh. 200°

10° 210°

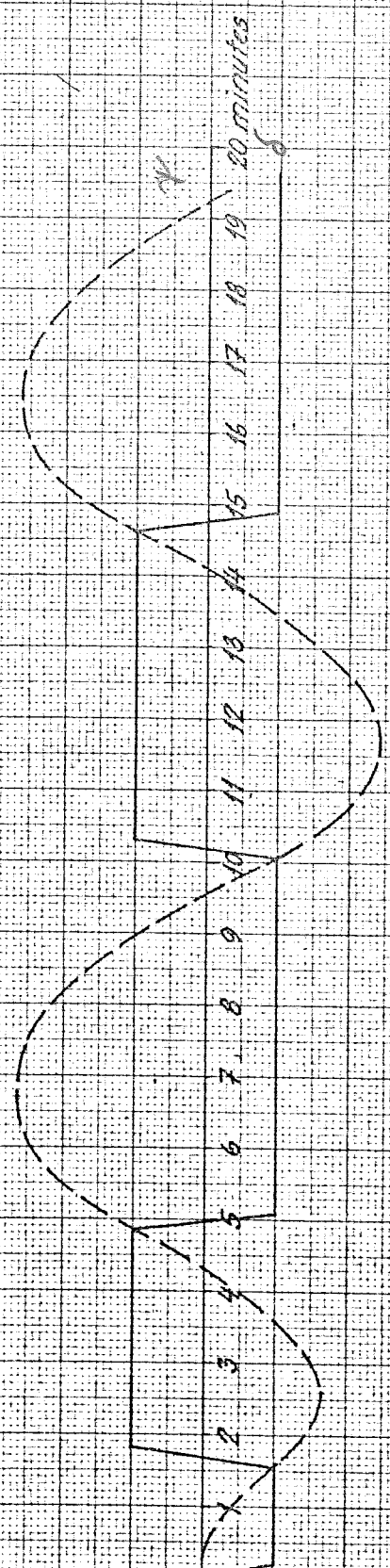
SB  
220°

230°

Knots  
15

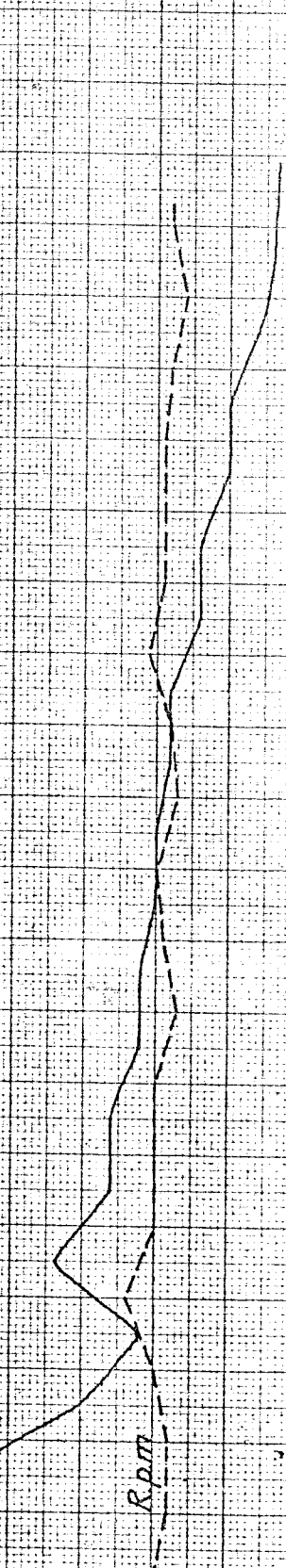
R.p.m.  
90 14

80 13



Speed

R.p.m.



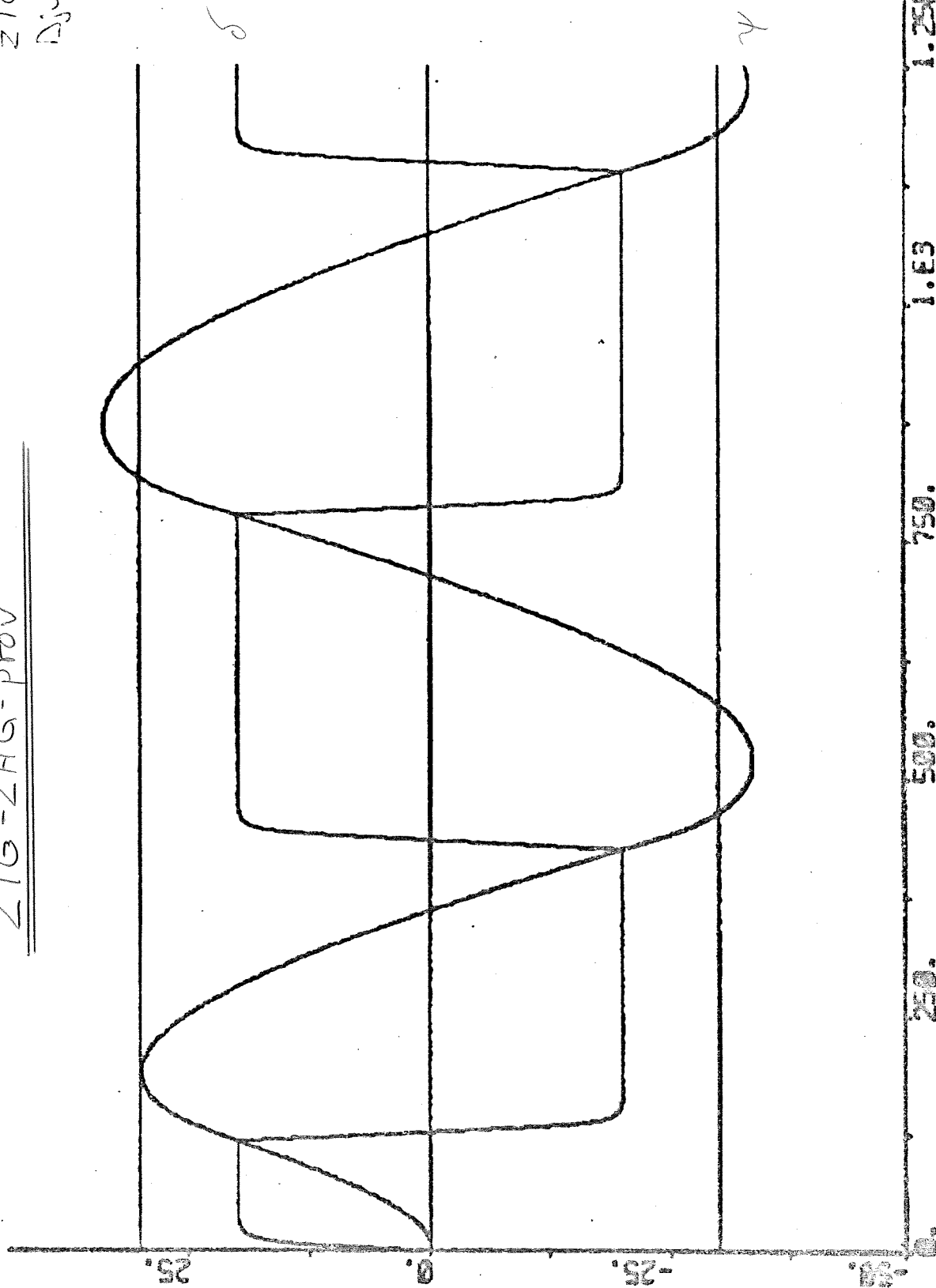
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 minutes



PLOT PSIN DELH ZERO LINE1 LINE2

Ångfärdway 08  
ZIGZAG 200  
Djupgående 20m

ZIG-ZAG-PROV

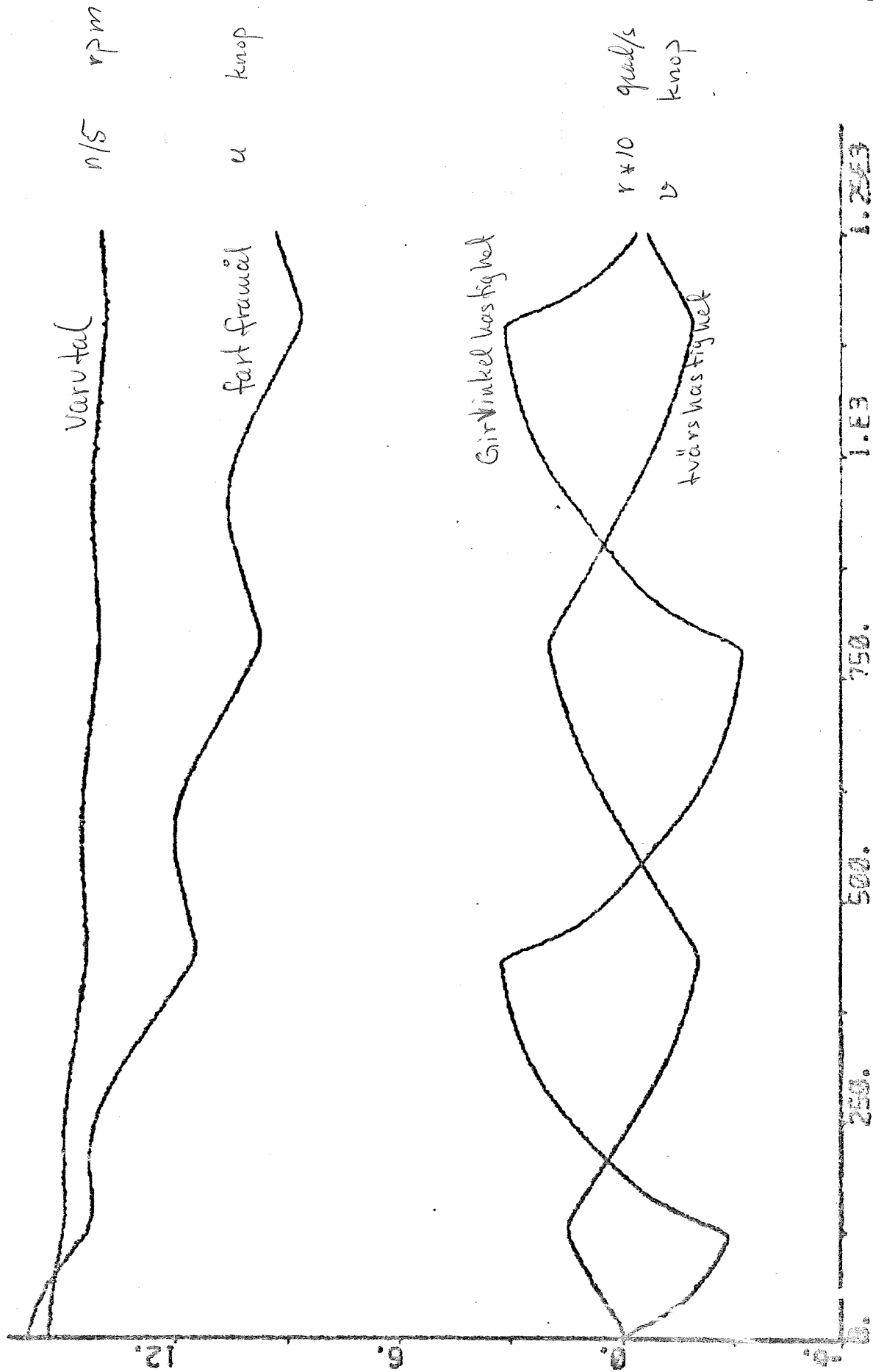


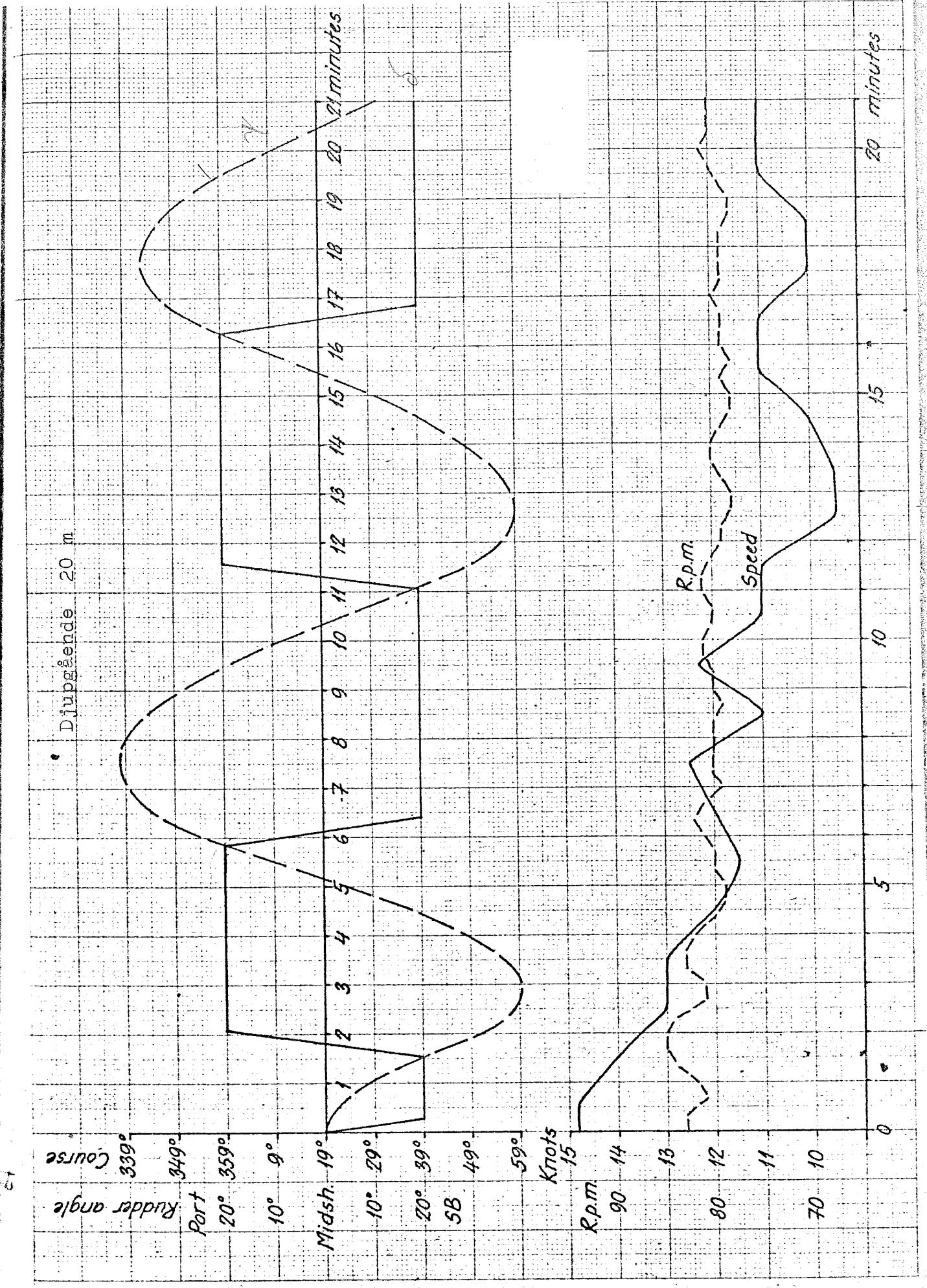
Ång pådrag 0.8

ZIGZAG 20°

Bjupjätte 20m

PLOT C2 C3 C4 C5(C9)



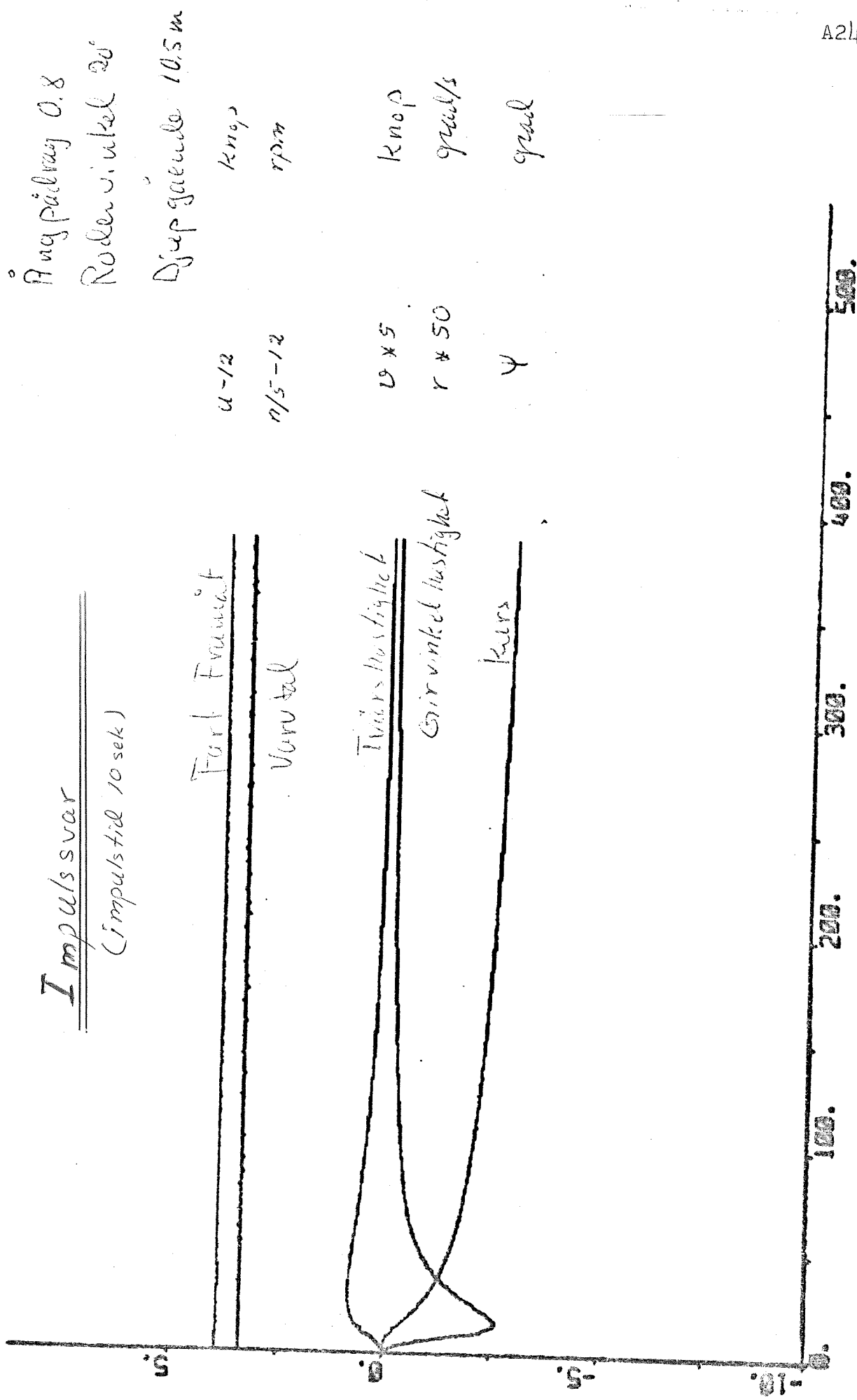


51

**PLOT CZICFILEJ CZICFILEJ CZICFILEJ CZICFILEJ**

Impulsvar

(Impulstid 10 sek)



Ång på räckvidd 0.8  
 Roder vinkel 20°  
 Djupgående 10.5 m  
 u-12 Knop  
 n/5-12 rpm  
 U x 5 Knop  
 r x 50 grad/s  
 ψ grad

**PLOT C2ICFILEJ C3ICFILEJ C4ICFILEJ C5ICFILEJ C6ICFILEJ**

Ring påkrav 0.8  
 Roller vinkel 20°  
 Djupgående 20m

Impulsvar  
 (Impulstid 10 sek)

Fart Forward

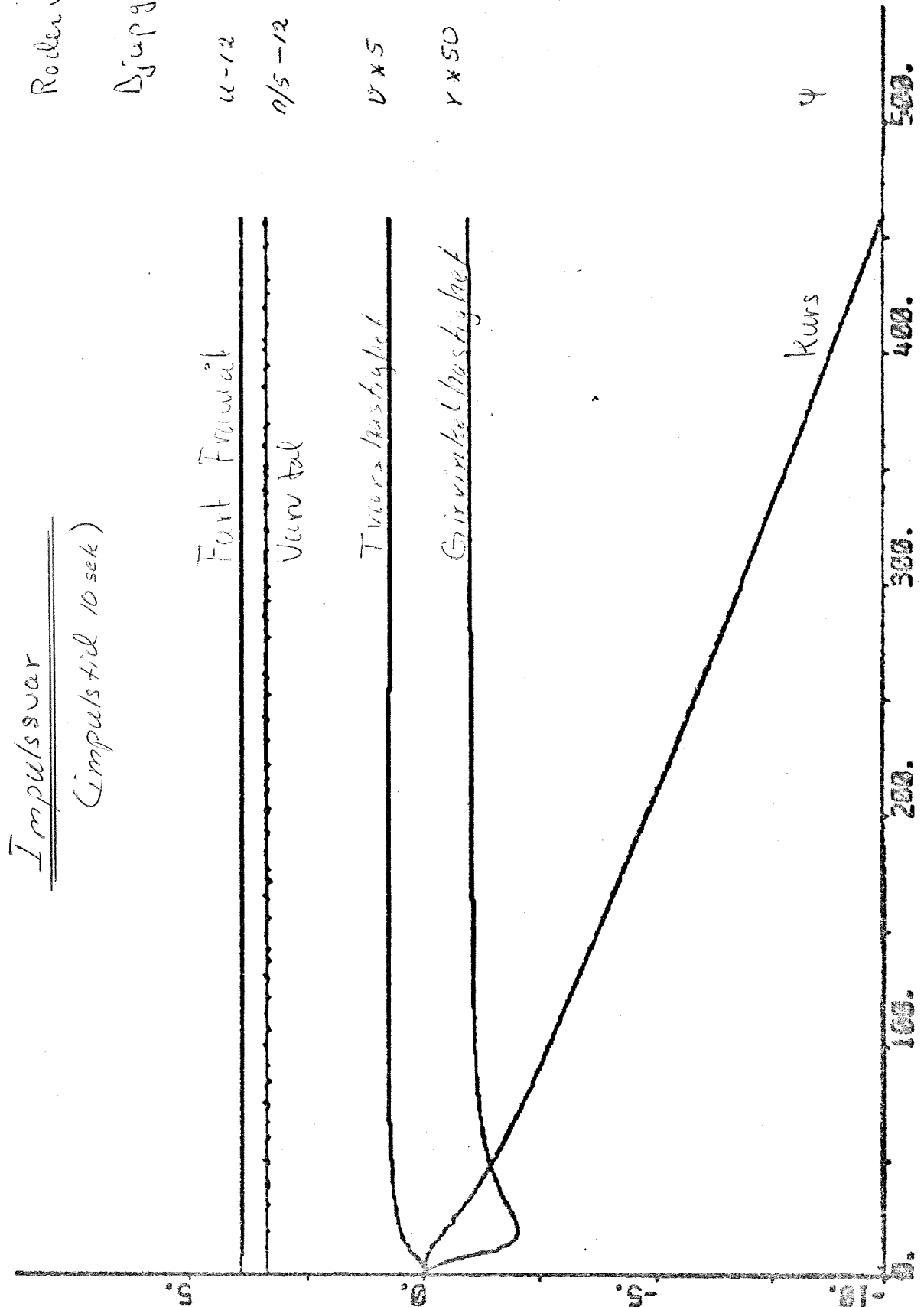
Værvtal

Trans hastighed

Girvinkel hastighed

U-12 Knops  
 11/5-12 rpm

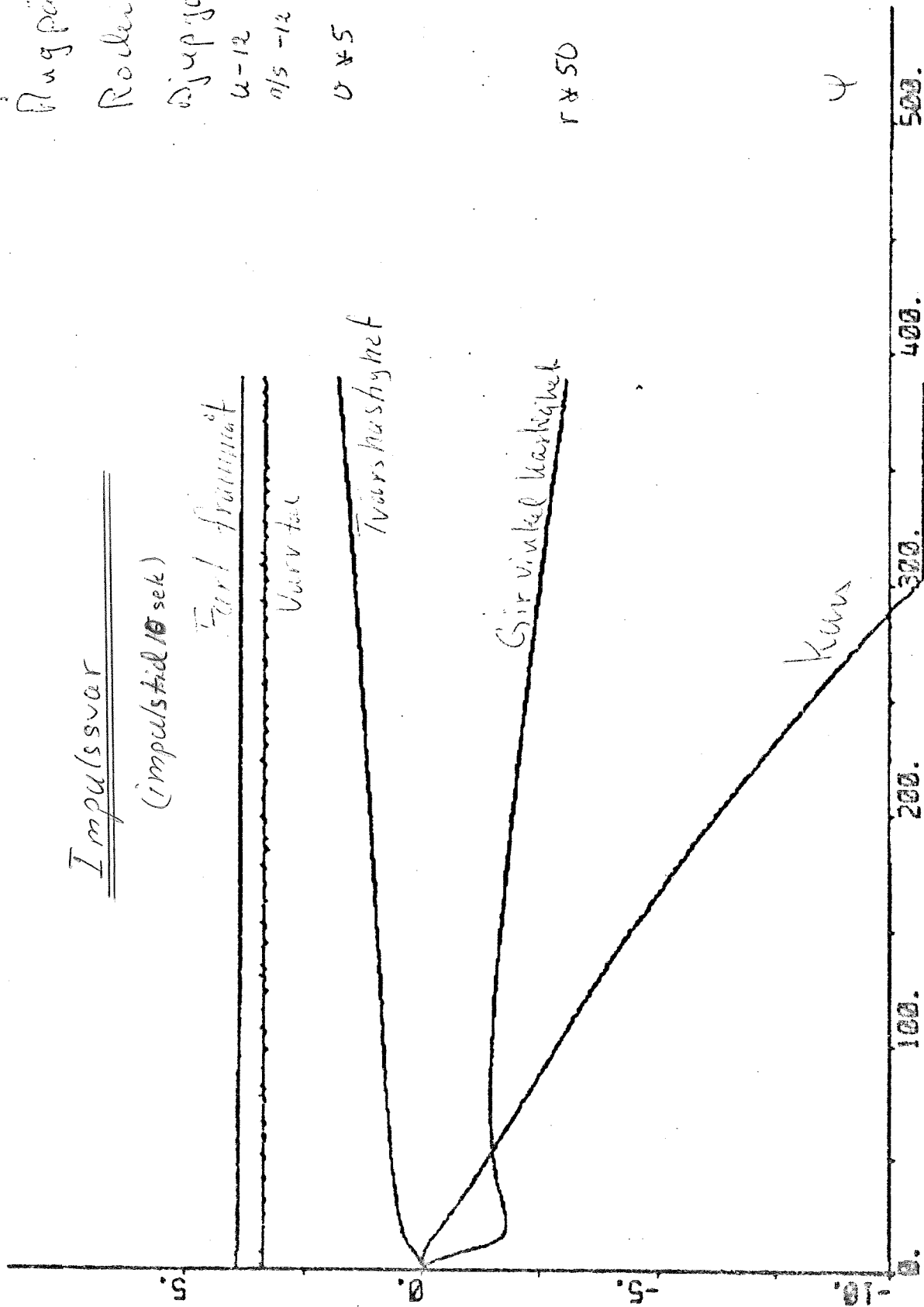
V\*5 Knops  
 Y\*50 opm/s.



4 grad

0. 100. 200. 300. 400. 500.

PLOT C21CFILE] C31CFILE] C41CFILE] C51CFILE] C61CFILE] C61CFILE] C61CFILE]  
 PLOT C21CFILE] C31CFILE] C41CFILE] C51CFILE] C61CFILE] C61CFILE] C61CFILE]



Rugg på krag 0.8  
 Roden vinkel 93°  
 Djup järende 25m  
 u-12 Knop  
 n/s -12 rpm  
 U #5 Knop

r #50 grad/s

4 grad

1. 2. 3. (CB)

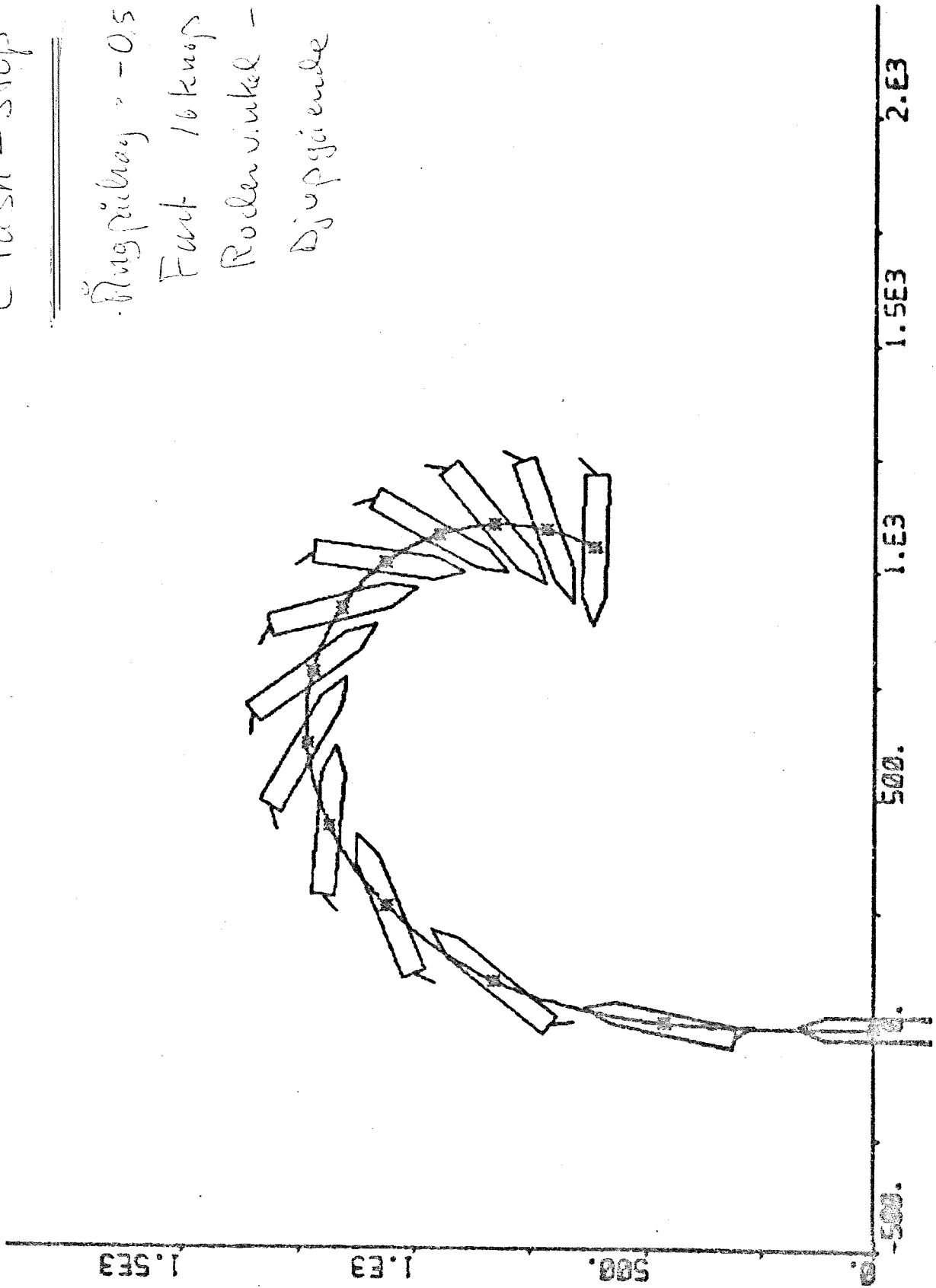
# Crash - Stop

• Ringradius = -0.5 (Full back)

Fart 16 knop

Roder vinkel -45°

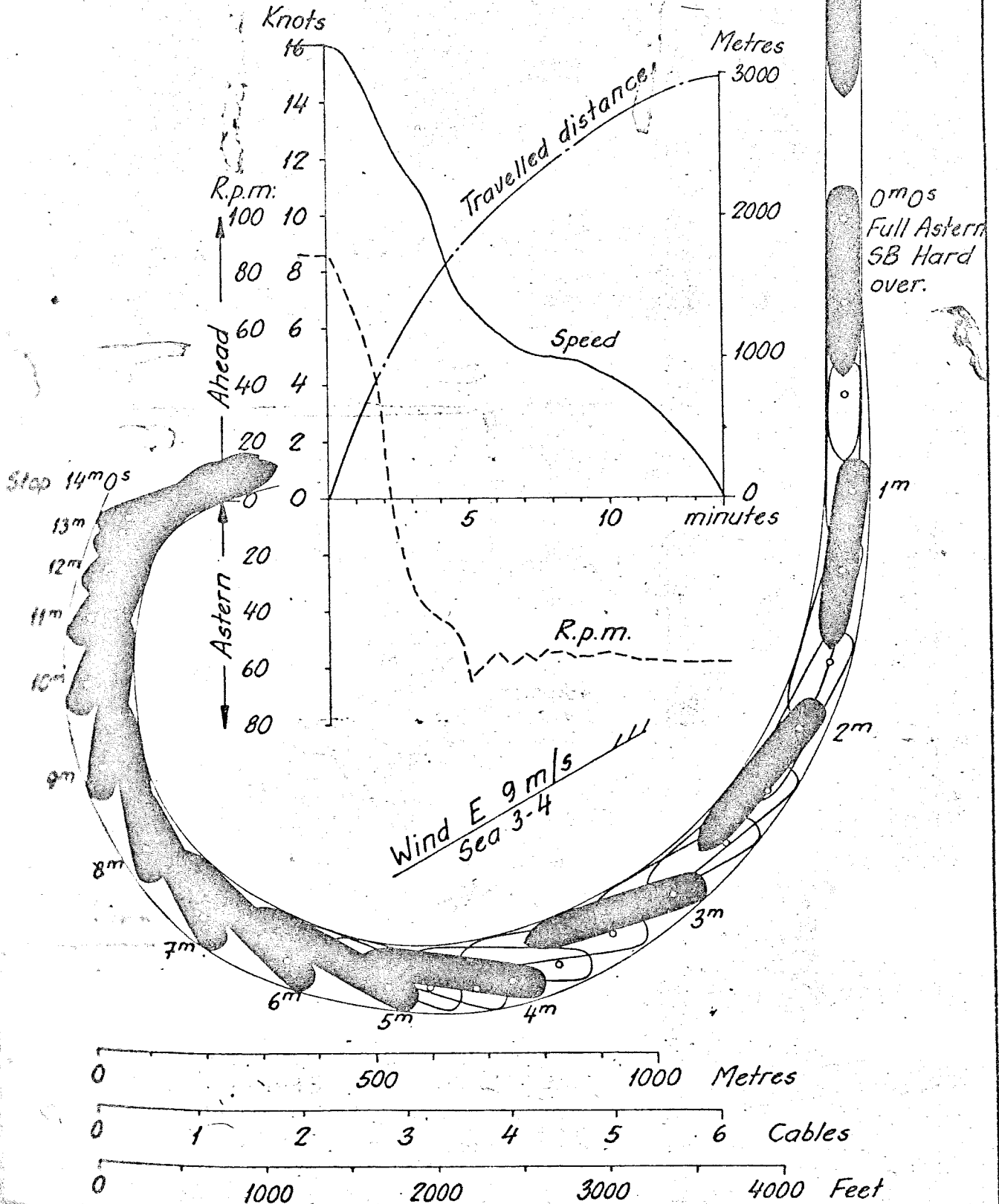
Djupgående 20m



### Crash-stop

Water depth : 250 mtrs.

Djupgående : 20 m



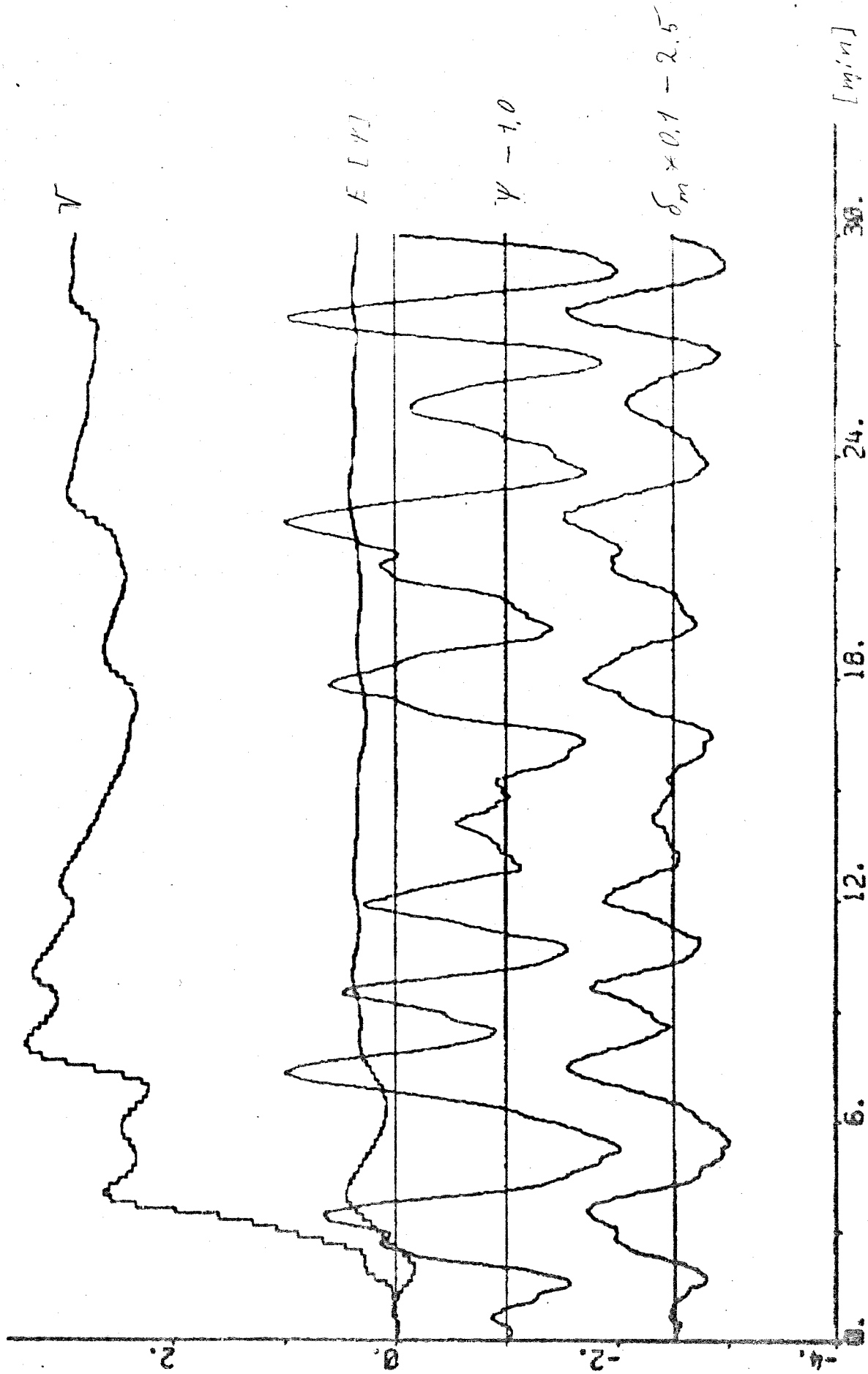


APPENDIX B

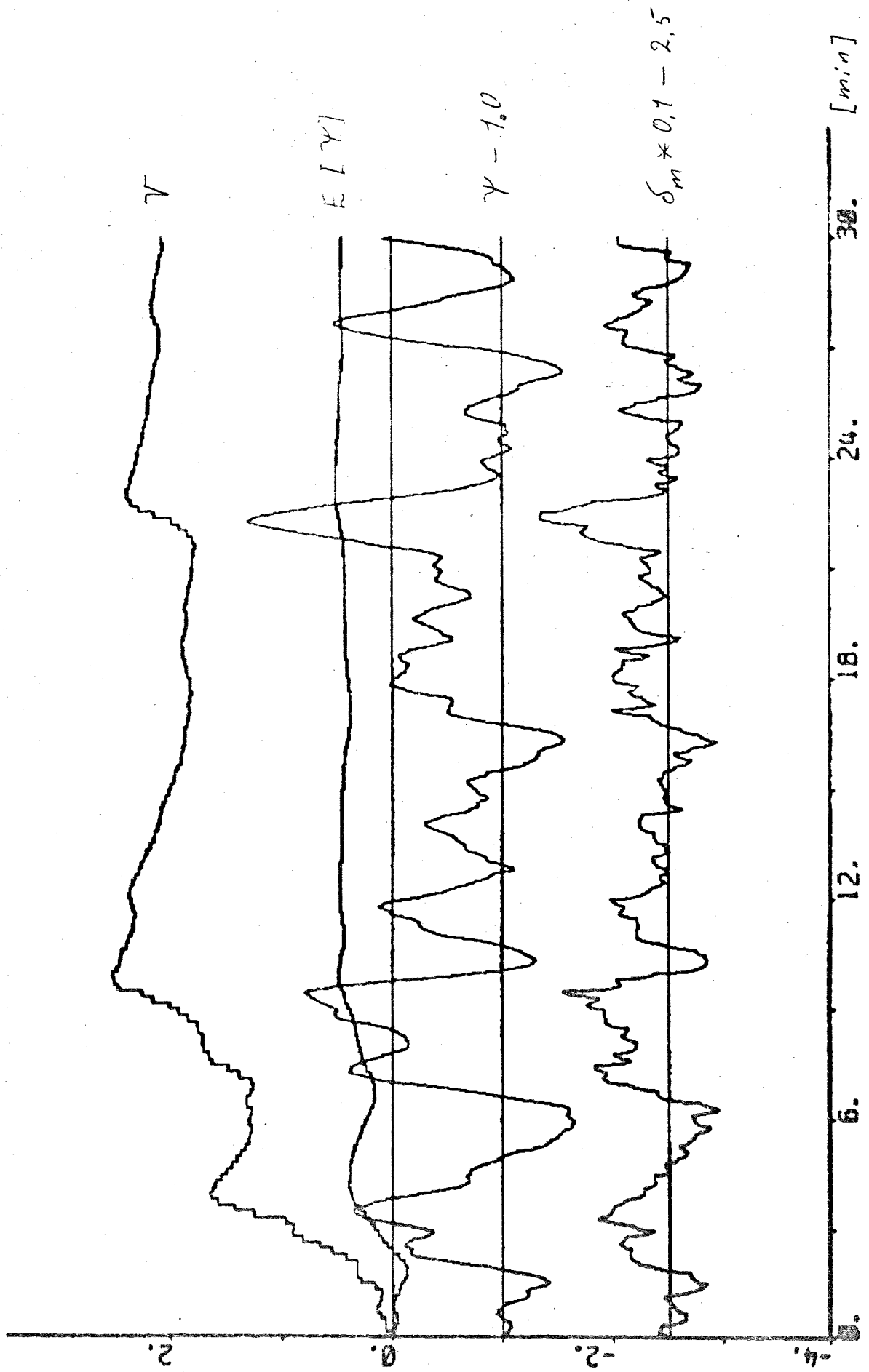
## Simuleringar med PID-regulator

Regulator beteckning	Djupgående	Vind	Sida
la	20 m	Hård	B2
lb	"	"	B3
lc	"	"	B4
ld	"	"	B5
le	"	"	B6
lf	"	"	B7
lg	"	"	B8
lh	"	"	B9
li	"	"	B10
lh	10.5m	Svag	B11
"	"	Hård	B12
"	20 m	Svag	B13
"	"	Hård	B14
"	25 m	Svag	B15
"	"	Hård	B16

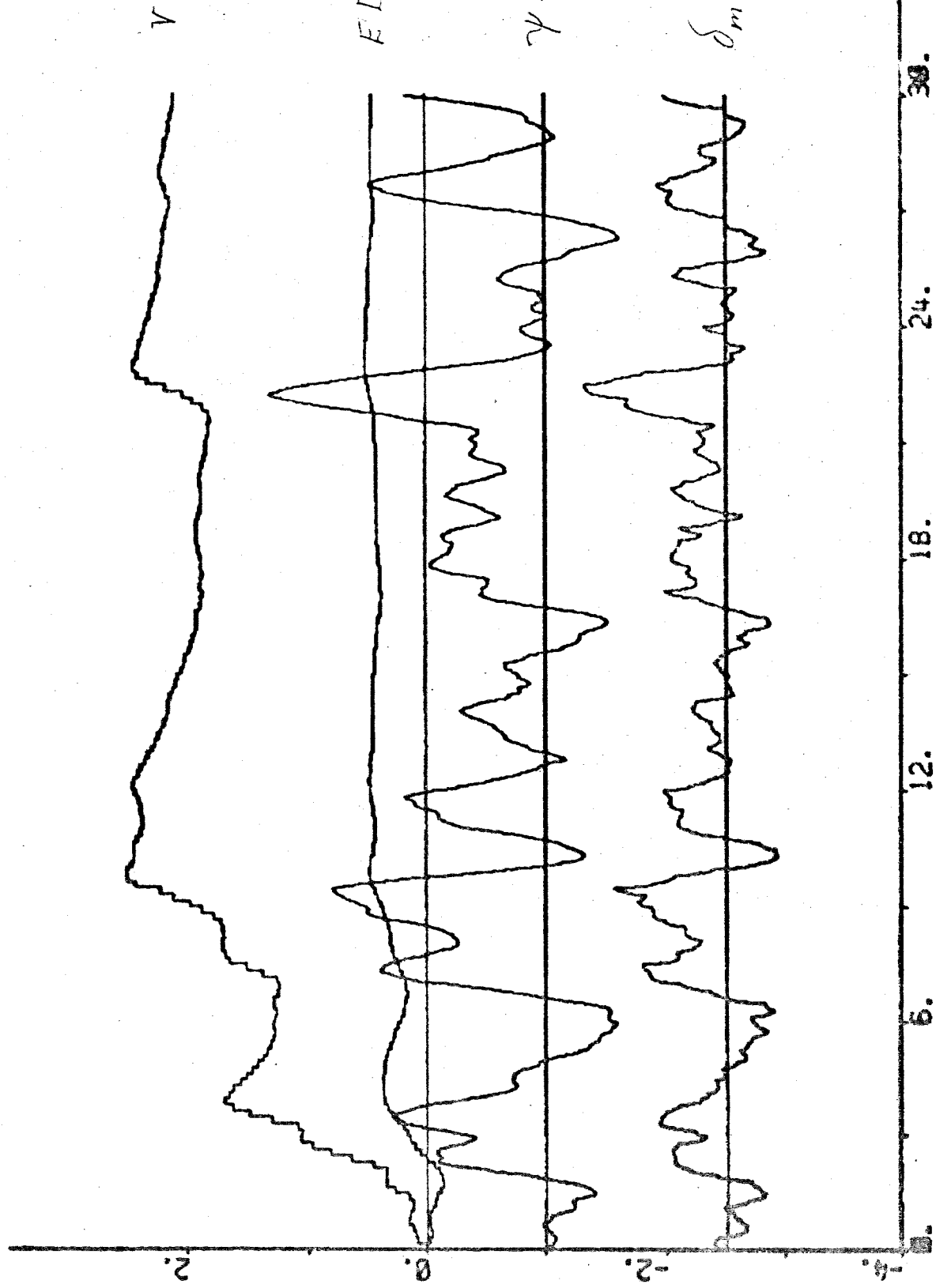
PL07 C27 C12 PL12 C35 PL5 C38 PL6 (C6)  
K1=5. K2=0. K3=0. FIL=1. TYP=1.



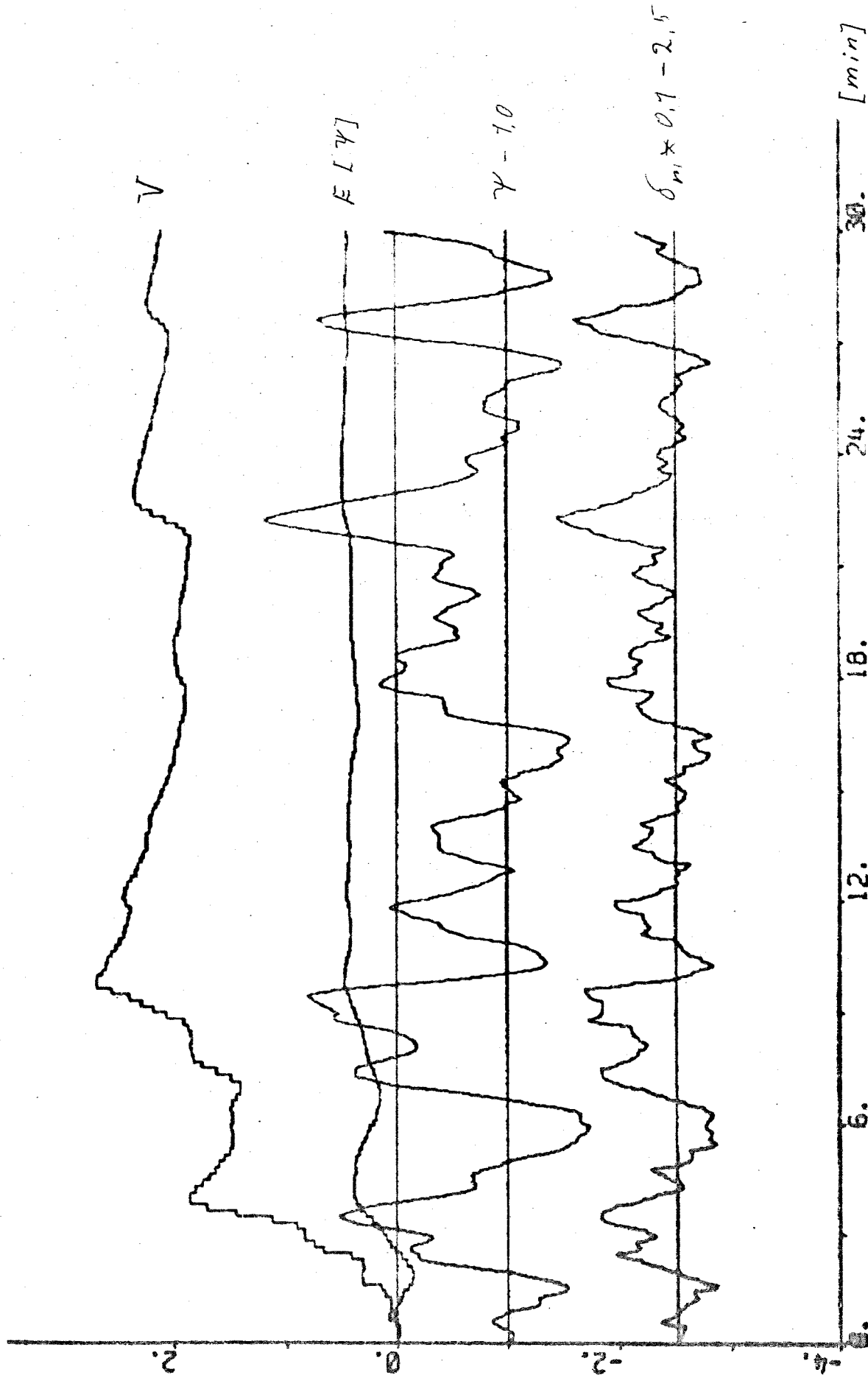
PL0Y C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=60. K3=0. FIL=1. TYP=1.



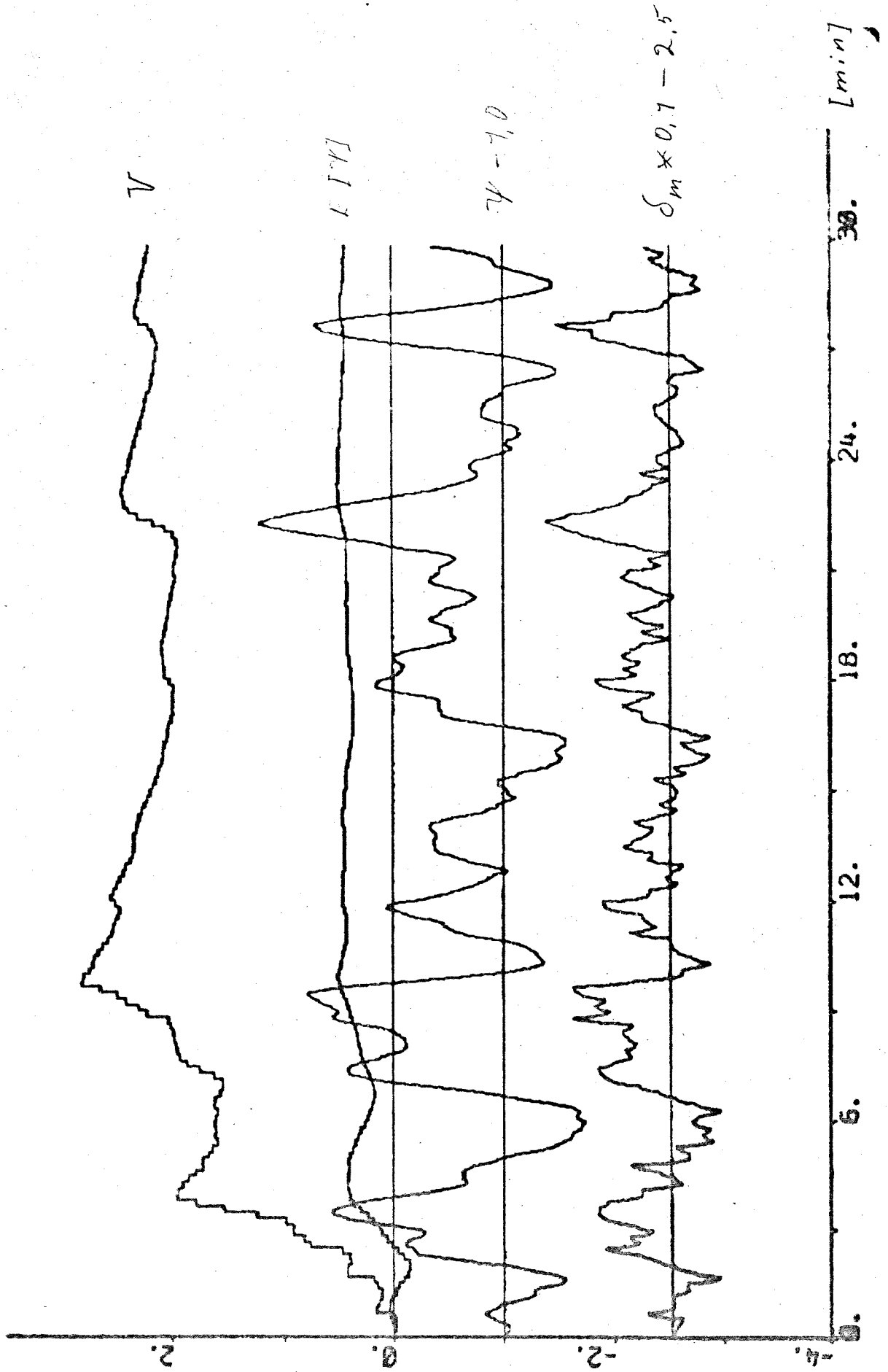
PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=70. K3=0. FIL=2. TYP=1.



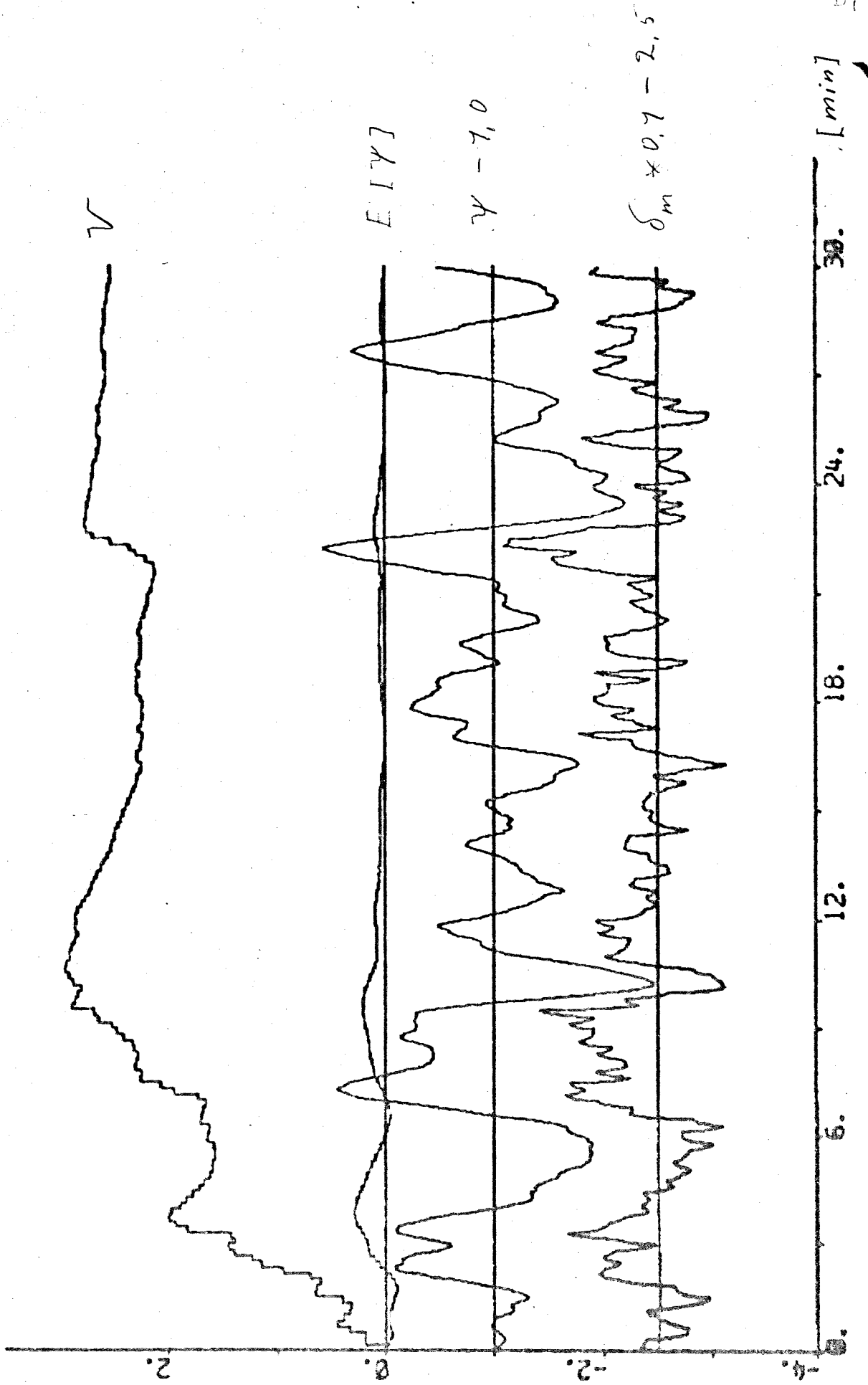
PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=60. K3=0. FIL=3. TYP=1.



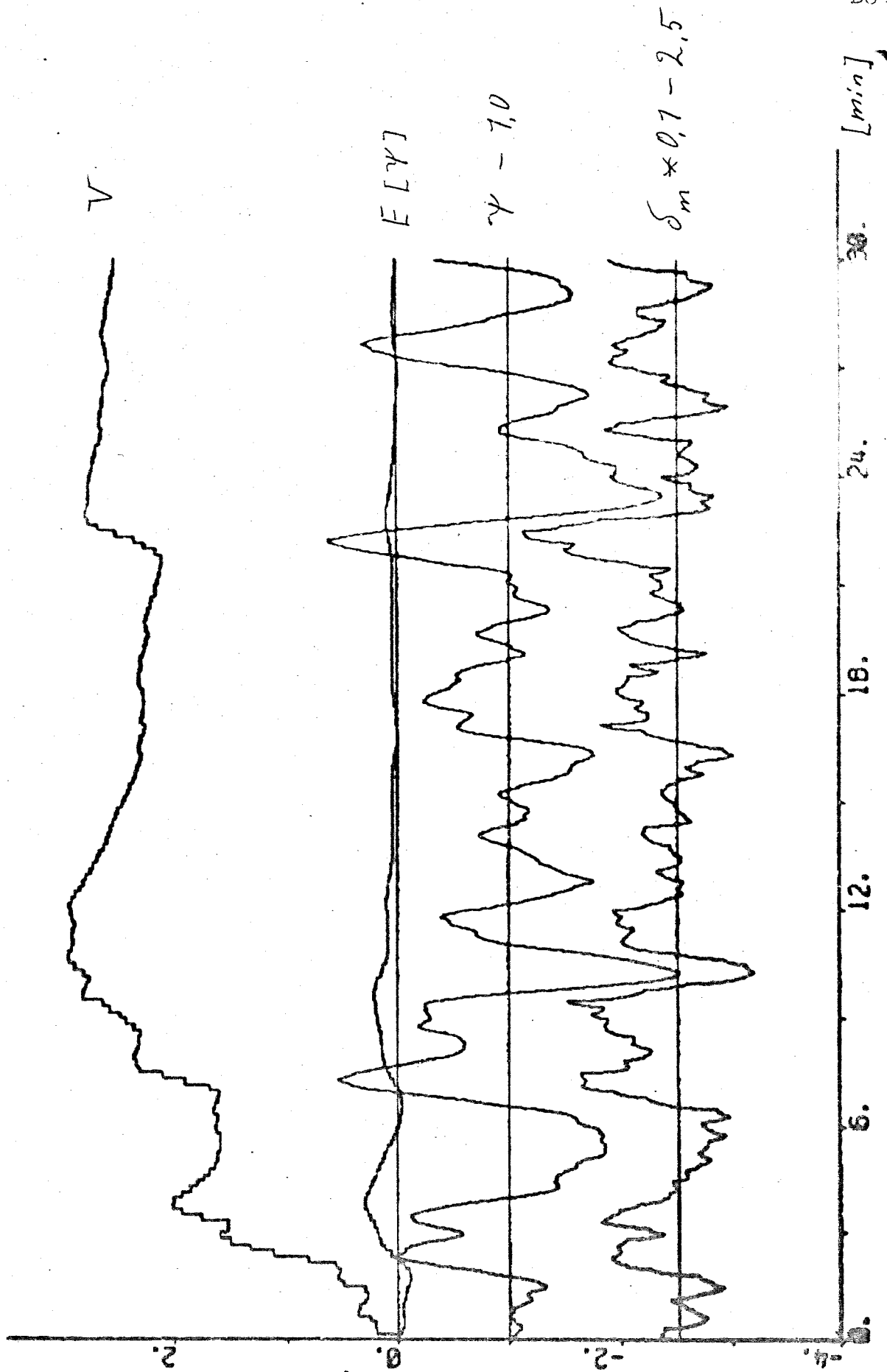
PLOT C27 C12 PL12 C35 PLS C36 PL6 (C6)  
K1:4. K2:60. K3:0. FIL:3. TYP:1.  
RM=0.01



PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=100. K3=0.04 FIL=1. TYP=1.

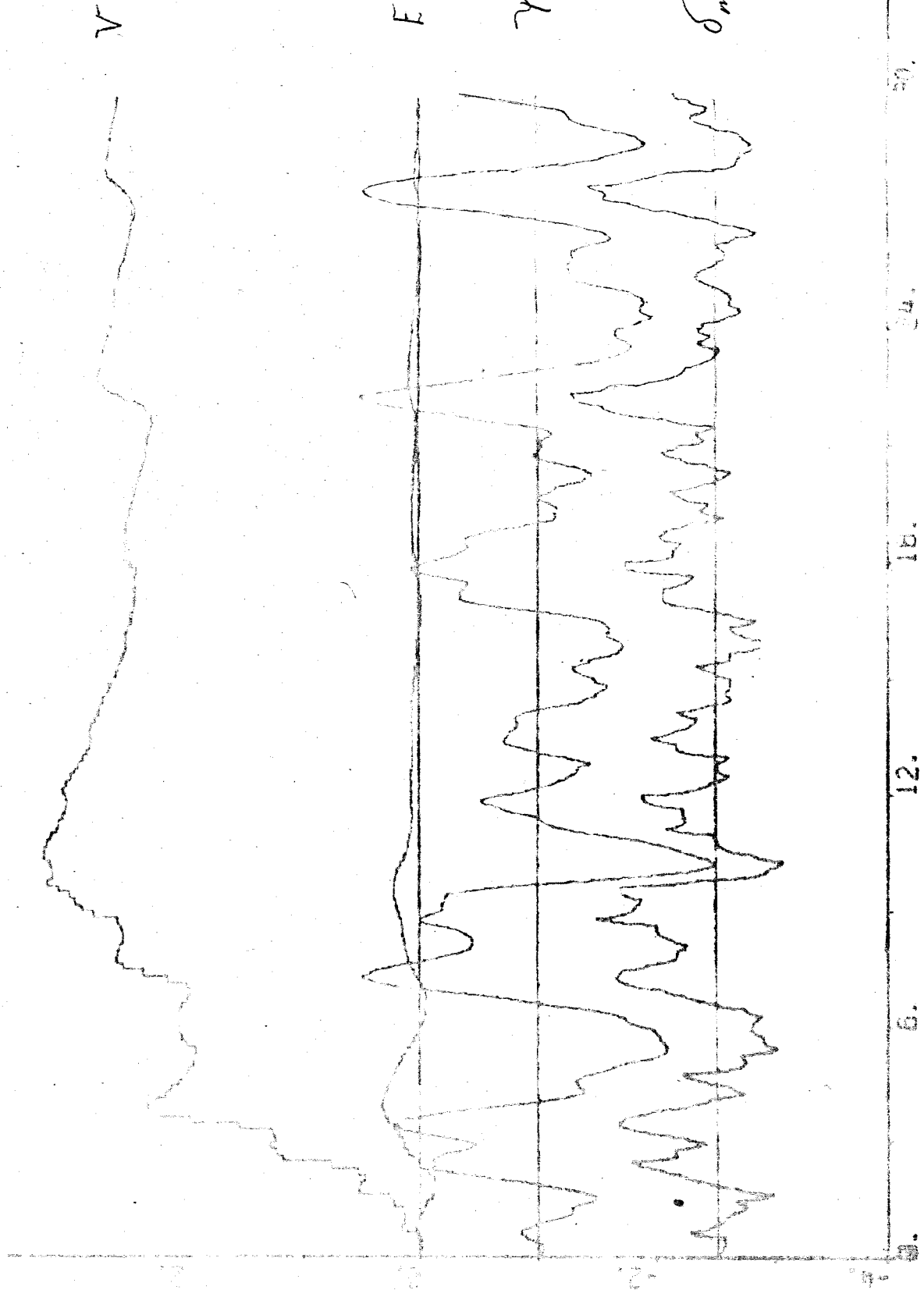


PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=100. K3=0.04 FIL=2. TYP=1.

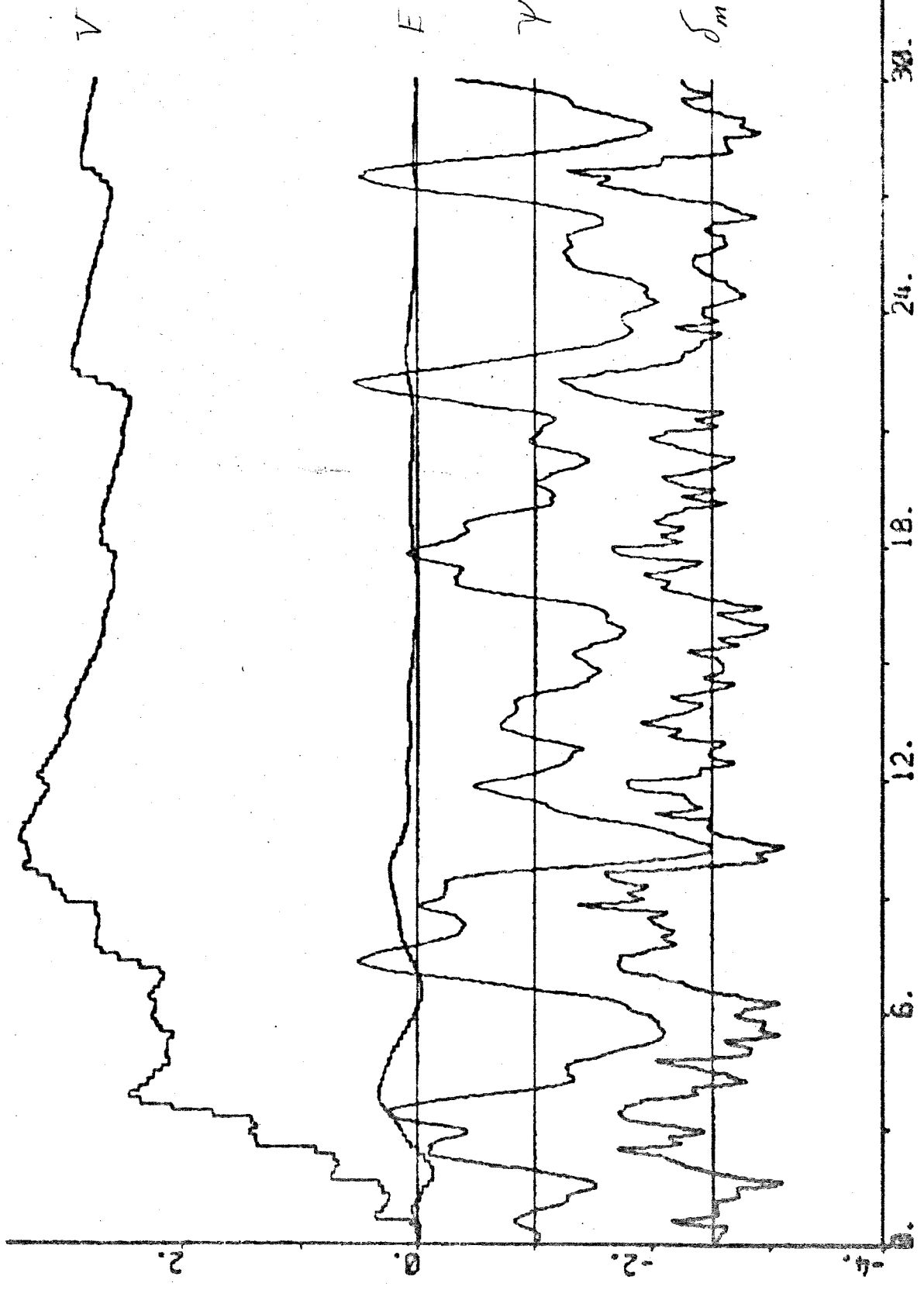




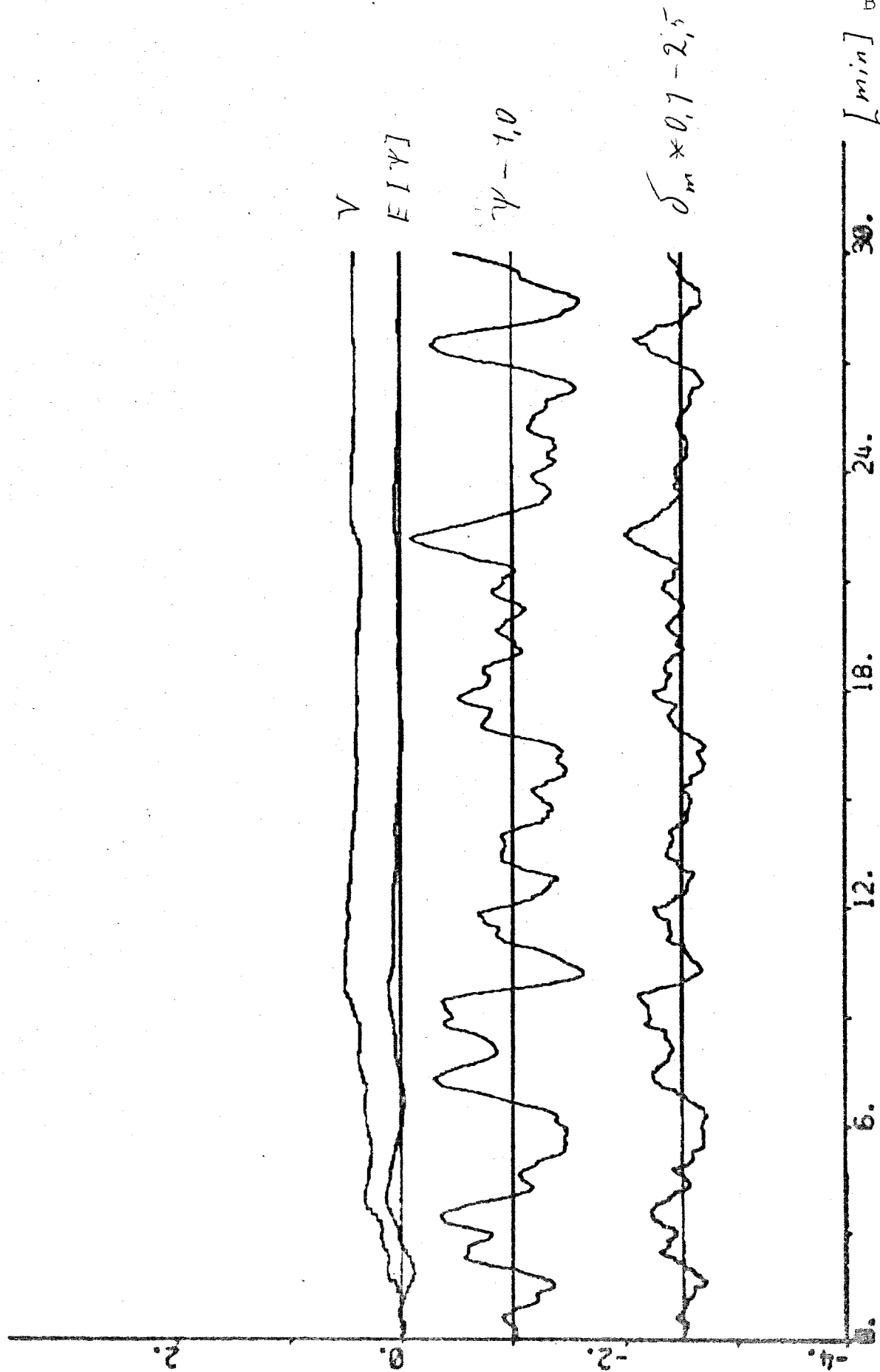
F 127 D12 PL12 C35 FL8 C16 P  
K1-R.05 - FL2



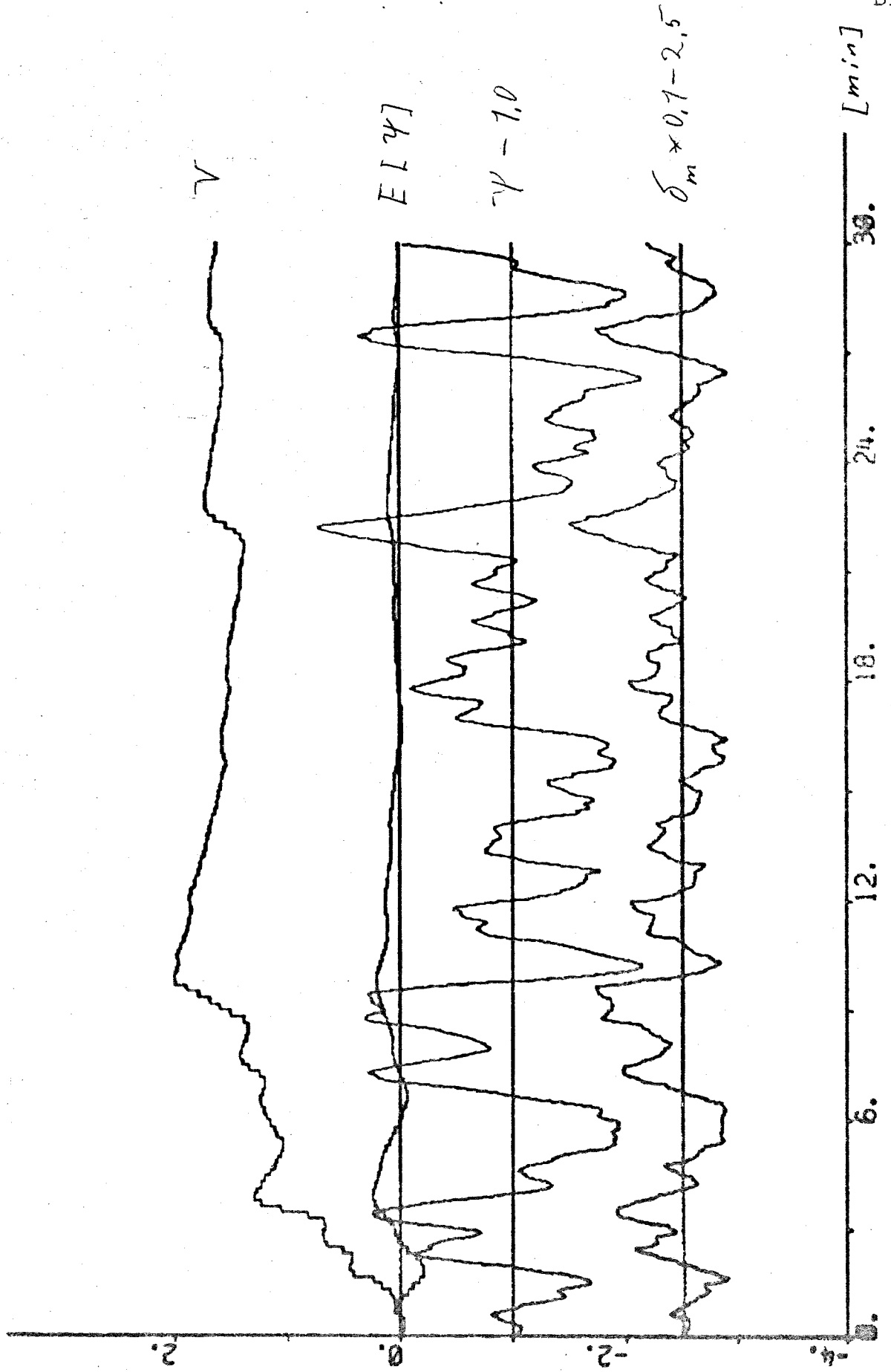
PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=100. K3=0.04 FIL=3. TYP=1.  
R44=0.01



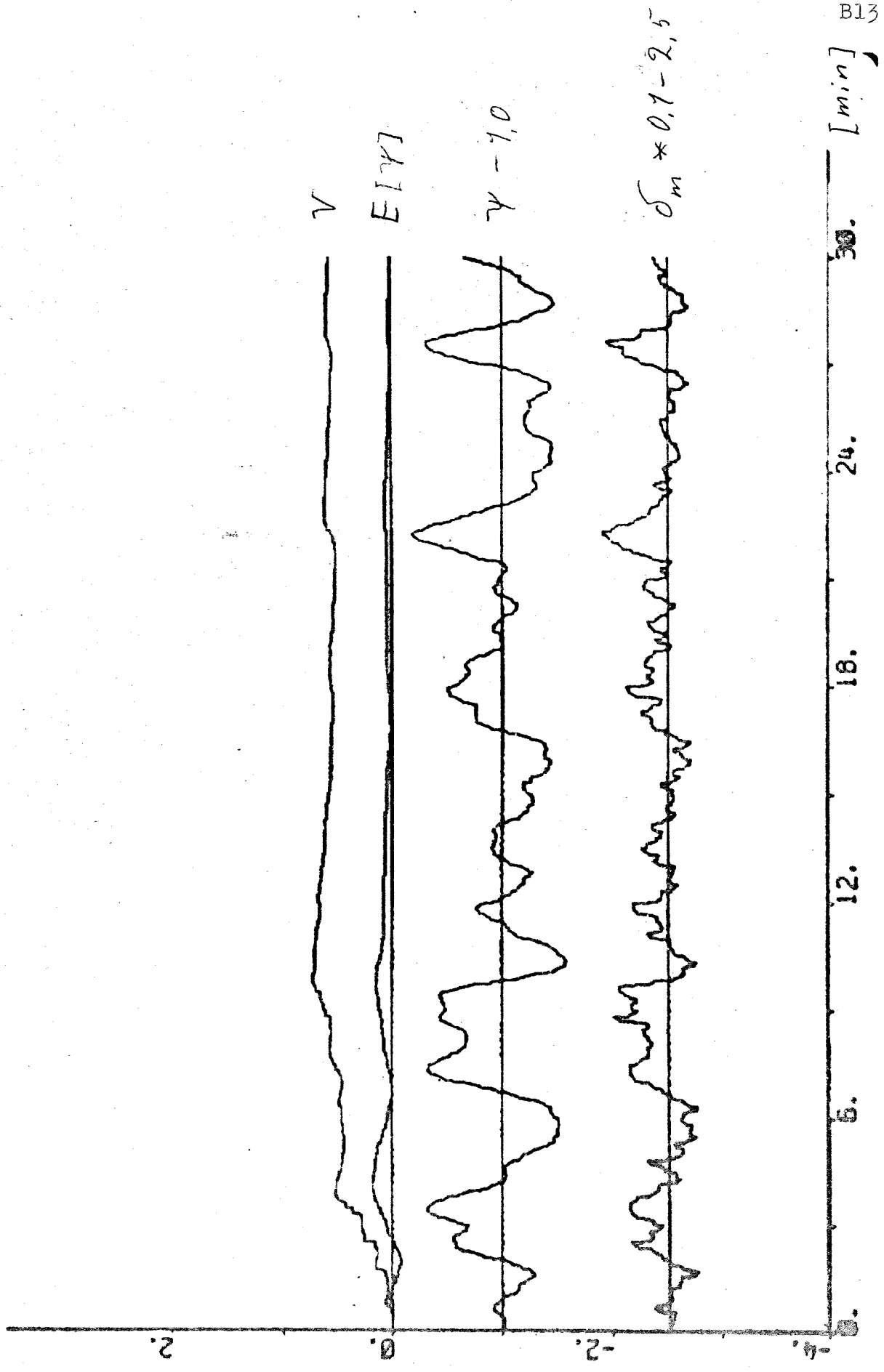
PLOT U27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)  
K1=4. K2=20. K3=0.02 FIL=3. TYP=1.



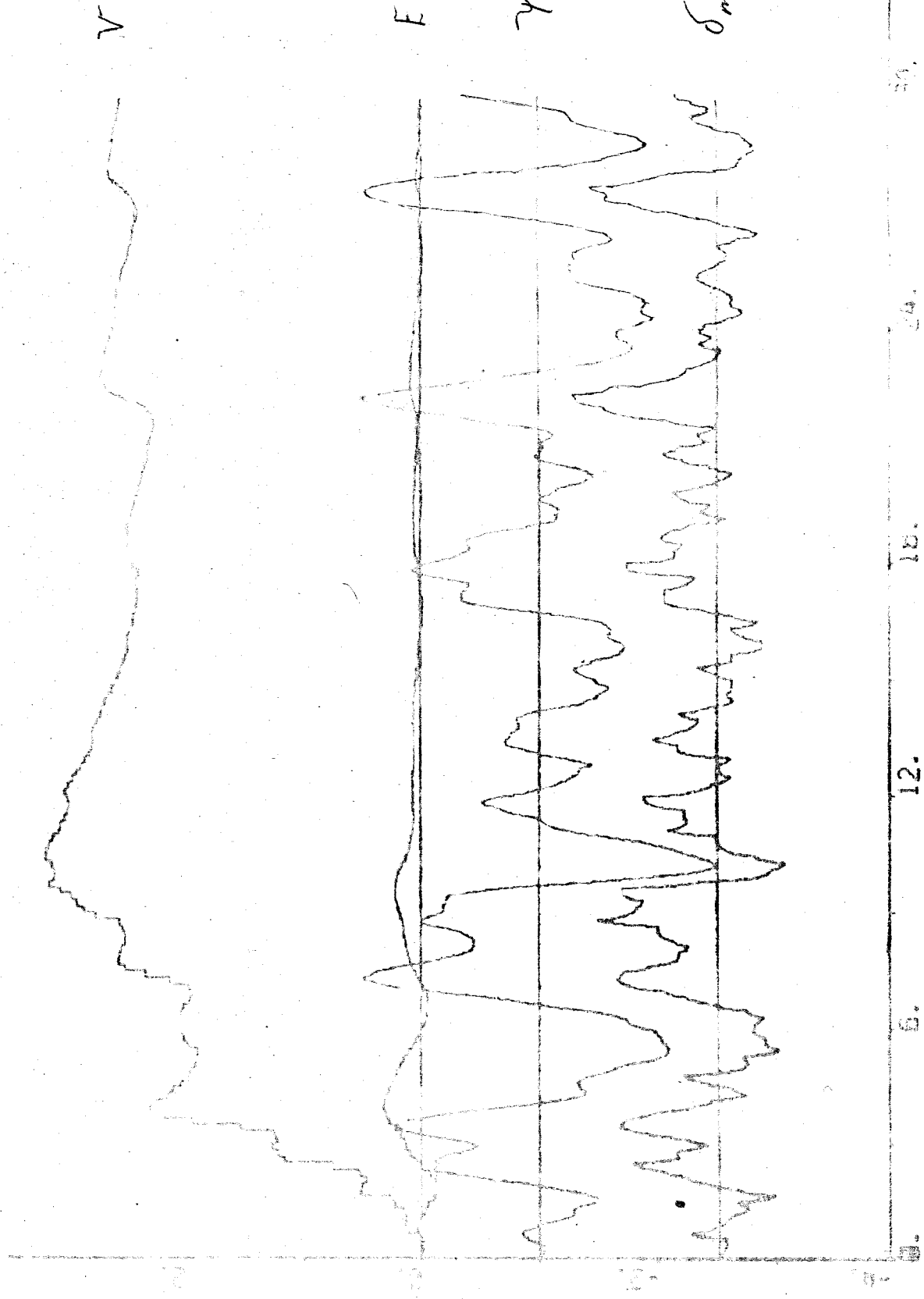
NO. 27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C8)  
K1:4. K2:30. K3:0.02 FIL:3. TYP:1.



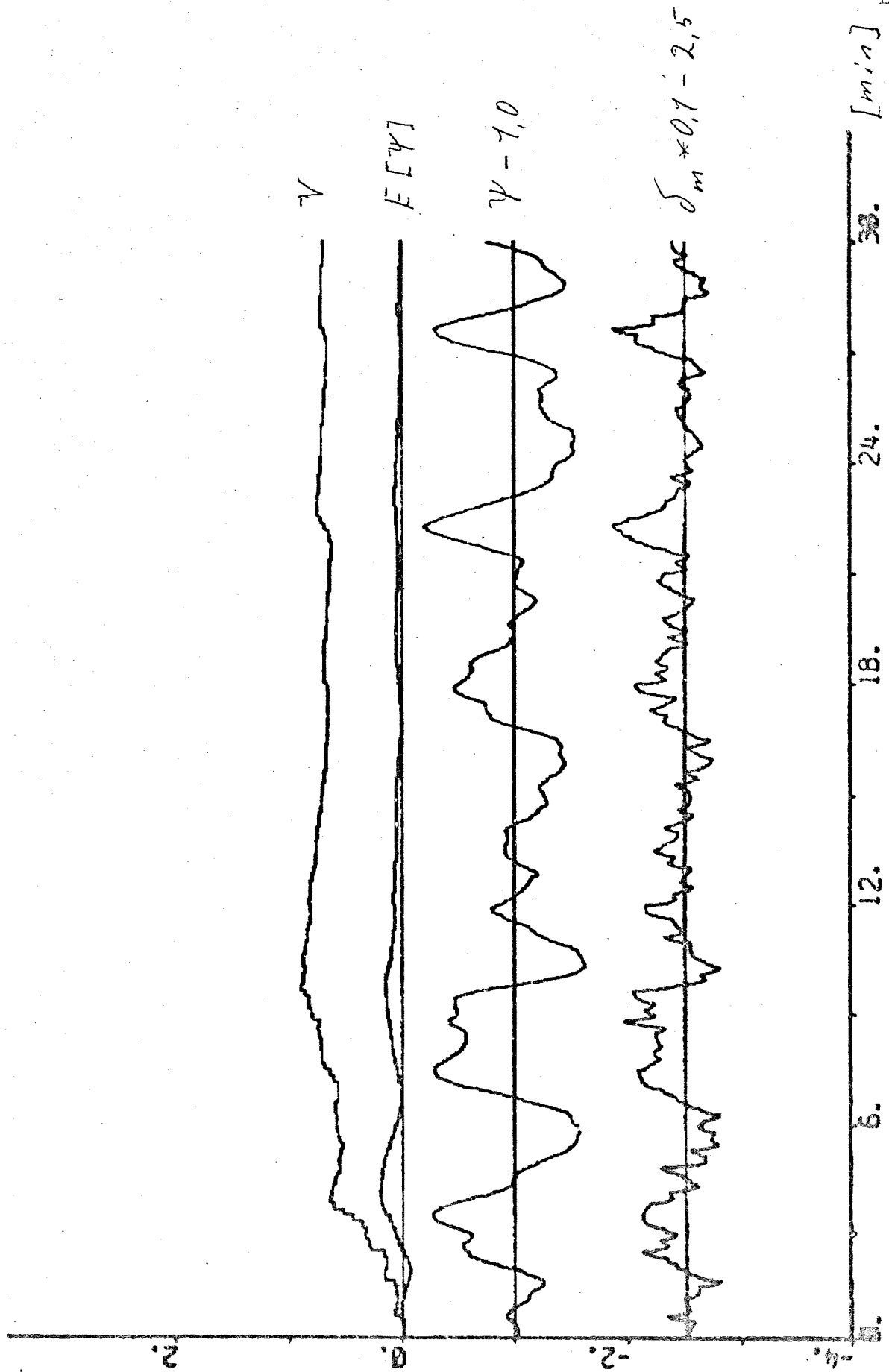
PL1=4 K2=80 K3=0.02 FIL=3 TYP=1  
PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C36 PL6 (C6)



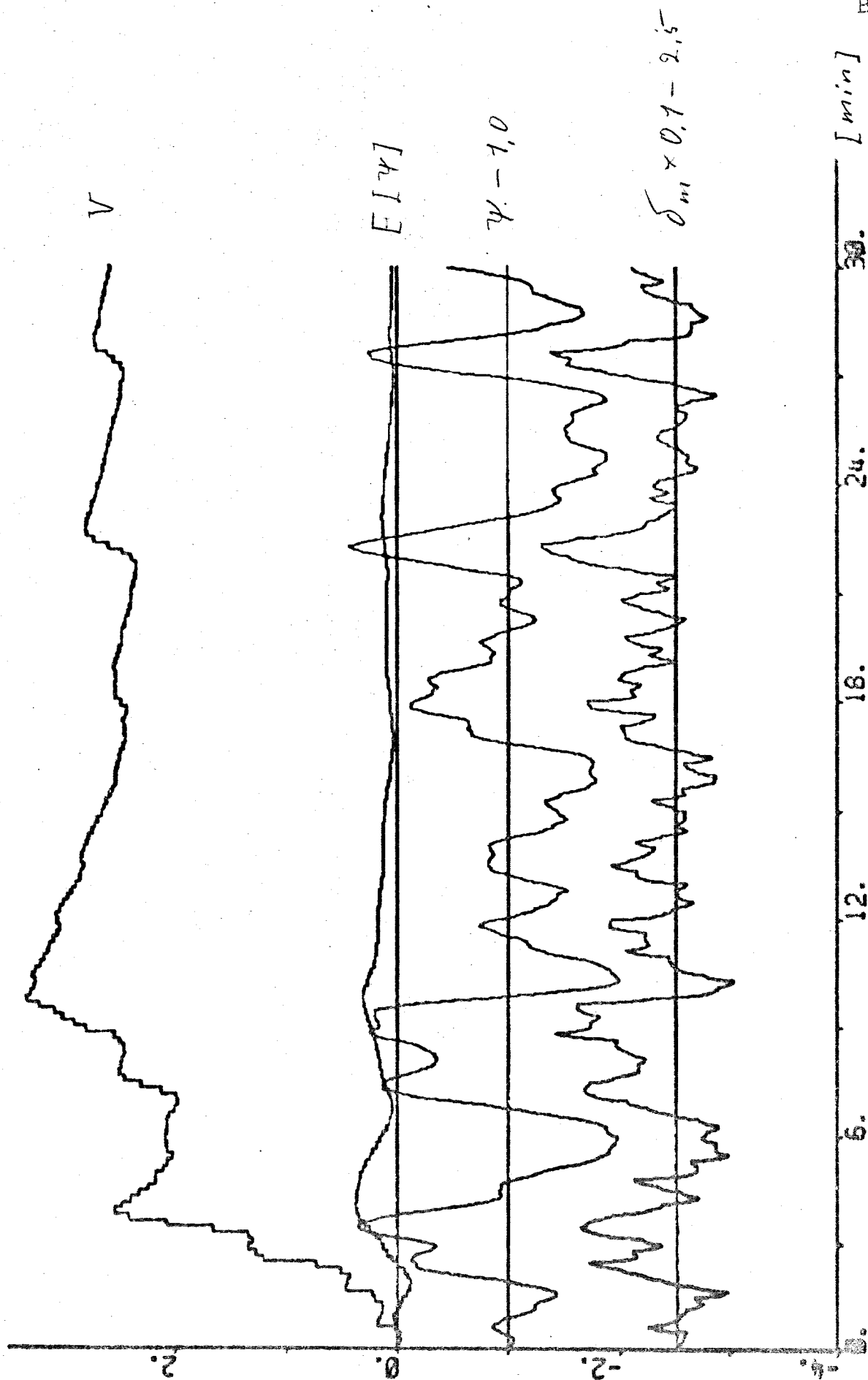
7.9.27 512 PL12 C98 118 526 P18  
K2=180. K3=0.60 K4



PLOT C27 C12 PL12 C35 PL5 C38 PL8 (C6)  
K1=4. K2=100. K3=0.02 FIL=3. TYP=1.



PLOT C27 C12 PL12 C35 PLS C38 PL6 (C6)  
K1:4. K2:120. K3:0.02 FIL:3. TYP:1.





APPENDIX C

Simuleringar med adaptiv regulator

Regulator	Djupgående	Vind		Sida
311---	10.5m	svag		C2
320---	"	"		C3
311---	"	hård		C4
320---	"	"		C5
311---	20 m	svag		C6
320---	"	"		C7
311---	"	hård		C8
320---	"	"		C9
PID	"	"		C10
311---	25 m	svag		C11
320---	"	"		C12
311---	"	hård		C13
320---	"	"		C14
311---	20 m	hård	"Bias" $5^{\circ}$ $0.05^{\circ}/s$	C15
320---	"	"	"	C16
PID	"	"	"	C17
311---	"	"	$R_e(4,4)=0.01$	C18
320---	"	"	"	C19
321---	"	"	"	C20
321---	"	"		C21
311---	"	"	$T_s = 20s$	C22

Sveig vind

Djupgående 10.5 m

Förhållan 0.92

**SELF-TUNING REGULATOR**

**STRUKTUR: (NA.NB.NC)=(3.1.1)**

**TIDSFÖRDRÖJNING: K=6**

**SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK**

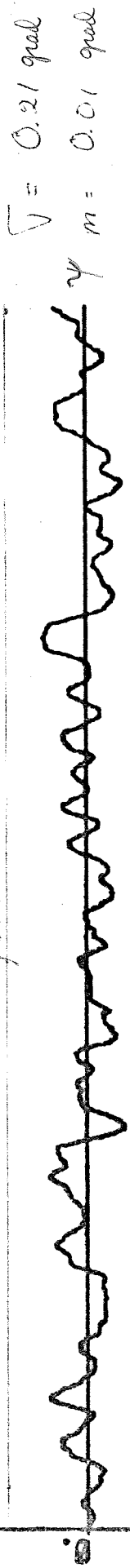
**DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK**

**EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98**

**FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN**

**UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER**

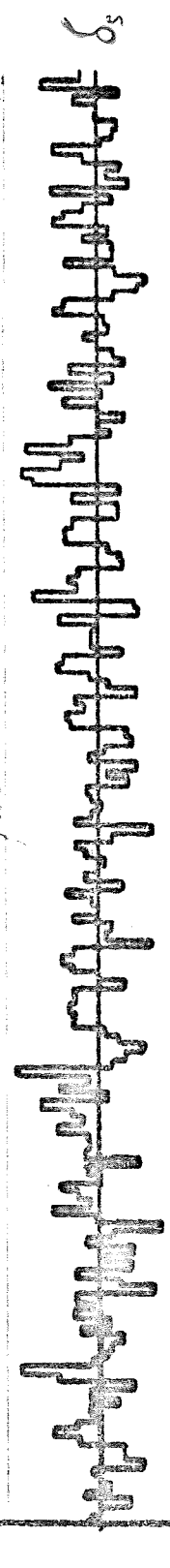
**SKALFAKTOR: B0=-1**



$\sigma = 0.21 \text{ grad}$

$m = 0.01 \text{ grad}$

10 grad



$\sigma = 2.75 \text{ grad}$

$m = 0.52 \text{ grad}$

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 2, 0)

TIDSFÖRDRÖJNING: K=6

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DD=70 SEK

EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.99

FEED-FORWARD:

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

Svag vind

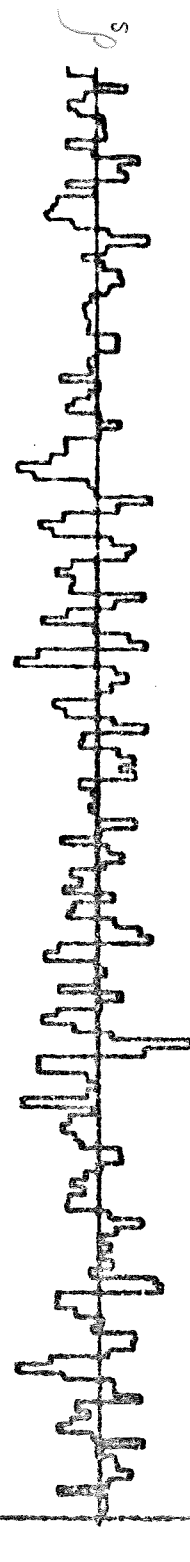
Djupgående 10.5 m

Förluster 1.11

$$\sigma = 0.21$$
$$m = 0.01$$



$$\sigma = 3.17$$
$$m = 0.50$$



6. 12. 18. 24. 30.

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (0, 1, 1)

TIDSFORDROJNING: K=0

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DD=70 SEK

EXONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98

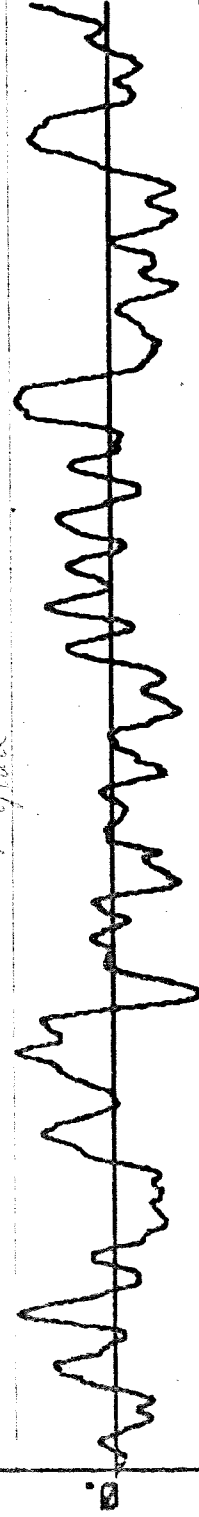
FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

Hård vind  
Djupgående 10.5 m  
Förlusten 2.69

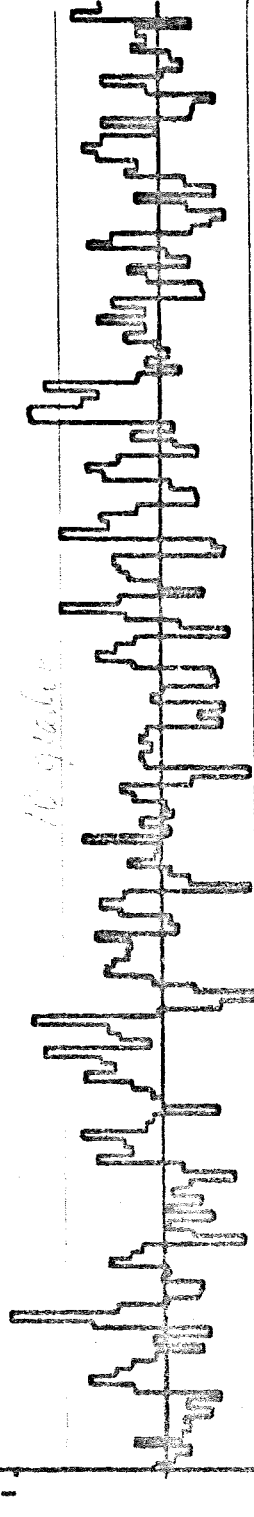
1 grad



$T = 0.39 \text{ grad}$

$\gamma m = 0.01 \text{ grad}$

16 grader



$T = 4.78 \text{ grad}$

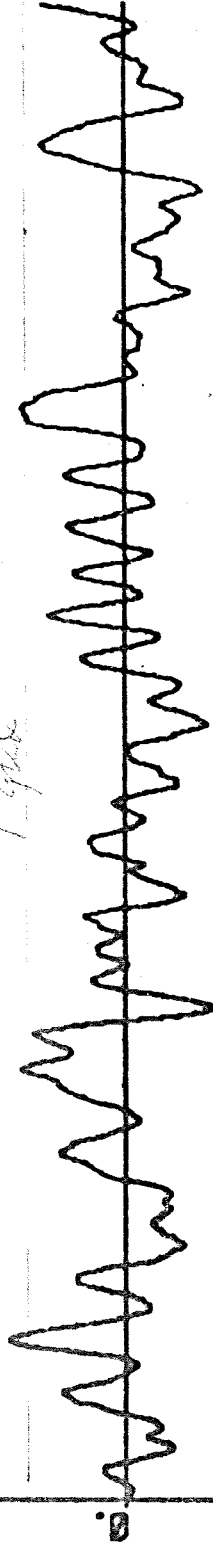
$m = 1.13 \text{ grad}$

Tid [min] 30. 24. 18. 12. 6.

SELF-TUNING REGULATOR  
 STRUKTUR: (NA,MB,NC)=(3,2,0)  
 TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK  
 EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD:  
 UT SIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER  
 SKALFAKTOR: B0=-1

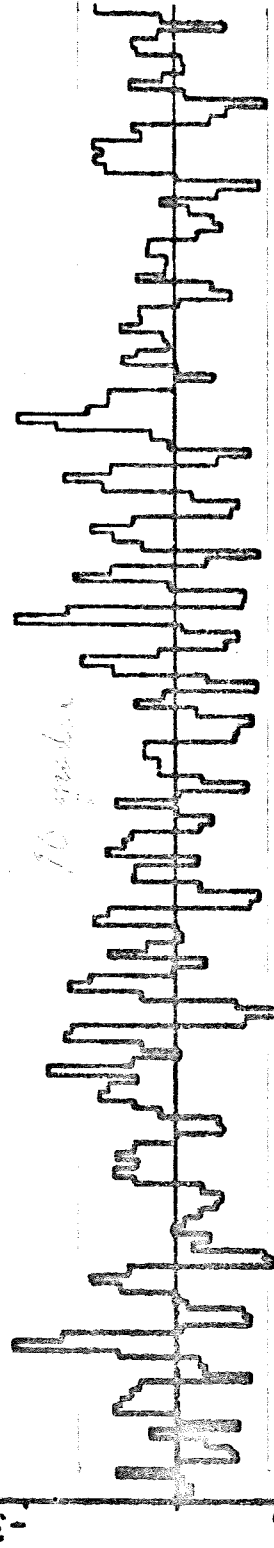
Hård vind  
 Djupgående 10.5 m  
 För laster 3.83

1 grad



$\sigma = 0.42$   
 $m = 0.03$

10 grader



$\sigma = 5.78$   
 $m = 1.07$

6. 12. 18. 24. 30.

**SELF-TUNING REGULATOR**

**STRUKTUR: (NA.NB.NC)-(3.1.1)**

**TIDSFORDRÖJNING: K=6**

**SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK**

**DEAD-BEAT TID: DD=70 SEK**

**EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98**

**FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN**

**UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER**

**SKALFAKTOR: B0=-1**

Sveiv vid

Djupgående 20m

Förhållande 0.95

$T = 0.24$

$m = 0.01$

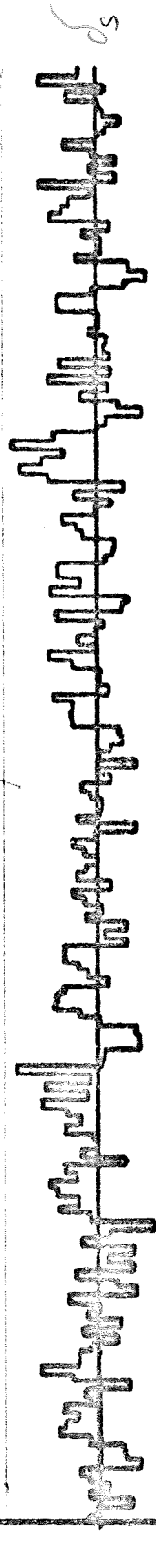
$T = 2.83$

$m = 0.83$

1 grad



10 grad



6. 12. 18. 24. 30.

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (M,NB,NC) = (3,2,0)

TIDSFÖRDRÖJNING: K=8

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK

EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98

FEED-FORWARD:

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

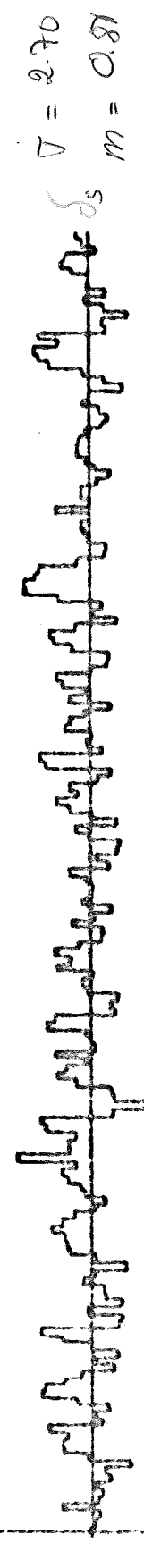
SKALFAKTOR: B0=-1

Svag vind

Djupgående 20m

Förbruker 0.92

$$\gamma = 0.23$$
$$m = 0.02$$



$$\gamma = 2.70$$
$$m = 0.81$$

0. 6. 12. 18. 24. 30.

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA,NB,NC)=(3,1,1)

TIDSFÖRDRÖJNING: K=6

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK

EXONENTIELL GLOMSFAKTOR: RL=0.98

FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

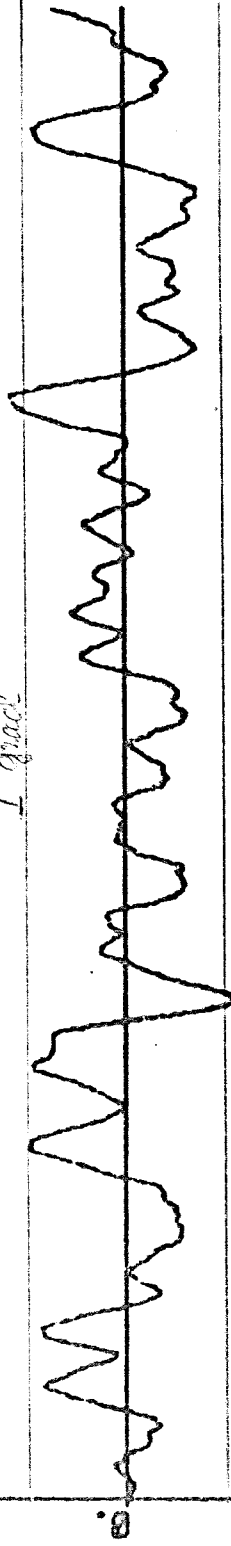
SKALFAKTOR: B0=-1

Hård Vind

Djupgående 20 m

Förbruker 2.78

1 grad

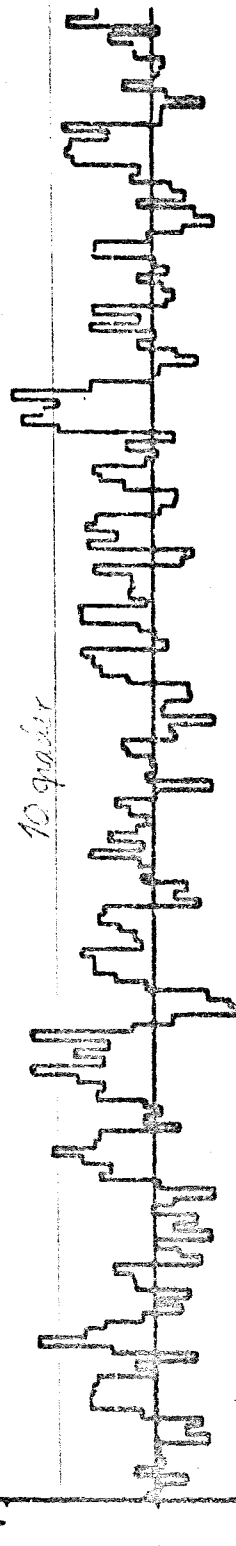


$\nabla = 0.45 \text{ grad}$

$\gamma$

$m = 0.01 \text{ grad}$

10 grader



$\nabla = 4.46 \text{ grad.}$

$m = 1.79 \text{ grad}$

30.

24.

18.

12.

6.

Tid

(min)

88



SELF-TUNING REGULATOR  
 STRUKTUR: (NA.NB.NC) = (3.2.0)  
 TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEAD-BEAT TID: DD=70 SEK  
 EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD:  
 UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER  
 SKALFAKTOR: B0=-1

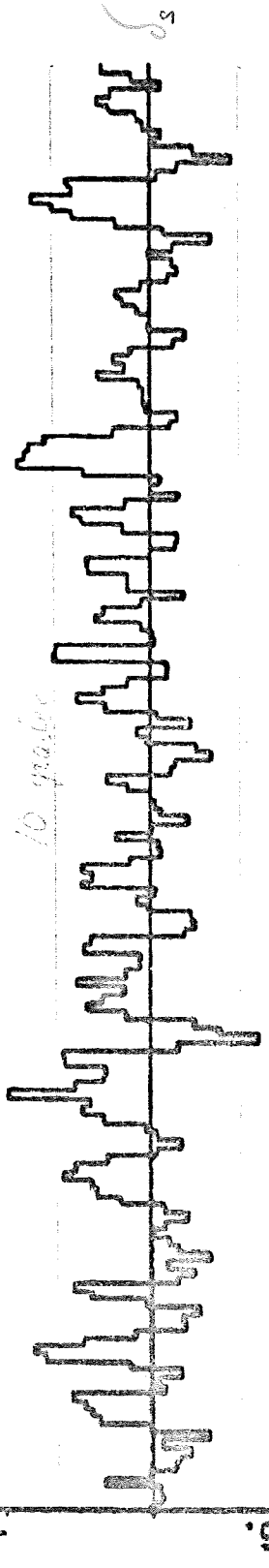
Hard vind  
 Djupgående 20 m  
 Förloster 3.21

1 grad



$T = 0.47$   
 $m = 0.65$

10 grader



$T = 4.82$   
 $m = 1.77$

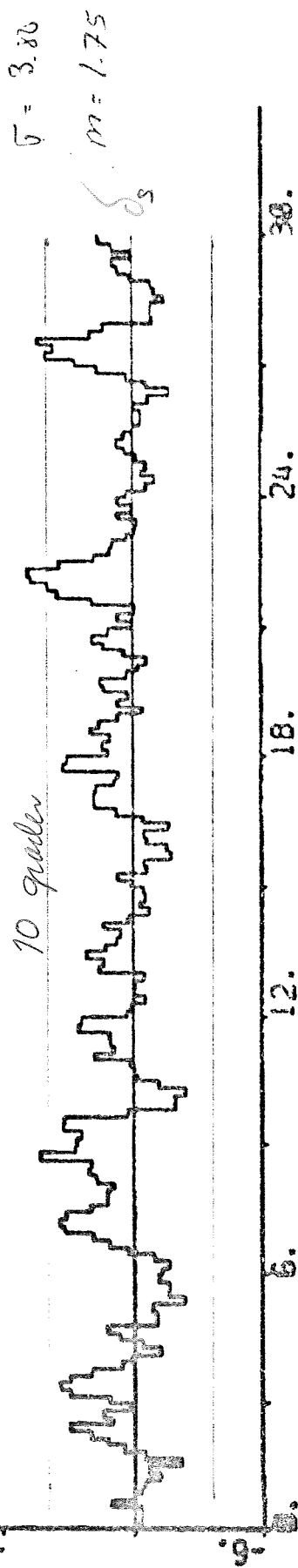
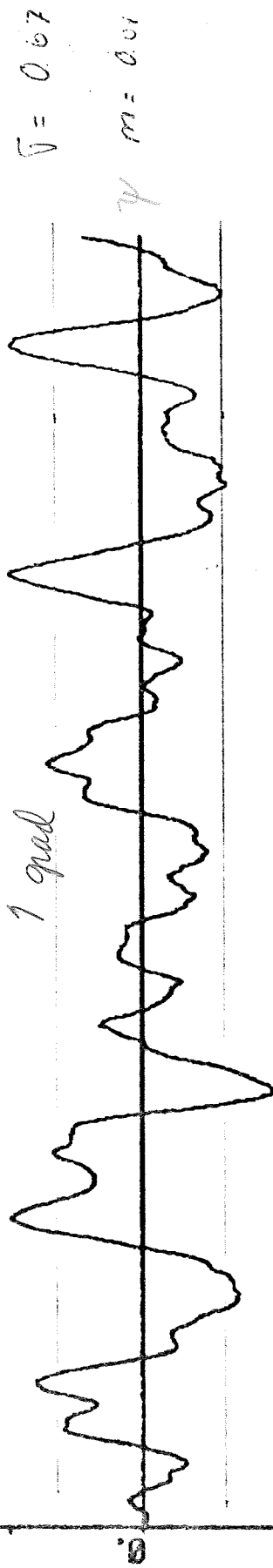
0. 6. 12. 18. 24. 30.

# PID-Regulator

$$\begin{cases} P = 4 \\ I = 0.04 \\ D = 100 \end{cases}$$

Girvinkel hastighetsreferens = deriverad kurs

Hård vind  
Djupgående 20m  
Förbrukar 2.53



24. 30.

**SELF-TUNING REGULATOR**

**STRUKTUR: (NA,NB,NC)=(3,1,1)**

**TIDSFORDROJNING: K=6**

**SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK**

**DEAD-TID: DD=70 SEK**

**EXONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98**

**FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN**

**UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER**

**SKALFAKTOR: B0=-1**

*Sveig vid*

*Djup gående 25 m*

*Föruster 1.02*

*1 grad*

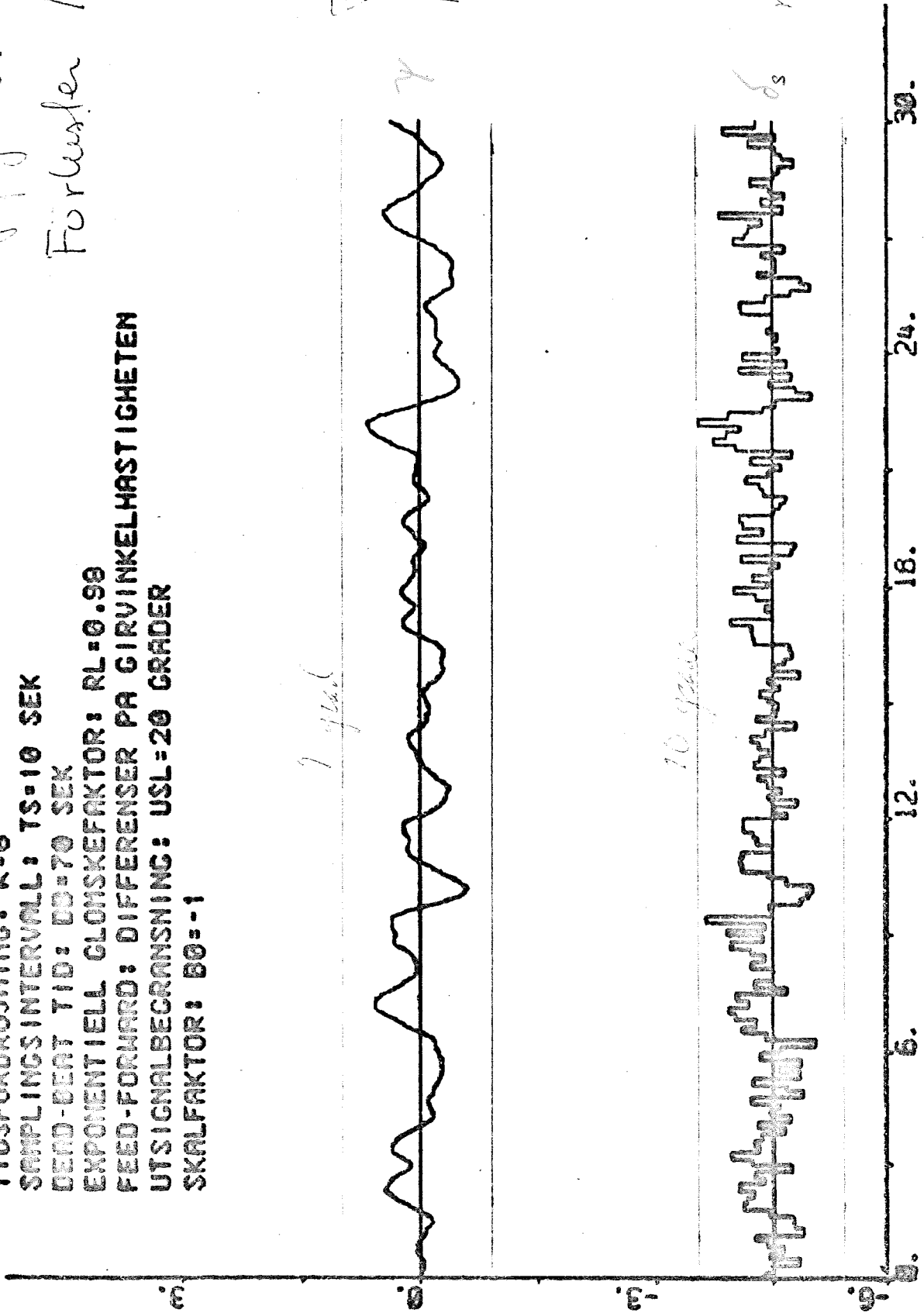
$\gamma = 0.26$

$m = 0.501$

*10 grad*

$\gamma = 2.86$

$m = 0.96$



SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 2, 0)

TIDSFØRDRØJNING: K=6

SAMPLINGINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-TID: DB=70 SEK

EXONENTIELL GLØNSKEFAKTOR: RL=0.98

FEED-FORWARD:

UTSIGNALBEGRÆNSNING: USL=28 GRADER

SÆLFÆKTOR: 0.02

Swag vind

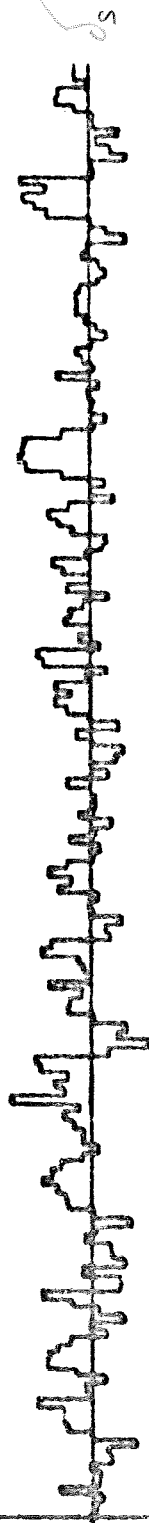
Djupgænde 25m

Følter 0.91

$\bar{V} = 0.25$   
 $m = 0.02$



$\bar{V} = 2.61$   
 $m = 0.95$



30.

24.

18.

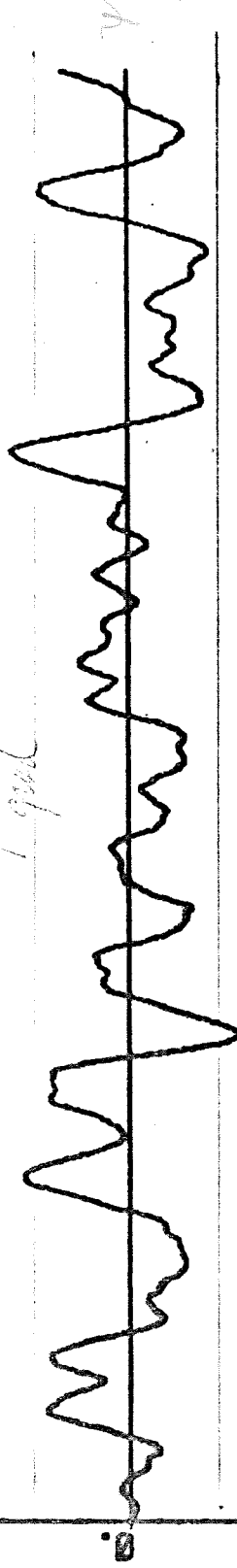
12.

6.

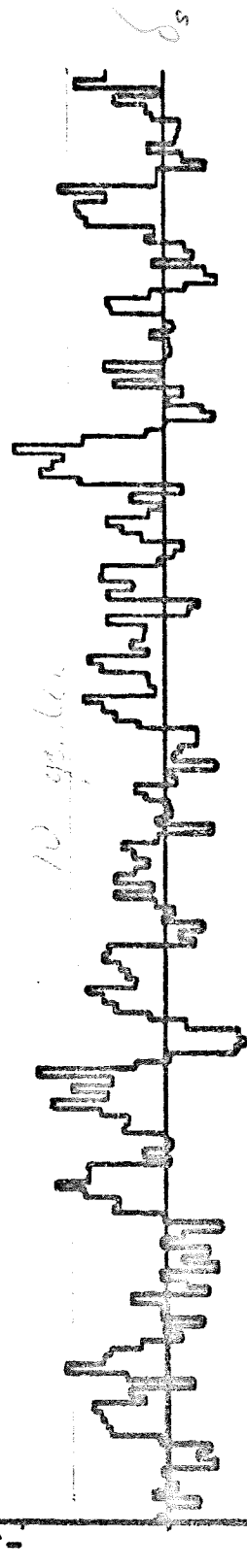
Hård vind  
Djupgående 25 m  
Förloster 303

SELF-TUNING REGULATOR  
STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 1, 1)  
TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
DEAD-TIME TID: DD=70 SEK  
EXPONENTIELL GLOMSFAKTOR: RL=0.98  
FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN  
UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER  
SKALFAKTOR: BO=-1

$\sigma = 0.48$   
 $m = 0.01$



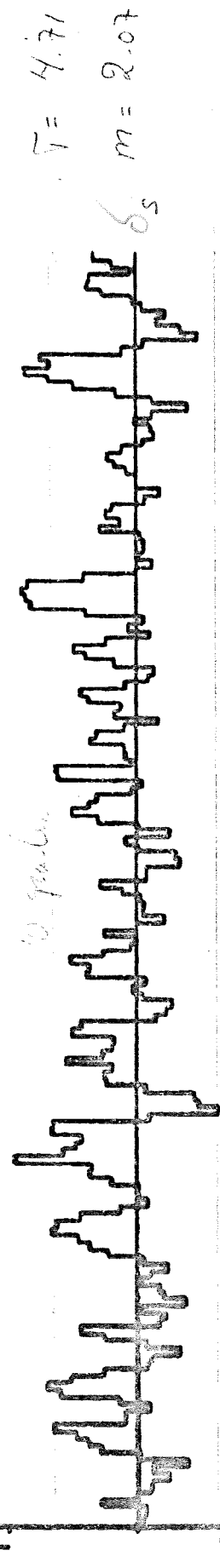
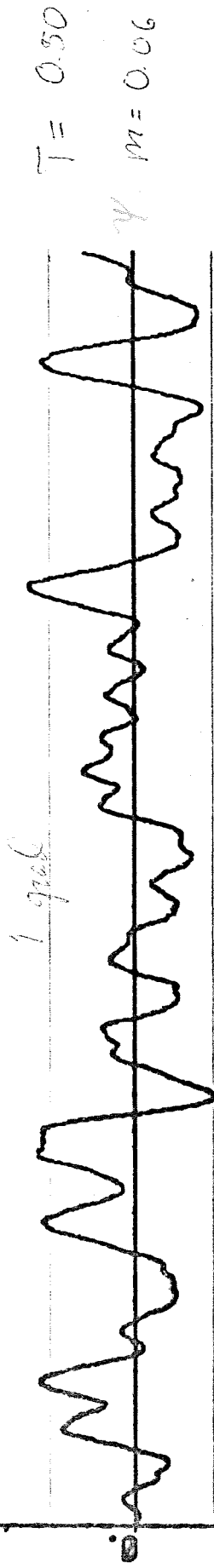
$\sigma = 4.51$   
 $m = 2.08$



6. 12. 18. 24. 30.

SELF-TUNING REGULATOR  
 STRUKTUR: (NA.NB.NC) = (3.2.0)  
 TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEAD-BEAT TID: DD=70 SEK  
 EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD:  
 UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER  
 SKALFAKTOR: B0=-1

Hård vind  
 2.5m  
 Förluster 3.31



SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 1, 1)

TIDSFORDROJNING: K=6

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK

EXPONENTIELL GLONSKEFAKTOR: RL=0.98

FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

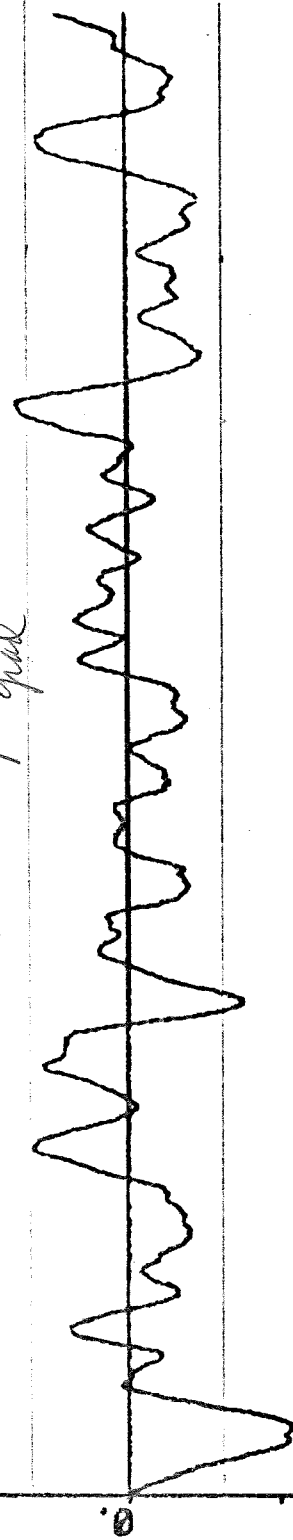
Hård vind

Djupgående 20m

Bius { Roder 5°  
Girvinkelhast. 0.05%/s

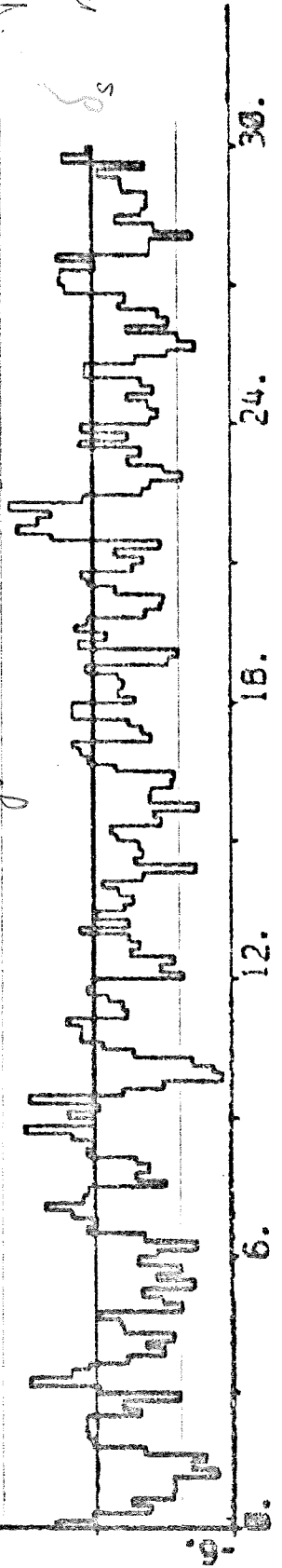
Förster 3.07

1 grad



$T = 0.50$   
 $m = 0.1$

10 grader



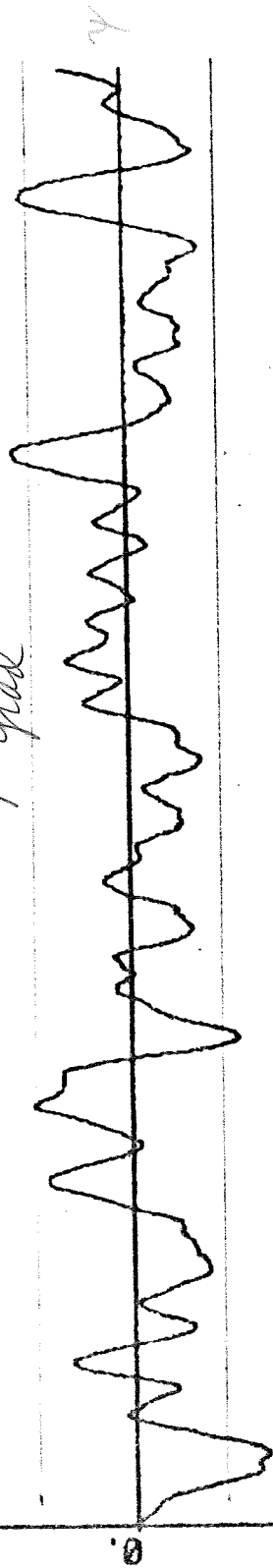
$T = 4.70$   
 $m = -3.18$

SELI-TUNING REGULATOR  
 STRUKTUR: (NA,NB,NC)=(3,2,0)  
 TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK  
 EXPONENTIELL GLOMSFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD:  
 UT SIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER  
 SKALFAKTOR: B0=-1

Hård vind  
 Djupgående 20m  
 Bias { Rollen 5°  
 girvinkelkast 0.05%  
 Förventar 3.38

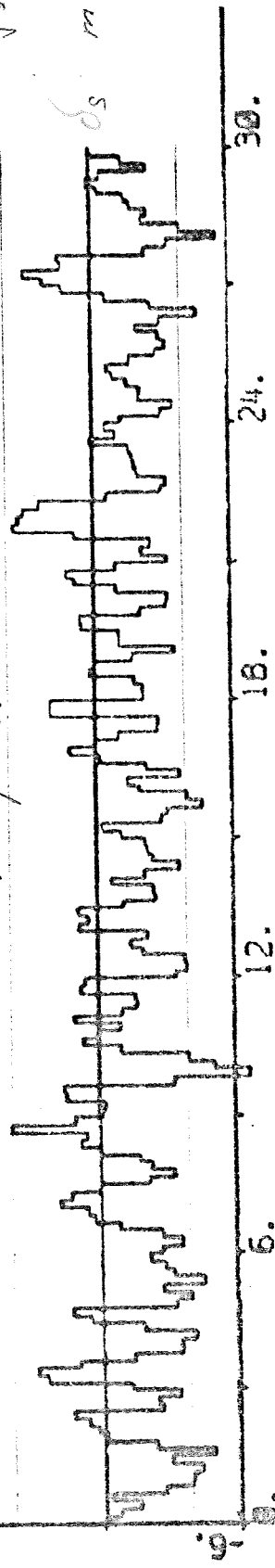
1 grad

$\sigma = 0.49$   
 $m = -0.1$



10 grader

$\sigma = 4.95$   
 $m = -3.20$





# PID-Regulator

$$\begin{cases} P = 4 \\ I = 0.04 \\ D = 100 \end{cases}$$

Girvinkelkastignelen = derivatalkurs

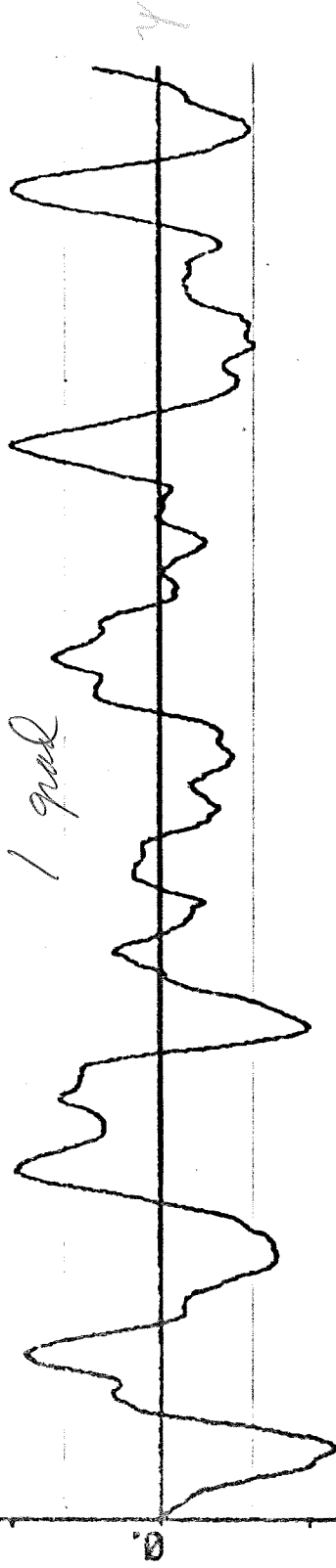
Hård vind

Djupgående 20 m

Bias { Roden 5°

{ Girvinkel kastighet = 0.05

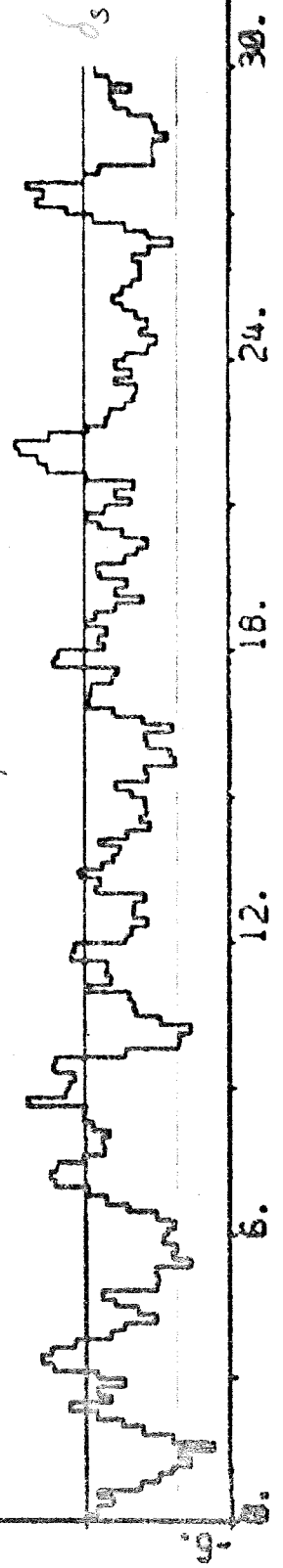
Förlusten 276



$$\bar{\gamma} = 0.73$$

$$m = -0.05$$

10 grader



$$\bar{\gamma} = 3.97$$

$$m = -3.23$$

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 1, 1)

TIDSFORDROJNING: K=6

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK

EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98

FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ CIRVINKELHASTIGHETEN

UTSIGNALBEGRANSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

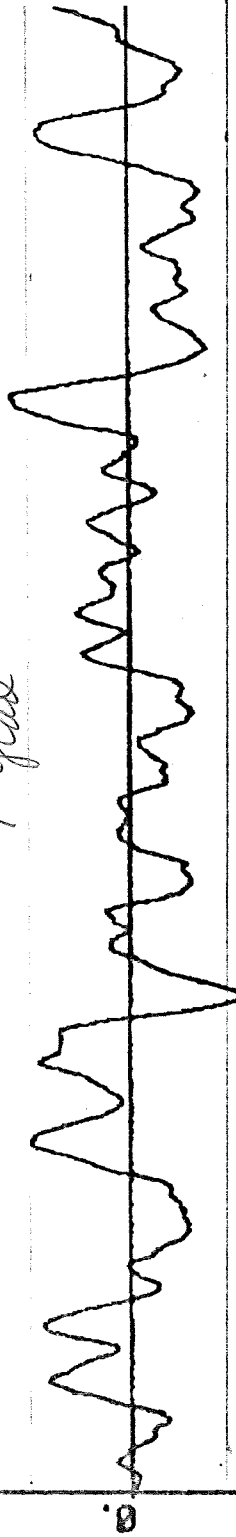
Hard vind

Djupgående 20m

$R_e(4,4) = 0.01 \text{ grad}^2$

Følterusen 3.23

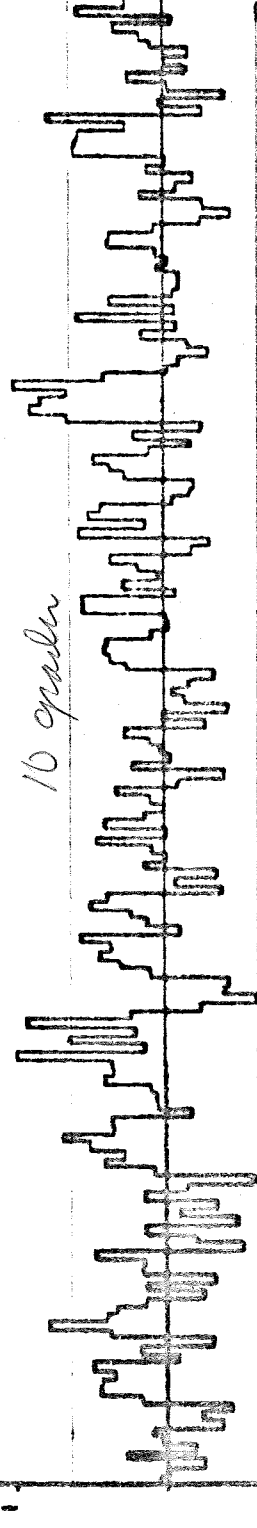
1 grad



$\sigma = 0.46$

$m = 0.01$

10 grader



$\sigma = 5.02$

$m = 1.79$

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (MA,NB,NC)=(3,2,0)

TIDSFÖRDRÖJNING: K=6

SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK

DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK

EXPONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.99

FEED-FORWARD:

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

Hård vind

Djup jäende 20m

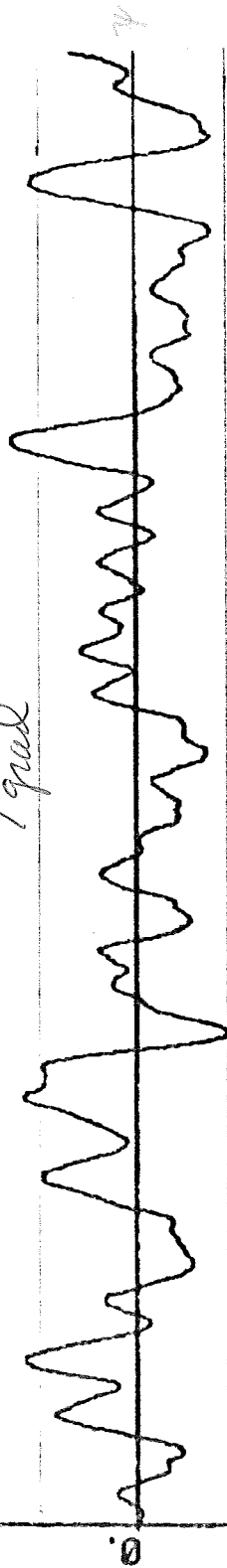
$R_e(4,4) = 0.01$

Förskru 3.87

1 grad

$\sigma = 0.48$

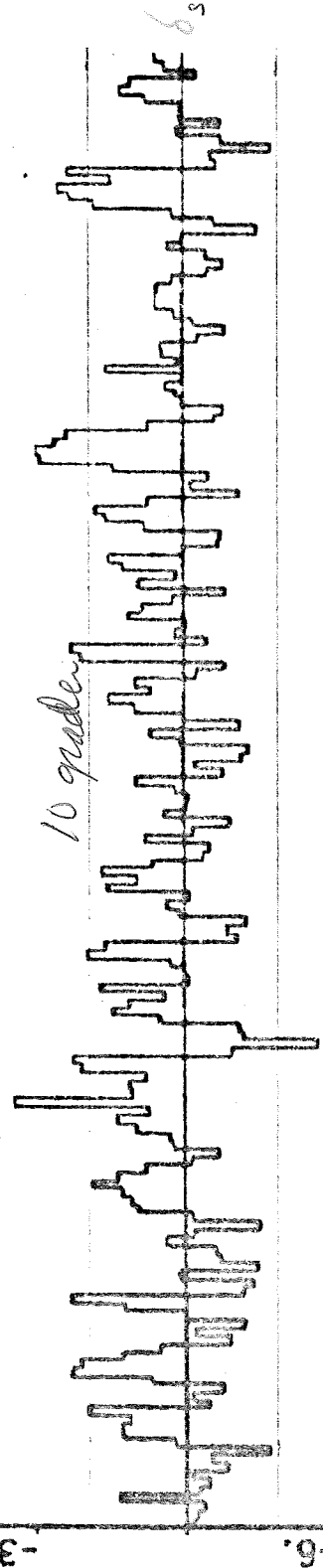
$m = 0.05$



10 grader

$T = 5.46$

$m = 1.76$



30.

24.

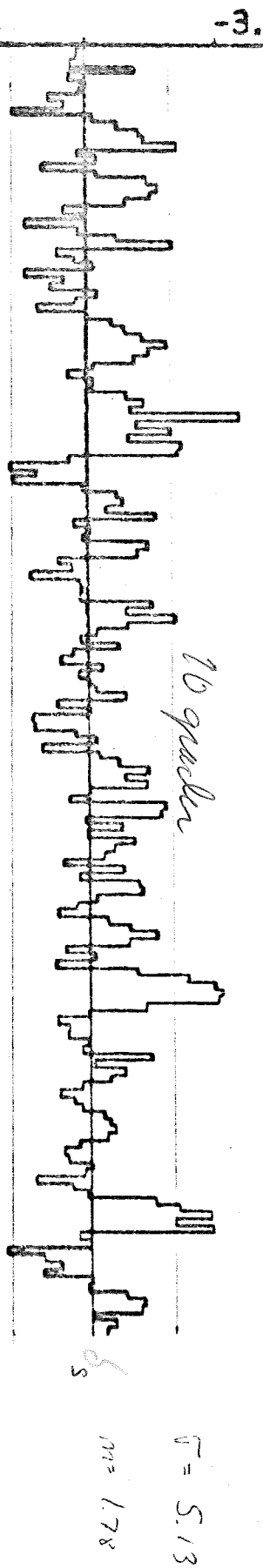
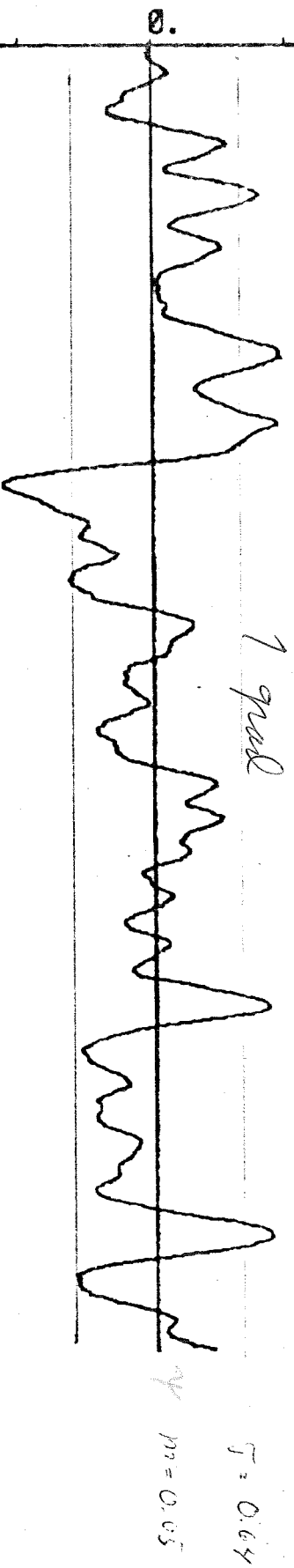
18.

12.

6.

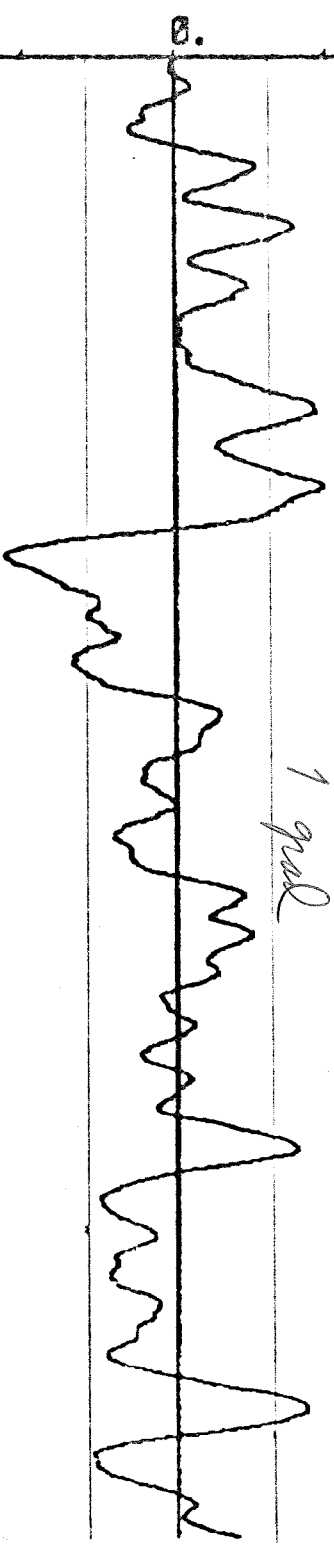
SELI - TUNING REGULATOR  
 STRUKTUR: (NR, NB, NC) = (3, 2, 1)  
 TIDSFORDRØJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEAD-BEAT TID: DB=70 SEK  
 EXPONENTIELL GLØNSKEFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD: DIFERENSER PÅ DERIVERAD KURS  
 UT SIGNALBEGRÆNSNING: USL=20 GRADER  
 SKALEFAKTOR: B0=-1

Hård vind  
 Djupgående søm  
 $R_0(4,4) = 0.01$   
 Førløst 3.68



**SELF-TUNING REGULATOR**  
 STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 2, 1)  
 TIDSFÖRDRÖJNING: K=6  
 SAMPLINGSINTERVALL: TS=10 SEK  
 DEPD-BEAT TID: DB=70 SEK  
 EXPONENTIELL CLONSKEFFAKTOR: RL=0.98  
 FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ DERIVERAD KURS  
 UTSIGNALBEGRENSNING: USL=20 GRADER  
 SKALFAKTOR: 80°-1

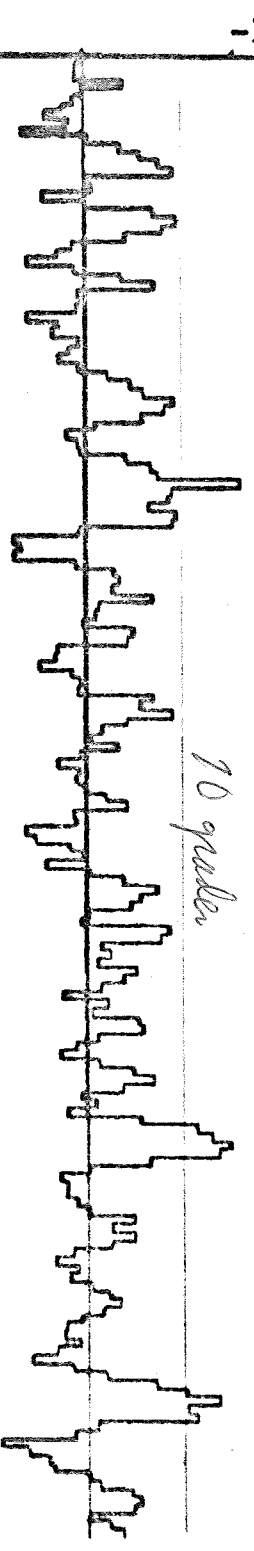
Hård vind  
 20m djupgående  
 Förusket 3.26



1 grad

$\sigma = 0.64$

$m = 0.05$



10 grader

$\sigma = 4.64$

$m = 1.78$

SELF-TUNING REGULATOR

STRUKTUR: (NA, NB, NC) = (3, 1, 1)

TIDSFÖRDRÖJNING: K=4

SAMPLINGSINTERVALL: TS=20 SEK

DEAD-BEAT TID: 100 SEK

EXONENTIELL GLOMSKEFAKTOR: RL=0.98

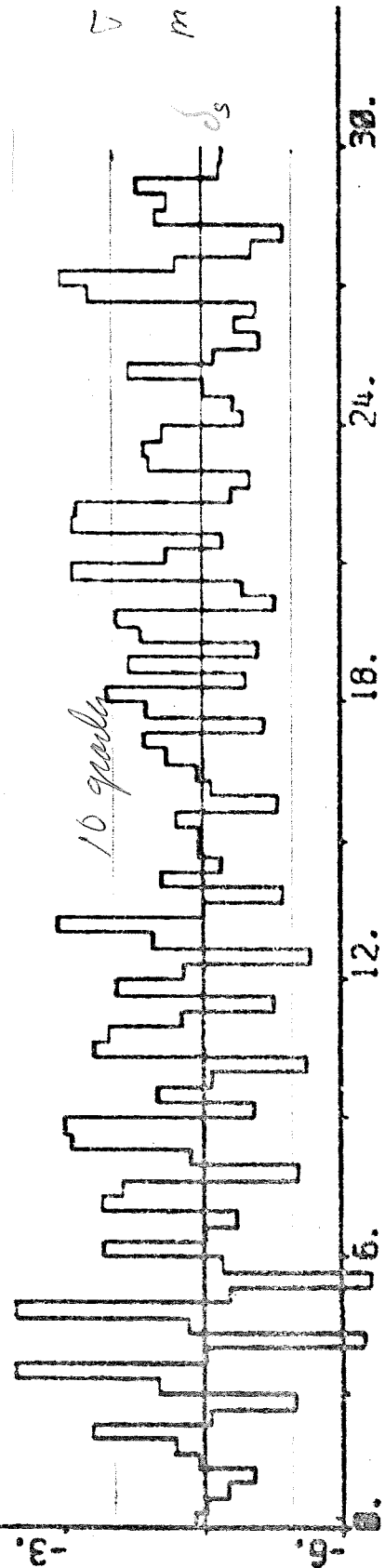
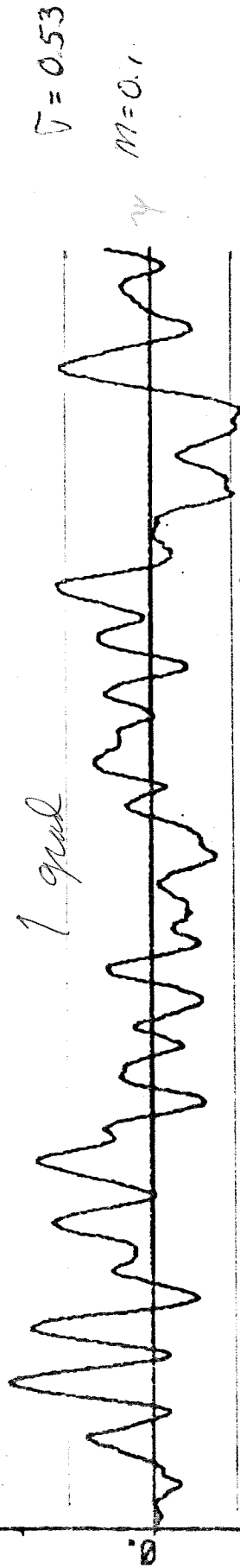
FEED-FORWARD: DIFFERENSER PÅ GIRVINKELHASTIGHETEN

UTSIGNALBEGRÄNSNING: USL=20 GRADER

SKALFAKTOR: B0=-1

Hard vind  
Djupgående 20m

Försterka 8.16



APPENDIX D

Program, använda vid manuell styrning,  
eller vid standardprov.

Namn	Kommentar	Sida
BOAT3	Båtmodell	D2
ZBOAT	Totalsystem, för standardprov	D5
YBOAT	Totalsystem, för repeterat st.-prov	D6
NABOT	Totalsystem, för manuell styrning	D7
FIG	Genererar båtbild på display	D8
BANA	Genererar bana på display	D10
ANIN	Analog in/ut-matning	D11
LPFIL	Lågpasfilter	D14
SIMBAT	Användes vid ihoplänkning enl. SIMNON	D15
SYSTS	"	D16

## CONTINUOUS SYSTEM BOAT3

STATE DELTA N U V R PSI X Y

```
" DELTA=RODERVINKEL          [RAD]
" N      =VARVTAL              [1/S]
" U      =HASTIGHET FRAMMAT    [M/S]
" V      =TRANSVERSELL HASTIGHET [M/S]
" R      =GIRVINKELHASTIGHET  [RAD/(S*100)]
" PSI    =KURS                 [RAD]
" X      =X-KOORDINAT         [M*1000]
" Y      =Y-KOORDINAT         [M*1000]
```

DER DDELTA DN DU DV DR DPSI DX DY

INPUT DELTS KAPPA W1 W2

```
" DELTS=RODERVINKEL;ONSKAD    [GRAD]
" KAPPA=RELATIVT ANGINSLAEP TILL TURBIN -0.5<KAPPA<1.0 [1]
" W1    =FILTRERAT BRUS
" W2    =FILTRERAT BRUS
```

OUTPUT DELM NM UM V1 V2 VM RM PSIM XM YM

```
" DELM=RODERVINKEL          [GRAD]
" NM  =VARVTAL PROPELLER    [RPM]
" UM  =FRAMMATHASTIGHET     [KNOP]
" V1  =TRANSVERSELL HASTIGHET;FOR [KNOP]
" V2  =TRANSVERSELL HASTIGHET;AKTER [KNOP]
" VM  =TRANSVERSELL HASTIGHET;MASSCENTRUM [KNOP]
" RM  =GIRVINKELHASTIGHET   [GRAD/S]
" PSIM=KURS                 [GRAD]
" XM  =X-KOORDINAT         [M]
" YM  =Y-KOORDINAT         [M]
```

INITIAL

DELTA:0

N :1.282

U :8.202

V :0

R :0

PSI :0

X :0

Y :0

F1 =(20.-TT)/9.5

F2 =(TT-10.5)/9.5

CDV =YVD10\*F1+YVD20\*F2

YUVP=YUV10\*F1+YUV20\*F2

YUVM=YUR10\*F1+YUR20\*F2

YVVP=YVV10\*F1+YVV20\*F2

IZN =NRD10\*F1+NRD20\*F2

NUVP=NUV10\*F1+NUV20\*F2

NURM=NUR10\*F1+NUR20\*F2

NVRP=NVR10\*F1+NVR20\*F2

TS1 =1/TS

TS2 =TS1/CRG

LIM1=DELIM/CRG

D2S=D2\*G/(L\*D1)

D3S=D3/(L\*L\*D1)

D4S=D4/(L\*D1)

D5S=D5/D1

D6S=D6/D1\*SQRT(G/L)

D7S=D7\*G/(L\*D1)

CU2=XU2P/(L\*CDU)

CVR=XVRP/CDU



```

CVV=XVVP/(L*CDU)
CCD=XCDP/(L*CDU)
CTP=MLP/CDU
G1S=G1/L
G3S=G3*L
A11=CDV
A12=MXV*L
A21=MXN/L
A22=IZN
DET1=1/(A11*A22-A12*A21)
CUV=YUVP/L
CUR=YUVM
CV2=YVVP/L
CYC=YCCDP/L
CN2=YNNP*L
C2UV=NUVP/(L*L)
C2UR=NURN/L
C2VR=NVRP/L
C2CD=NCDP/(L*L)
C2TP=KTPN/L
CSIN=LV/(L*L)
FV1=CMK*L1
FV2=-CMK*L2
SINAL=SIN(1/CRG*ALFA)*K
COSAL=COS(1/CRG*ALFA)*K

```

## OUTPUT

```

DELM=CRG*DELTA
NM=60.*N
UM=CMK*U
V1=FV1*R/100.+CMK*V
V2=FV2*R/100.+CMK*V
VM=CMK*V
RM=CRG*R/100.
PSIM=CRG*PSI
XM=X*1000.
YM=Y*1000.

```

## DYNAMICS

```

SINP=SIN(PSI)
COSP=COS(PSI)
RR=R/100.
NSIGN=SIGN(1.,N)
N2=N*N
U2=U*U
TPM=G1S*U2+G2*U*N+G3S*NSIGN*N2
CCA=C1*U2+C2*NSIGN*U2+C3*U*N+C4*N2
DDEL1=-TS1*DELTA+TS2*DELTS
DDELT=IF DDEL1<-LIM1 THEN -LIM1 ELSE IF DDEL1>LIM1 THEN LIM1 ELSE DDEL1
DN=D2S*NSIGN+D3S*U2+D4S*U*N+D5S*NSIGN*N2+D6S*N+D7S*KAPPA
CCDD=CCA*DELTA*DELTA
DU1=CVR*V*RR+CVV*V*V+CCD*(IF CCDD>CDLIM THEN CDLIM ELSE CCDD)
DU=CU2*U2+(IF DU1<0 THEN DU1 ELSE 0)+CTP*TPM
KSIN=SINAL*COSP-COSAL*SINP
B0=CUV*U*V+CUR*U*RR+CV2*V*ABS(V)+CYC*CCA*DELTA+KTYP*TPM
B1=B0+CN2*N2-KSIN+W1
B21=C2UV*U*V+C2UR*U*RR+C2VR*ABS(V)*RR+C2CD*CCA*DELTA
B2=B21+C2TP*TPM+NNNP*N2+CSIN*KSIN+W2
DV=DET1*(B1*A22-B2*A12)
DR=DET1*(B2*A11-B1*A21)*100.
DPSI=RR
DX=(U*COSP-V*SINP)/1000.
DY=(U*SINP+V*COSP)/1000.
G:9.80665

```

CMK:1.943844  
 CRG:57.2958  
 CDLIM:7.9  
 L:329.18 " BATENS LAENGD  
 TS:5.0 " TIDSKONSTANT FOR RODRET  
 DELIM:2.0 " BEGRAENSNING FOR RODERHASTIGHETEN  
 D1:0.70E-7  
 D2:-0.95E-7  
 D3:0.575E-4  
 D4:0.423E-6  
 D5:-0.695E-7  
 D6:-0.431E-6  
 D7:0.685E-5  
 CDU:1.050  
 XU2P:-0.0208  
 XVRP:6.0  
 XVVP:8.70  
 XCDP:-0.220  
 MLP:0.760  
 YVD10:1.67  
 YVD20:2.5  
 MXY:0.050  
 YUV10:-1.21  
 YUV20:-1.083  
 YUR10:-0.525  
 YUR20:-0.625  
 TT:20. " DJUPGAENDE  
 YVV10:-0.58  
 YVV20:-1.06  
 YCCDP:0.197  
 KTYP:0.040  
 YNNP:0  
 K:0  
 ALFA:135. " VINDRIKTNING  
 MXN:0.040  
 NRD10:0.100  
 NRD20:0.16  
 NUV10:-0.180  
 NUV20:-0.329  
 NUR10:-0.256  
 NUR20:-0.2122  
 NVR10:-0.23  
 NVR20:-0.49  
 NCDP:-0.092  
 KTNP:-0.0000645  
 NNNP:0  
 LV:25. " MOMENTARM FOR VINDEN  
 G1:-0.0226  
 G2:-0.232E-3  
 G3:0.234E-4  
 C1:0.4225  
 C2:-0.224  
 C3:-0.81  
 C4:29.1  
 L1:148.7 " AVSTAND FRAN MASSCENTRUM TILL FORLIG DOPPLERLOGG  
 L2:131.1 " AVSTAND FRAN MASSCENTRUM TILL AKTLIG DOPPLERLOGG

END

```

TOTAL SYSTEM ZBOAT
TIME T
DELZ=IF T<10 THEN DEL0 ELSE IF -PSIM[BOAT3]<DELZ THEN DEL0 ELSE -DEL0
DELTS[BOAT3]=IF ISW>0.5 THEN DELZ ELSE DEL0
DELN=-DELM[BOAT3] "NEGATIVT RODERUTSLAG [GRAD]
PSIN=-PSIM[BOAT3] "NEGATIV KURS [GRAD]
PSIMR=PSIM[BOAT3]/57.2958 "POSITIV KURS [RAD]
DELMR=DELM[BOAT3]/57.2958 "POSITIVT RODERUTSLAG [RAD]
N1=NM[BOAT3]/5. "SKALAT VARVTAL [RPM]
R1=RM[BOAT3]*10. "SKALAD GIRVINKELHASTIGHET [GRAD/S]
KAPPA[BOAT3]=K0 "RELATIVT ANGPADRAG [1]
C1[CFILE]=DELM[BOAT3] "RODERUTSLAG [GRAD]
C2[CFILE]=N1 "SKALAT VARVTAL [RPM]
C3[CFILE]=UM[BOAT3] "FRAMMATHASTIGHET [KNOP]
C4[CFILE]=VM[BOAT3] "TVAERSHASTIGHET [KNOP]
C5[CFILE]=R1 "SKALAD GIRVINKELHASTIGHET [GRAD/S]
C6[CFILE]=PSIM[BOAT3] "POSITIV KURS [GRAD]
C7[CFILE]=XM[BOAT3] "X-KOORDINAT [M]
C8[CFILE]=YM[BOAT3] "Y-KOORDINAT [M]
C9[CFILE]=T "TID [S]
C10[CFILE]=PSIMR "POSITIV KURS [RAD]
C11[CFILE]=DELMR "POSITIVT RODERUTSLAG [RAD]
XM[FIG]=XM[BOAT3] "X-KOORDINAT [M]
YM[FIG]=YM[BOAT3] "Y-KOORDINAT [M]
PSI[FIG]=PSI[BOAT3] "POSITIV KURS [RAD]
DELTA[FIG]=DELM[BOAT3]/57.2958 "POSITIVT RODERUTSLAG [RAD]
DEL0:0. "VALJ LAMPLIGT VARDE
K0:0.8 " DITO
ZERO:0
W1[BOAT3]=0. " DETERMINISTISKT SYSTEM
W2[BOAT3]=0. " DETERMINISTISKT SYSTEM
LINE1:30
LINE2:-30
ISW:0 "ISW:0 - CIRKEL *** ISW:1 - ZIGZAG
END

```

```
TOTAL SYSTEM YBOAT  
TIME T  
XM(FIG)=C7(IFILE)  
YM(FIG)=C8(IFILE)  
PSI(FIG)=C10(IFILE)  
DELTA(FIG)=C11(IFILE)  
END
```

TOTAL SYSTEM NABOT

TIME T

```

DELN=-DELM[BOAT3]           "NEGATIVT RODERUTSLAG      [GRAD]
PSIN=-PSIM[BOAT3]          "NEGATIV KURS              [GRAD]
PSIMR=PSIM[BOAT3]/57.2958  "POSITIV KURS              [RAD]
DELMR=DELM[BOAT3]/57.2958 "POSITIVT RODERUTSLAG     [RAD]
N1=NM[BOAT3]/5.           "SKALAT VARVTAL           [RPM]
R1=RM[BOAT3]*10.          "SKALAD GIRVINKELHASTIGHET [GRAD/S]

C1[CFILE]=DELM[BOAT3]     "RODERUTSLAG              [GRAD]
C2[CFILE]=N1              "SKALAT VARVTAL           [RPM]
C3[CFILE]=UM[BOAT3]       "FRAMMATHASTIGHET        [KNOP]
C4[CFILE]=VM[BOAT3]       "TVAERSHASTIGHET         [KNOP]
C5[CFILE]=R1              "SKALAD GIRVINKELHASTIGHET [GRAD/S]
C6[CFILE]=PSIM[BOAT3]     "POSITIV KURS              [GRAD]
C7[CFILE]=XM[BOAT3]       "X-KOORDINAT              [M]
C8[CFILE]=YM[BOAT3]       "Y-KOORDINAT              [M]
C9[CFILE]=T               "TID                       [S]
C10[CFILE]=PSIMR          "POSITIV KURS              [RAD]
C11[CFILE]=DELMR          "POSITIVT RODERUTSLAG     [RAD]

XM[FIG]=XM[BOAT3]         "X-KOORDINAT              [M]
YM[FIG]=YM[BOAT3]         "Y-KOORDINAT              [M]
PSI[FIG]=PSI[BOAT3]       "POSITIV KURS              [RAD]
DELTA[FIG]=DELM[BOAT3]/57.2958 "POSITIVT RODERUTSLAG     [RAD]

RM[ANIN]=RM[BOAT3]+E3[NOISE]
U[ANIN]=UM[BOAT3]/1.9438
PSIM[ANIN]=PSIM[BOAT3]+E4[NOISE]
K11=Y1[ANIN]
K10=Y2[ANIN]

KAPPA[BOAT3]=K10/10.
DELTS[BOAT3]=K11*4.5

C12[CFILE]=K10*0.5
C13[CFILE]=K11*0.45

X1[LPF1]=E1[NOIS1]
X1[LPF2]=E2[NOIS1]

W1[BOAT3]=X0[LPF1]
W2[BOAT3]=X0[LPF2]

RN1=(RM[BOAT3]+E3[NOISE])*10.

C14[CFILE]=RN1
C15[CFILE]=PSIM[BOAT3]+E4[NOISE]

```

END

```

001          SUBROUTINE FIG
002          C
003          C
004          REAL LANGD
005          DIMENSION XP(7),YP(7)
006          COMMON /TIME/ T
007          COMMON /DESTIN/ IDUM,IPART
008          DATA NPOINT /7/
009          GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8),IPART
010          C
011          C
012          1  CALL IDENT('DISCR','FIG')
013          RETURN
014          C
015          C
016          2  CALL INPUT(XM,'XM')
017          CALL INPUT(YM,'YM')
018          CALL INPUT(PSI,'PSI')
019          CALL INPUT(DELTA,'DELTA')
020          CALL PAR(SKAL,'SKAL')
021          CALL PAR(LANGD,'LANGD')
022          CALL PAR(AST,'AST')
023          CALL PAR(BAN,'BAN')
024          CALL PAR(SCALE,'SCALE')
025          CALL PARV(XP,NPOINT,'XP')
026          CALL PARV(YP,NPOINT,'YP')
027          CALL TSAMP(TS,'TS')
028          CALL PAR(DT,'DT')
029          C  XM=X-KOORDINAT
030          C  YM=Y-KOORDINAT
031          C  PSI=KURS
032          C  DELTA=RODERVINKEL
033          C  BAN>0.5 EN KARTBILD GENERERAS VID START AV SIMULERING
034          C  BAN=0.      -      "      -      INTE      -      "      -
035          C  AST=1. EN ASTERISK GENERERAS I MASSCENTRUM
036          C  AST=0.      -      "      -      INTE      -      "      -
037          C  SKAL=SKALNING AV RODERUTSLAGET
038          C  LANGD=LAENGDEN AV RODRET
039          C  SCALE=SKALNING AV FARTYGETS STORLEK
040          C  XP,YP=BESTAEMMER FIGUREN AV FARTYGET
041          C  DT= VAR DT:DE SEKUND GENERERAS EN FARTYGSBILD
042          RETURN
043          C
044          C
045          3  DT=60.
046          SCALE=1.
047          IMRK=5
048          AST=1.
049          SKAL=1.
050          LANGD=50.
051          XP(1)=-158.
052          XP(2)=-158.
053          XP(3)=110.
054          XP(4)=172.
055          XP(5)=110.
056          XP(6)=-158.
057          XP(7)=-158.
058          YP(1)=0.
059          YP(2)=25.
060          YP(3)=25.
061          YP(4)=0.
062          YP(5)=-25.
063          YP(6)=-25.

```

```
064          YP(7)=0.
065          BAN=1.
066          RETURN
067          C
068          C
069          4    CALL BANA(BAN)
070          TS=T
071          RETURN
072          C
073          C
074          5    RETURN
075          C
076          C
077          6    CURS=4HDARK
078          SINP=SIN(PSI)
079          COSP=COS(PSI)
080          CALL MRK(YM, XM, IMRK, AST)
081          XP8=XP(1)-LANGD*COS(DELTA*SKAL)
082          YP8=YP(1)-LANGD*SIN(DELTA*SKAL)
083          DO 60 I=1, NPOINT
084          XX=XM+SCALE*(XP(I)*COSP-YP(I)*SINP)
085          YY=YM+SCALE*(YP(I)*COSP+XP(I)*SINP)
086          CALL PLOT1(YY, XX, CURS)
087          CURS=5HLIGHT
088          60   CONTINUE
089          XX=XM+SCALE*(XP8*COSP-YP8*SINP)
090          YY=YM+SCALE*(YP8*COSP+XP8*SINP)
091          CALL PLOT1(YY, XX, CURS)
092          TS=T+DT
093          RETURN
094          C
095          C
096          7    RETURN
097          C
098          C
099          8    RETURN
100          C
101          C
102          END
```

```

001          SUBROUTINE BANA(BAN)
002          DIMENSION XB(10),YB(10),XC(13),YC(13)
003          DATA XB/-0.5,0.,1.,2.5,2.5,3.5,3.5,1.,1.,1.5/
004          DATA YB/0.5,1.5,3.,3.,1.,1.5,0.,0.,1.,2./
005          DATA XC/0.,3.,4.,6.,3.,3.,1.,3.,4.,4.,3.,1.5,1.5/
006          DATA YC/1.5,4.5,4.5,0.5,-0.5,0.5,1.5,4.,2.5,0.5,
007          *1.5,0.5,1.5/
008          IF(BAN.LT.0.5)GOTO 100
009          IF(BAN.LT.1.5)GOTO 50
010          CURS=4HDARK
011          DO 10 I=1,4
012          X=XC(I)*900.
013          Y=YC(I)*900.
014          CALL PLOT(X,Y,CURS)
015          10  CURS=5HLIGHT
016          CURS=4HDARK
017          DO 20 I=5,6
018          X=XC(I)*900.
019          Y=YC(I)*900.
020          CALL PLOT(X,Y,CURS)
021          20  CURS=5HLIGHT
022          CURS=4HDARK
023          DO 30 I=7,13
024          X=XC(I)*900.
025          Y=YC(I)*900.
026          CALL PLOT(X,Y,CURS)
027          30  CURS=5HLIGHT
028          RETURN
029          50  CONTINUE
030          CURS=4HDARK
031          DO 60 I=1,5
032          X=XB(I)*1000.
033          Y=YB(I)*1000.
034          CALL PLOT(X,Y,CURS)
035          60  CURS=5HLIGHT
036          CURS=4HDARK
037          DO 70 I=6,10
038          X=XB(I)*1000.
039          Y=YB(I)*1000.
040          CALL PLOT(X,Y,CURS)
041          70  CURS=5HLIGHT
042          100 CONTINUE
043          RETURN
044          END

```



```

001      SUBROUTINE ANIN
002      C
003      C      DISCRETE SYSTEM TO BE INCLUDED IN SIMNON THAT
004      C      READS ANALOG INPUT SIGNALS AND SYNCHRONIZES THE SIMULATION
005      C      TIME WITH REAL TIME.
006      C
007      C      THE NAMES OF THE OUTPUT VARIABLES ARE Y1,Y2,...
008      C      THE SAMPLING PERIOD IS DETERMINED BY THE PARAMETER DT.
009      C      THE SYNCHRONIZATION IS MADE SO THAT REAL TIME
010      C      IS EQUAL TO A PARAMETER 'SCALE' TIMES THE
011      C      SIMULATION TIME.
012      C
013      C      CHANNEL NUMBERS ARE READ FROM THE TELETYPE DURING IPART=2
014      C
015      C      AUTHOR  HILDING ELMQVIST  MARCH 1974
016      C
017      C      SUBROUTINE REQUIRED
018      C          IDENT,...
019      C          TIME10
020      C          AIRDW
021      C          AOW
022      C
023      C
024      C      LOGICAL NODISC
025      C      DIMENSION BUFF(16),Y(5),INP(5)
026      C      COMMON /TIME/ T
027      C      COMMON /SAVE/ NY,MPX(5)
028      C      COMMON /DESTIN/ IIDUM,IPART
029      C      COMMON /USER/ IDUM(3),NODISC
030      C
031      C      GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8),IPART
032      C
033      1  CALL IDENT('DISCR','ANIN')
034      C      RETURN
035      C
036      C      READ ANALOG INPUT CHANNEL NUMBERS
037      2  WRITE(9,910)
038      910 FORMAT(1X,'  ENTER ANALOG INPUT CHANNELS')
039      C
040      210 CALL RLINE(9,8,BUFF,2)
041      C      I=1
042      C      NY=0
043      220 CALL RIFF(I,DUM,ICHAN,IND)
044      C      IF(IND.EQ.7) GO TO 260
045      C      IF(IND.NE.3) GO TO 240
046      C      IF(ICHAN.LT.0 .OR. ICHAN.GT.15) GO TO 240
047      C      IF(NY.GT.5) GO TO 240
048      C
049      C      NY=NY+1
050      C      MPX(NY)=ICHAN
051      C      GO TO 220
052      C
053      240 WRITE(9,920)
054      920 FORMAT(1X,'  ?')
055      C      GO TO 210
056      C
057      260 CALL OUTPUV(Y,NY,'Y')
058      C      CALL INPUT(RM,'RM')
059      C      CALL INPUT(U,'U')
060      C      CALL PAR(DT,'DT')
061      C      CALL INPUT(PSIM,'PSIM')
062      C      CALL PAR(SCALE,'SCALE')
063      C      CALL TSAMP(TS,'TS')

```

```

064          RETURN
065      C
066          3      DT=1.
067          SCALE=1.
068          RETURN
069      C
070          4      TS=T
071          IMIN=0
072          ISEC=0
073          ISEC10=0
074          RTSAVE=0.
075          TSTART=T
076          Y1OLD=0.
077          Y2OLD=0.
078          RETURN
079      C
080      C          SYNCHRONIZE WITH REAL TIME
081          5      SCT=SCALE*(T-TSTART)
082          IOFF=1
083          RT=IMIN*60.+ISEC+ISEC10*0.1+RTSAVE
084          RTSAVE=RT
085          IOFF=0
086          CALL TIME10(IMIN,ISEC,ISEC10,IOFF)
087      C
088          510     IF(RT.GE.SCT) GO TO 530
089      C
090      C          WAIT
091          IOLD10=ISEC10
092          520     IF(ISEC10.EQ.IOLD10) GO TO 520
093          RT=RT+0.1
094          GO TO 510
095      C
096      C          READ ANALOG INPUT CHANNELS
097          530     TS=T+DT
098          CALL AIRDW(NY,MPX(1),INP(1),IERR)
099          DO 540 J=1,NY
100          540     Y(J)=INP(J)*0.01953125
101          IF(ABS(Y1-Y1OLD).LE.1.E-3)10,10,30
102          10     IF(ABS(Y2-Y2OLD).LE.1.E-3)20,20,30
103          20     NODISC=,TRUE.
104          30     Y1OLD=Y1
105          Y2OLD=Y2
106      C
107      C          COMPUTE LAG AND WRITE IT ON D/A CHANNEL 0
108      C          WRITE YAW RATE (RM) ON D/A CHANNEL 1
109      C          WRITE FORWARD SPEED (U) ON D/A CHANNEL 2
110      C          WRITE COURSE (PSIM) ON D/A CHANNEL 3
111          TDEL=RT-SCT
112          ITDEL=TDEL*51.2
113          IRM=256.+RM*512./1.5
114          IUM=U*51.2
115          PSIV=PSIM
116          550     DP=ABS(PSIV)-180.
117          IF(DP.LE.0.)GOTO 560
118          S=PSIM/ABS(PSIM)
119          PSIV=-PSIV+2.*DP*S
120          GOTO 550
121          560     IPSIV=256.+PSIV/36.*51.2
122          CALL AOW(1,0,ITDEL,IERR)
123          CALL AOW(1,1,IRM,IERR)
124          CALL AOW(1,2,IUM,IERR)
125          CALL AOW(1,3,IPSIV,IERR)
126      C
127          RETURN

```

128	C	
129	6	RETURN
130	C	
131	7	RETURN
132	C	
133	8	RETURN
134	C	
135		END

CONTINUOUS SYSTEM LPF11

INPUT X1

OUTPUT X0

STATE X1 X2

DER DX1 DX2

INITIAL

X1:0

X2:0

T=TP/6.283185

A1=-2\*CS/T

A2=-1/(T\*T)

C2=AK/(T\*T)

OUTPUT

X0=C2\*X2

DYNAMICS

DX1=A1\*X1+A2\*X2+X1

DX2=X1

AK:1 " FILTER GAIN

TP:8 " PERIOD TIME OF PEAK FREQ.

CS:0.25 " DAMPING FACTOR

" PEAK GAIN FOR FREQ.=1/TP : AK/(2\*CS)

END

```

XJOB
A DK -5/DT1 -6
CHAIN
SIMNON]
SZ]
SIMNON,0,PLT,0BCDIO,SETNAM,SETVAR]
L1=0IINTR,0INTR,0PARINT,0COTEXT/0LOGARG]
L2=0COSYST,0EXTSYS,0COERR,0COLIST,0COTURN,0CODISP,0COPLOT,0COSIMU
,0UINIT,0ISIMN,0INTERR,0COALG,0TEST/0LOGARG]
L3=0COAXES,0COSAVE,0COGET,0COSET,0WMESS,0USRSUB/0LOGARG,0OFNEF]
LCOMP=0SIMNSY,0COEDIT/0EXTSUB,0LOGARG]
LSIM=0SIMU,0OUTP/0BINIO,0SIN]
LINT1=0HAMPC]
LINT2=0RUNKUT,0RKFIX]
LCALC=0CALCUL]
LUSER=0EXTCAL,SYSTS/EIG,NOIS1,MNODI3,ANIN,DARITE,ADREAD]
LUS1=0INPUT,0TSAMP,0PAR,0INPUTV,0OUTPUV,0PARV,0IDENT,0CRENAM,0OUTPUT]
LUS2=BANA/PLOT]
LUS3=0DESYM,0NORM]
LUS4=PLOT1,MRK]
L1:L2:L3:LCOMP:LSIM,LINT1,LCALC,LUSER,LUS1]
LINT1:LINT2]
LUS1:LUS2:LUS3:LUS4]
]
XJOB
A DT1 -14
ABS
SIMNON
XJOB
PIP
T DKEDT1 SIMNON XCT (B)]
XEXIT

```

```

001          SUBROUTINE SYSTS
002          C
003          C          SERVES A LINK BETWEEN SIMNON AND USER SUBROUTINE.
004          C
005          C          AUTHOR  HILDING ELMQVIST  1974-02-05
006          C
007          C          CHANGE THE CONTINUE STATEMENTS TO CALLS TO
008          C          YOUR SUBROUTINES.
009          C
010          C
011          LOGICAL ISTOP,LUSER
012          COMMON /DESTIN/ ISYST
013          COMMON /USER/ ISTOP,IDUM,LUSER
014          COMMON /USRCOM/ IERR1,ISYERR
015          COMMON /SETVAR/ NIN,IDUM1,FILE1
016          :      ,NOUT,IDUM2,FILE0
017          :      ,TYPE,N,IDUM3
018          :      ,NNOI1,IDUM4,NODD,IDUM5
019          :      ,NNOI11,IDUM6,NODD1,IDUM7
020          C
021          C
022          GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10),ISYST
023          C
024          1      CALL IFILE(NIN,FILE1,IERR)
025          GO TO 100
026          C
027          2      CALL CFILE(NOUT,FILE0,IERR)
028          GO TO 100
029          C
030          3      RETURN
031          C
032          4      CALL NOISE(NNOI1,NODD,IERR)
033          GO TO 100
034          C
035          5      CALL NOIS1(NNOI11,NODD1,IERR)
036          GO TO 100
037          C
038          6      CALL STALG
039          RETURN
040          C
041          7      CALL FIG
042          RETURN
043          C
044          8      CALL ANIN
045          RETURN
046          C
047          9      CONTINUE
048          RETURN
049          C
050          10     CONTINUE
051          RETURN
052          C
053          C
054          100   IF(IERR.EQ.0) RETURN
055          IERR1=IERR
056          ISYERR=ISYST
057          ISTOP=.TRUE.
058          LUSER=.TRUE.
059          RETURN
060          C
061          END

```

APPENDIX E

Program, använda vid simuleringar med  
PID-regulator eller adaptiv regulator

Namn	Kommentar	Sida
BOAT4	Båtmodell	E2
RTOT	Totalsystem, för simulering m. regulator	E5
REG	PID-regulator, eller anrop av STURE	E8
STURE	Adaptiv regulator	E12
LOSS	Beräknar förlustfunktion samt medelvärde och varians	E15

## CONTINUOUS SYSTEM BOAT4

STATE DELTA V R PSI X Y

```
" DELTA=RODERVINKEL           [RAD]
" V      =TRANSVERSELL HASTIGHET [M/S]
" R      =GIRVINKELHASTIGHET    [RAD/(S*100)]
" PSI    =KURS                   [RAD]
" X      =X-KOORDINAT           [M*1000]
" Y      =Y-KOORDINAT           [M*1000]
```

DER DDELTA DV DR DPSI DX DY

INPUT DELTS KAPPA W1 W2

```
" DELTS=RODERVINKEL;ONSKAD     [GRAD]
" KAPPA=RELATIVT ANGINSLAEP TILL TURBIN -0.5<KAPPA<1.0 [1]
" W1    =FILTRERAT BRUS
" W2    =FILTRERAT BRUS
```

OUTPUT DELM V1 V2 VM RM PSIM XM YM

```
" DELM=RODERVINKEL                [GRAD]
" V1  =TRANSVERSELL HASTIGHET;F0R [KNOP]
" V2  =TRANSVERSELL HASTIGHET;AKTER [KNOP]
" VM  =TRANSVERSELL HASTIGHET;MASSCENTRUM [KNOP]
" RM  =GIRVINKELHASTIGHET         [GRAD/S]
" PSIM=KURS                        [GRAD]
" XM  =X-KOORDINAT                [M]
" YM  =Y-KOORDINAT                [M]
```

INITIAL

```
DELTA:0
V      :0
R      :0
PSI    :0
X      :0
Y      :0
F1     =(20.-TT)/9.5
F2     =(TT-10.5)/9.5
CDV    =YVD10*F1+YVD20*F2
YUVP   =YUV10*F1+YUV20*F2
YUVM   =YUR10*F1+YUR20*F2
YVVP   =YVV10*F1+YVV20*F2
IZN    =NRD10*F1+NRD20*F2
NUVP   =NUV10*F1+NUV20*F2
NURM   =NUR10*F1+NUR20*F2
NVRP   =NVR10*F1+NVR20*F2
TS1    =1/TS
TS2    =TS1/CRG
LIM1   =DELIM/CRG
G1S    =G1/L
G3S    =G3*L
NSIGN  =SIGN(1.,N)
N2     =N*N
U2     =U*U
TPM    =G1S*U2+G2*U*N+G3S*NSIGN*N2
CGA    =C1*U2+C2*NSIGN*U2+C3*U*N+C4*N2
A11    =CDV
A12    =MXY*L
A21    =MXN/L
A22    =IZN
DET1   =1/(A11*A22-A12*A21)
CUV    =YUVP/L
CUR    =YUVM
```



CV2=YVVP/L  
 CYC=YCCDP/L  
 CN2=YNNP\*L  
 C2UV=NUVP/(L\*L)  
 C2UR=NURM/L  
 C2VR=NVRP/L  
 C2CD=NCDP/(L\*L)  
 C2TP=KTNP/L  
 CSIN=LV/(L\*L)  
 FV1=CMK\*L1  
 FV2=-CMK\*L2  
 SINL=SIN(1/CRG\*ALFA)\*K  
 COSAL=COS(1/CRG\*ALFA)\*K

## OUTPUT

DELM=CRG\*DELTA  
 V1=FV1\*R/100.+CMK\*V  
 V2=FV2\*R/100.+CMK\*V  
 VM=CMK\*V  
 RM=CRG\*R/100.  
 PSIM=CRG\*PSI  
 XM=X\*1000.  
 YM=Y\*1000.

## DYNAMICS

SINP=SIN(PSI)  
 COSP=COS(PSI)  
 RR=R/100.  
 DDEL1=-TS1\*DELTA+TS2\*DELTS  
 DDEL1=IF DDEL1<-LIM1 THEN -LIM1 ELSE IF DDEL1>LIM1 THEN LIM1 ELSE DDEL1  
 KSIN=SINAL\*COSP-COSAL\*SINP  
 B0=CUV\*U\*V+CUR\*U\*RR+CV2\*V\*ABS(V)+CYC\*CCA\*DELTA+KTYP\*TPM  
 B1=B0+CN2\*N2-KSIN+W1  
 B21=C2UV\*U\*V+C2UR\*U\*RR+C2VR\*ABS(V)\*RR+C2CD\*CCA\*DELTA  
 B2=B21+C2TP\*TPM+NNP\*N2+CSIN\*KSIN+W2  
 DV=DET1\*(B1\*A22-B2\*A12)  
 DR=DET1\*(B2\*A11-B1\*A21)\*100.  
 DPSI=RR  
 DX=(U\*COSP-V\*SINP)/1000.  
 DY=(U\*SINP+V\*COSP)/1000.  
 U:8.202 "FRAMMAT HASTIGHET (M/S)  
 N:1.282 "VARVTAL (1/S)  
 G:9.80665  
 CMK:1.943844  
 CRG:57.2958  
 CDLIM:7.9  
 L:329.18 "BATENS LAENGD  
 TS:5.0 "TIDSKONSTANT FOR RODRET  
 DELIM:2.0 "BEGRAENSNING FOR RODERHASTIGHETEN  
 D1:0.70E-7  
 D2:-0.95E-7  
 D3:0.575E-4  
 D4:0.423E-6  
 D5:-0.695E-7  
 D6:-0.431E-6  
 D7:0.685E-5  
 CDU:1.050  
 XU2P:-0.0208  
 XVRP:6.0  
 XVVP:8.70  
 XC DP:-0.220  
 MLP:0.760  
 YVD10:1.67  
 YVD20:2.5

MXV:0.050  
YUV10:-1.21  
YUV20:-1.083  
YUR10:-0.525  
YUR20:-0.625  
TT:20.  
YVV10:-0.58  
YVV20:-1.06  
YCCDP:0.197  
KTYP:0.040  
YNNP:0

" DJUPGAENDE

K:0  
ALFA:135.  
MXN:0.040  
NRD10:0.100  
NRD20:0.16  
NUV10:-0.180  
NUV20:-0.329  
NUR10:-0.256  
NUR20:-0.2122  
NVR10:-0.23  
NVR20:-0.49  
NCDP:-0.092  
KTNP:-0.0000645  
NNNP:0

" VINDRIKTNING

LV:25.  
G1:-0.0226  
G2:-0.232E-3  
G3:0.234E-4  
C1:0.4225  
C2:-0.224  
C3:-0.81  
C4:29.1  
L1:148.7  
L2:131.1

" MOMENTARM FOR VINDEN

" AVSTAND FRAN MASSCENTRUM TILL FORLIG DOPPLERLOGG  
" AVSTAND FRAN MASSCENTRUM TILL AKTLIG DOPPLERLOGG

END

TOTAL SYSTEM RTOT

TIME T

$X1[LPF11]=E1[NOIS1]$

$X1[LPF12]=E2[NOIS1]$

$W1[BOAT4]=X0[LPF11]$

$W2[BOAT4]=X0[LPF12]$

$KAPPA[BOAT4]=K0$

$YS[REG]=PSIM[BOAT4]+E4[NOISE]$

$YRF[REG]=PREF$

$YSD[REG]=RM[BOAT4]+E3[NOISE]$

$DELTS[BOAT4]=US[REG]$

$UTSIG=US[REG]$

$C1[CFIL]=0$

$C2[CFIL]=0$

$C3[CFIL]=0$

$C4[CFIL]=0$

$C5[CFIL]=0$

$C6[CFIL]=T/60$

$C31[CFIL]=S1*V1[BOAT4]+PL1$

" TVÄRSHASTIGHET UTAN BRUS

$C32[CFIL]=S2*V2[BOAT4]+PL2$

" TVÄRSHASTIGHET UTAN BRUS

$C33[CFIL]=S3*VM[BOAT4]+PL3$

" TVÄRSHASTIGHET

$C34[CFIL]=S4*RM[BOAT4]+PL4$

" GIRVINKELHASTIGHET UTAN BRUS

$C35[CFIL]=S5*PSIM[BOAT4]+PL5$

" KURS UTAN BRUS

$C36[CFIL]=S6*DELM[BOAT4]+PL6$

" RODERVINKEL

$C7[CFIL]=S1*(V1[BOAT4]+E1[NOISE])+PL1$

" TVÄRSHAST. MED BRUS

$C8[CFIL]=S2*(V2[BOAT4]+E2[NOISE])+PL2$

" TVÄRSHAST. MED BRUS

$C9[CFIL]=S4*(RM[BOAT4]+E3[NOISE])+PL4$

" GIRVINKELHAST. MED BRUS

$C10[CFIL]=S5*(PSIM[BOAT4]+E4[NOISE])+PL5$

" KURS MED BRUS

$C11[CFIL]=S11*UTSIG+PL11$

" RODERSIGNAL

$C12[CFIL]=S12*X1[REG]+PL12$

" MEDELVÄRDE FOR KURS

$C13[CFIL]=S13*X3[REG]+PL13$

" MEDELVÄRDE FOR RODERVINKEL

$C14[CFIL]=S14*X5[REG]+PL14$

" MEDELVÄRDE FOR RODERSIGNAL

$C15[CFIL]=S15*X7[REG]+PL15$

" MEDELVÄRDE FOR TVÄRSHASTIGHET

$C16[CFIL]=S16*X9[REG]+PL16$

" MEDELVÄRDE FOR TVÄRSHASTIGHET

$C17[CFIL]=S17*X11[REG]+PL17$

" MEDELVÄRDE FOR TVÄRSHASTIGHET

$C18[CFIL]=S18*X13[REG]+PL18$

" MEDELVÄRDE FOR GIRVINKELHAST.

$C19[CFIL]=S19*X2[REG]+PL19$

" STANDARDAVV. KURS

$C20[CFIL]=S20*X4[REG]+PL20$

" STANDARDAVV. RODERVINKEL

$C21[CFIL]=S21*X6[REG]+PL21$

" STANDARDAVV. RODERSIGNAL

$C22[CFIL]=S22*X8[REG]+PL22$

" STANDARDAVV. TVÄRSHASTIGHET

$C23[CFIL]=S23*X10[REG]+PL23$

" STANDARDAVV. TVÄRSHASTIGHET

$C24[CFIL]=S24*X12[REG]+PL24$

" STANDARDAVV. TVÄRSHASTIGHET

$C25[CFIL]=S25*X14[REG]+PL25$

" STANDARDAVV. GIRVINKELHAST.

$C26[CFIL]=S26*X15[REG]+PL26$

" ACKUMULERADE FORLUSTER

$C27[CFIL]=S27*X16[REG]+PL27$

" FORLUSTFUNKTION

$C28[CFIL]=S28*RF[REG]+PL28$

" FILTERAD GIRVINKELHAST.

$C29[CFIL]=S29*RB[REG]+PL29$

" BERÄKNAD GIRVINKELHAST.

$C30[CFIL]=T$

C37[CFIL]=THU1[REG]  
C38[CFIL]=THU2[REG]  
C39[CFIL]=THU3[REG]  
C40[CFIL]=THU4[REG]  
C41[CFIL]=THU5[REG]  
C42[CFIL]=THU6[REG]  
C43[CFIL]=THU7[REG]  
C44[CFIL]=THU8[REG]  
C45[CFIL]=THU9[REG]  
C46[CFIL]=THU10[REG]  
C47[CFIL]=THU11[REG]  
C48[CFIL]=THU12[REG]

U1[REG]=PSIM[BOAT4]  
U2[REG]=PREF  
U3[REG]=DELM[BOAT4]  
U4[REG]=UTSIG  
U5[REG]=V1[BOAT4]  
U6[REG]=V2[BOAT4]  
U7[REG]=VM[BOAT4]  
U8[REG]=RM[BOAT4]

K0:0.8  
PREF:0.  
S1:5.  
PL1:-2.  
S2:5.  
PL2:-4.  
S3:5.  
PL3:5.5  
S4:10.  
PL4:4.  
S5:1.  
PL5:0.  
S6:0.2  
PL6:-3,  
S11:0.2  
PL11:-3.  
S12:1.  
PL12:0.  
S13:5.  
PL13:-3.  
S14:5.  
PL14:-3.  
S15:10.  
PL15:7.  
S16:10.  
PL16:5.  
S17:10,  
PL17:7.  
S18:10.  
PL18:3.  
S19:1.  
PL19:0.  
S20:5.  
PL20:-3.  
S21:5.  
PL21:-3.  
S22:10.  
PL22:7.  
S23:10,  
PL23:5.  
S24:10.  
PL24:7.

S25:10.  
PL25:3.  
S26:0.02  
PL26:0.  
S27:1.  
PL27:0.  
S28:10.  
PL28:3.  
S29:10.  
PL29:2.

END

```

001          SUBROUTINE REG
002          C
003          C
004          REAL KI,K1,K2,K3,LAMB
005          DIMENSION DAT(45),TH(12),THU(12),P(78),DUM(12)
006          DIMENSION X(16),U(8),H(14)
007          COMMON /TIME/ T
008          COMMON /DESTIN/IDUM, IPART
009          COMMON /XUHL/ X,U,H,LAMB
010          GOTO(1,2,3,4,5,6,7,8),IPART
011          C
012          1  CALL IDENT('DISCR','REG')
013          RETURN
014          C
015          2  CALL INPUTV(U,8,'U')
016          CALL OUTPUT(RFOLD,'RF')
017          CALL OUTPUT(RPSI,'RB')
018          CALL INPUT(YS,'YS')
019          CALL INPUT(YSD,'YSD')
020          CALL INPUT(YRF,'YRF')
021          CALL OUTPUV(X,16,'X')
022          CALL OUTPUT(US,'US')
023          CALL TSAMP(TS,'TS')
024          CALL VARV(H,14,'H')
025          CALL PAR(DT,'DT')
026          CALL PAR(K1,'K1')
027          CALL PAR(K2,'K2')
028          CALL PAR(K3,'K3')
029          CALL PAR(USL,'USL')
030          CALL PAR(B,'B')
031          CALL PAR(FIL,'FIL')
032          CALL PAR(TYP,'TYP')
033          CALL PAR(LAMB,'LAMB')
034          CALL OUTPUV(THU,12,'THU')
035          CALL PAR(ANA,'NA')
036          CALL PAR(ANB,'NB')
037          CALL PAR(ANC,'NC')
038          CALL PAR(AK,'K')
039          CALL PAR(AIRDIF,'IRDIF')
040          CALL PAR(RL,'RL')
041          CALL PAR(B0,'B0')
042          CALL PARV(P,78,'P')
043          CALL PARV(TH,12,'TH')
044          C
045          C      DT=SAMPLE INTERVAL
046          C      K1=P-FACTOR
047          C      K2=D-FACTOR
048          C      K3=I-FACTOR
049          C      USL=UTSIGNALBEGRÄNSNING
050          C      1-B=FORGETTING FACTOR WHEN COMPUTING MOVING AVERAGE
051          C      FIL=1  RM FILTRERAS INTE
052          C      FIL=2  RM FILTRERAS SOM GLIDANDE MEDELVÄRDE MED
053          C              GLÖMSKEFAKTOR 1-B
054          C      FIL=3  RM BERÄKNAS GENOM DERIVATION AV PSIM
055          C      LAMB=KOEFFICIENT I FORLUSTFUNKTIONEN
056          C      TYP=1  PIDREG
057          C      TYP=2  STURE
058          C      THU  =VEKTOR INNEHÄLLANDE NYA PARAMETER ESTIMAT
059          C      TH   =VEKTOR INNEHÄLLANDE INITIAL PARAMETRAR
060          C      NA   =ANTAL A-PARAMETRAR
061          C      NB   =ANTAL B-PARAMETRAR
062          C      NC   =ANTAL C-PARAMETRAR
063          C      K    =NUMBER OF TIME DELAYS

```

```

064 C IRDIF=0 FEED FORWARD IS RM(T)
065 C IRDIF=1 FEED FORWARD IS RM(T)-RM(T-1)
066 C RL =EXPONENTIAL FORGETTING FACTOR
067 C B0 =SKALFAKTOR I STURE-REGULATORN
068 C P =KOVARIANSMATRISEN VID MINSTA-KVADRAT IDENTIFIERING
069 RETURN
070 C
071 3 DT=15.
072 K1=1.5
073 K2=80.
074 K3=0.003125
075 USL=45.
076 B=0.7
077 FIL=1.
078 TYP=2.
079 ANA=3.
080 ANB=2.
081 ANC=3.
082 AK=2.
083 AIRDIF=0.
084 RL=0.99
085 B0=-1.
086 C
087 DO 302 I=1,12
088 302 TH(I)=0.
089 C
090 DO 304 I=1,78
091 304 P(I)=0.
092 C
093 DO 306 I=1,8
094 L=I*(I-1)/2+1
095 306 P(L)=100.
096 RETURN
097 C
098 4 TS=T
099 C
100 IFIL=FIL+0.1
101 ITYP=TYP+0.1
102 AN=0.
103 ICON=1
104 RIOLD=0.
105 RFOLD=0.
106 S1OLD=1.-B
107 YSOLD=0.
108 YSDOLD=0.
109 USOLD=0.
110 US=0.
111 K1=K3*DT
112 DO 40 I=1,14
113 40 H(I)=0.
114 NA=ANA+0.1
115 NB=ANB+0.1
116 NC=ANC+0.1
117 K=AK+0.1
118 IRDIF=AIRDIF+0.1
119 DO 402 I=1,45
120 402 DAT(I)=0.
121 NAB=NA+NB
122 NP=NAB+NC
123 K11=K+1
124 NDAT=NP+3*K+3
125 NDAT1=NDAT+1
126 NU1=NA+K+2
127 N1=NU1+K

```

```

128      NN=NAB+2*K+3
129      RETURN
130  C
131  5      IF(ICON)500,502,500
132  500      ICON=0
133          DO 501 I=1,16
134  501      X(I)=0.
135          RFOLD=0.
136          RPSI=0.
137          GOTO 580
138  C
139  502      AN=AN+1.
140          GOTO(505,560),ITYP
141  C
142  C      P I D-REGULATOR
143  C
144  505      ERR=YS-YRF
145          RIN=RIOLD+KI*ERR
146          RPSI=(YS-YSOLD)/DT
147          GOTO(510,520,530),IFIL
148  510      USF=YSD
149          GOTO 540
150  520      IF(T.GT.1)S1OLD=(1.-B)*S1OLD/(1.-B+S1OLD)
151          RFOLD=RFOLD+(B+S1OLD)*(YSD-RFOLD)
152          USF=RFOLD
153          GOTO 540
154  530      USF=RPSI
155  540      US1=K1*ERR+K2*USF+RIN
156          IF(US1.GT.USL.OR.US1.LT.-USL)GOTO 545
157          US=US1
158          GOTO 550
159  545      US=SIGN(1.,US1)*USL
160  550      RIOLD=RIN
161          YSOLD=YS
162          CALL LOSS(AN)
163          GOTO 599
164  C
165  C      SELF TUNING REGULATOR
166  C
167  560      DAT(1)=YS
168          IF(NC)568,568,561
169  561      RPSI=(YS-YSOLD)/DT
170          GOTO(562,563,564),IFIL
171  562      USF=YSD
172          GOTO 565
173  563      IF(T.GT.1)S1OLD=(1.-B)*S1OLD/(1.-B+S1OLD)
174          RFOLD=RFOLD+(B+S1OLD)*(YSD-RFOLD)
175          USF=RFOLD
176          GOTO 565
177  564      USF=RPSI
178  565      IF(IRDIF)567,567,566
179  566      DAT(NN)=USF-YSDOLD
180          YSDOLD=USF
181          GOTO 568
182  567      DAT(NN)=USF
183  568      CALL STURE(DAT,TH,P,DUM,RL,NA,NAB,NP,K11,NDAT,NDAT1,NU1,N1)
184          US1=DAT(NU1)/B0+US
185          USOLD=US
186          IF(ABS(US1)-USL)570,570,569
187  569      US1=SIGN(1.,US1)*USL
188          DAT(NU1)=(US1-USOLD)*B0
189  570      US=US1
190          YSOLD=YS
191          CALL LOSS(AN)

```



```
192     580     DO 581 I=1,12
193     581     THU(I)=TH(I)
194     599     RETURN
195         6     TS=T+DT
196         RETURN
197     C
198         7     CONTINUE
199         RETURN
200     C
201         8     CONTINUE
202         RETURN
203     C
204         END
```

```
192      580      DO 581 I=1,12
193      581      THU(I)=TH(I)
194      599      RETURN
195      6        TS=T+DT
196      RETURN
197      C
198      7        CONTINUE
199      RETURN
200      C
201      8        CONTINUE
202      RETURN
203      C
204      END
```

```

001 SUBROUTINE STURE(DAT,TH,P,DUM,RL,NA,NAB,NP,K1,NDAT,NDAT1,NU1,N1)
002 C
003 C SELF TUNING REGULATOR BASED ON LEAST SQUARES IDENTIFICATION
004 C AND MINIMUM VARIANCE CONTROL, ADMITS FEEDFORWARD AND
005 C EXPLOITS SYMMETRY OF P.
006 C
007 C AUTHOR, C.KALLSTROM 1974-07-04.
008 C
009 C THE ALGORITHM IS BASED ON THE MODEL
010 C
011 C  $Y(T)+A(1)*Y(T-K-1)+\dots+A(NA)*Y(T-K-NA)=$ 
012 C  $B0*(U(T-K-1)+B(1)*U(T-K-2)+\dots+B(NB)*U(T-K-NB-1))+$ 
013 C  $C(1)*V(T-K-1)+C(2)*V(T-K-2)+\dots+C(NC)*V(T-K-NC)+EPS(T)$ 
014 C
015 C AT EACH STEP THE LEAST SQUARES ESTIMATES OF THE PARAMETERS
016 C OF THE MODEL ARE COMPUTED. THE CONTROL VARIABLE U(T) TO
017 C BE APPLIED AT TIME T IS THEN COMPUTED FROM
018 C
019 C  $US(T)= AE(1)*Y(T)+\dots+AE(NA)*Y(T-NA+1)$ 
020 C  $-BE(1)*US(T-1)-\dots-BE(NB)*US(T-NB)$ 
021 C  $-CE(1)*V(T)-\dots-CE(NC)*V(T-NC+1)$ 
022 C
023 C WHERE AE,BE AND CE ARE THE PARAMETER ESTIMATES
024 C AND US THE SCALED CONTROL SIGNAL I.E.  $US=B0*U$ 
025 C
026 C WHEN USING THE ALGORITHM THE PROCESS OUTPUT Y(T) AND THE
027 C FEEDFORWARD SIGNAL V(T) ARE READ AT TIME T AND THE CONTROL
028 C SIGNAL U(T) TO BE APPLIED AT TIME T IS THEN COMPUTED
029 C
030 C DAT- VECTOR OF DIMENSION  $NA+NB+NC+3*K+3$  CONTAINING
031 C PROCESS OUTPUTS Y, SCALED CONTROL VARIABLES U
032 C AND FEED FORWARD SIGNALS V ORGANIZED AS FOLLOWS
033 C DAT(1)=Y(T) RETURNED AS Y(T)
034 C DAT(2)=Y(T-1) RETURNED AS Y(T)
035 C DAT(3)=Y(T-2) RETURNED AS Y(T-1)
036 C
037 C DAT(NA+K+1)=Y(T-K-NA) RETURNED AS Y(T-K-NA+1)
038 C DAT(NA+K+2)=US(T-1) RETURNED AS US(T)
039 C DAT(NA+K+3)=US(T-2) RETURNED AS US(T-1)
040 C
041 C DAT(NA+NB+2*K+2)=US(T-K-NB-1) RETURNED AS US(T-K-NB)
042 C DAT(NA+NB+2*K+3)=V(T) RETURNED AS US(T-K-NB-1)
043 C DAT(NA+NB+2*K+4)=V(T-1) RETURNED AS V(T)
044 C
045 C DAT(NA+NB+NC+3*K+3)=V(T-K-NC) RETURNED AS V(T-K-NC+1)
046 C
047 C
048 C TH- VECTOR OF DIMENSION  $NP=NA+NB+NC$  CONTAINING THE PARAMETER
049 C ESTIMATES ORGANIZED AS FOLLOWS
050 C TH(1)=-AE(1)
051 C TH(2)=-AE(2)
052 C
053 C TH(NA)=-AE(NA)
054 C TH(NA+1)=BE(1)
055 C TH(NA+2)=BE(2)
056 C
057 C TH(NA+NB)=BE(NB)
058 C TH(NA+NB+1)=CE(1)
059 C TH(NA+NB+2)=CE(2)
060 C
061 C TH(NA+NB+NC)=CE(NC)
062 C
063 C

```

```

064 C      P- COVARIANCE MATRIX STORED AS FOLLOWS
065 C      P(1)=P(1,1)
066 C      P(2)=P(2,1)
067 C      P(3)=P(2,2)
068 C      .
069 C      P(I*(I-1)/2+J)=P(I,J)
070 C      .
071 C      P(NP*(NP+1)/2)=P(NP,NP)
072 C
073 C
074 C      DUM- DUMMY VECTOR OF DIMENSION NP
075 C      RL- BASE OF EXPONENTIAL WEIGHTING FACTOR
076 C      NA- NUMBER OF A-PARAMETERS (MAX 12, MIN 0)
077 C      NB- NUMBER OF B-PARAMETERS (MAX 12, MIN 0)
078 C      NC- NUMBER OF C-PARAMETERS (MAX 12, MIN 0)
079 C      K -NUMBER OF TIME DELAYS IN THE MODEL (MAX (42-NA-NB-NC)/3,
080 C      MIN 0)
081 C      NAB- NA+NB
082 C      NP- NA+NB+NC (MAX 12, MIN 1)
083 C      K1- K+1
084 C      NDAT- NP+3*K+3
085 C      NDAT1- NDAT+1
086 C      NU1- NA+K+2
087 C      N1- NU1+K
088 C
089 C      SUBROUTINE REQUIRED
090 C      NONE
091 C
092 C      DIMENSION DAT(45),TH(12),P(78),DUM(12)
093 C
094 C      RES=DAT(1)-DAT(N1)
095 C      DENOM=1.
096 C      DO 12 I=1,NP
097 C      R=0.
098 C      DO 10 J=1,NP
099 C      L=I*(I-1)/2+J
100 C      IF (J.GT.I) L=J*(J-1)/2+I
101 C      M=K1+J
102 C      IF (J.GT.NA) M=M+K1
103 C      IF (J.GT.NAB) M=M+K1
104 C      10 R=R+P(L)*DAT(M)
105 C      DUM(I)=R
106 C      M=K1+I
107 C      IF (I.GT.NA) M=M+K1
108 C      IF (I.GT.NAB) M=M+K1
109 C      DENOM=DENOM+R*DAT(M)
110 C      12 RES=RES-DAT(M)*TH(I)
111 C
112 C      DO 20 I=1,NP
113 C      R=DUM(I)/DENOM
114 C      TH(I)=TH(I)+R*RES
115 C      DO 20 J=1,I
116 C      L=I*(I-1)/2+J
117 C      20 P(L)=(P(L)-R*DUM(J))/RL
118 C
119 C      R=0.
120 C      DO 30 I=1,NP
121 C      L=I
122 C      IF (I.GT.NA) L=L+K1
123 C      IF (I.GT.NAB) L=L+K1
124 C      30 R=R-TH(I)*DAT(L)
125 C
126 C      DO 32 I=2,NDAT
127 C      L=NDAT1-I

```

```
128 32 DAT(L+1)=DAT(L)
129 DAT(NU1)=R
130 C
131 RETURN
132 END
```

```
001      SUBROUTINE LOSS(AN)
002      C
003      C
004      REAL LAMB
005      DIMENSION X(16),U(8),H(14)
006      COMMON /XUHL/ X,U,H,LAMB
007      C
008      LAMB=1./8.
009      K=3
010      H(1)=H(1)+U(1)-U(2)
011      X(1)=H(1)/AN
012      H(2)=H(2)+(U(1)-U(2))*(U(1)-U(2))
013      IF(AN.GT.1.5)X(2)=SQRT((H(2)-AN*X(1)*X(1))/(AN-1.))
014      C
015      DO 20 I=3,8
016      H(K)=H(K)+U(I)
017      X(K)=H(K)/AN
018      H(K+1)=H(K+1)+U(I)*U(I)
019      IF(AN.GT.1.5)X(K+1)=SQRT((H(K+1)-AN*X(K)*X(K))/(AN-1.))
020      20 K=K+2
021      C
022      X(15)=H(2)+LAMB*H(4)
023      X(16)=X(15)/AN
024      C
025      RETURN
026      C
027      END
```