Simulering av adaptiv fartygsstyrning med Kalmanfilter

Aspernäs, Bertil; Källström, Claes

1975

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Aspernäs, B., & Källström, C. (1975). *Simulering av adaptiv fartygsstyrning med Kalmanfilter*. (Research Reports TFRT-3123). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
2

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

3123

SIMULERING AV ADAPTIV FARTYGSSTYRNING MED KALMANFILTER.

B. ASPERNÄS
C. KÄLLSTRÖM

Rapport 7517(C) Juni 1975
Inst. för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

SIMULERING AV ADAPTIV FARTYGSSTYRNING MED KALMANFILTER

Bertil Aspernäs   Claes Källström

Detta arbete har utförts med stöd från Styrelsen för Teknisk Utveckling (diarienr. 734187).

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sida
1.	Inledning	1
2.	Design av Kalman-filter	2
3.	Simulering av Kalman-filter	8
4.	Simulering av styrning med Kalman-filter	29
5.	Slutsatser	63
6.	Referenser	64

APPENDIX - Programlistningar

1. INLEDNING.

Ett antal simuleringar av adaptiv fartygsstyrning med Kalman-filter presenteras i denna rapport. Simuleringarna är utförda med hjälp av det interaktiva programpaketet SIMNON (se Elmqvist (1975)). Den fartygsmodell som simuleras efterliknar en Kockums-byggd 255 000 dwt tankbåt. Modellen finns utförligt beskriven i Aspernäs och Foisack (1975), där också ett flertal simuleringar av adaptiv styrning utan Kalman-filter visas. Några få experiment med en adaptiv autopilot i kombination med ett Kalman-filter har utförts på en verklig 255 000 dwt tankbåt. Dessa experiment finns beskrivna i Källström (1974).

Listningar av vid simuleringarna använda program finns givna i appendix.

2. DESIGN AV KALMANFILTER.

Den båtmodell som används finns beskriven i Aspernäs och Foisack (1975). Endast de linjariserade kraft- och moment-ekvationerna, inklusive ekvationen för kursen, har emellertid medtagits för att bestämma Kalman-filtret. Driftsfallet är fixerat till propellervarvtalet 77 varv/min, framåthastigheten 16 knop och djupgåendet 20 meter. Den linjära båtmodellen, med kraft- och momentstörningar från vind och vågor införda som extra tillstånd, blir då med normalisering enl. "bis"-systemet:

$$
\begin{pmatrix}
(1-Y''_{\dot{v}}) & (x''_G-Y''_{\dot{r}})L & 0 & 0 & 0 \\
(x''_G-N''_{\dot{v}})\frac{1}{L} & (k''_{zz}-N''_{\dot{r}}) & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} dv \\ dr \\ d\psi \\ dF \\ dM \end{pmatrix} =
$$

$$
= \begin{pmatrix}
Y''_{uv}\frac{1}{L}u & (Y''_{ur}-1)u & 0 & 1 & 0 \\
N''_{uv}\frac{1}{L^2}u & (N''_{ur}-x''_G)\frac{1}{L}u & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} v \\ r \\ \psi \\ F \\ M \end{pmatrix} dt +
$$

$$
+ \begin{pmatrix}
Y''_{c|c|\delta}\frac{1}{L}c|c| \\
N''_{c|c|\delta}\frac{1}{L^2}c|c| \\
0 \\
0 \\
0
\end{pmatrix} \delta_s dt +
\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ dw'_1 \\ dw'_2 \end{pmatrix} \qquad (2.1)
$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ r_m \\ \psi_m \end{bmatrix}(t_k) = \begin{bmatrix} CMK & CMK\cdot\ell_1 & 0 & 0 & 0 \\ CMK & -CMK\cdot\ell_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & CRG & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & CRG & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ F \\ M \end{bmatrix}(t_k) + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix}(t_k)$$

$t_k = kT_s$, $k = 0, 1, 2, \ldots$

Insignal:

roderservoläge	δ_s	[rad]

Tillstånd:

tvärhastighet	v	[m/s]
girvinkelhastighet	r	[rad/s]
kurs	ψ	[rad]
kraft per massenhet	F	[m/s^2]
moment per massenhet	M	[rad/s^2]

Mätsignaler:

tvärhastighet i fören	v_1	[knop]
tvärhastighet i aktern	v_2	[knop]
girvinkelhastighet	r_m	[gr/s]
kurs	ψ_m	[gr]

Följande parametervärden används:

$$1 - Y''_{\dot{v}} = 2,5$$

$$x''_G - Y''_{\dot{r}} = 0,050$$

$$Y''_{uv} = -1,083$$

$$Y''_{ur} - 1 = -0,625$$

$$Y''_{c|c|\delta} = 0,197$$

$$x''_G - N''_{\dot{v}} = 0,040$$

$$k''_{zz} - N''_{\dot{r}} = 0,16$$

N''_{uv}	=	-0,329	
$N''_{ur} - x''_G$	=	0,2122	
$N''_{c\|c\|\delta}$	=	-0,092	
L	=	329,18	m
ℓ_1	=	148,7	m
ℓ_2	=	131,1	m
u	=	8,23	m/s
c	=	8,23	m/s
CMK	=	1,9438	knop·s/m
CRG	=	57,2958	gr
T_s	=	1	s

Det förutsätts att $\{w'(t),\ 0 \le t \le \infty\}$ är en Wiener-process, med inkrementell kovariansmatris R_1dt, vilken är oberoende av initialtillståndet och av mätfelen. Mätfelen $\{e(t_k)\}$ antages vara oberoende och normalfördelade med medelvärde noll och kovariansmatris R_e.

Det bör påpekas att det processbrus som används i den simulerade båten är färgat och dessutom infört på ett något annorlunda sätt än vad som förutsätts i modellen (2.1). Dessutom är den simulerade båtmodellen olinjär. Se vidare Aspernäs och Foisack (1975).

Systemet skrives nu på standardform

$$\begin{cases} dx = Axdt + Budt + dw' \\ y(t_k) = Cx(t_k) + e(t_k) \end{cases} \tag{2.2}$$

där matriserna har följande numeriska värden:

$$A = \begin{bmatrix} -0{,}00985 & -1{,}85 & 0 & 0{,}402 & -41{,}4 \\ -0{,}000149 & -0{,}0318 & 0 & -0{,}000305 & 6{,}28 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0{,}0146 \\ -0{,}000291 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1{,}94 & 289 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}94 & -255 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 57{,}3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57{,}3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Systemen (2,2) och (2,3) samplas med samplingsintervallet 1s och det förutsätts då att insignalen u är konstant över samplingsintervallet:

$$\begin{cases} x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma u(t) + w(t) \\ y(t) = Cx(t) + e(t) \end{cases} \qquad (2.4)$$

där

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0{,}990 & -1{,}81 & 0 & 0{,}400 & -46{,}9 \\ -0{,}000146 & 0{,}969 & 0 & -0{,}000330 & 6{,}19 \\ -0{,}0000733 & 0{,}984 & 1 & -0{,}000161 & 3{,}11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(2.5)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0{,}0148 \\ -0{,}000288 \\ -0{,}000144 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

och där C ges av (2.3).

Kovariansmatrisen för mätbruset R_e väljs till

$$R_e = \begin{bmatrix} 0{,}0025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0025 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}0025 \end{bmatrix}$$

Problemet är nu att välja lämplig kovariansmatris för tillståndsbruset R_w. Efter att ha simulerat några olika Kalmanfilter designade med olika R_w valdes

$$R_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-13} \end{bmatrix}$$

Tillståndsbruset och mätbruset antages vara okorrelerade, vilket medför att $R_{we} = 0$.

Kalman-filtret får följande utseende (se Åström (1970)):

$$\begin{cases} \hat{x}(t|t-1) = \Phi\hat{x}(t-1|t-1) + \Gamma u(t-1) \\ \hat{x}(t|t) = \hat{x}(t|t-1) + K\varepsilon(t) \\ y(t) = C\hat{x}(t|t-1) + \varepsilon(t) \end{cases} \tag{2.6}$$

där $\hat{x}(t|t-1)$ betecknar estimatet av x vid tidpunkten t baserat på data upp till och med tidpunkten t-1. Φ, Γ och C är samma matriser som i (2.4) och deras numeriska värden finns i (2.3) och (2.5). Filterförstärkningen K beräknas m.h.a. SYNPAC till

$$K = 10^{-3}\begin{bmatrix} -1{,}34 & 4{,}54 & -3{,}87 & -4{,}79 \\ 0{,}174 & -0{,}193 & 0{,}242 & 0{,}182 \\ 0{,}756 & -0{,}972 & 1{,}14 & 2{,}04 \\ 0{,}0440 & 0{,}0449 & -0{,}000593 & 0{,}00447 \\ 0{,}00350 & -0{,}00361 & 0{,}00468 & 0{,}00211 \end{bmatrix}$$

Listning av programmet som utför Kalman-filtreringen enl. (2.6) finns i appendix.

3. SIMULERING AV KALMANFILTER.

Den fartygsmodell som simuleras finns beskriven i Aspernäs och Foisack (1975). Driftfallet är i fortsättningen alltid fixerat till propellervarvtalet 77 varv/min och framåthastigheten 16 knop. Vindriktningen visas i fig. 3.1.

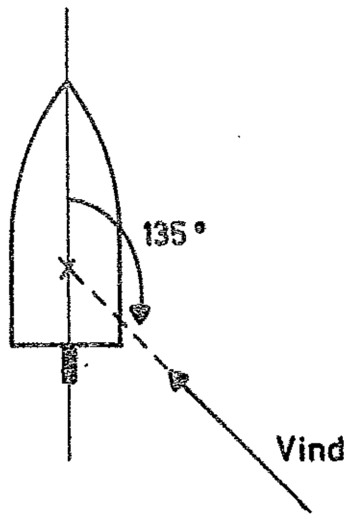


Fig. 3.1 - Vindriktningen under simuleringarna.

Medelvärden F_0 och M_0 för kraft och moment från vind och vågor för två fall finns givna i tabell 3.1.

	F_0		M_0	
	m/s^2	knop/s	rad/s^2	gr/s^2
Svag vind (6 - 9 m/s)	$-1{,}19\ 10^{-3}$	$-2{,}31\ 10^{-3}$	$3{,}25\ 10^{-7}$	$1{,}86\ 10^{-5}$
Hård vind (16 - 19 m/s)	$-2{,}60\ 10^{-3}$	$-5{,}06\ 10^{-3}$	$6{,}51\ 10^{-7}$	$3{,}73\ 10^{-5}$

Tabell 3.1 - Medelvärden F_0 och M_0 för kraft och moment från vind och vågor för två vindförhållanden.

Vid simuleringarna överlagras medelvärdena F_0 och M_0 med färgat brus (se Aspernäs och Foisack (1975)). I fig. 3.2 och 3.3 visas kraften F och momentet M från vind och vågor för de två fallen svag och hård vind.

I fig. 3.4 visas i en simulering att tillståndsestimaten $\hat{F}$ och $\hat{M}$ svänger in mot korrekta värden redan efter ca. 10 minuter. I fortsättningen sätts därför alltid initialtillståndet i Kalman-filtret till

$$\hat{x}(0) = \begin{bmatrix} \hat{v}(0) \\ \hat{r}(0) \\ \hat{\psi}(0) \\ \hat{F}(0) \\ \hat{M}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_0 \\ M_0 \end{bmatrix} \qquad (3.1)$$

där F_0 och M_0 får värden från tabell 3.1, beroende på vilken vind som simuleras.

I fig. 3.5 visas mätsignaler, verkligt tillstånd och tillståndsestimat vid djupgåendet 20 m och svag vind, när båten styrs med en adaptiv autopilot. Simulering vid samma djupgående men vid hård vind visas i fig. 3.6. Djupgåendet 10,5 m och svag vind resp. hård vind finns i fig. 3.7 och 3.8. Överensstämmelsen mellan verkligt tillstånd och tillståndsestimat från Kalman-filtret är för samtliga simuleringar mycket god.

Kalman-filtrets uppförande är med andra ord inte speciellt känsligt för ändringar i vare sig djupgående eller vindstyrka. Däremot har känsligheten för fartändringar ej undersökts och inte heller hur Kalman-filtrets uppförande ändras om någon av mätsignalerna faller ifrån.

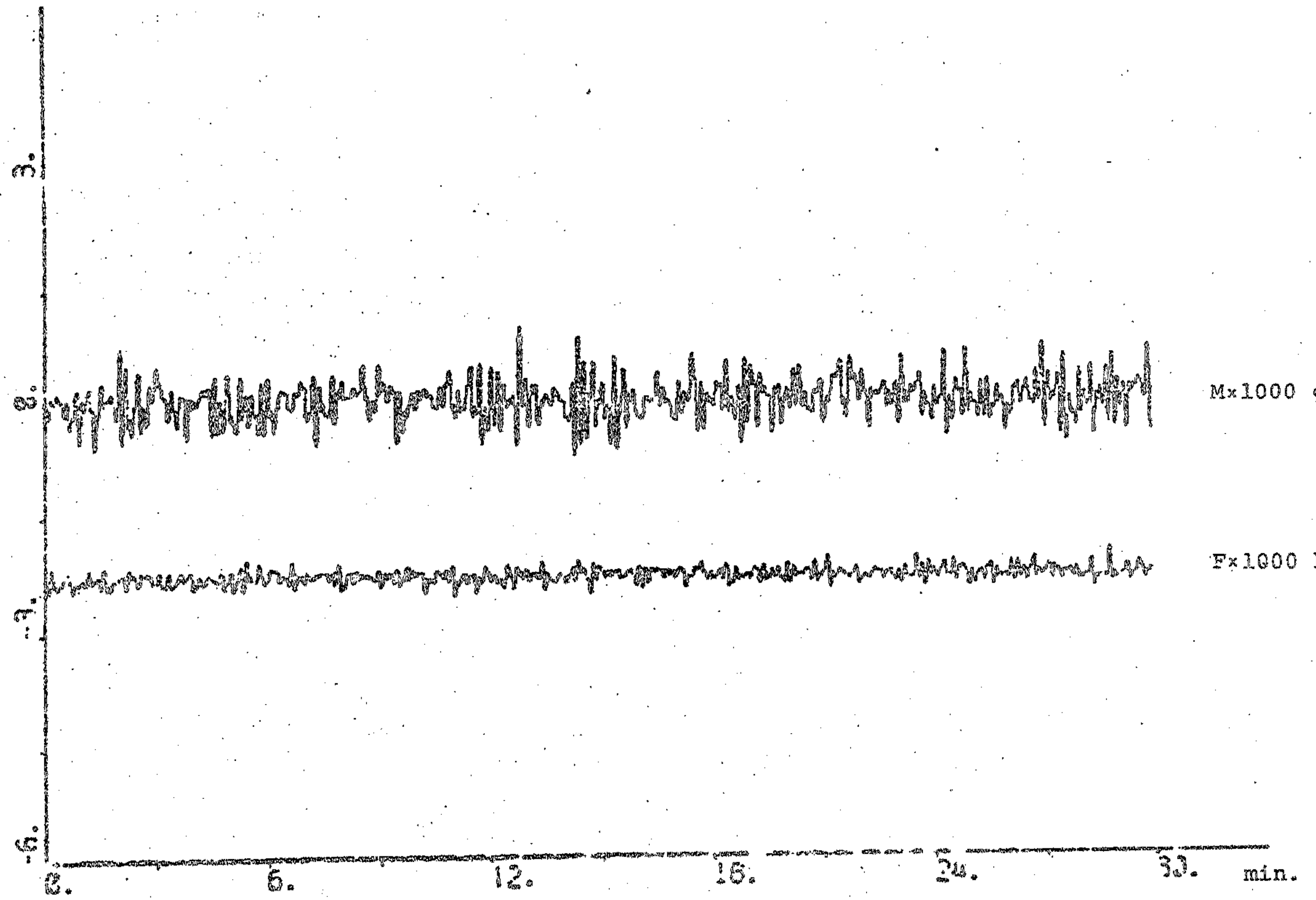


Fig. 3.2 - Kraften F och momentet M från vind och vågor vid svag vind.

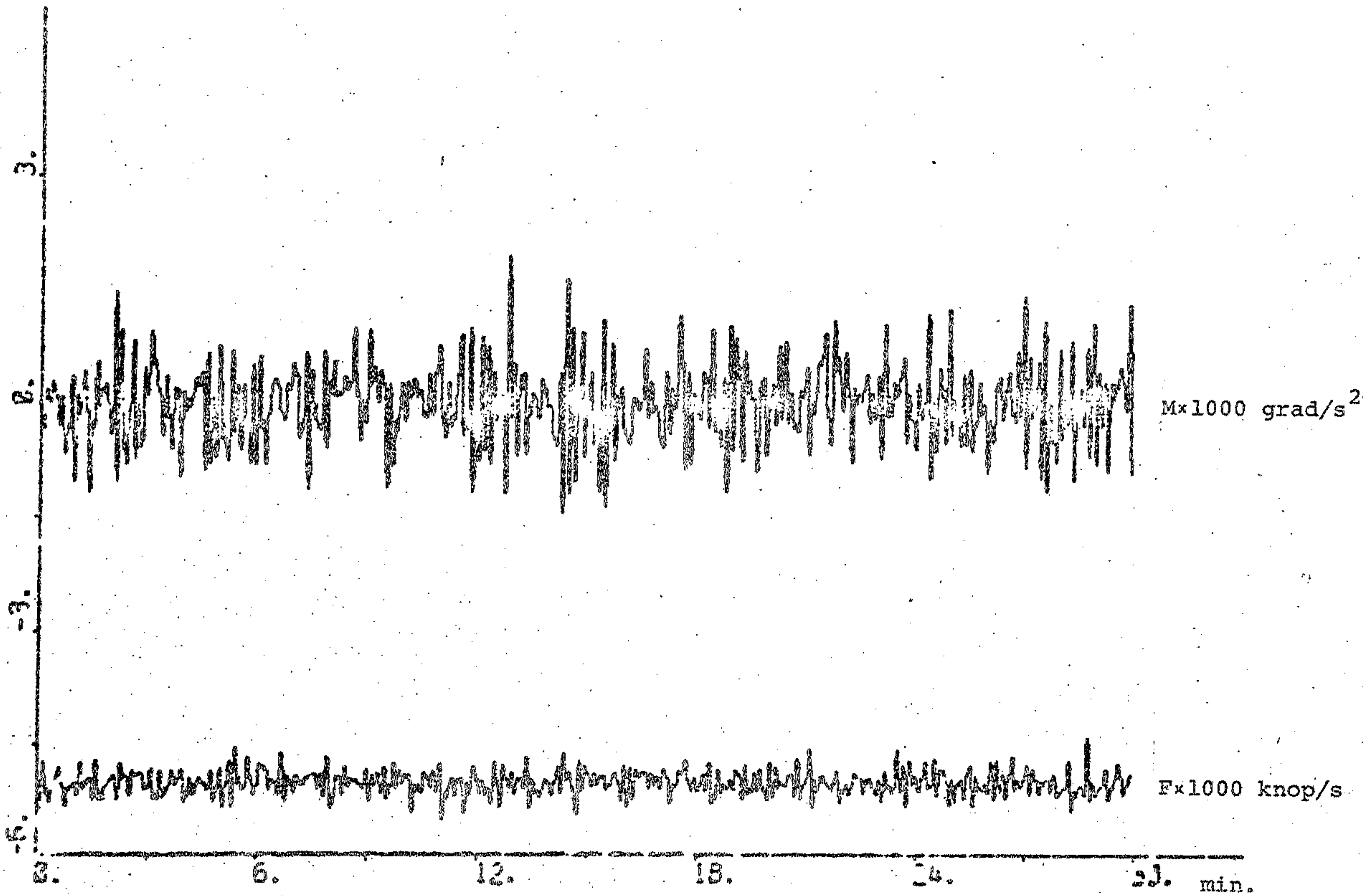


Fig. 3.3 - Kraften F och momentet M från vind och vågor vid hård vind.

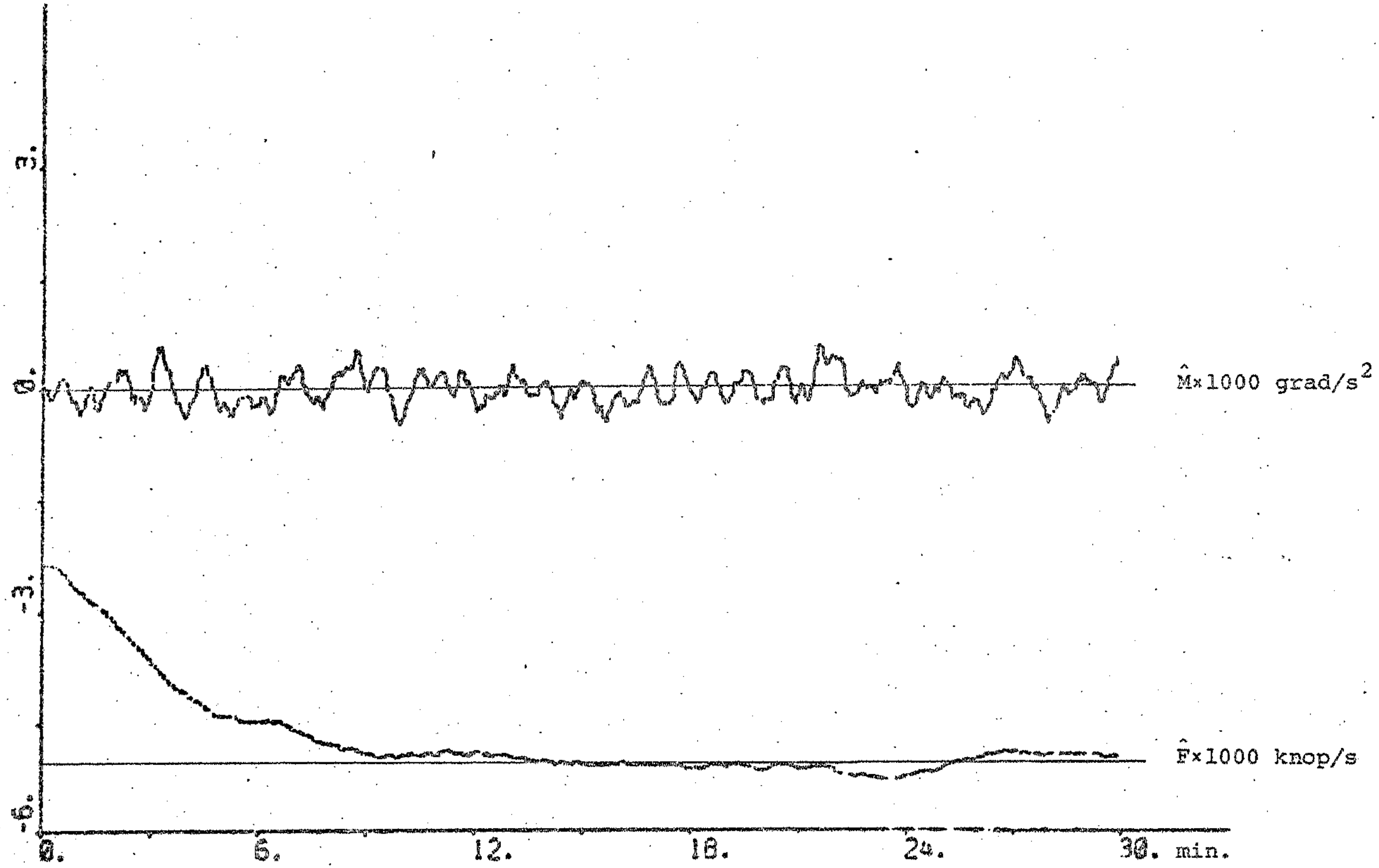


Fig. 3.4 - Insvängningen av tillståndsestimaten $\hat{F}$ och $\hat{M}$ vid hård vind när $\hat{F}(0)$ och $\hat{M}(0)$ har värden för svag vind.

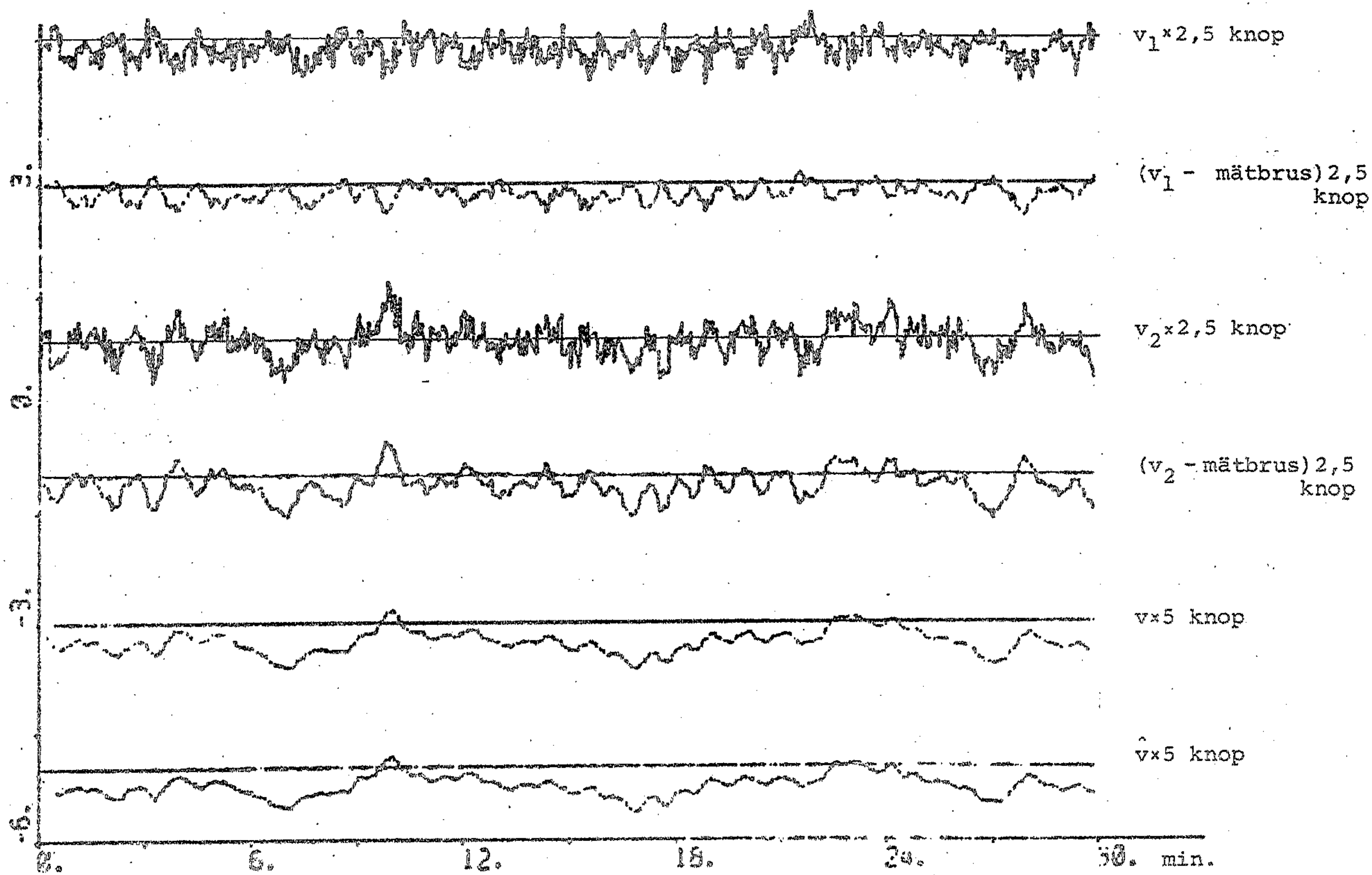


Fig. 3.5a - Mätsignaler, verkligt tillstånd och tillståndsestimat vid djupgåendet 20 m och svag vind. En del kurvor är förskjutna. Forts. nästa sida.

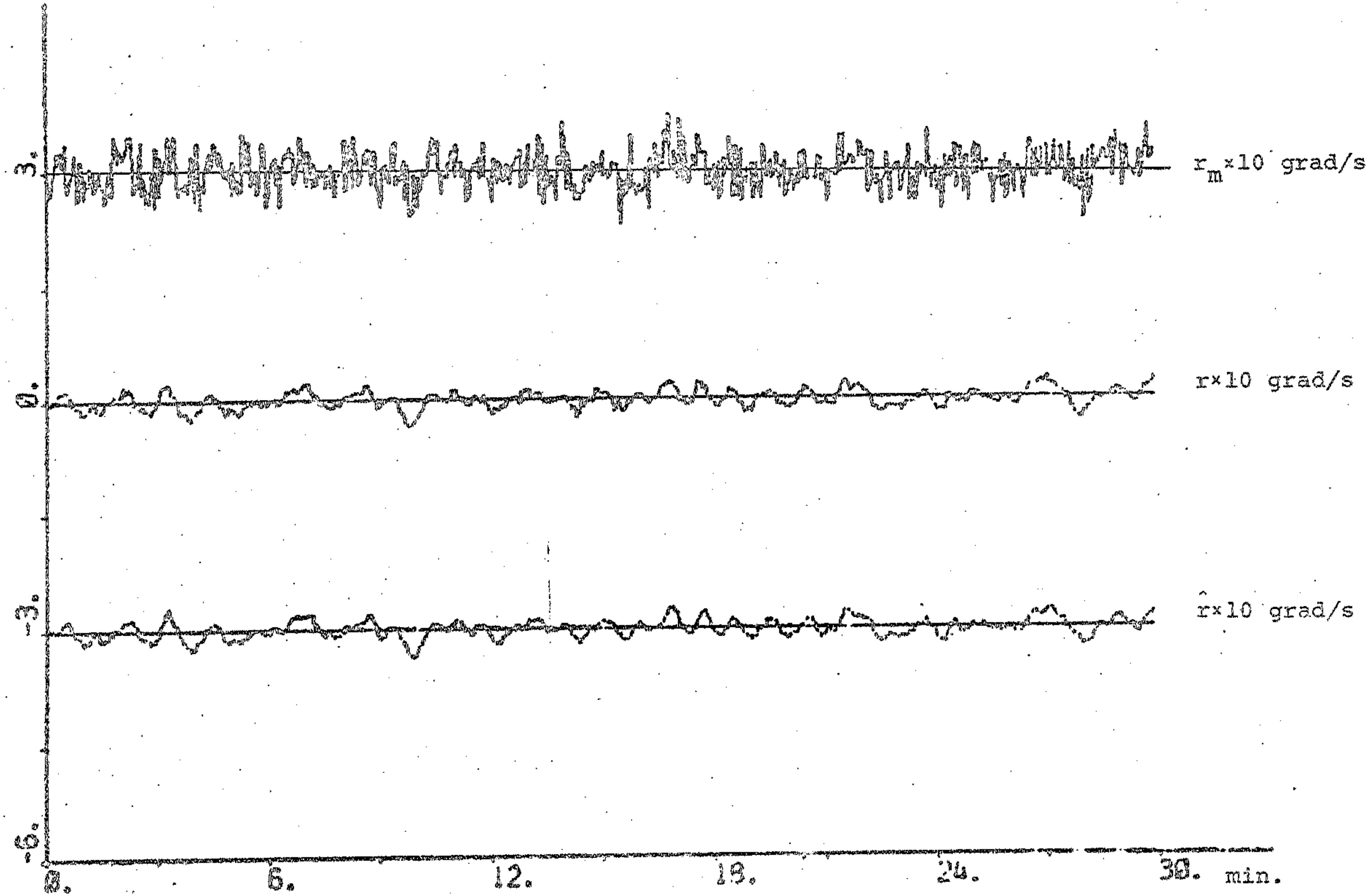

3.
0.
-3.
-6.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.
$r_m \times 10$ grad/s
$r \times 10$ grad/s
$\hat{r} \times 10$ grad/s

Fig. 3.5b

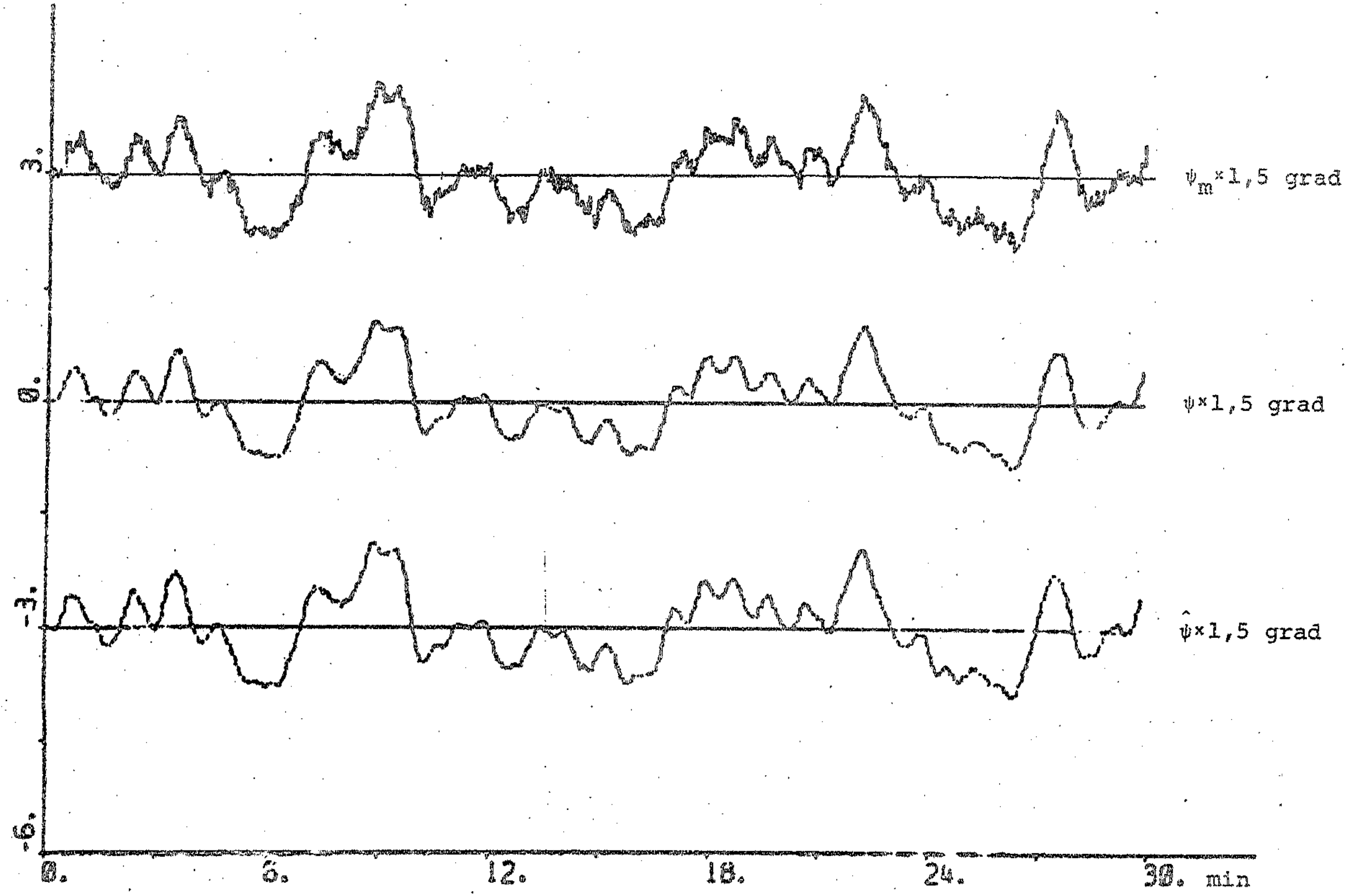
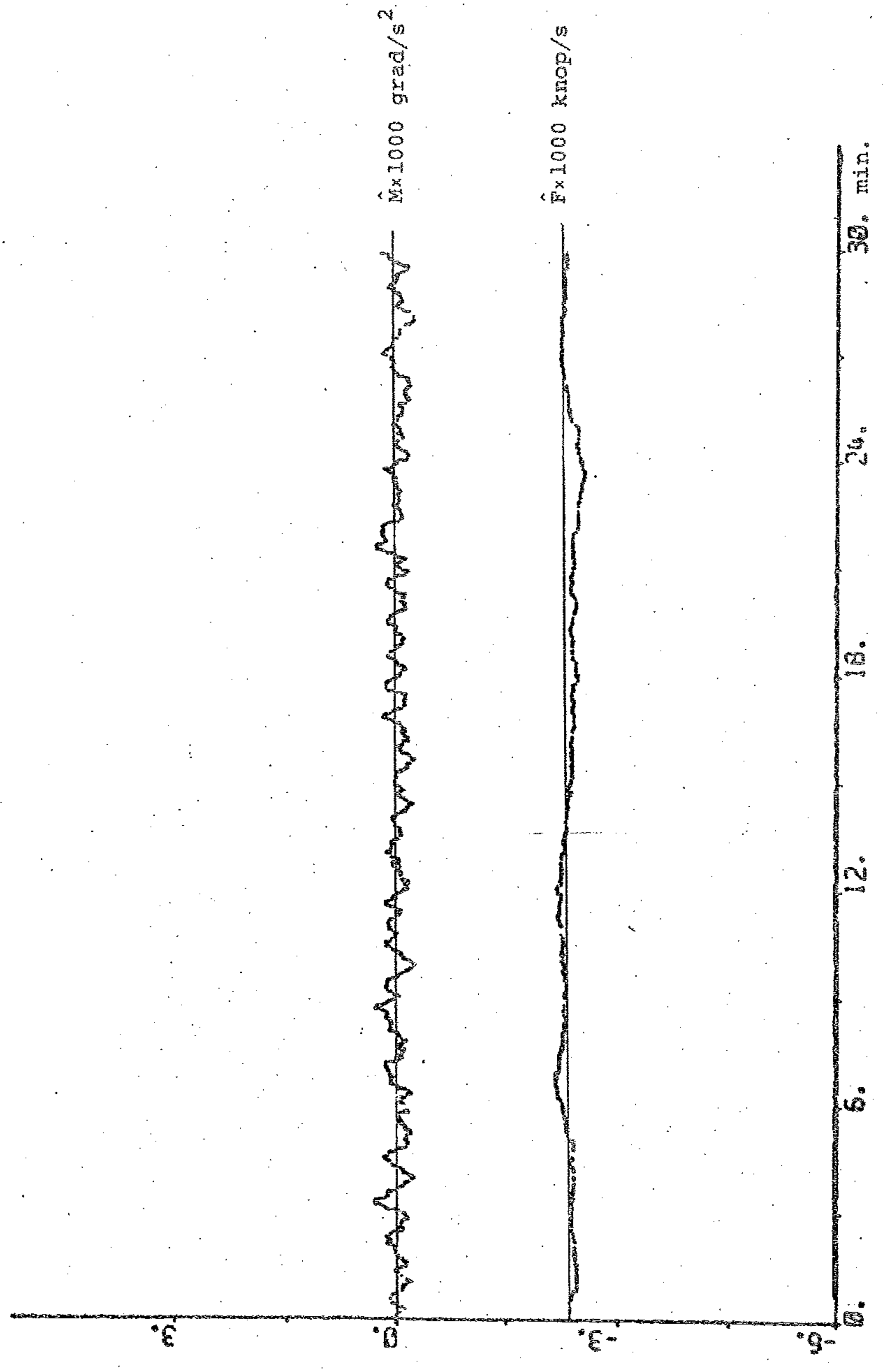
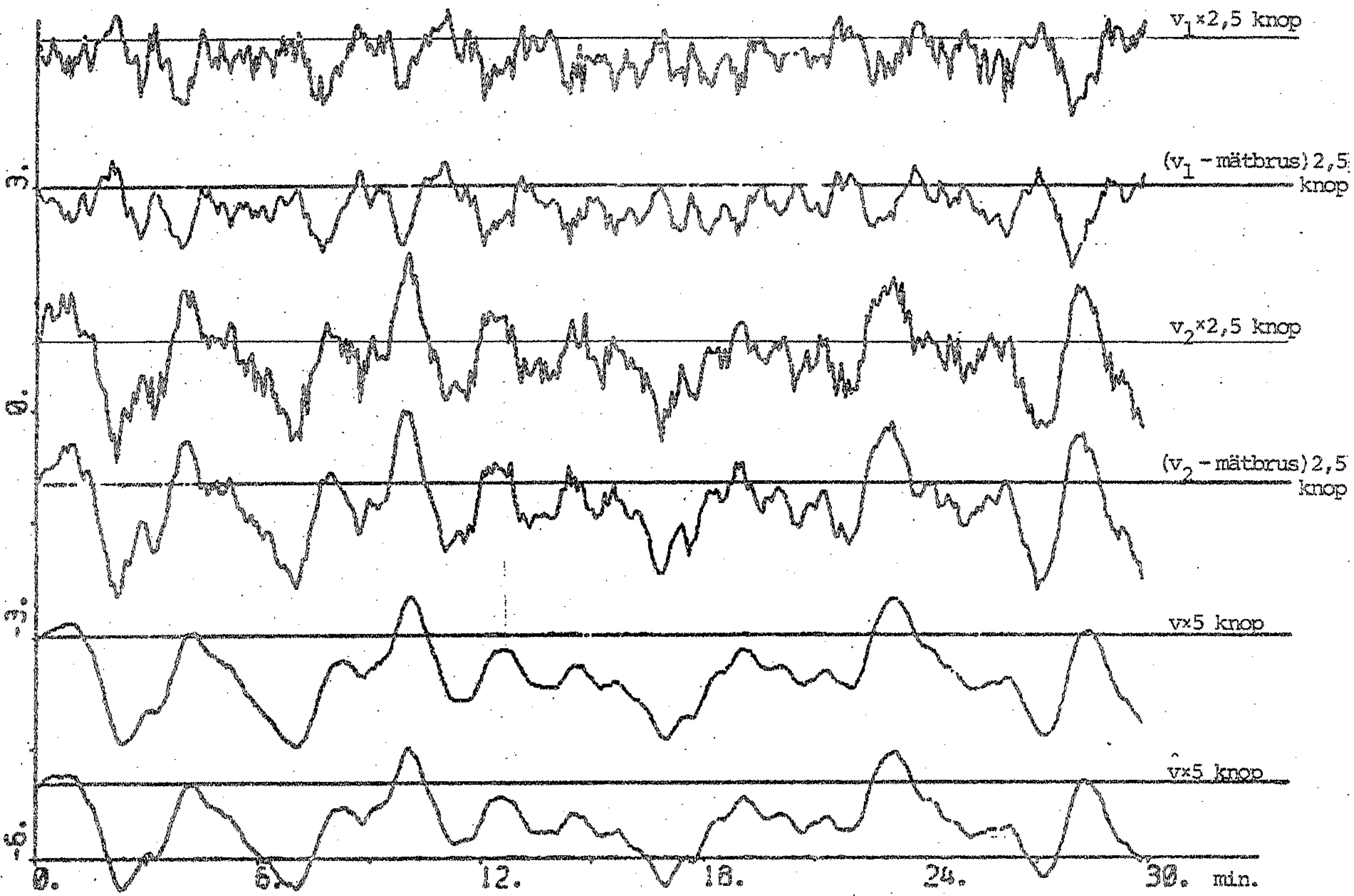

3.
0.
-3.
-6.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min
$\psi_m \times 1,5$ grad
$\psi \times 1,5$ grad
$\hat{\psi} \times 1,5$ grad

Fig. 3.5c



$\hat{M} \times 1000$ grad/s^2
$\hat{F} \times 1000$ knop/s
min.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
3.
0.
-3.
-6.

Fig. 3.5d



<u>Fig. 3.6a</u> - Mätsignaler, verkligt tillstånd och tillståndsestimat vid djupgåendet 20 m och hård vind. En del kurvor är förskjutna. Forts. nästa sida.

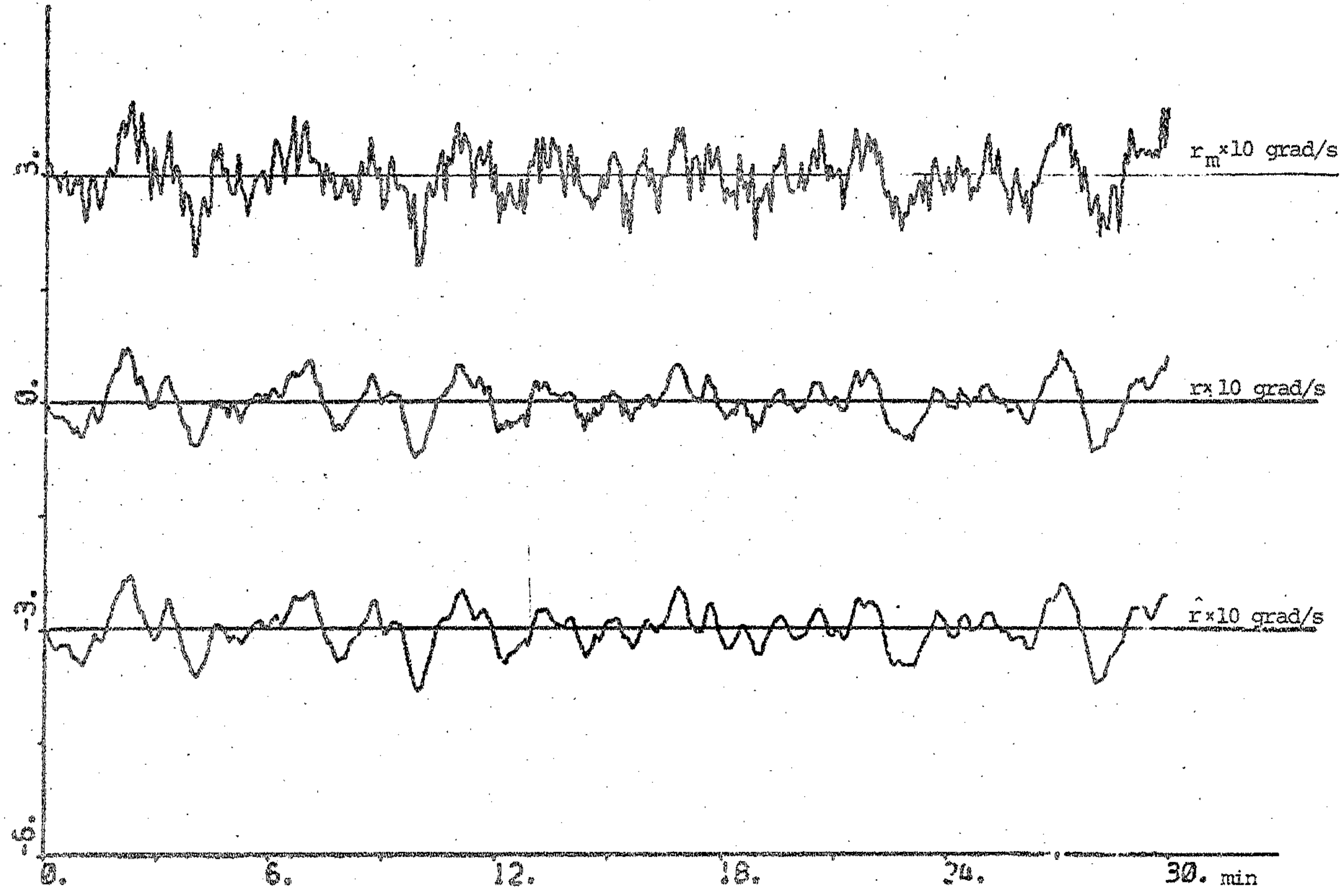
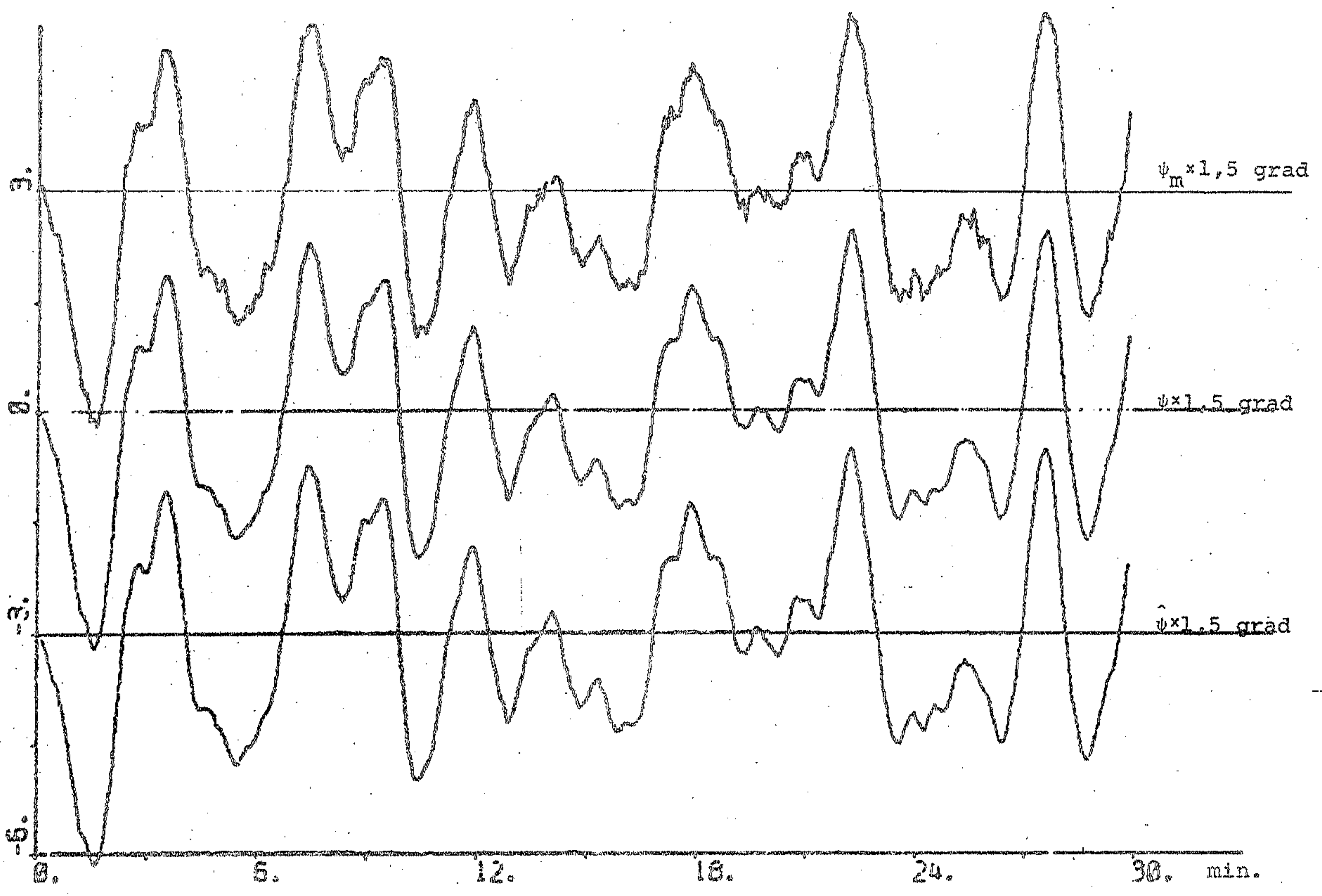


Fig. 3.6b



$\psi_m \times 1,5$ grad
$\psi \times 1.5$ grad
$\hat{\psi} \times 1.5$ grad
3.
0.
-3.
-6.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
min.

Fig. 3.6c

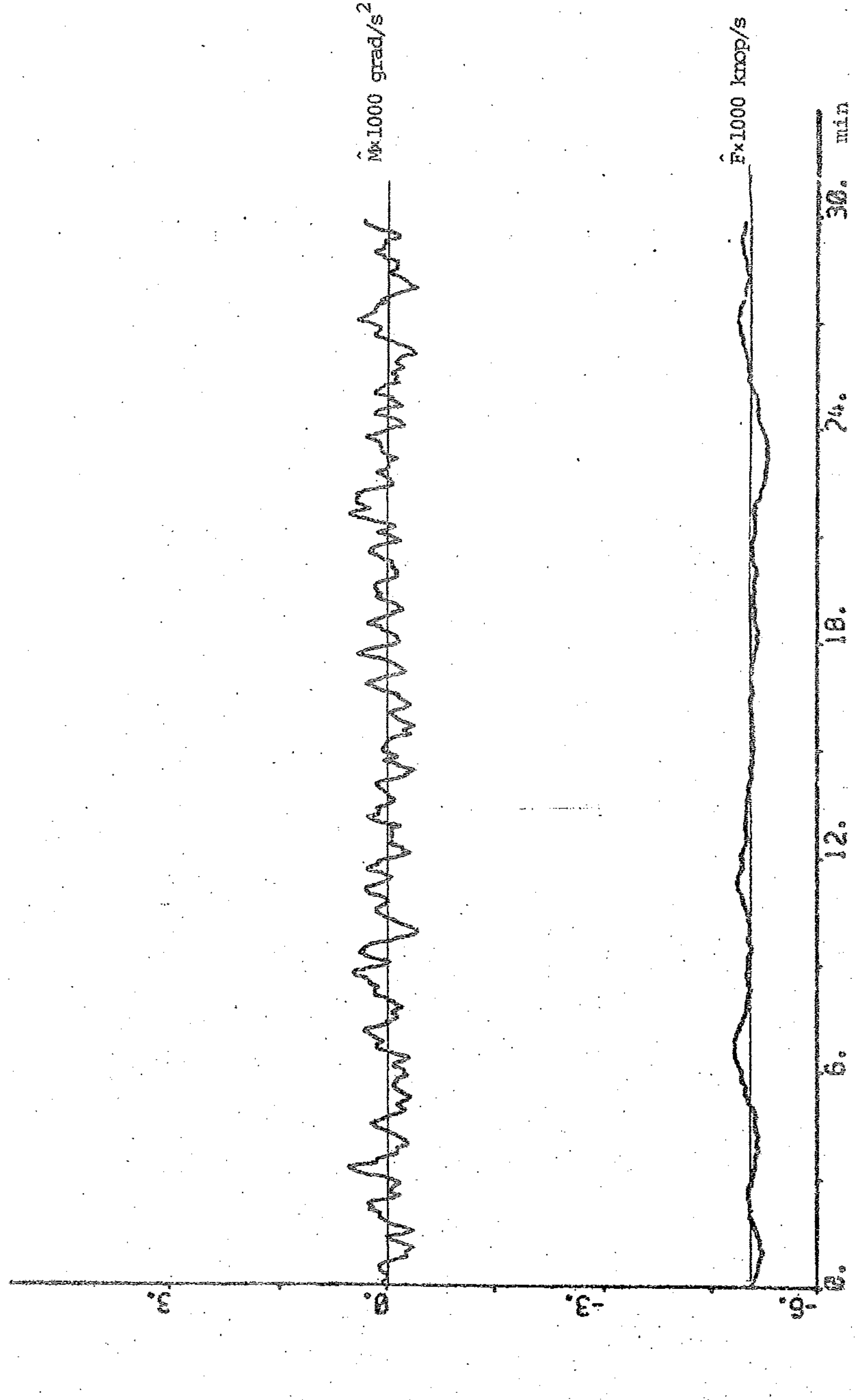


Fig. 3.5d

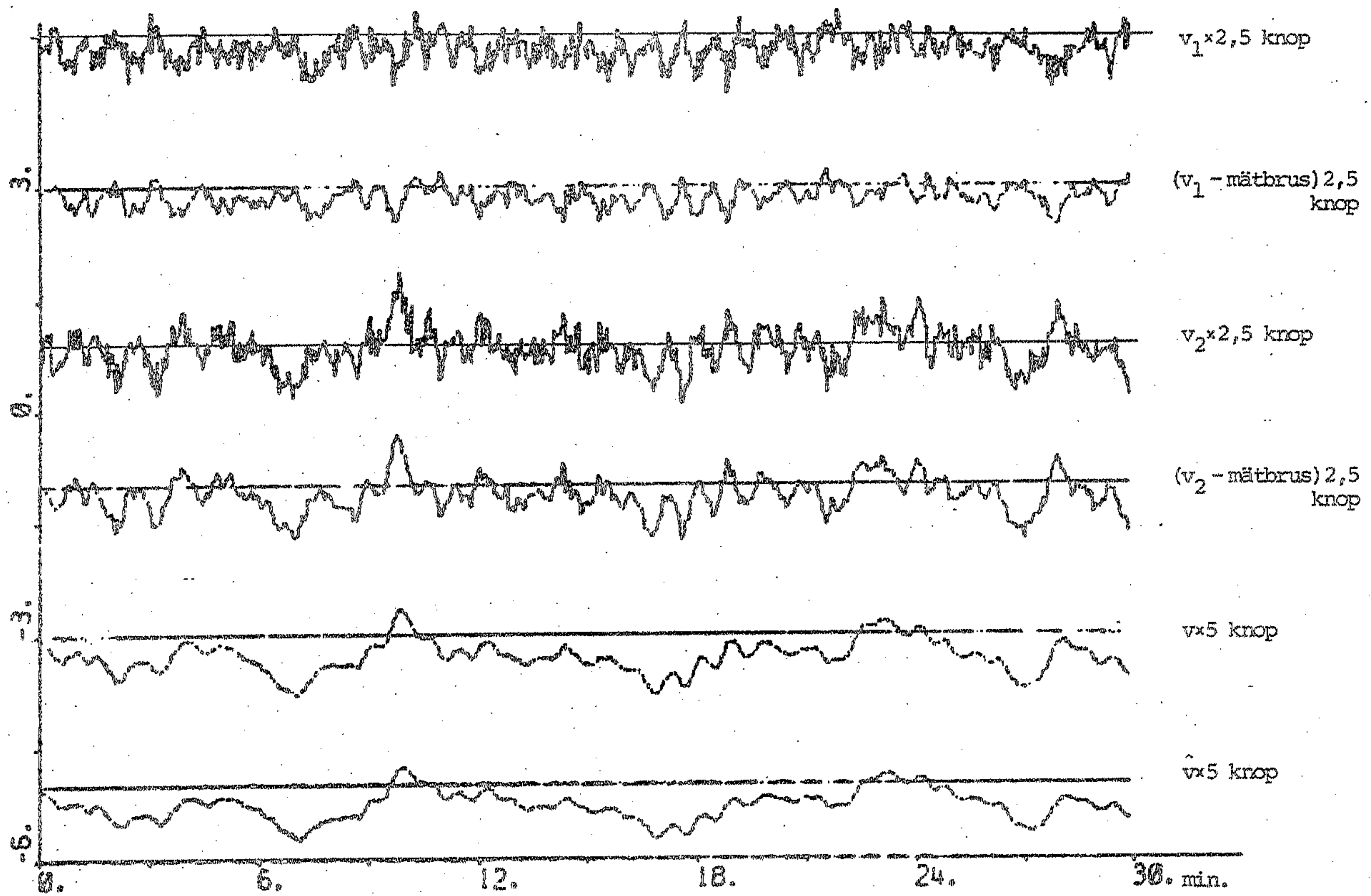


Fig. 3.7a - Mätsignaler, verkligt tillstånd och tillståndsestimat vid djupgåendet 10,5 m och svag vind. En del kurvor är förskjutna. Forts. nästa sida.

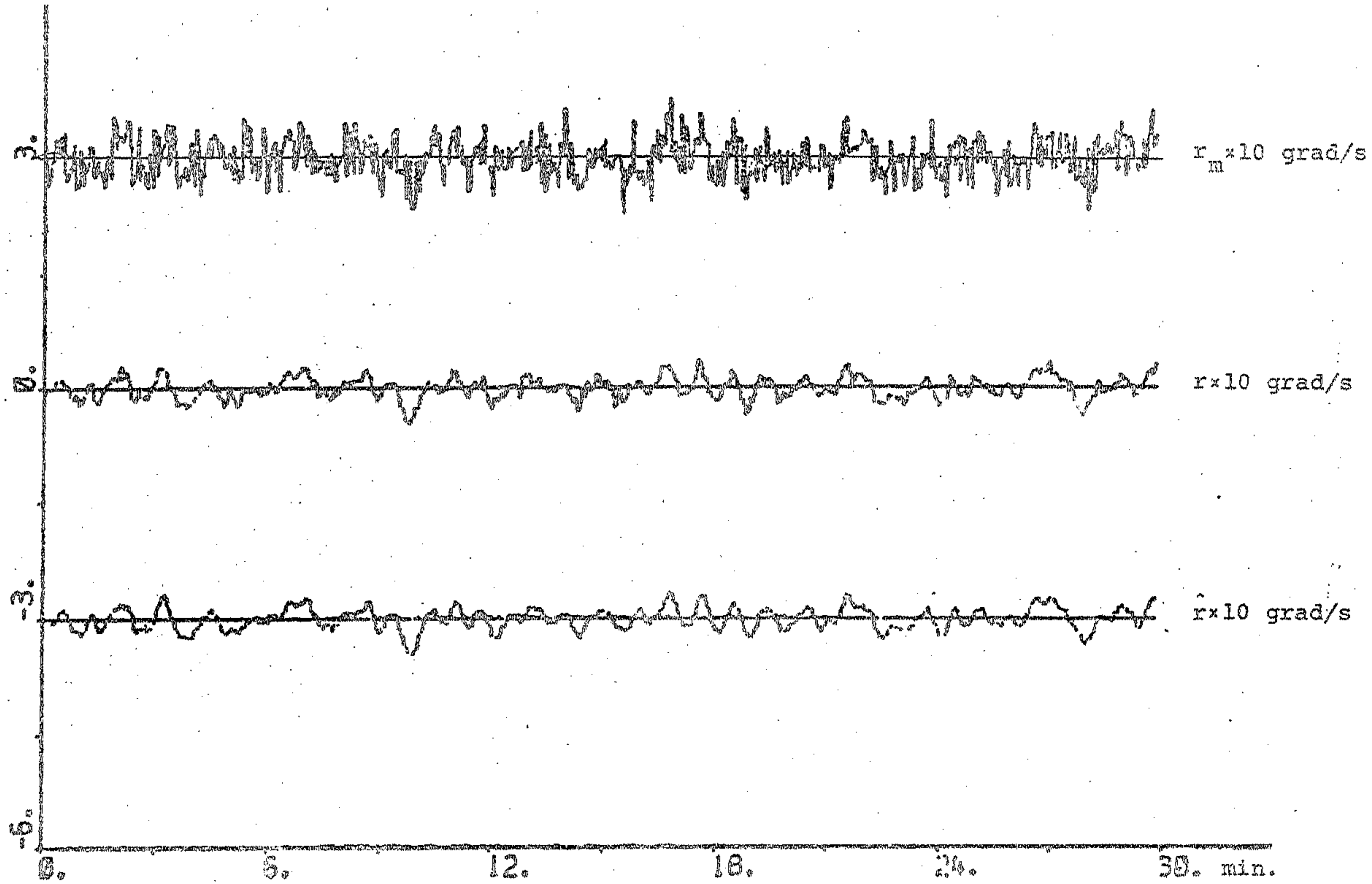

3.
0.
-3.
-6.
$r_m \times 10$ grad/s
$r \times 10$ grad/s
$\hat{r} \times 10$ grad/s
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 3.7b

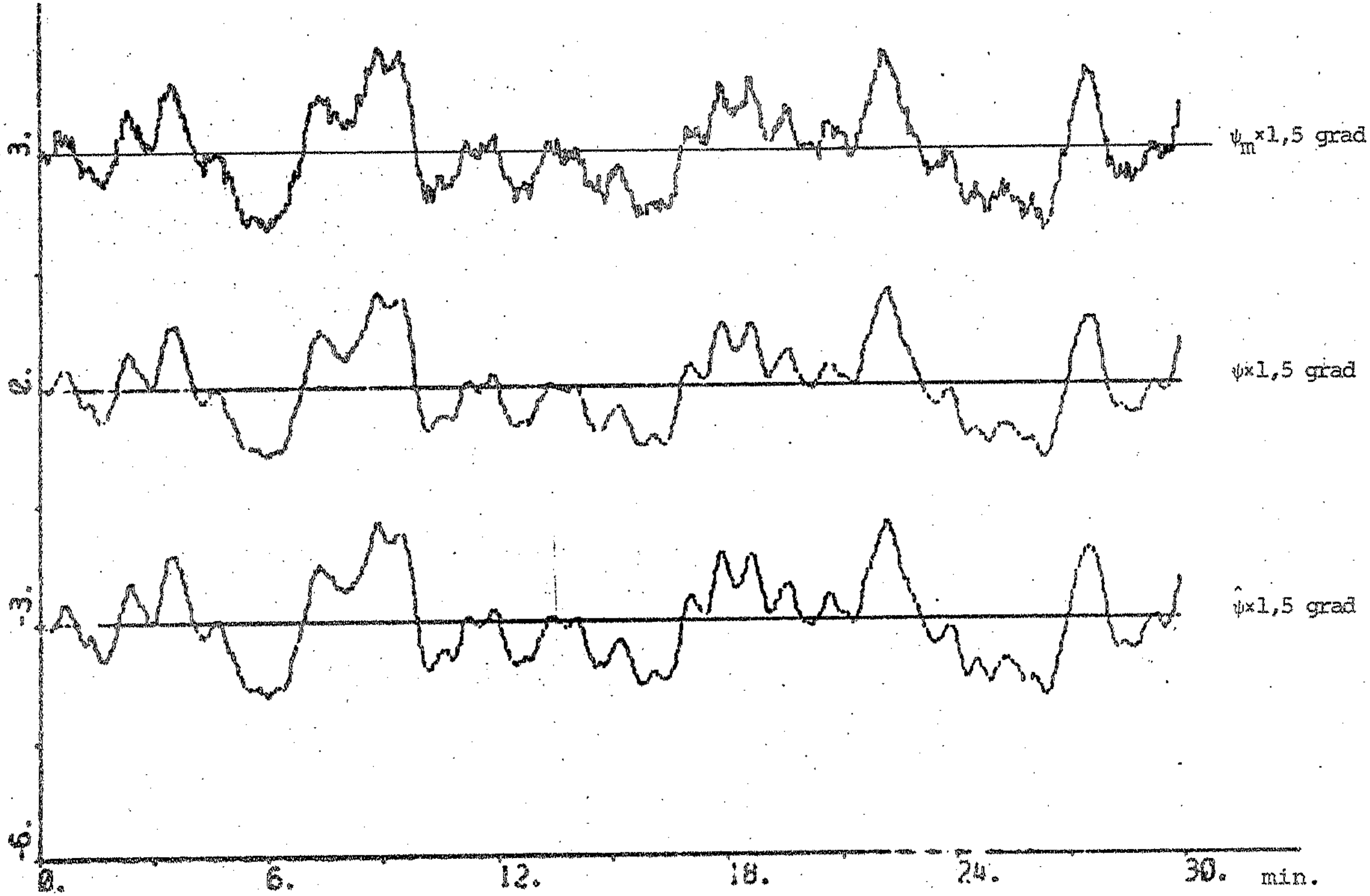

3.
0.
-3.
-6.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
min.
$\psi_m \times 1{,}5$ grad
$\psi \times 1{,}5$ grad
$\hat{\psi} \times 1{,}5$ grad

Fig. 3.7c

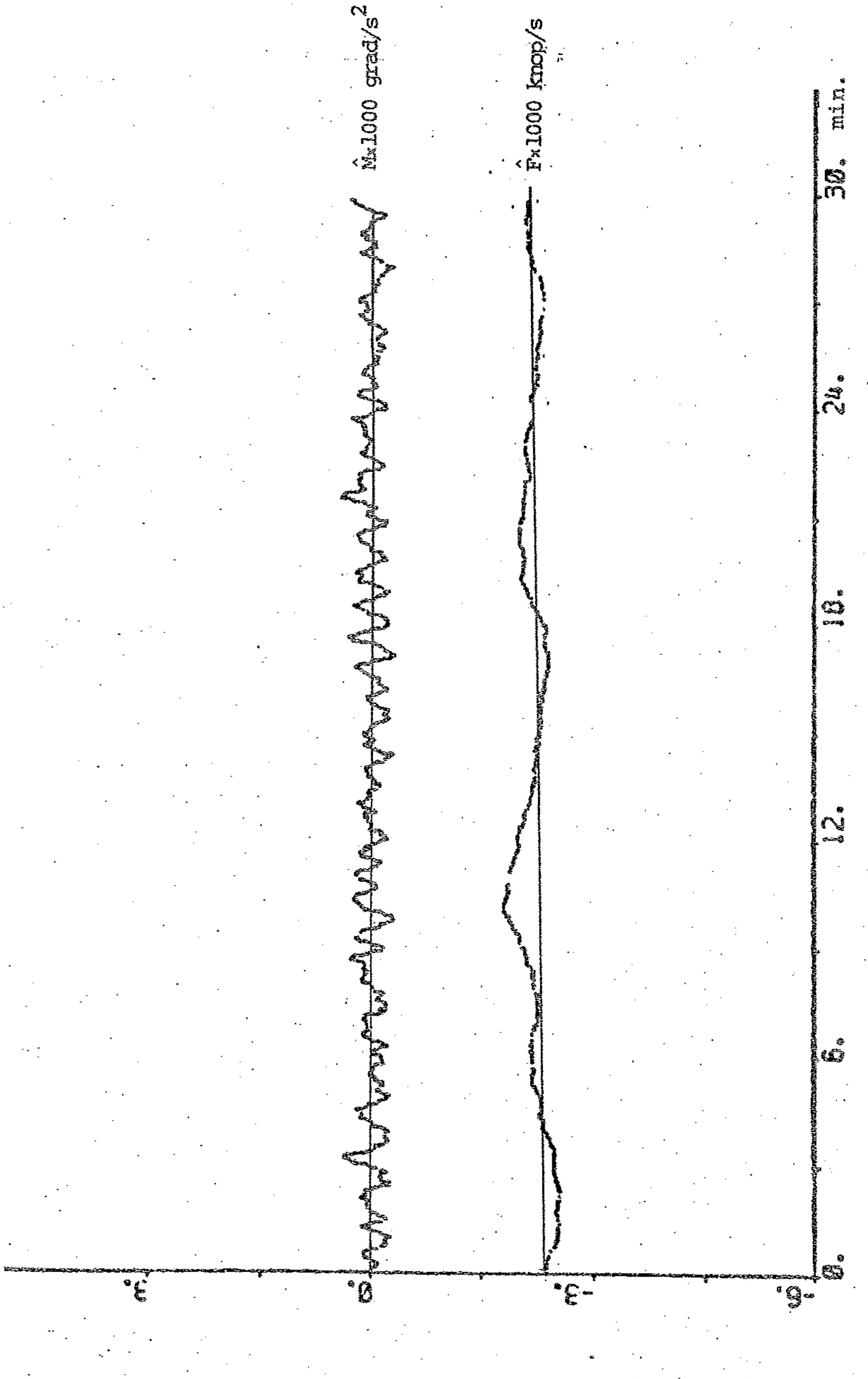

$\hat{M}\times1000$ grad/s^2
$\hat{F}\times1000$ knop/s
3.
0.
-3.
-6.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 3.7d

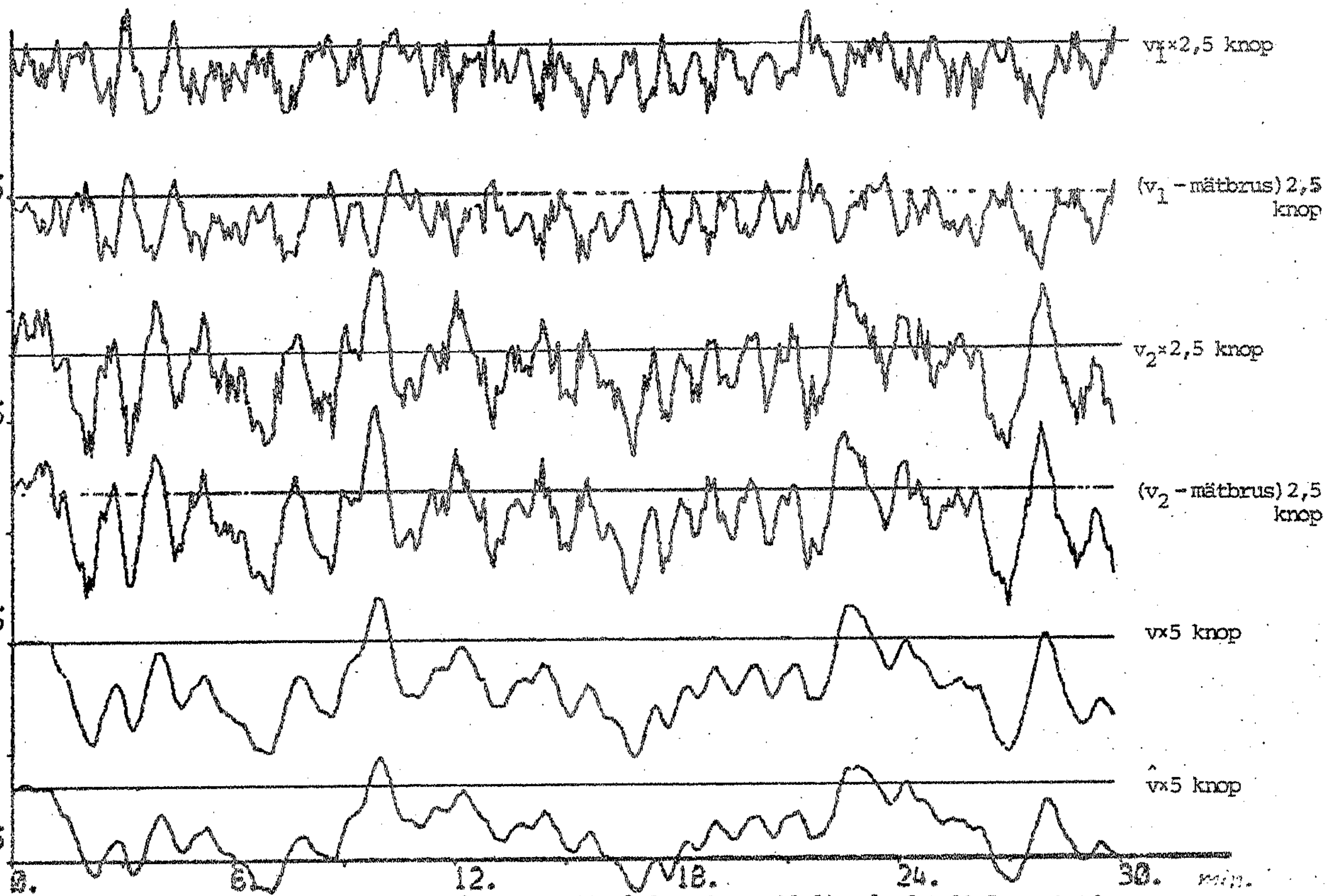


Fig. 3.8a - Mätsignaler, verkligt tillstånd och tillståndsestimat vid djupgåendet 10,5 m och hård vind. En del kurvor är förskjutna. Forts. nästa sida.

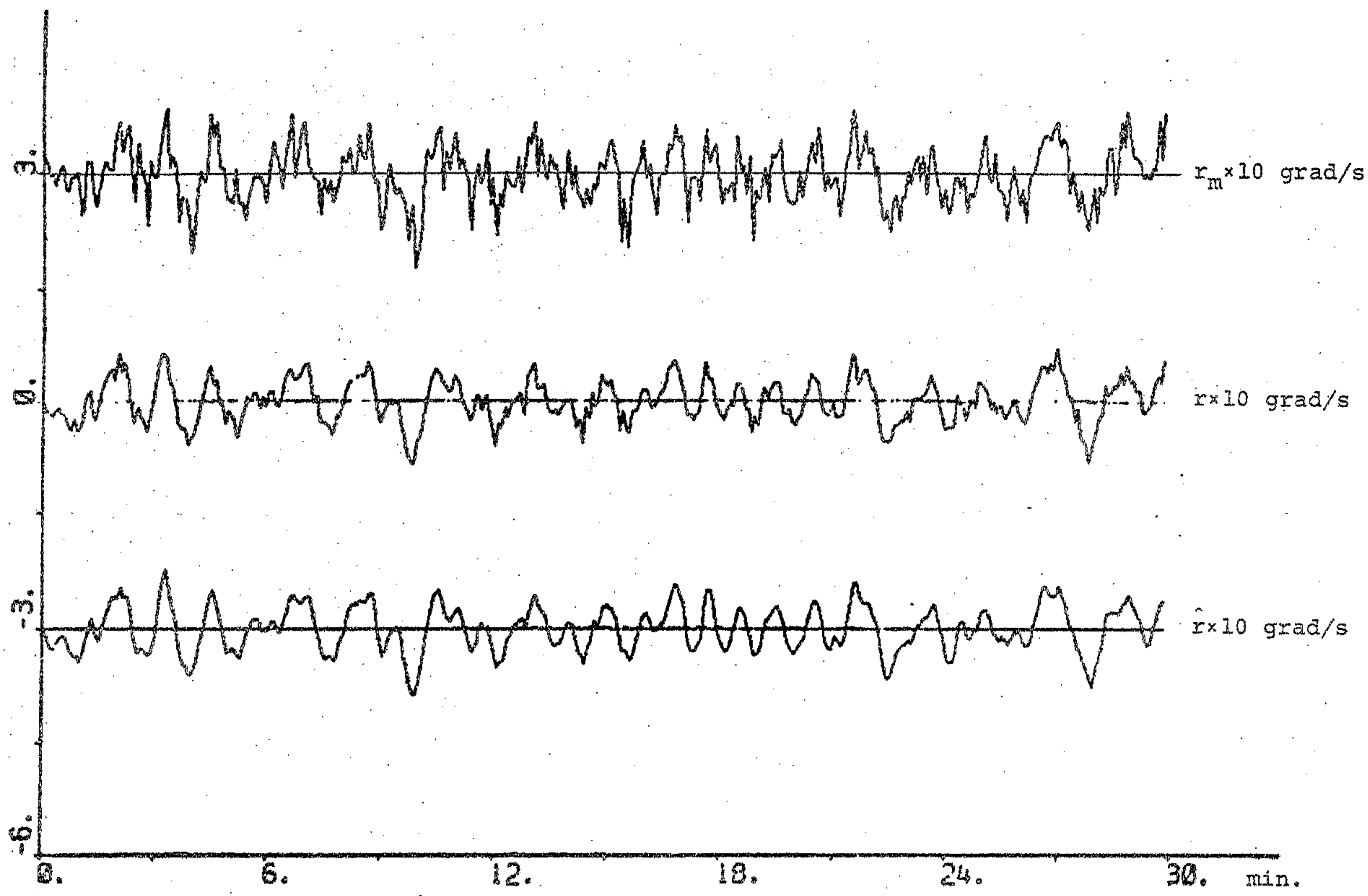
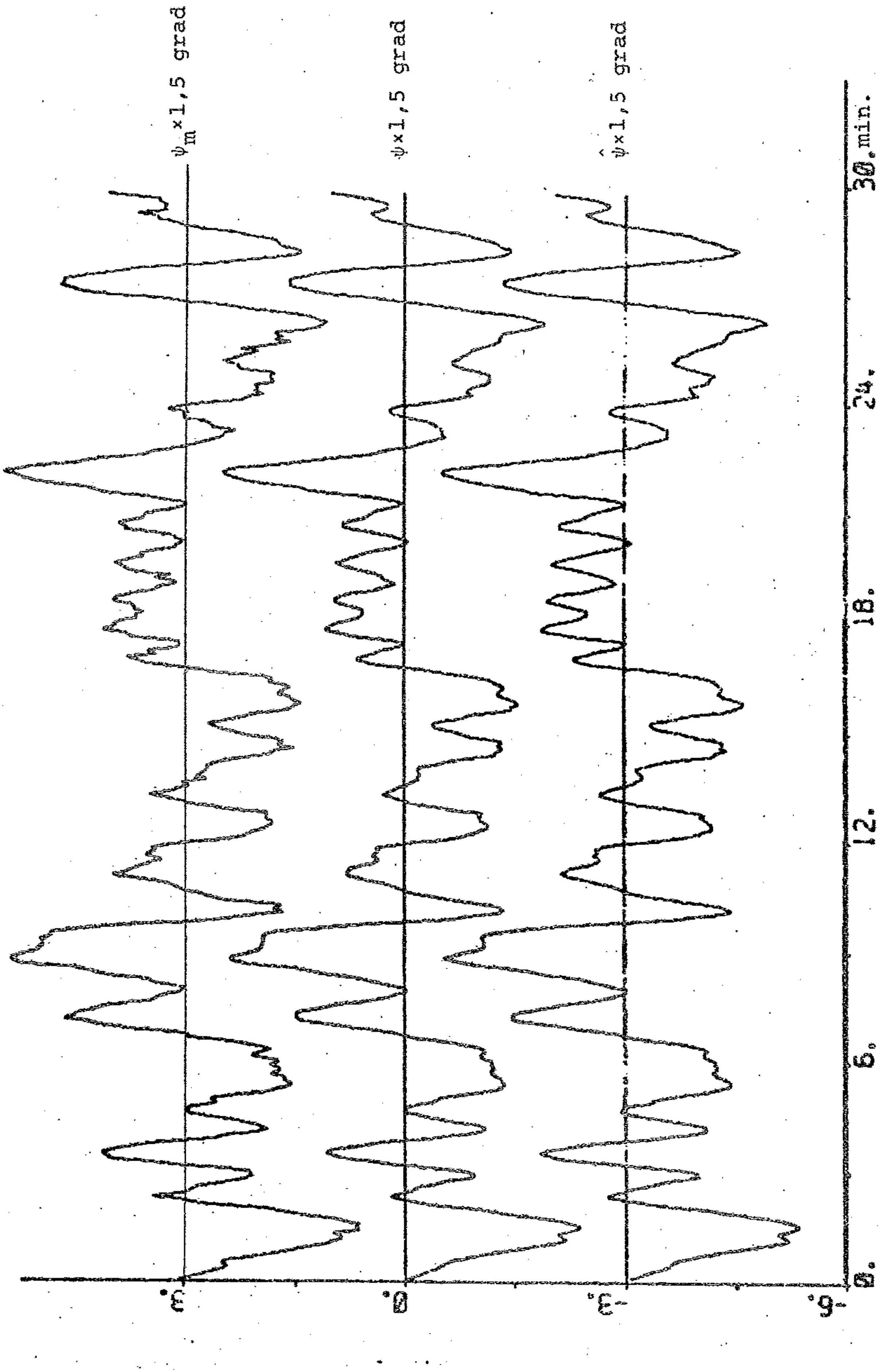


Fig. 3.8b



$\psi_m \times 1,5$ grad
$\psi \times 1,5$ grad
$\hat{\psi} \times 1,5$ grad
30. min.
24.
18.
12.
6.
0.
3.
0.
-3.
-6.

Fig. 3.8c

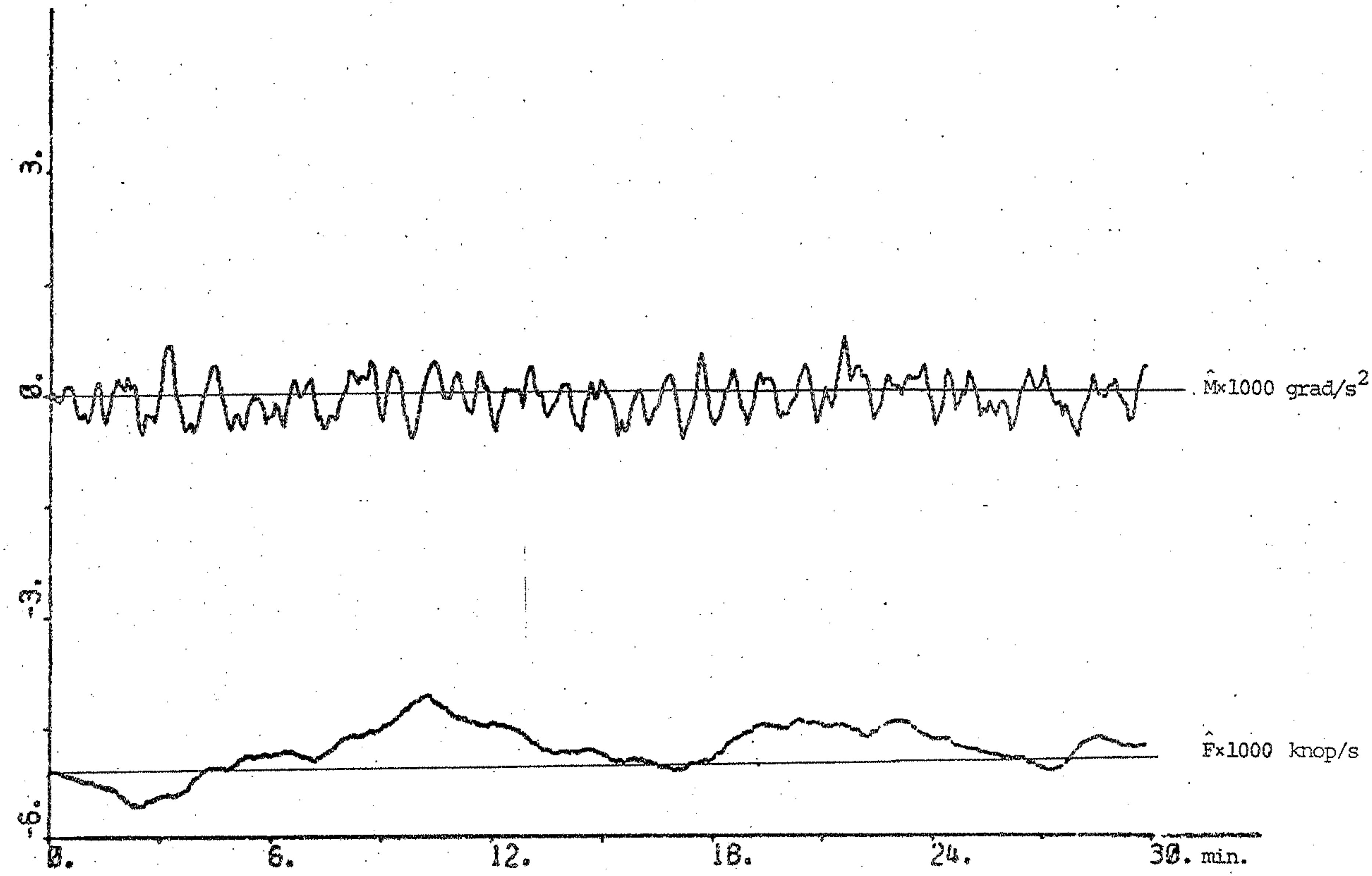

3.
0.
-3.
-6.
$\hat{M} \times 1000$ grad/s^2
$\hat{F} \times 1000$ knop/s
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 3.8d

4. SIMULERING AV STYRNING MED KALMANFILTER.

Den grundläggande självinställande regulatorn finns beskriven i Wittenmark (1973). Simuleringar med i princip samma adaptiva regulator som används i denna rapport, dock utan Kalman-filter, finns beskrivna i Aspernäs och Foisack (1975).

Den modell av fartyget, som regulatorn använder, är:

$$\begin{aligned}
&(\hat{\psi}(t) - \psi_{ref}) + a_1(\hat{\psi}(t-k-1) - \psi_{ref}) + \ldots + \\
&\quad + a_{NA}(\hat{\psi}(t-k-NA) - \psi_{ref}) = \\
&= b_0[\nabla\delta_s(t-k-1) + b_1\nabla\delta_s(t-k-2) + \ldots + \\
&\quad + b_{NB}\nabla\delta_s(t-k-NB-1)] + \\
&\quad + c_1\nabla\hat{v}(t-k-1) + c_2\nabla\hat{r}(t-k-1) + \\
&\quad + 100\cdot c_3\nabla\hat{F}(t-k-1) + 100\cdot c_4\nabla\hat{M}(t-k-1) + \varepsilon(t)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Minimalvariansstyrlagen blir då:

$$\begin{aligned}
\nabla_s\delta_s(t) = {} & \hat{a}_1(\hat{\psi}(t) - \psi_{ref}) + \ldots + \hat{a}_{NA}(\hat{\psi}(t-NA+1) - \psi_{ref}) - \\
& - \hat{b}_1\nabla_s\delta_s(t-1) - \ldots - \hat{b}_{NB}\nabla_s\delta_s(t-NB) - \\
& - \hat{c}_1\nabla\hat{v}(t) - \hat{c}_2\nabla\hat{r}(t) - 100\cdot\hat{c}_3\nabla\hat{F}(t) - \\
& - 100\cdot\hat{c}_4\nabla\hat{M}(t)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

där

$$\nabla_s\delta_s(t) = b_0\nabla\delta_s(t) = b_0(\delta_s(t) - \delta_s(t-1))$$

och där t.ex.

$$\nabla\hat{v}(t) = \hat{v}(t) - \hat{v}(t-1)$$

I fortsättningen fixeras följande parametrar:

NA = 3

NB = 2

k = 5

$b_0 = -1$

Dessutom väljs samplingsintervallet för regulatorn till 15 s och den exponentiella glömskefaktorn sätts till 0,99. I fortsättningen kommer alltid ψ_{ref} att vara noll. Listning av programmet för regulatorn finns i appendix.

För att kunna utvärdera simuleringarna införes två förlustfunktioner

$$V_1 = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}\left[\left(\psi(t) - \psi_{ref}\right)^2 + \lambda\delta_s^2(t)\right]dt$$

$$V_2 = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}\left[\left(\psi(t) - \psi_{ref}\right)^2 + \lambda\left(\delta_s(t) - \bar{\delta}_s\right)^2\right]dt \tag{4.3}$$

där $\bar{\delta}_s$ är medelvärdet av $\delta_s(t)$ och där viktfaktorn λ sätts lika med 0,1.

De två förlustfunktionerna beräknas approximativt som

$$V_1 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left[\left(\psi(nT_s) - \psi_{ref}\right)^2 + \lambda\delta_s^2(nT_s)\right]$$

$$V_2 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left[\left(\psi(nT_s) - \psi_{ref}\right)^2 + \lambda\left(\delta_s(nT_s) - \bar{\delta}_s\right)^2\right] \tag{4.4}$$

där $NT_s = \tau$.

I fortsättningen kommer även medelvärde m_{δ_s} och standardavvikelse σ_{δ_s} för roderservoläget att anges, liksom medelvärde m_ψ och standardavvikelse σ_ψ för kursen.

I fig. 4.1 och 4.2 visas simuleringar för djupgåendet 20 m och svag vind resp. hård vind. Alla fyra framkopplingarna av tillståndsestimaten i (4.1) och (4.2) används. En sammanställning av resultaten finns i tabell 4.1.

		Svag vind	Hård vind
Djupgående 20 m	V_1 gr^2	0,63	2,44
	V_2 gr^2	0,56	2,14
	σ_ψ gr	0,30	0,79
	σ_{δ_s} gr	2,16	3,90

Tabell 4.1 - Resultat av simuleringar med framkoppling av fyra tillståndsestimat.

Vissa svårigheter att få samtliga 9 parametrar att konvergera uppstod. Framkopplingen av $\hat{F}$ och $\hat{M}$ bör inte ge särskilt mycket information till regulatorn, eftersom dessa estimat ändrar sig mycket långsamt och eftersom regulatorn har möjlighet att ta hänsyn till denna typ av störningar genom att den arbetar med differenser av δ_s.

I fig. 4.3 - 4.6 visas simuleringar vid olika djupgående och olika vindstyrkor, när endast $\hat{v}$ och $\hat{r}$ har använts som framkopplingar i regulatorn (4.1) och (4.2). Resultaten finns sammanställda i tabell 4.2.

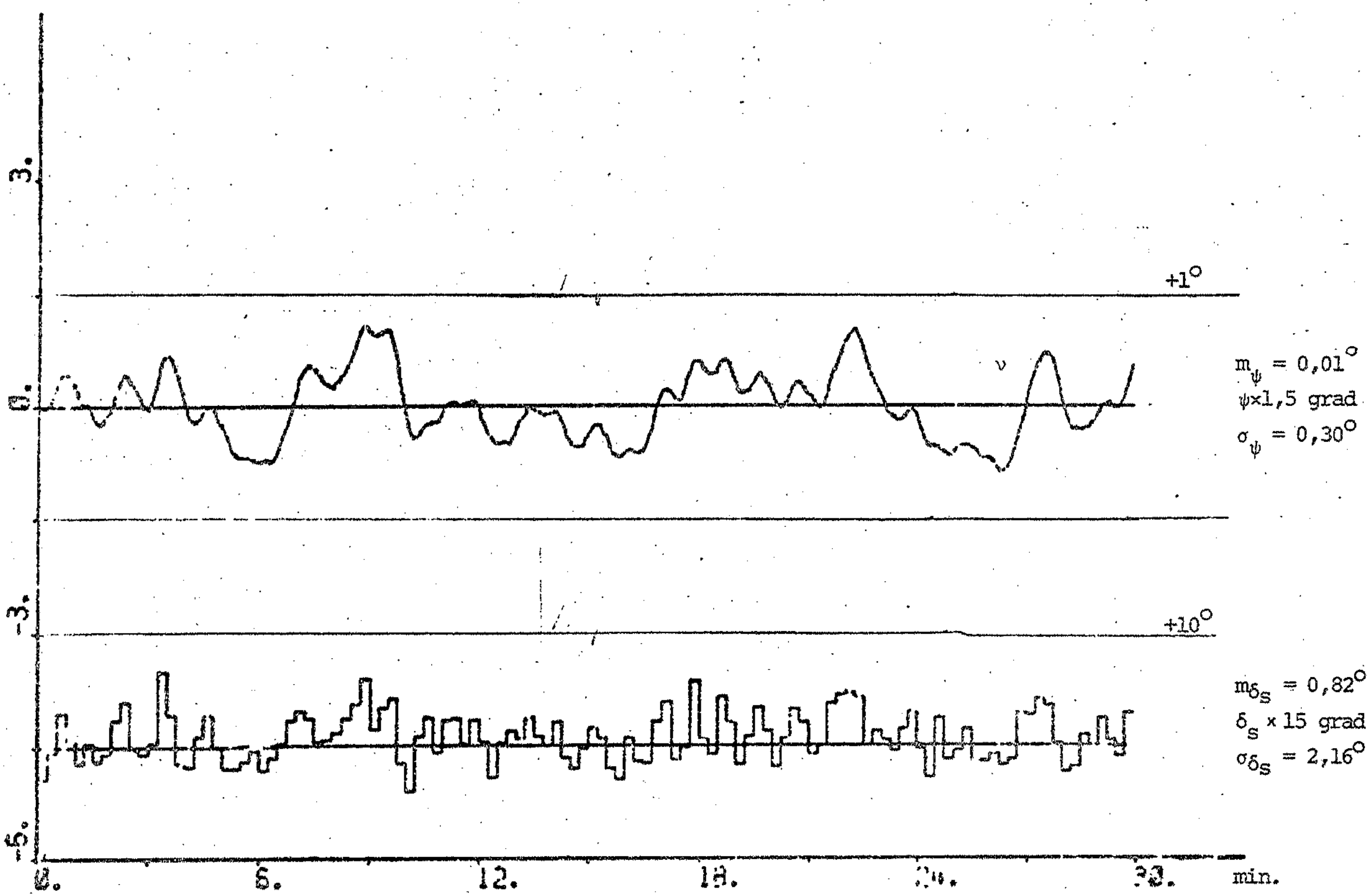


Fig. 4.1a - Styrning med framkoppling av $\hat{v}$, $\hat{r}$, $\hat{F}$, $\hat{M}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind. Forts. nästa sida.

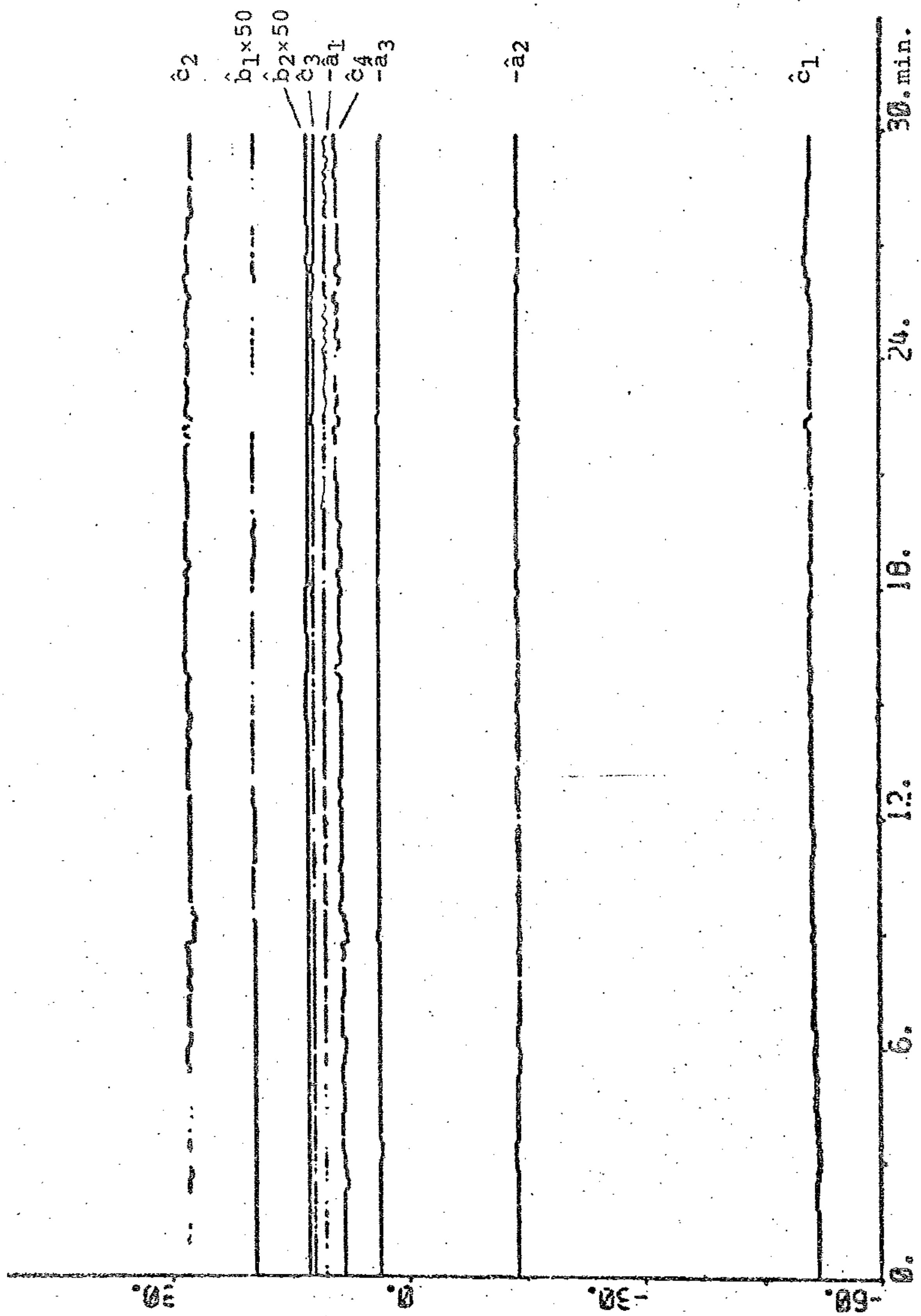
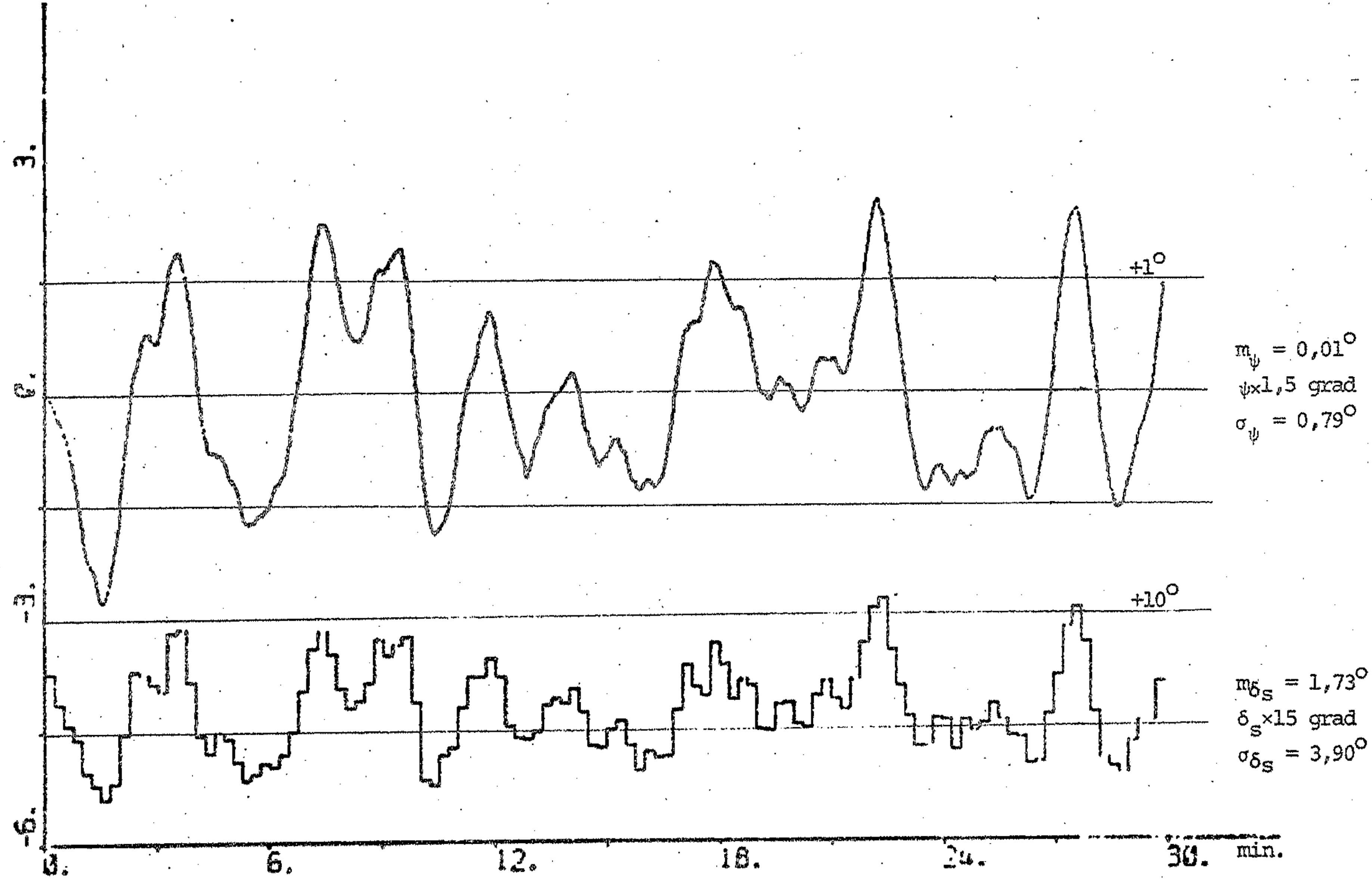

$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$\hat{c}_3$
$-\hat{a}_1$
$\hat{c}_4$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
$\hat{c}_1$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.1b



<u>Fig. 4.2a</u> – Styrning med framkoppling av $\hat{v}$, $\hat{r}$, $\hat{F}$, $\hat{M}$ vid djupgåendet 20 m och hård vind. Forts. nästa sida.

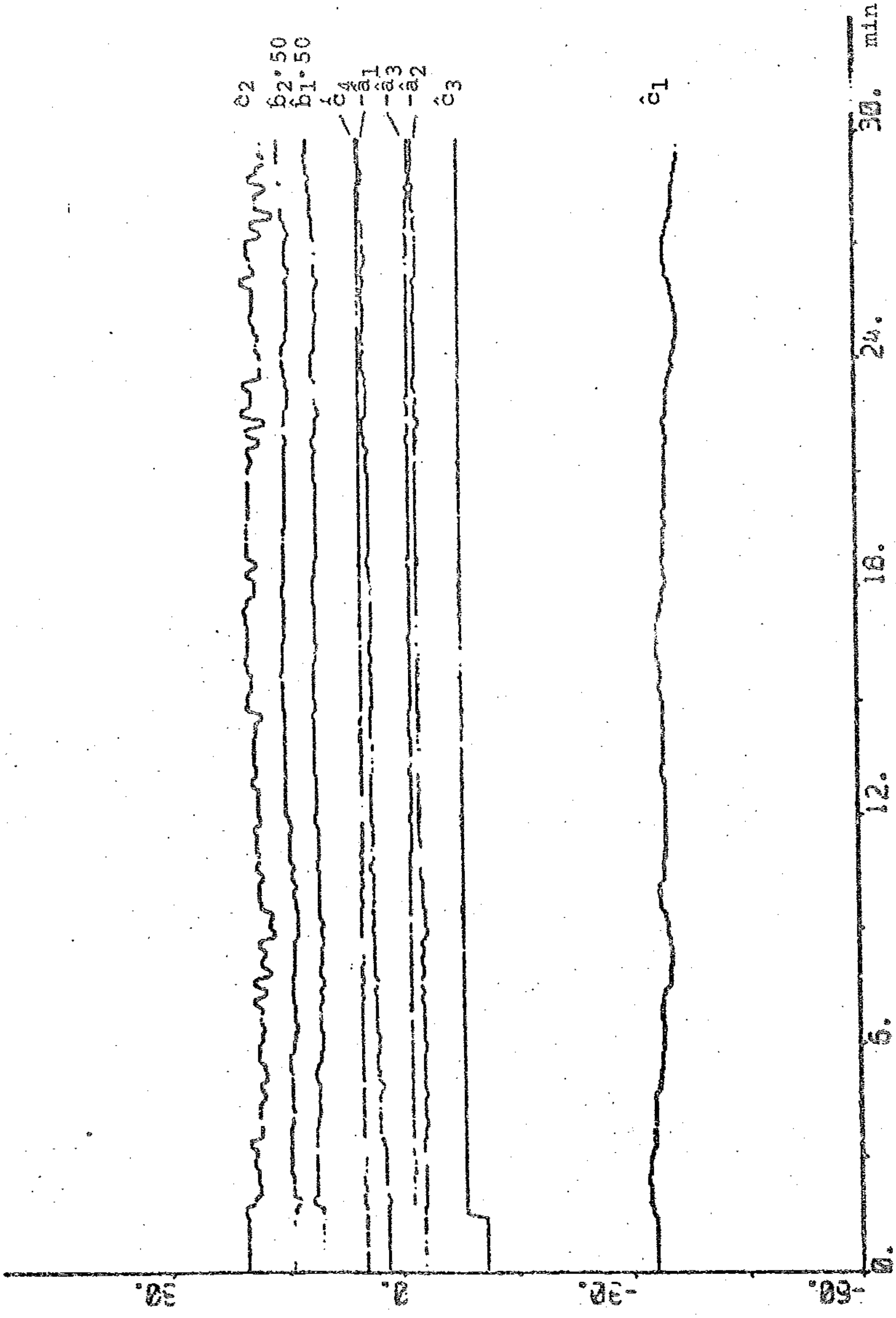


Fig. 4.2b

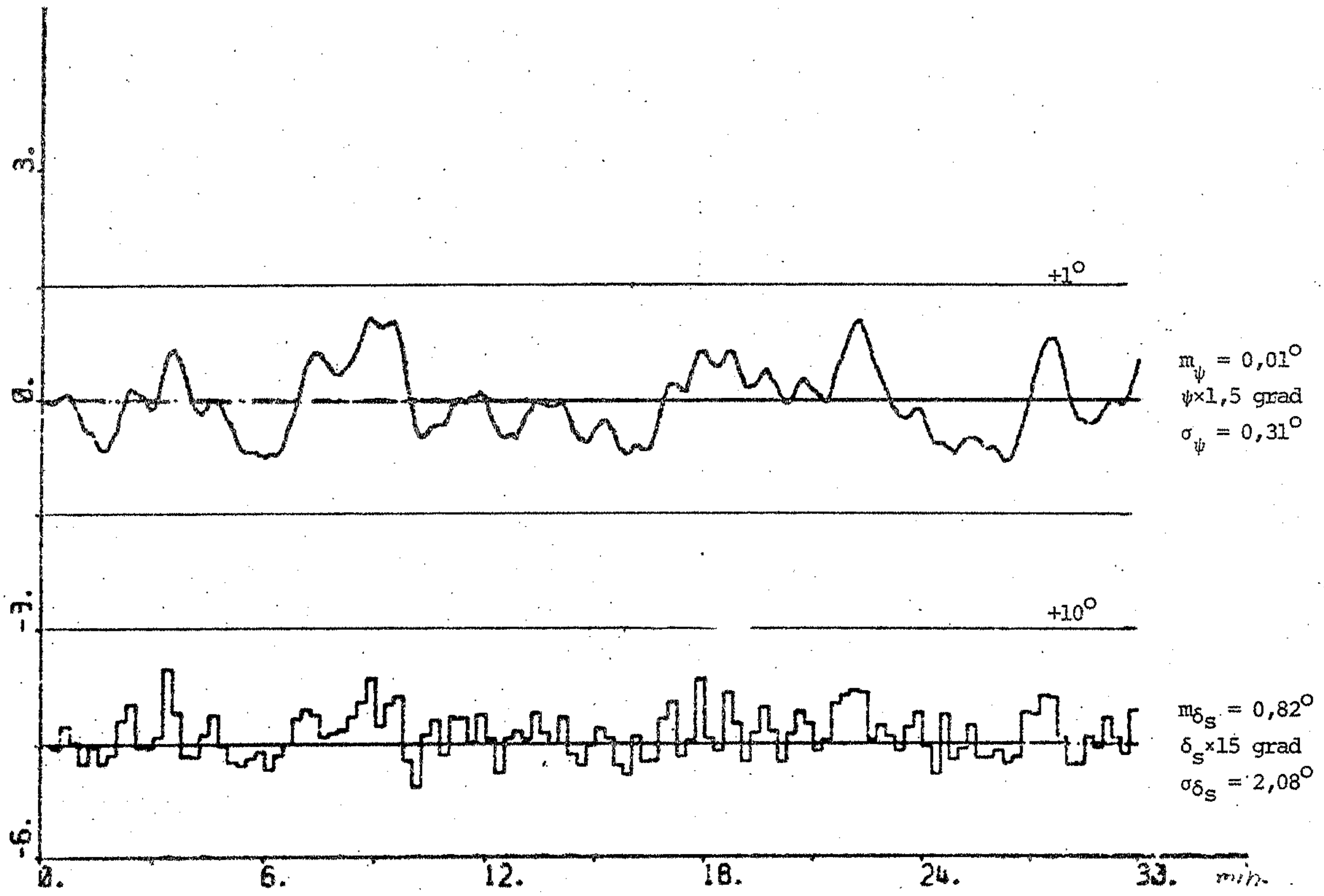


Fig. 4.3a - Styrning med framkoppling av $\hat{v}$ och $\hat{r}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind. Forts. nästa sida.

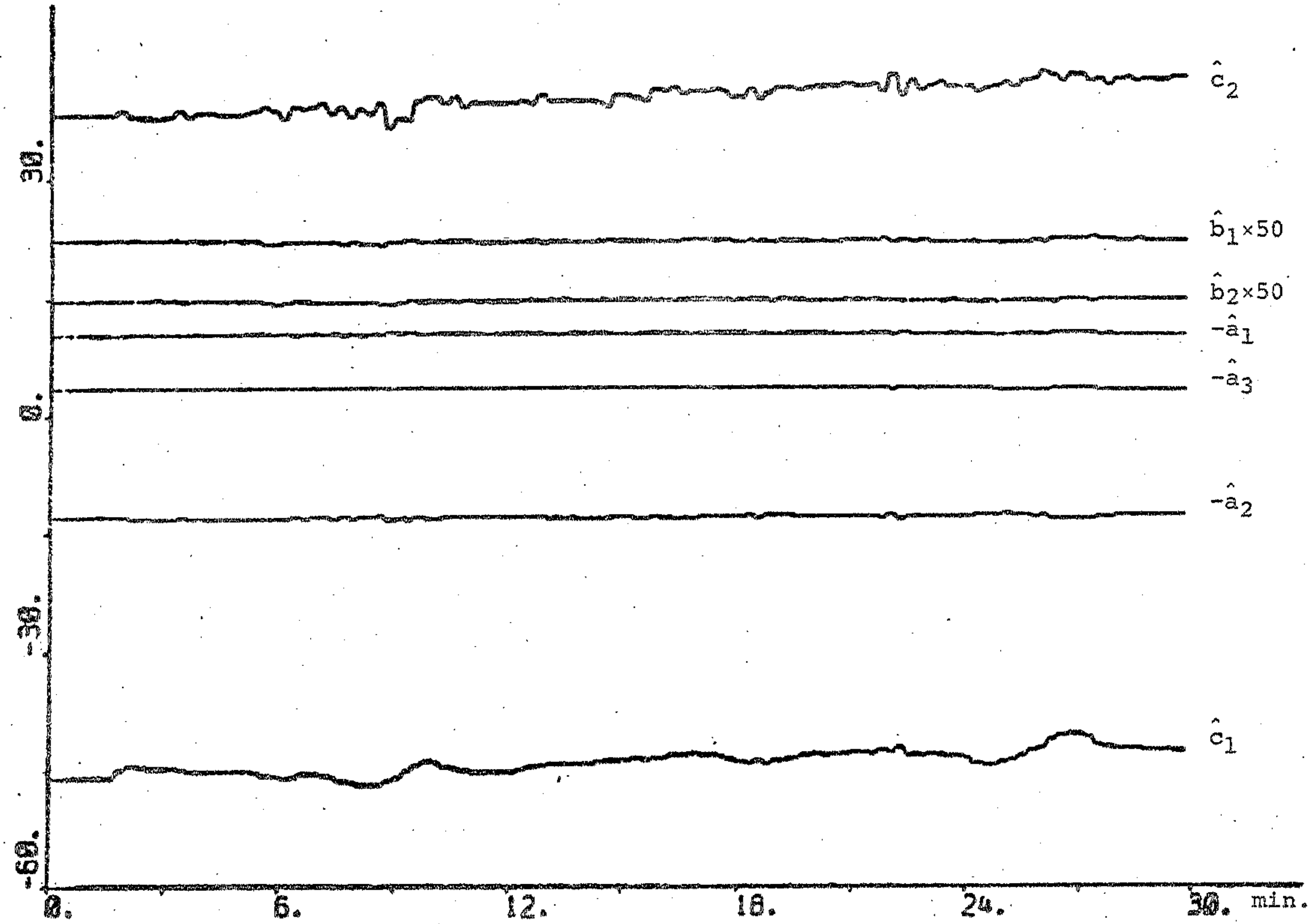

$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
$\hat{c}_1$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
min.

Fig. 4.3b.

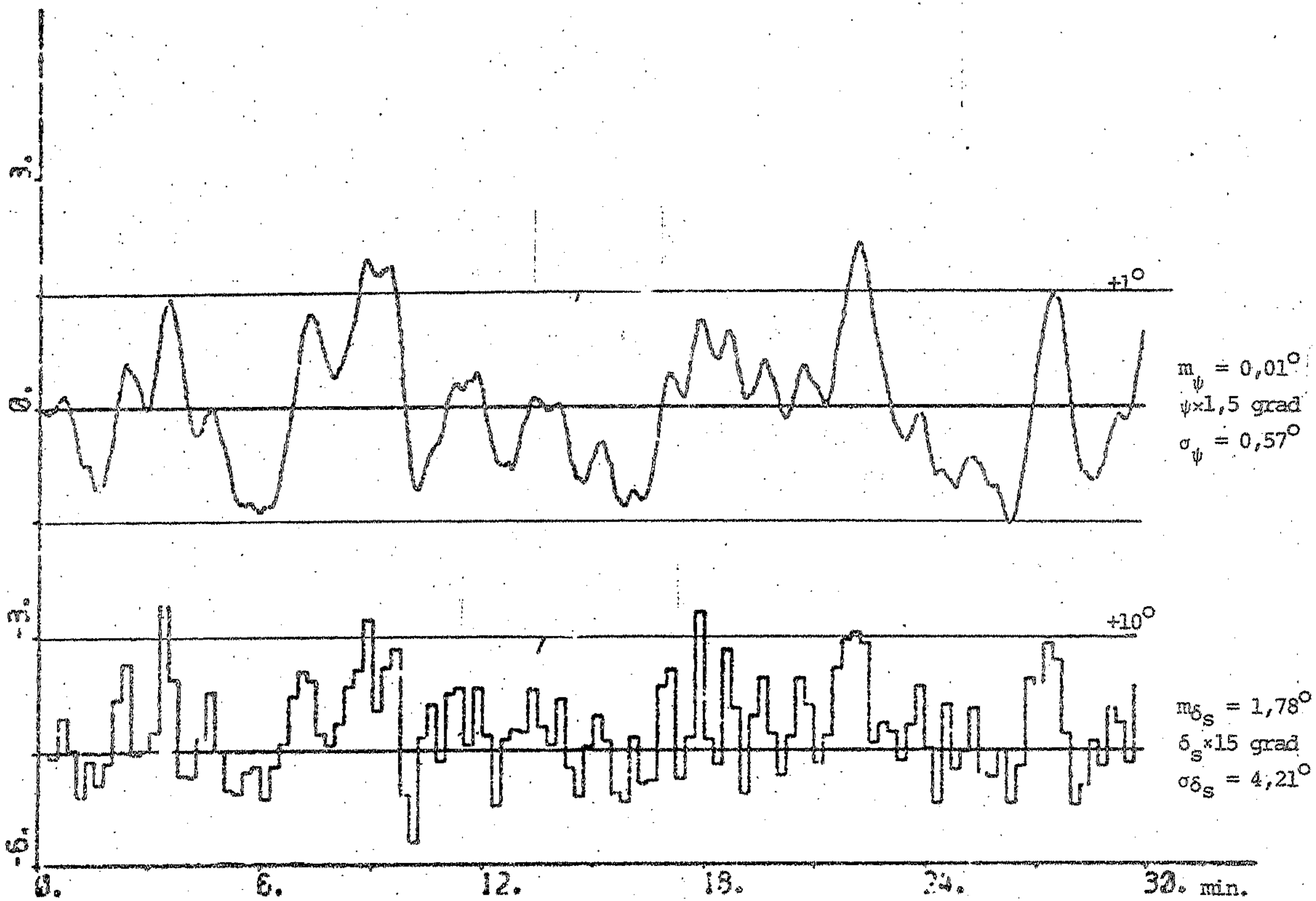


Fig. 4.4a - Styrning med framkoppling av $\hat{v}$ och $\hat{r}$ vid djupgåendet 20 m och hård vind. Forts. nästa sida.

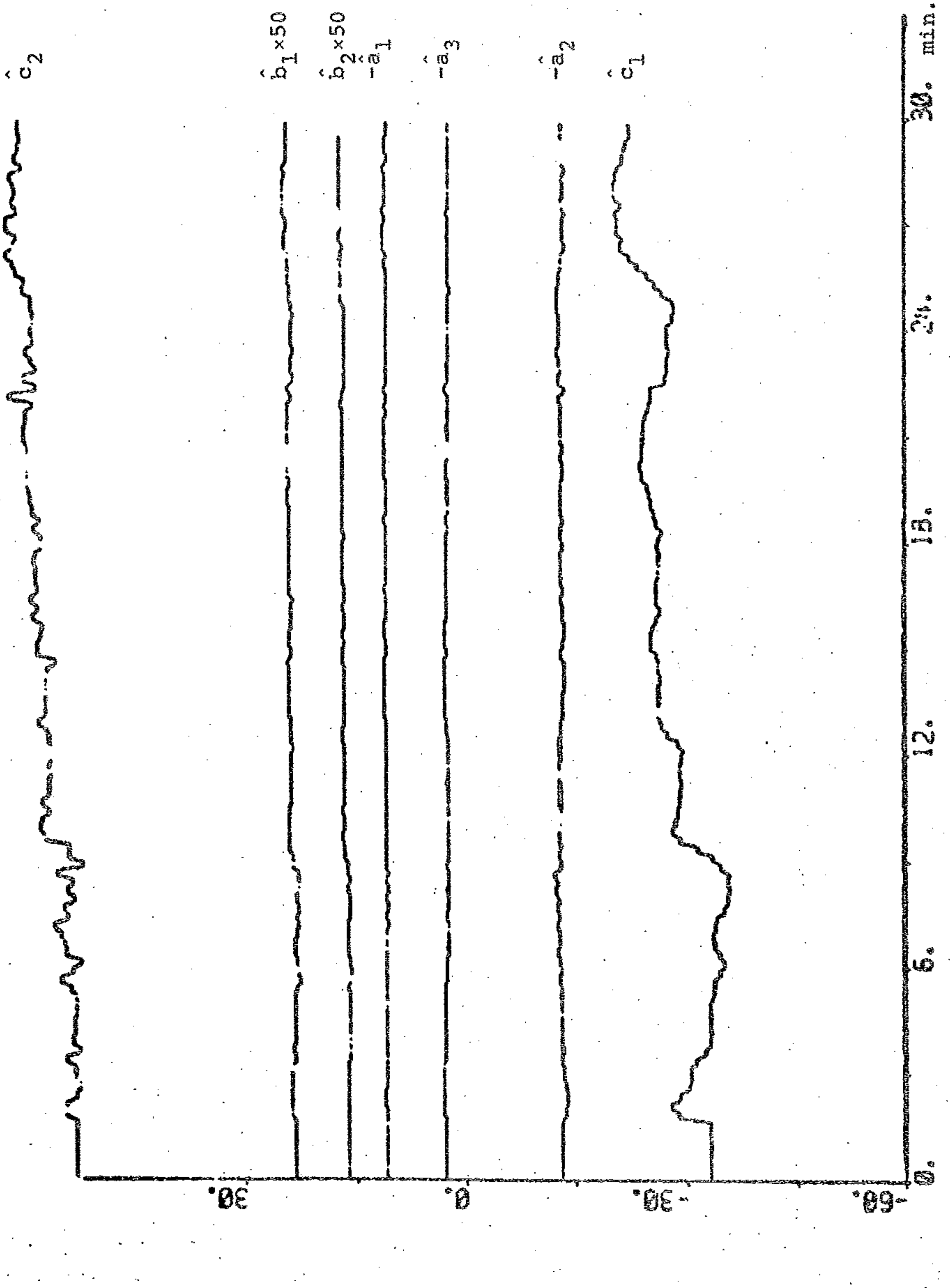

$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
$\hat{c}_1$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.4b

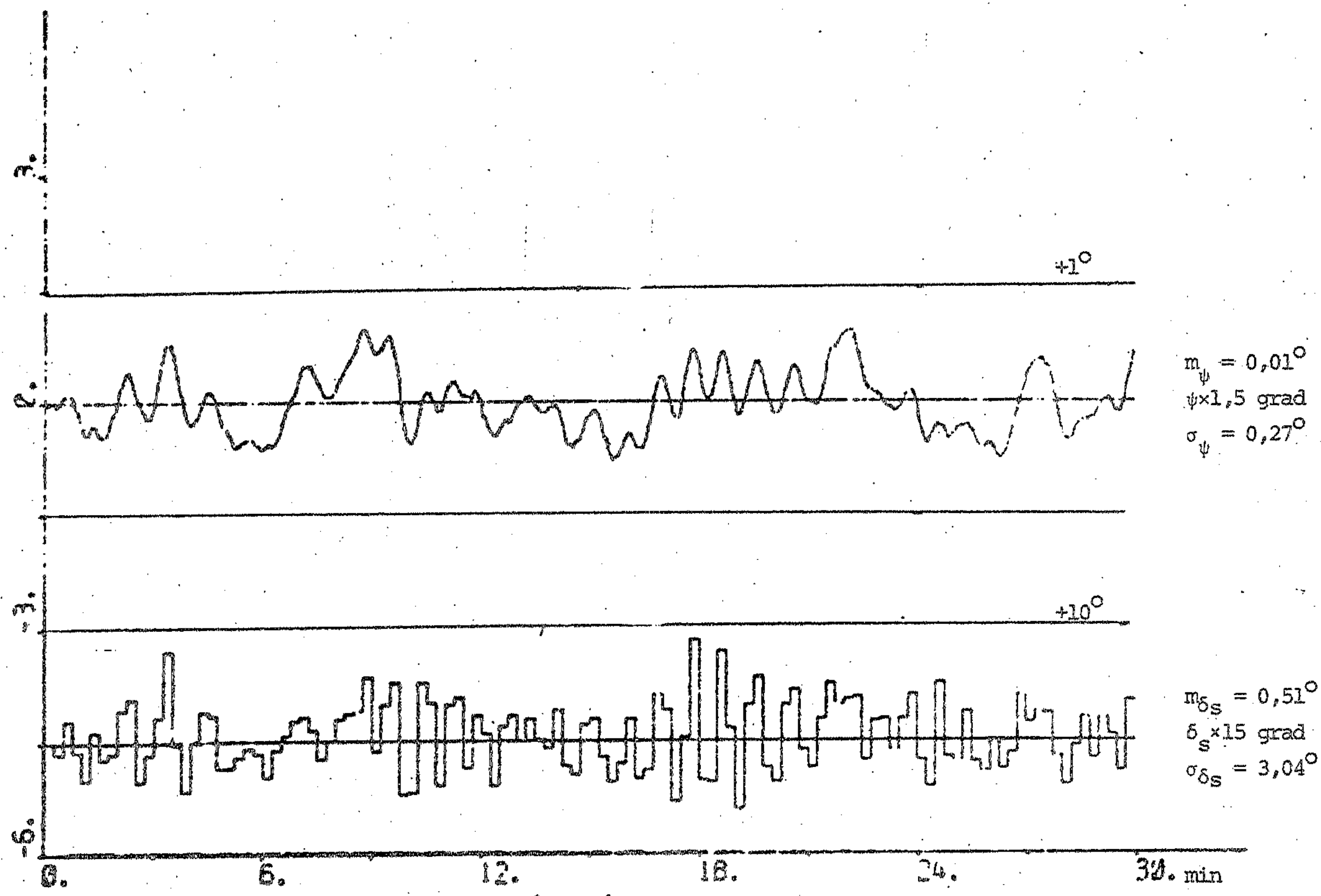
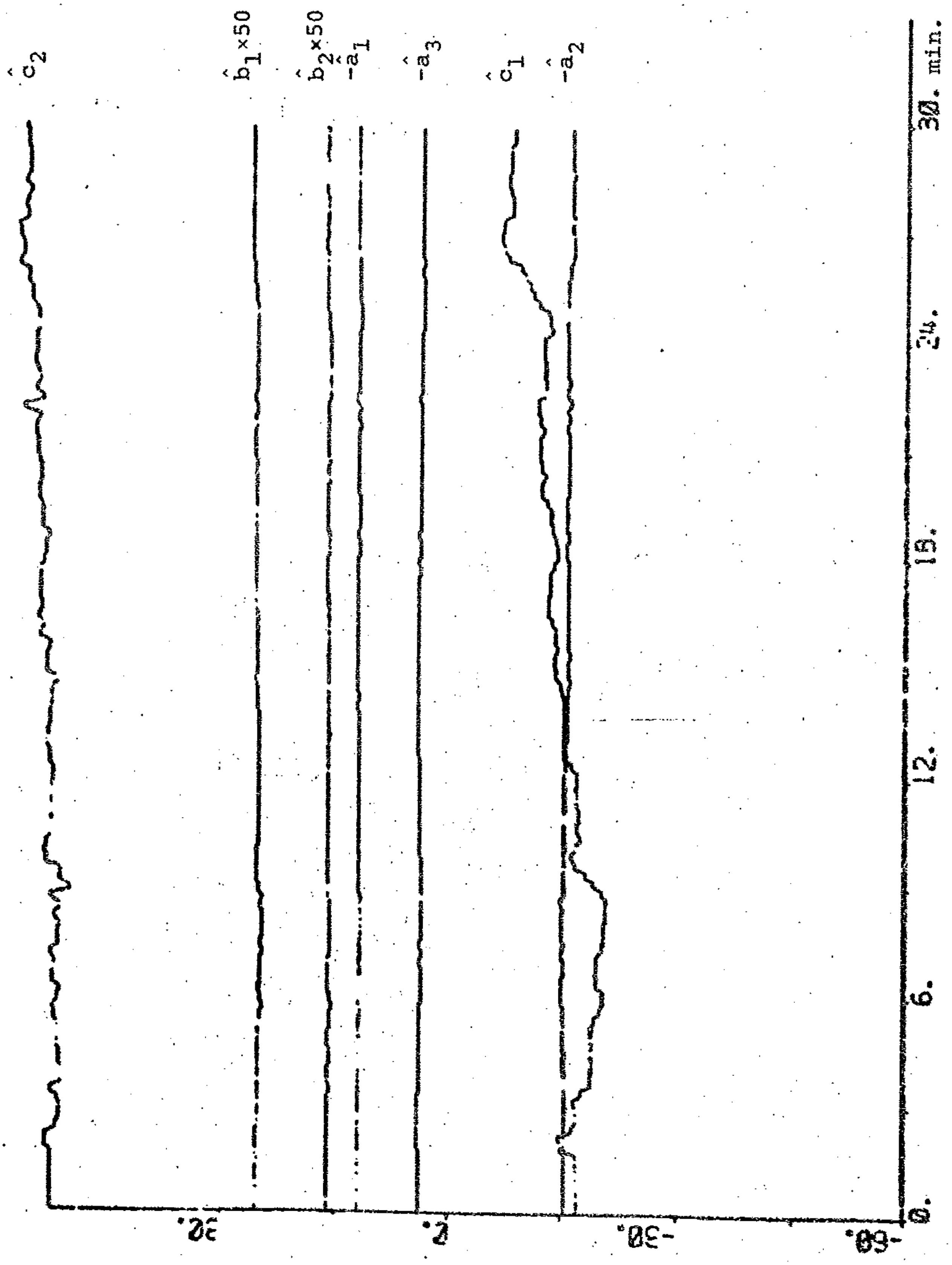


Fig. 4.5a - Styrning med framkoppling av $\hat{v}$ och $\hat{r}$ vid djupgåendet 10,5 m och svag vind. Forts. nästa sida.



$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$\hat{c}_1$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.5b

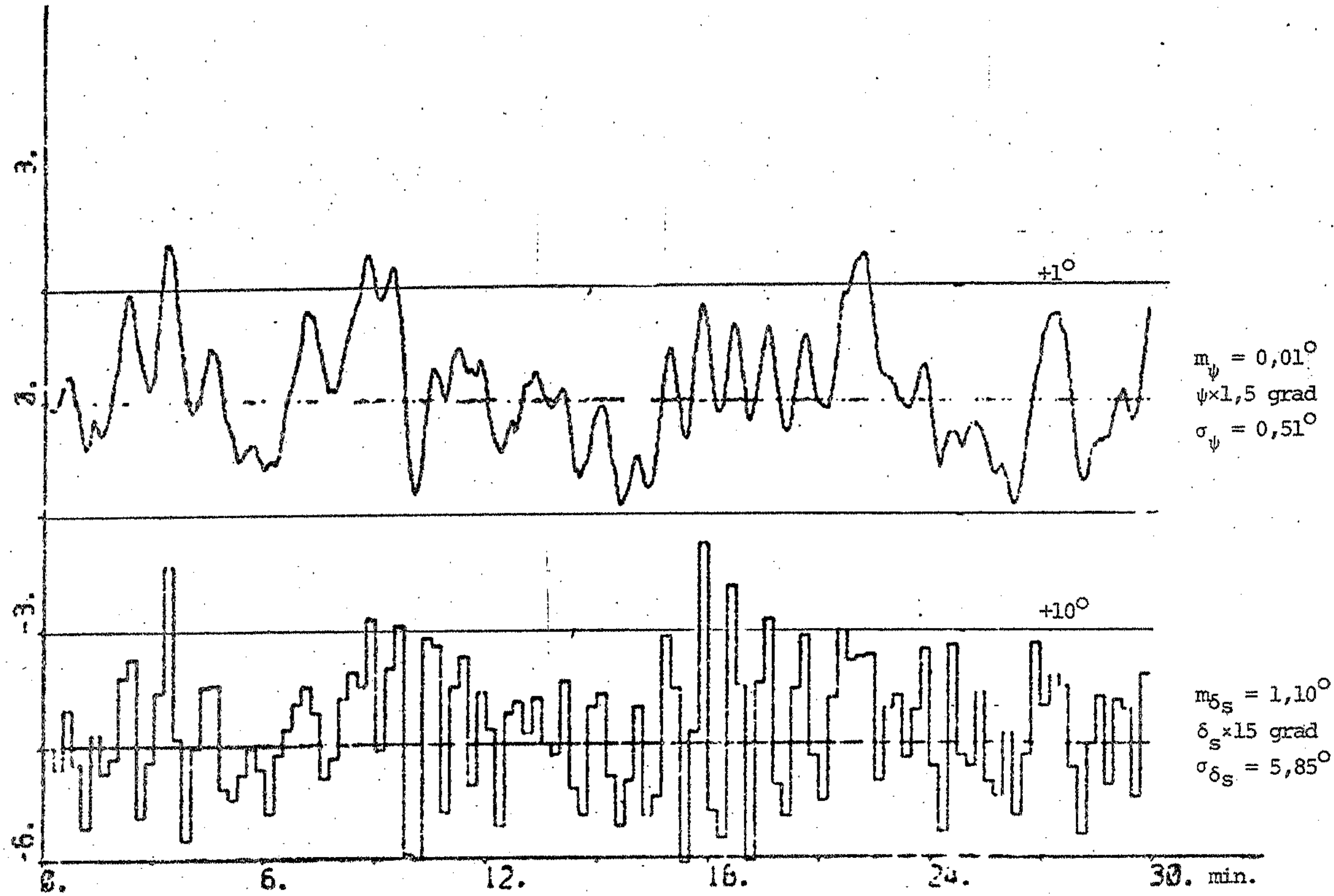


Fig. 4.6a - Styrning med framkoppling av $\hat{v}$ och $\hat{r}$ vid djupgåendet 10,5 m och hård vind. Forts. nästa sida.

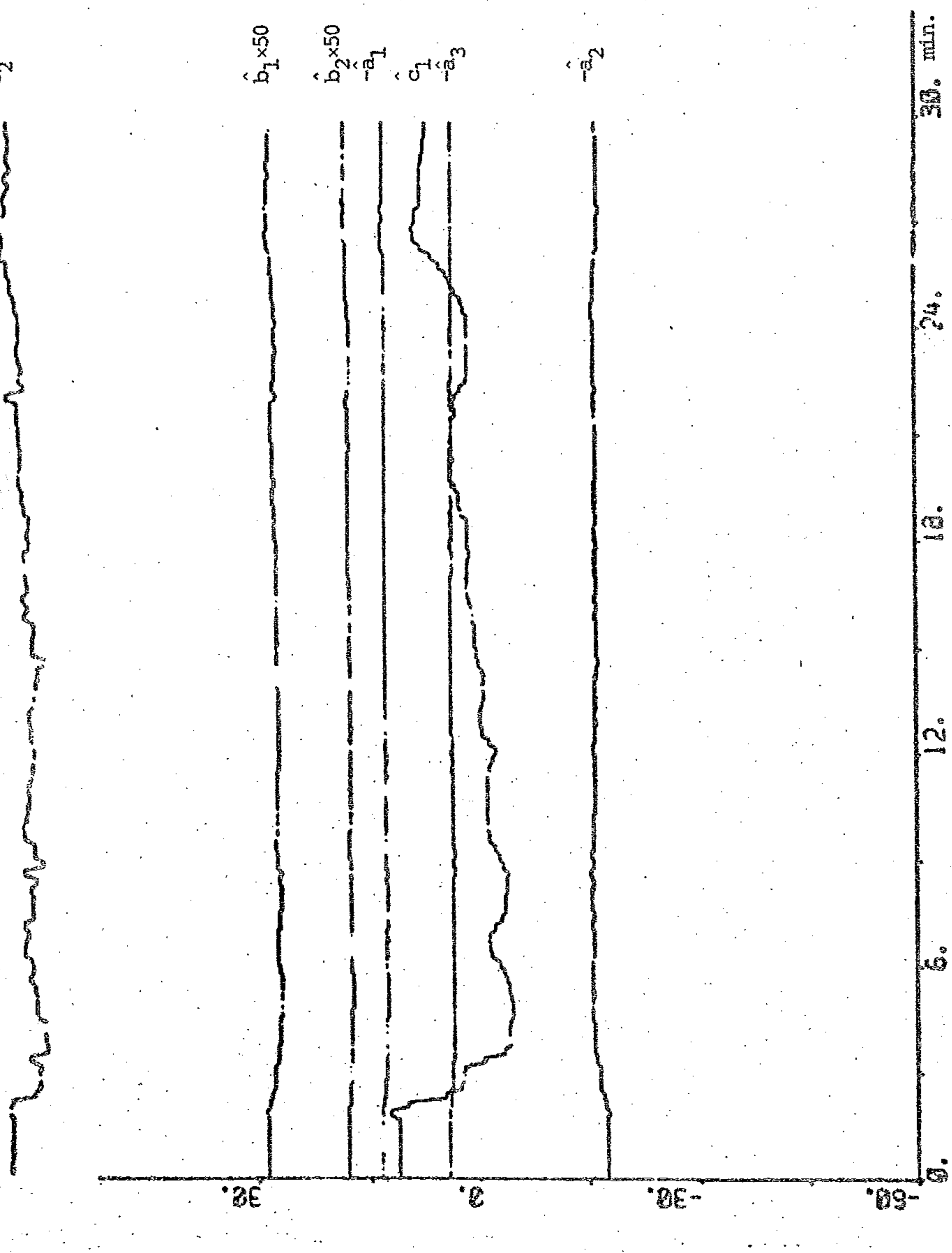

$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$\hat{c}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.6b

		Svag vind	Hård vind
Djupgående 20 m	V_1 gr^2	0,60	2,41
	V_2 gr^2	0,53	2,10
	σ_ψ gr	0,31	0,57
	σ_{δ_S} gr	2,08	4,21
Djupgående 10,5 m	V_1 gr^2	1,02	3,81
	V_2 gr^2	1,00	3,69
	σ_ψ gr	0,27	0,51
	σ_{δ_S} gr	3,04	5,85

Tabell 4.2 - Resultat av simuleringar med framkoppling av endast $\hat{v}$ och $\hat{r}$.

Om tabell 4.2 jämförs med tabell 4.1 kan det konstateras att framkoppling av $\hat{F}$ och $\hat{M}$ inte förbättrar styrningen.

Proceduren vid samtliga simuleringar i denna rapport har varit att låta regulatorparametrarna först svänga in sig för fallet svag vind och djupgåendet 20 m. Dessa injusterade parametrar med tillhörande kovariansmatris har sedan använts som startvärden vid simuleringar av de andra fallen. Möjligen har inte regulatorparametrarna hunnit svänga in sig när djupgåendet har ändrats från 20 m till 10,5 m, varför resultaten för det senare djupgåendet är något sämre än väntat. Emellertid är resultaten av simuleringar vid djupgåendet 20 m alltid sinsemellan jämförbara, liksom simuleringar vid djupgåendet 10,5 m är det.

För att utröna vilken av framkopplingarna $\hat{v}$ eller $\hat{r}$ som är viktigast för styrningen utfördes två simuleringar vid djupgåendet 20 m och svag vind. Se fig. 4.7 och 4.8 samt tabell 4.3.

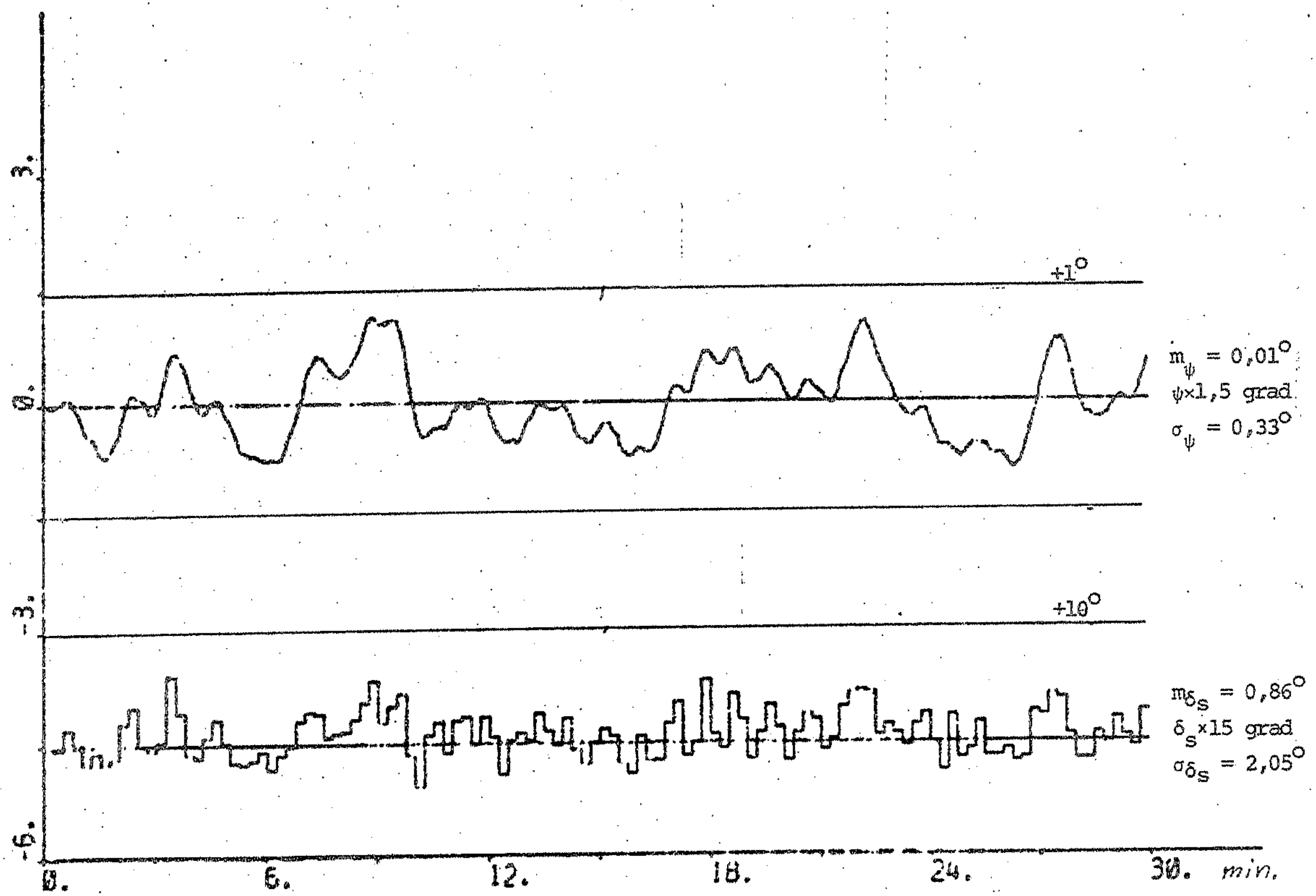


Fig. 4.7a – Styrning med framkoppling av $\hat{v}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind. Forts. nästa sida.

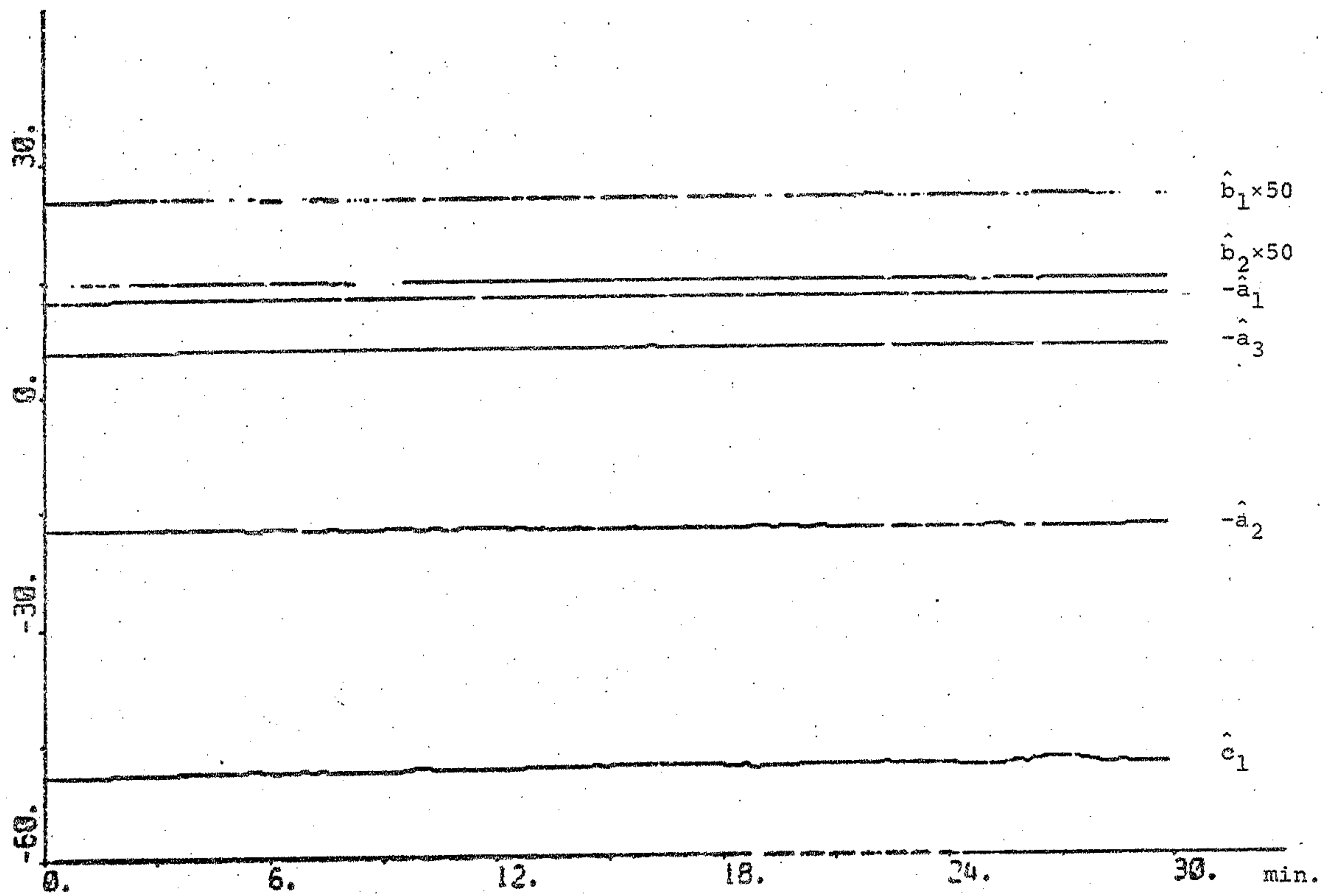

30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
min.
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
$\hat{c}_1$

Fig. 4.7b.

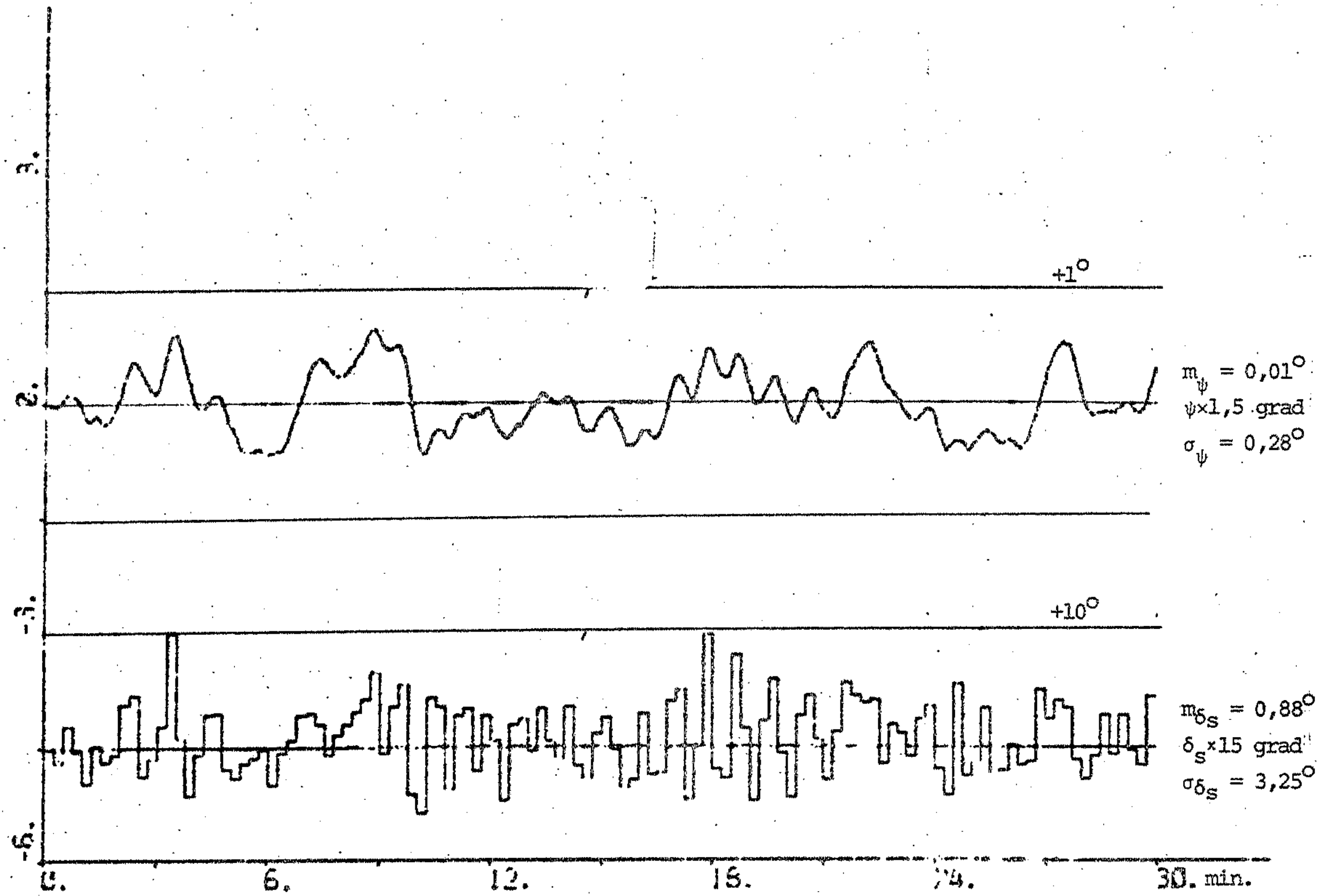


Fig. 4.8a - Styrning med framkoppling av $\hat{r}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind. Forts. nästa sida.

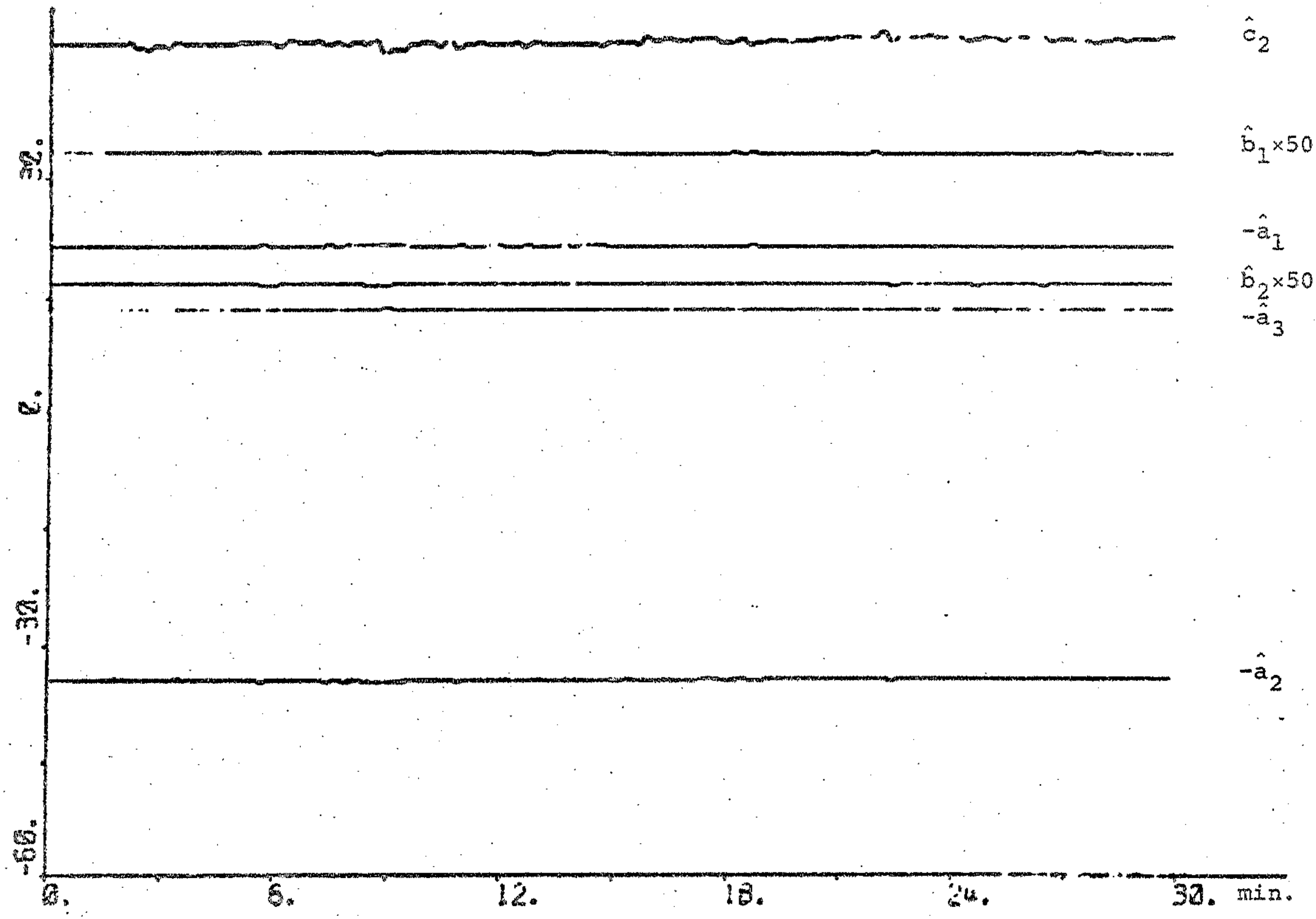

$\hat{c}_2$
$\hat{b}_1 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.8b

		Framkoppling $\hat{v}$	Framkoppling $\hat{r}$
Djupgående 20 m Svag vind	V_1 gr^2	0,60	1,21
	V_2 gr^2	0,53	1,13
	σ_ψ gr	0,33	0,28
	$\sigma_{\delta s}$ gr	2,05	3,25

Tabell 4.3 - Resultat av simulering med framkoppling av endast $\hat{v}$ resp. endast $\hat{r}$.

Tabell 4.3 bör jämföras med tabell 4.2 och slutsatsen blir att framkopplingen av $\hat{v}$ är den absolut viktigaste, medan framkopplingen av $\hat{r}$ kan undvaras. Denna slutsats är egentligen inte förvånande, eftersom kurssignalen ger information om girvinkelhastigheten medan information om fartygsrörelsen i tvärsled endast kommer in till regulatorn genom $\hat{v}$.

Ett antal simuleringar utan Kalman-filter, d.v.s. i regulatorn (4.1) och (4.2) används ψ_m istället för $\hat{\psi}$ och inga framkopplingar, visas i fig. 4.9 - 4.12. Resultaten finns sammanställda i tabell 4.4 som bör jämföras med tidigare tabeller, speciellt tabell 4.2. Slutsatsen blir att ett Kalman-filter otvetydigt förbättrar styrningen. Om tabell 4.4 jämförs med tabell 4.3 ser man emellertid att framkoppling av enbart $\hat{r}$ är något sämre än inget Kalman-filter alls, vilket möjligen kan förklaras med att regulatorparametrarna i det förra fallet inte har hunnit konvergera ordentligt.

		Svag vind	Hård vind
Djupgående 20 m	V_1 gr^2	1,04	3,36
	V_2 gr^2	0,98	3,02
	σ_ψ gr	0,40	0,66
	σ_{δ_S} gr	2,86	5,08
Djupgående 10,5 m	V_1 gr^2	2,47	6,44
	V_2 gr^2	2,44	6,30
	σ_ψ gr	0,30	0,59
	σ_{δ_S} gr	4,85	7,71

Tabell 4.4 - Resultat av simuleringar utan framkoppling och med kursmätningen ψ_m istället för estimatet $\hat{\psi}$ i regulatorn.

Slutligen visas i fig. 4.13 och 4.14 simuleringar utan någon framkoppling, där i första fallet den verkliga kursen ψ har använts och i det andra fallet kursestimatet $\hat{\psi}$. Resultaten finns sammanställda i tabell 4.5 och genom att jämföra med tabell 4.4 kan vi dra slutsatsen att styrningen förbättras om kursestimatet $\hat{\psi}$ används istället för kursmätningen ψ_m. Naturligtvis blir styrningen lite bättre genom att använda den verkliga kursen ψ istället för kursestimatet $\hat{\psi}$, men detta går givetvis inte att utnyttja i praktiken.

		Verklig kurs ψ	Kursestimat $\hat{\psi}$
Djupgående 20 m Svag vind	V_1 gr^2	0,77	0,85
	V_2 gr^2	0,70	0,78
	σ_ψ gr	0,37	0,38
	σ_{δ_S} gr	2,37	2,51

Tabell 4.5 - Resultat av simulering utan framkoppling där den verkliga kursen ψ resp. kursestimatet $\hat{\psi}$ har använts.

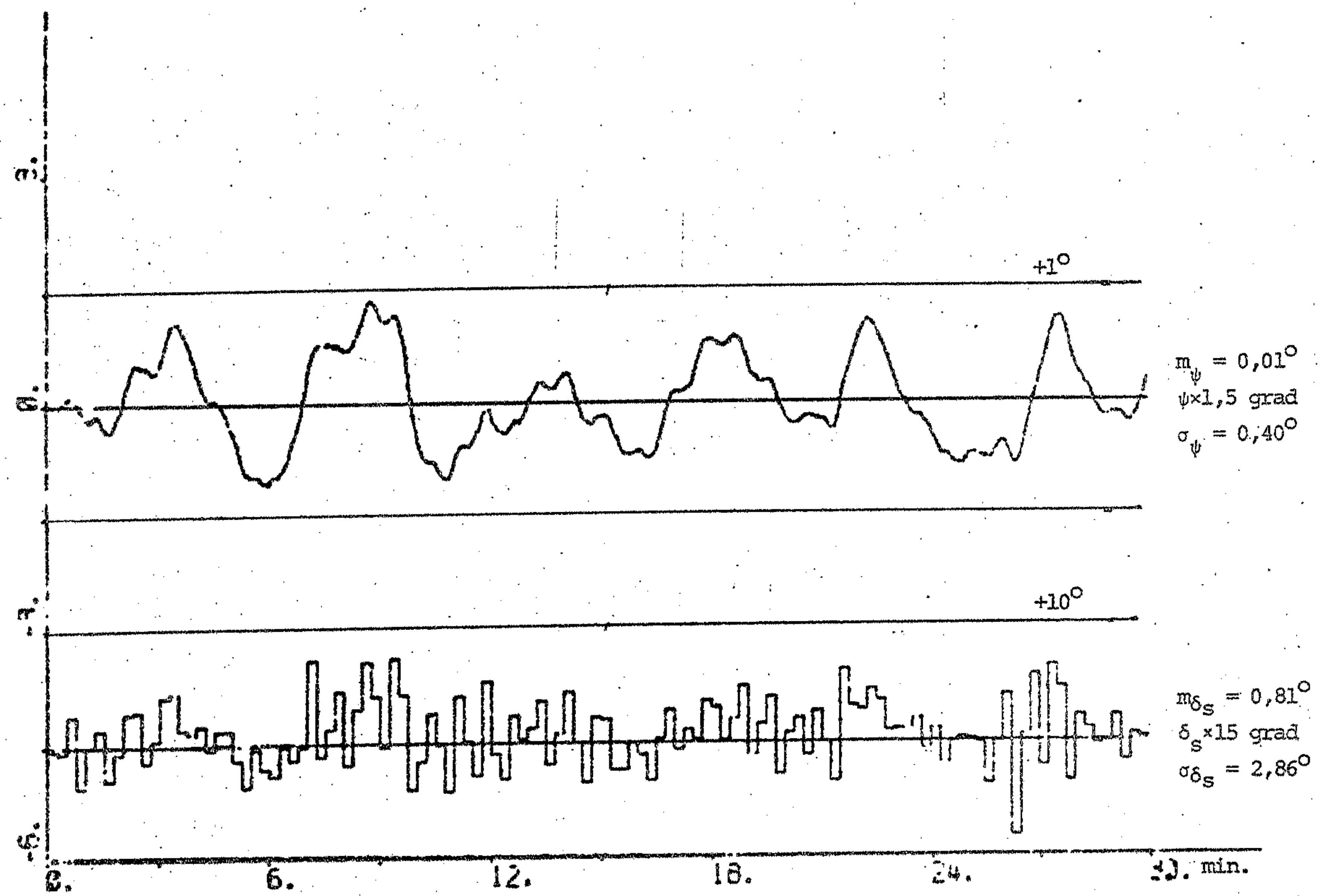


Fig. 4.9a – Styrning utan framkoppling och med ψ_m istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind.
Forts. nästa sida.

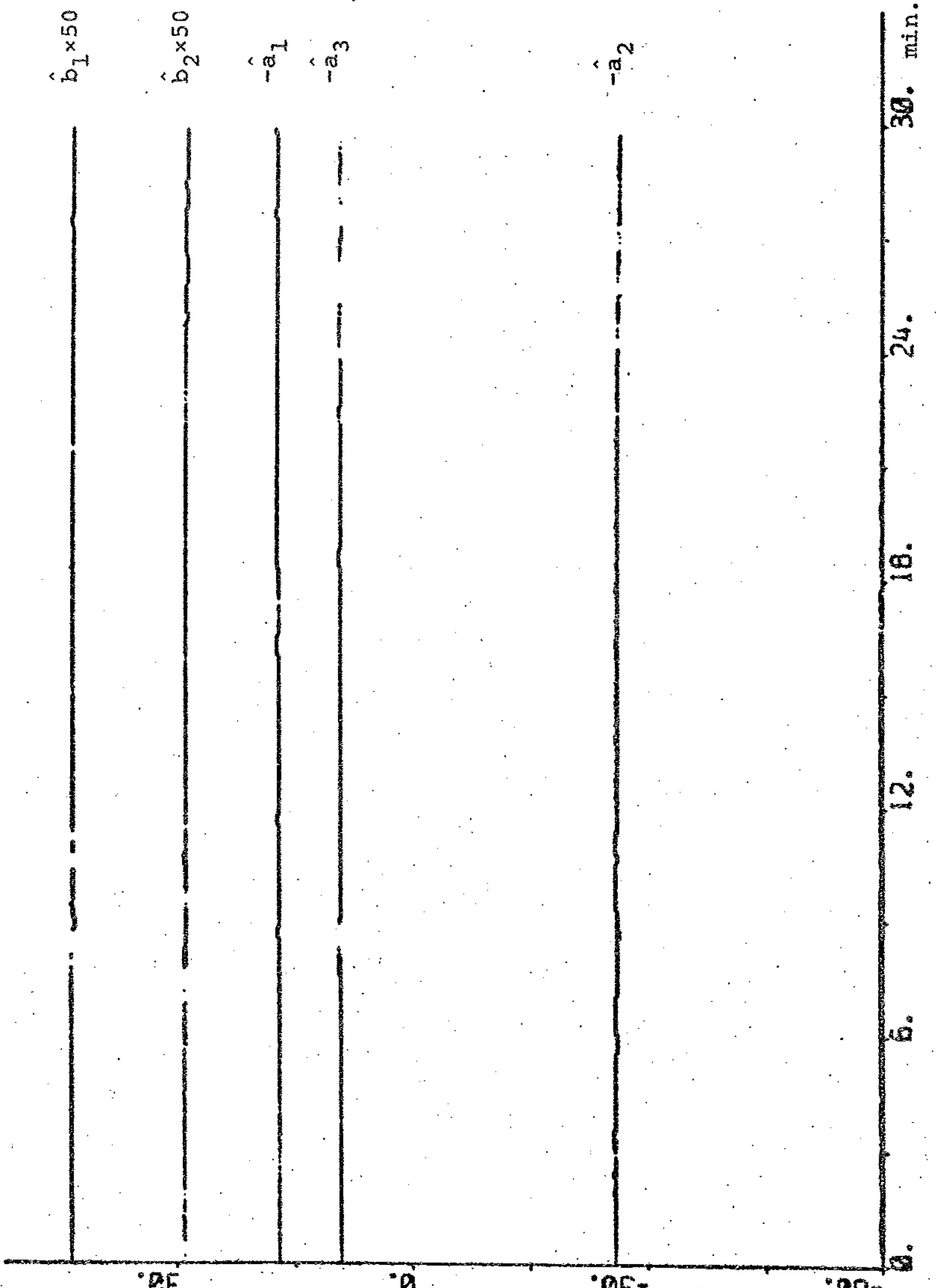

$\hat{b}_1\times50$
$\hat{b}_2\times50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.9b

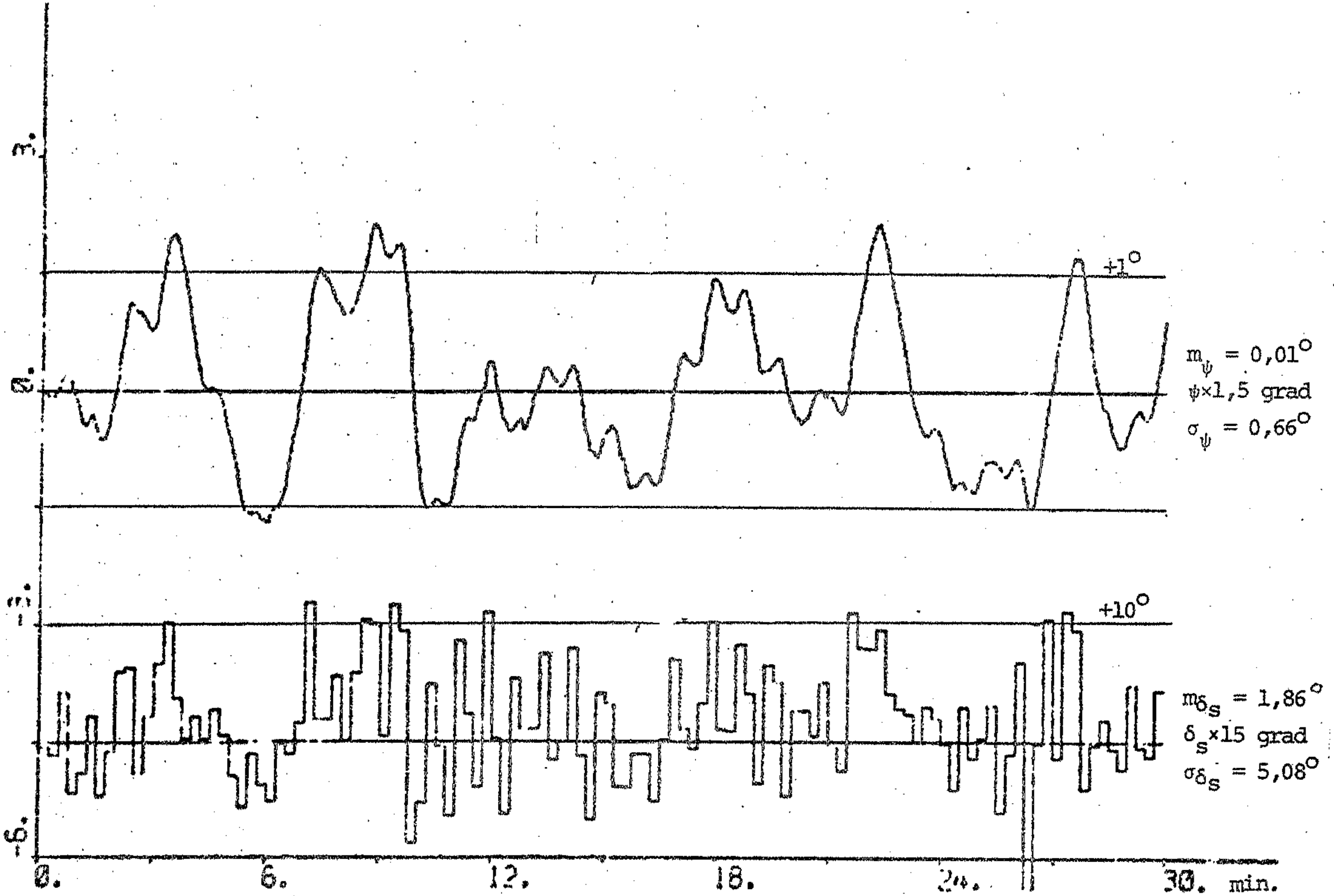
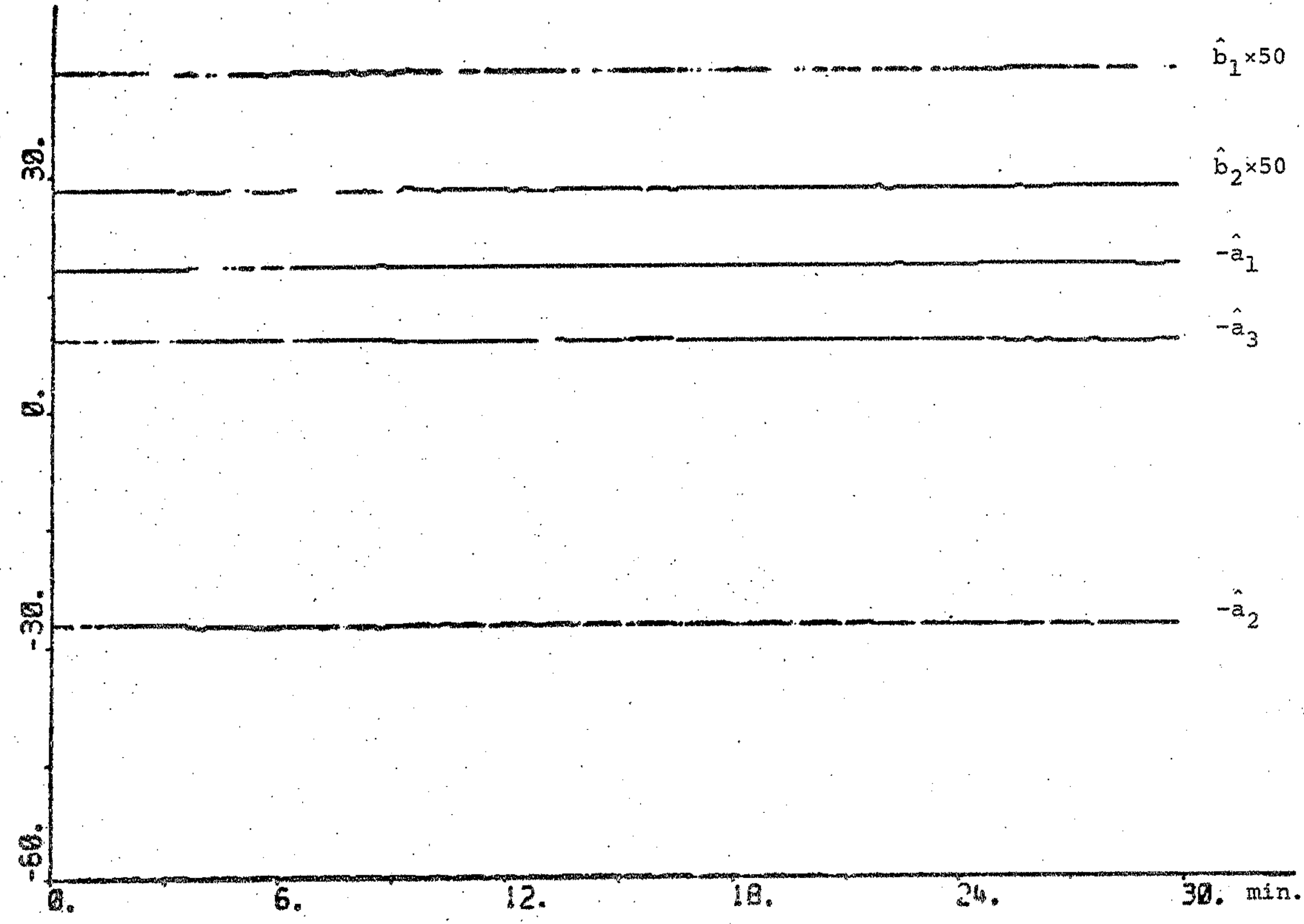


Fig. 4.10a - Styrning utan framkoppling och med ψ_m istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 20 m och hård vind.
Forts. nästa sida.



30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.
$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$

Fig. 4.10b

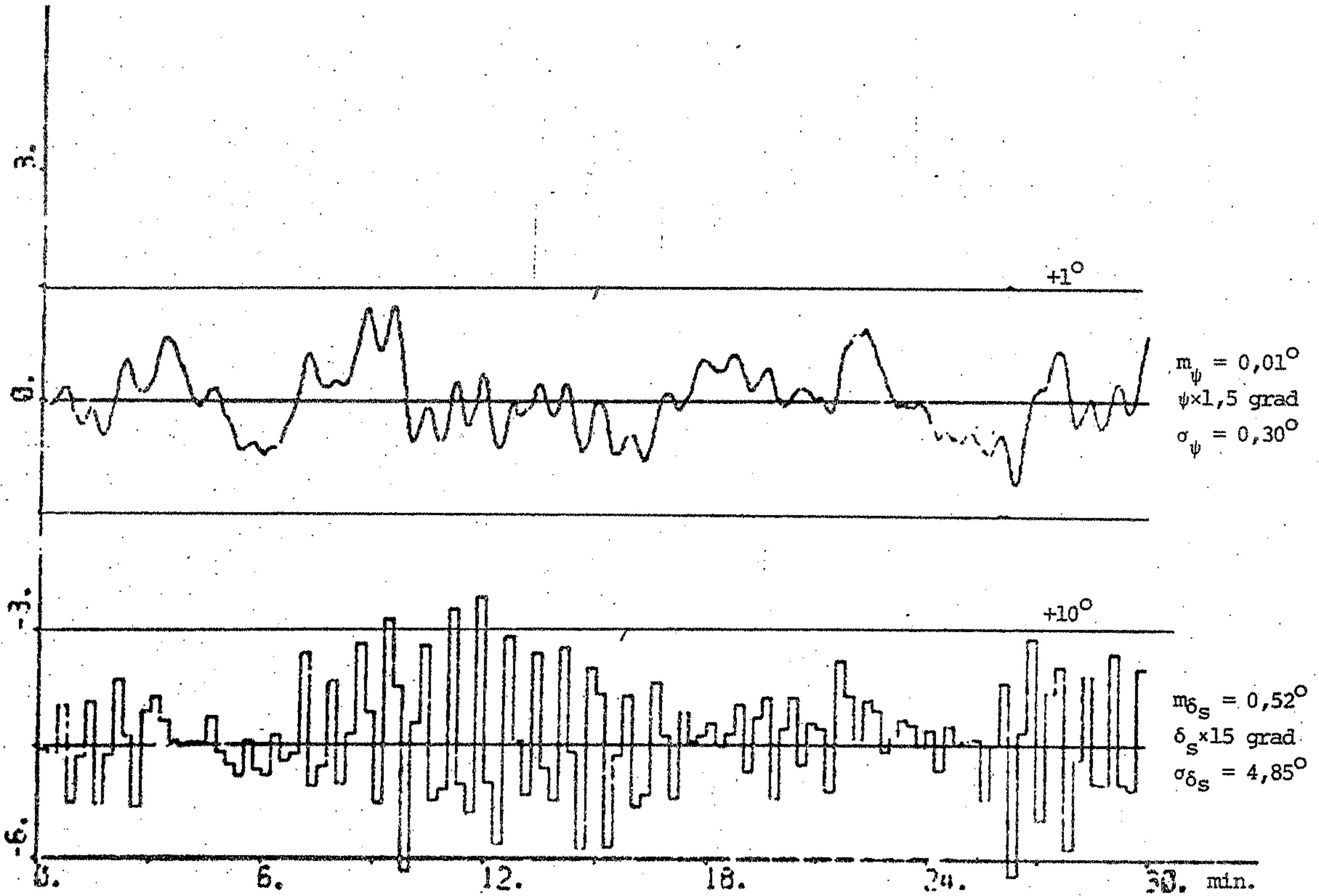


Fig. 4.11a - Styrning utan framkoppling och med ψ_m istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 10,5 m och svag vind.
Forts. nästa sida.

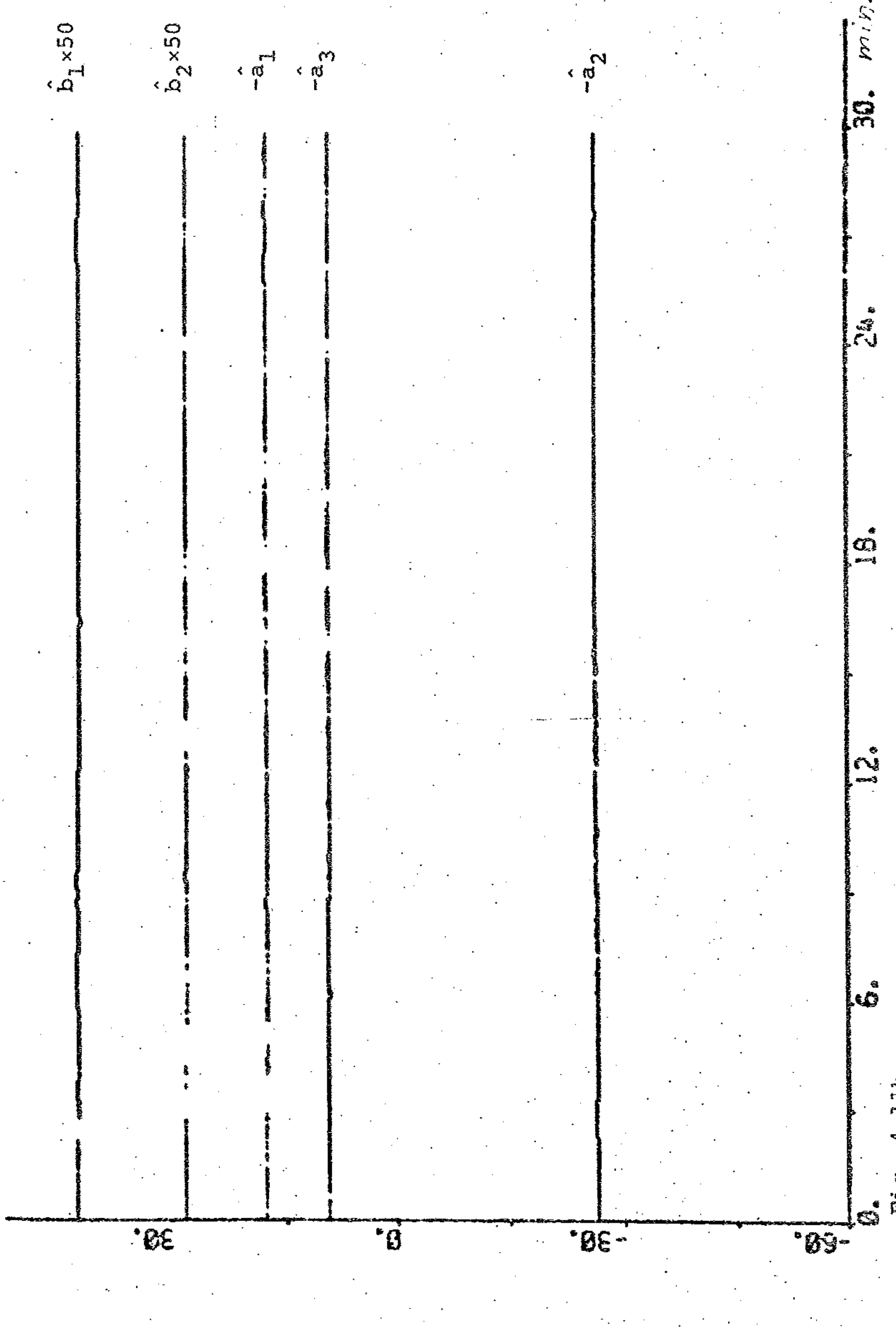

$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
min.
0.
6.
12.
18.
24.
30.
30.
0.
-30.
-60.

Fig. 4.11b

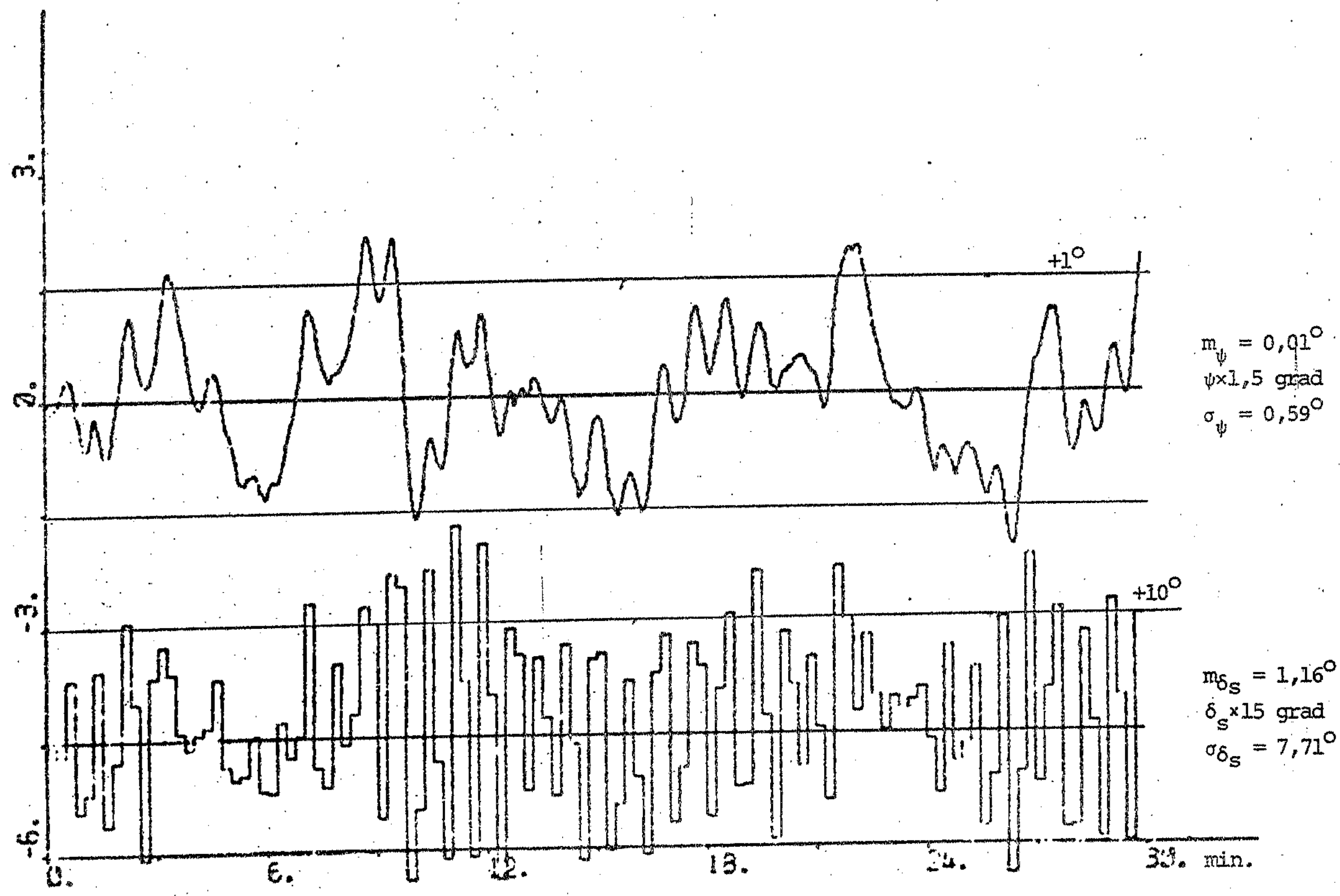
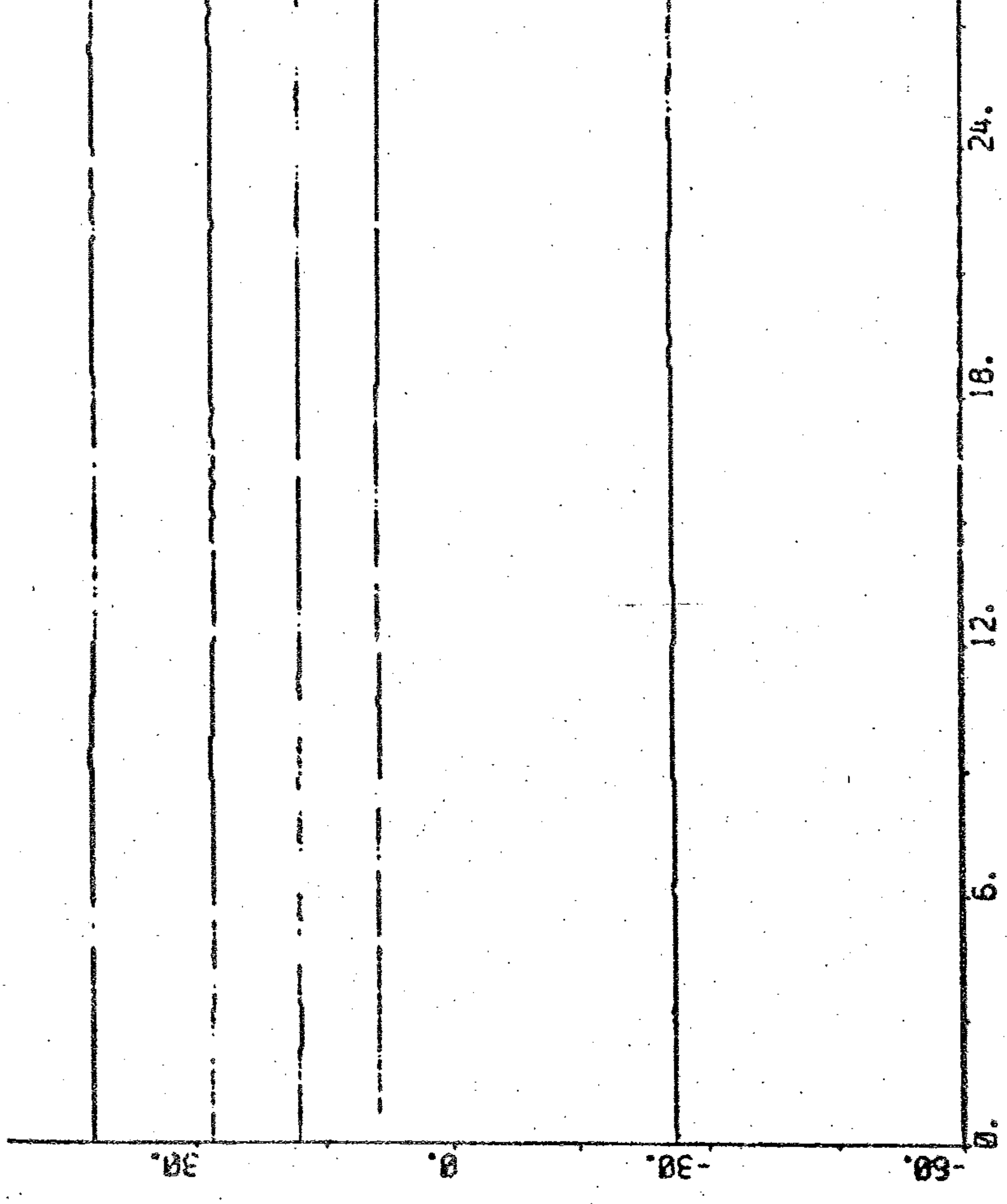


Fig. 4.12a – Styrning utan framkoppling och med ψ_m istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 10,5 m och hård vind.
Forts. nästa sida.



$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.12b.

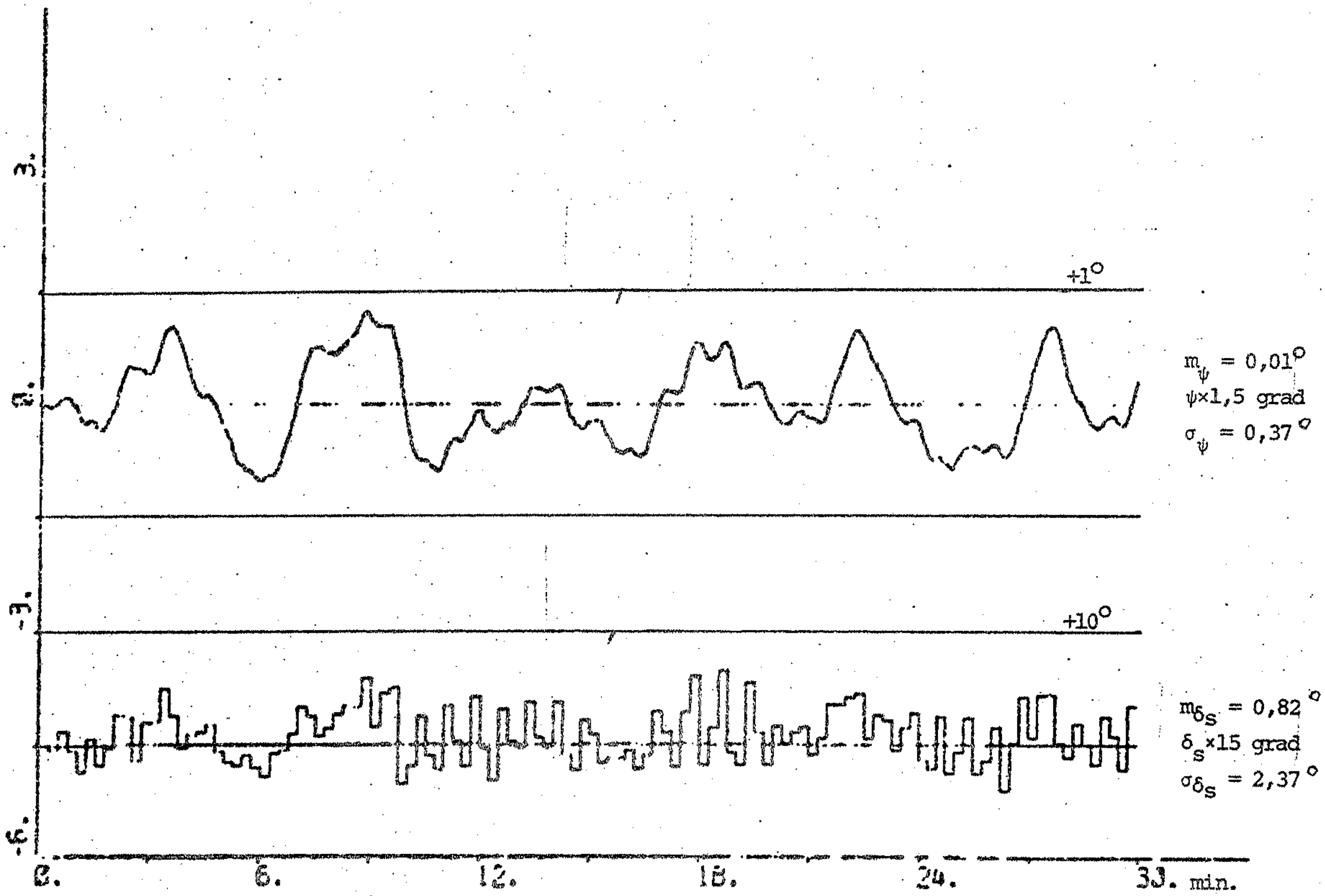


Fig. 4.13a - Styrning utan framkoppling och med ψ istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind.
Forts. nästa sida.

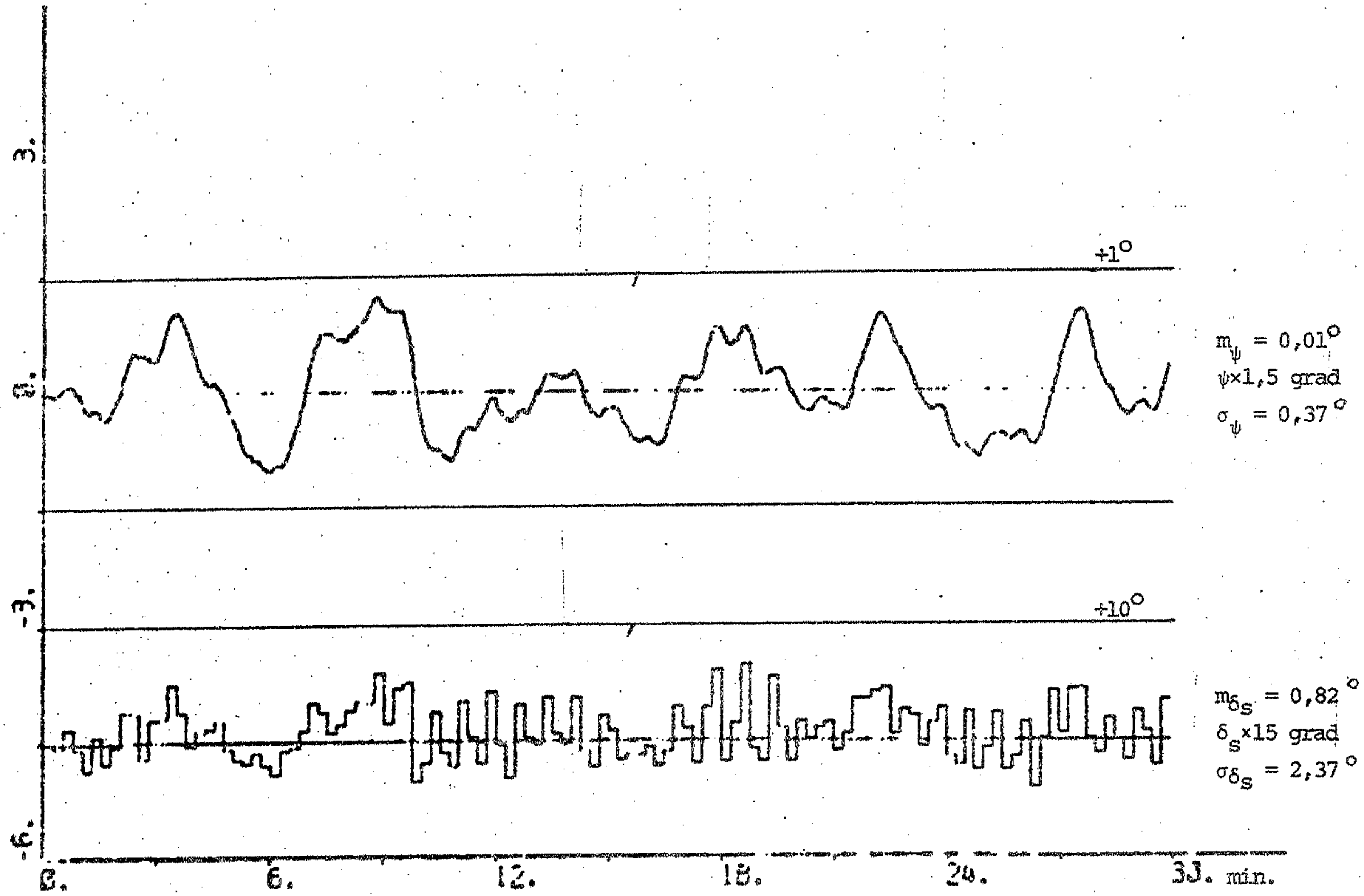
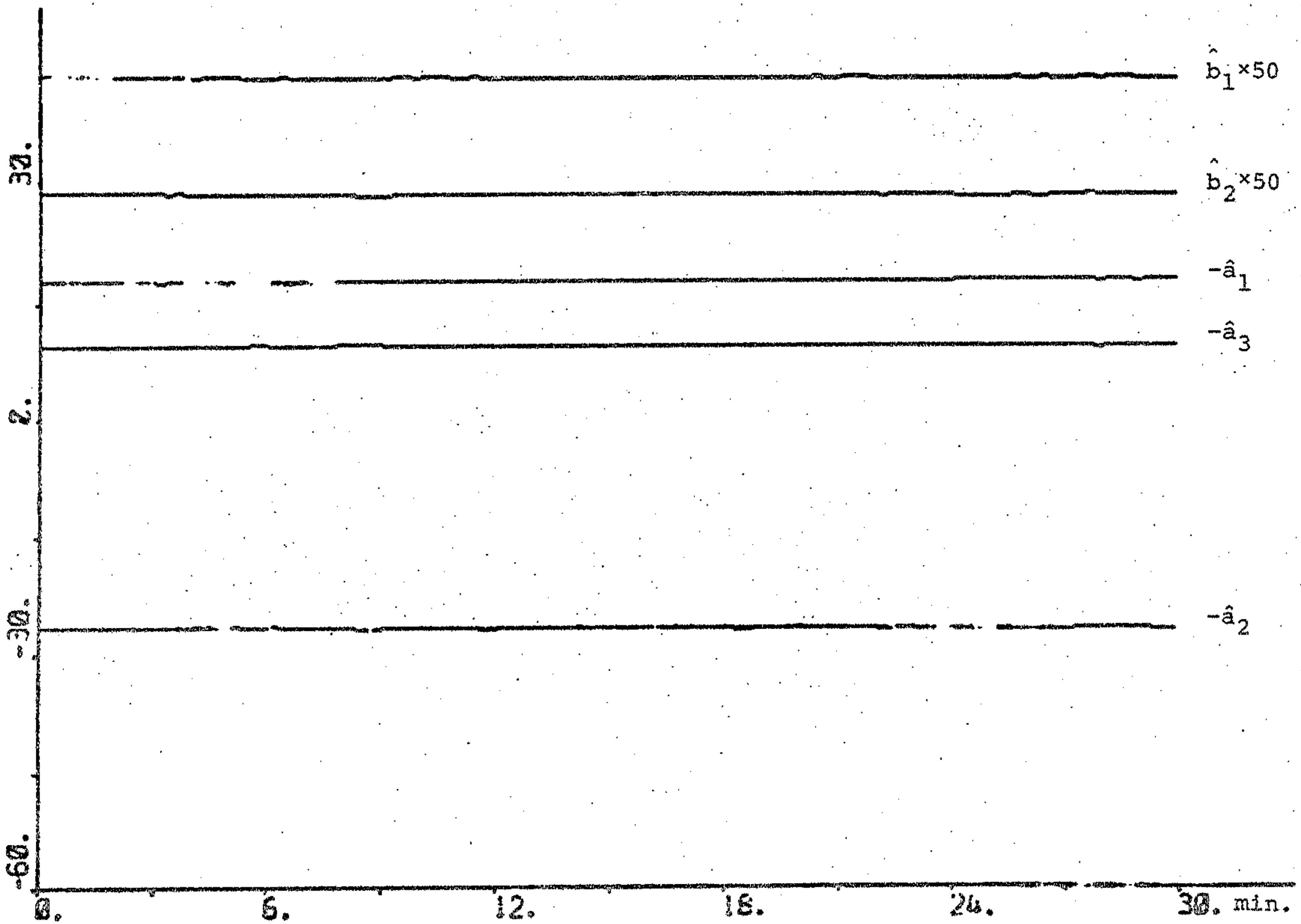
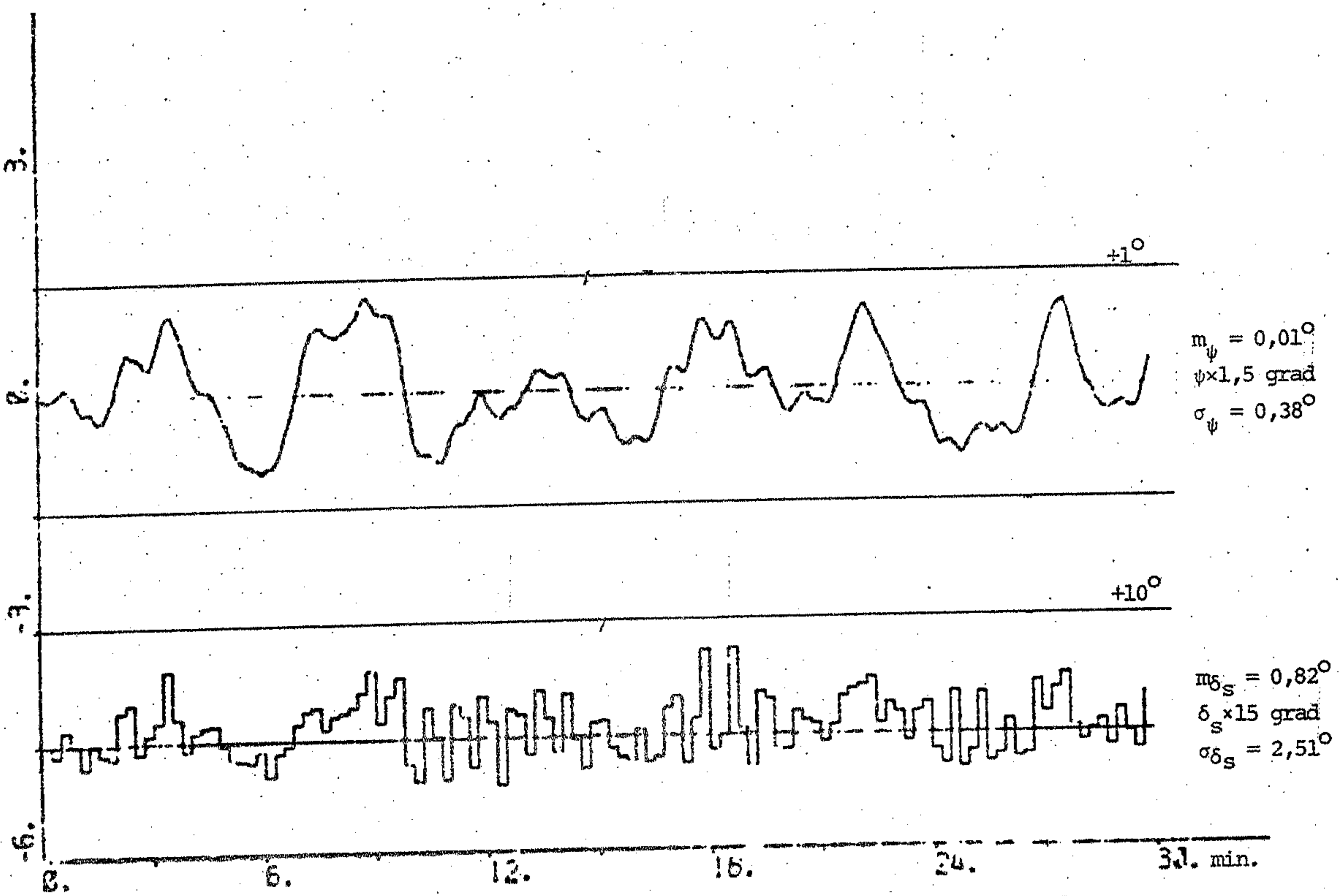


Fig. 4.13a - Styrning utan framkoppling och med ψ istället för $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind.
Forts. nästa sida.

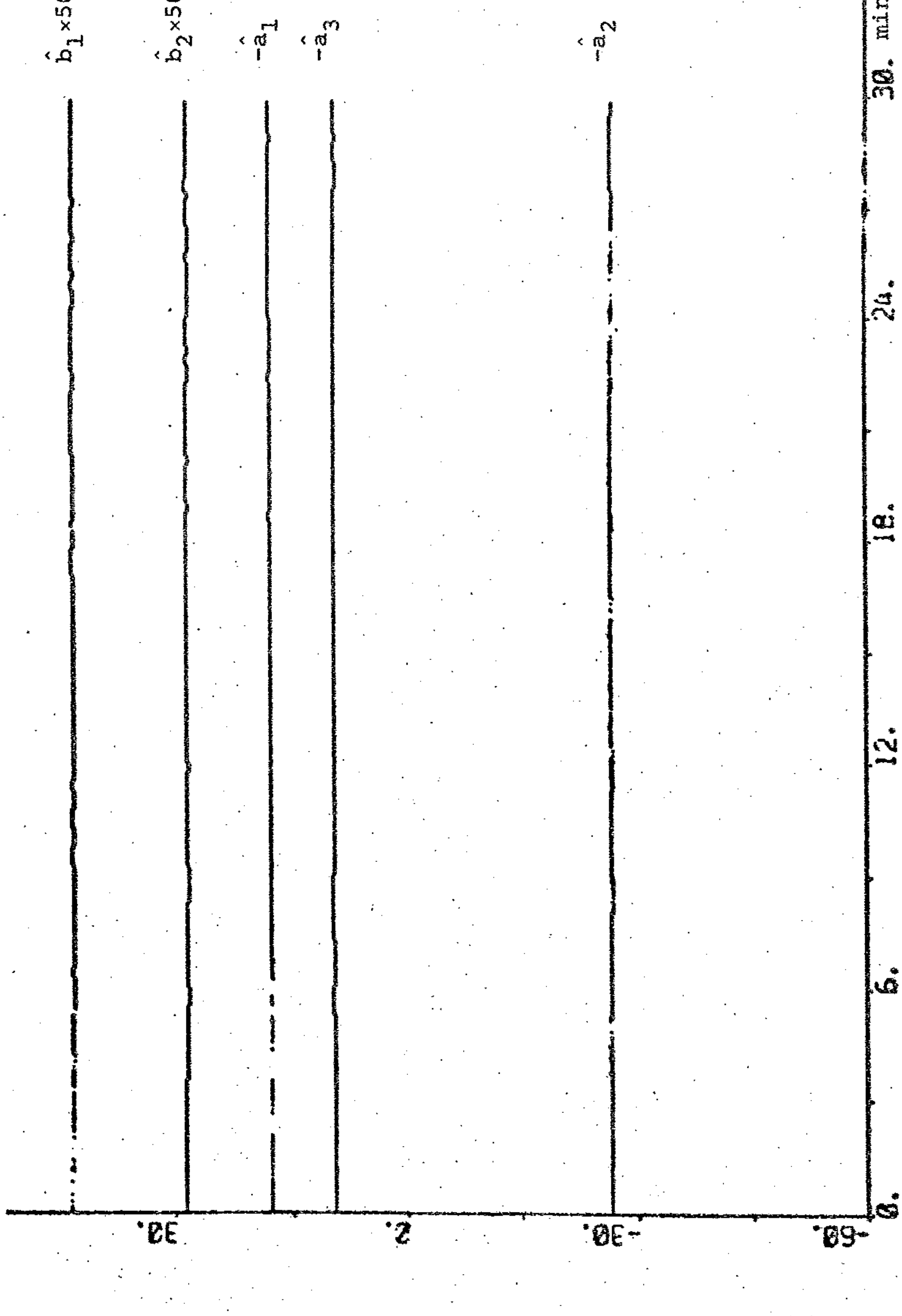


$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
2.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.13b



<u>Fig. 4.14a</u> - Styrning utan framkoppling och med $\hat{\psi}$ vid djupgåendet 20 m och svag vind.
Forts. nästa sida.



$\hat{b}_1 \times 50$
$\hat{b}_2 \times 50$
$-\hat{a}_1$
$-\hat{a}_3$
$-\hat{a}_2$
30.
0.
-30.
-60.
0.
6.
12.
18.
24.
30. min.

Fig. 4.14b

5. SLUTSATSER.

Ett stationärt Kalman-filter designat för djupgåendet 20 m och en vindstyrka av 6 - 9 m/s ger utmärkta tillståndsestimat även för andra djupgåenden och andra vindstyrkor. Kalman-filtret är med andra ord inte särskilt känsligt för ändringar i djupgående eller vindstyrka. Däremot har inte känsligheten för fartändringar undersökts och inte heller hur mycket sämre filtret blir om någon eller några av mätsignalerna faller bort.

En adaptiv autopilot förbättrar styrningen om kursestimatet från Kalman-filtret används istället för kursmätningen, även om denna mätning går att göra relativt noggrant. Bland tänkbara framkopplingar i regulatorn är estimatet av tvärhastigheten den viktigaste för att förbättra styrningen, eftersom regulatorn inte får någon information om fartygsrörelsen i tvärsled på annat sätt. Estimatet av girvinkelhastigheten ger regulatorn mycket lite ytterligare information utöver vad kursestimatet ger, så den framkopplingen kan ev. utelämnas. Estimaten av kraft och moment från vind och vågor gör parameterskattningarna i regulatorn något osäkra och dessutom elimineras denna typ av störningar redan i regulatorn genom att differenser av roderservoläget används. Simuleringarna i denna rapport visar alltså att estimaten av kurs, tvärhastighet och ev. girvinkelhastighet från ett stationärt Kalman-filter förbättrar styrningen hos en adaptiv autopilot.

6. REFERENSER.

Aspernäs, B. och Foisack, P. (1975), "Simulering av styrsystem för tankfartyg", rapport RE-154 (ex.arbete), Inst. för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.

Elmqvist, H. (1975), "SIMNON - An Interactive Simulation Program for Nonlinear Systems, User's Manual", Report 7502, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Källström, C. (1974), "The Sea Scout Experiments, October 1973", Report 7407(C), Div. of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Wittenmark, B. (1973), "A Self-Tuning Regulator", Report 7311, Div. of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Åström, K.J. (1970), "Introduction to Stochastic Control Theory", Academic Press, New York.

```
CONNECTING SYSTEM COREG

TIME T

XI[LPFI1]=E1[NOIS1]
XI[LPFI2]=E2[NOIS1]

W1[BOAT4]=XO[LPFI1]
W2[BOAT4]=XO[LPFI2]


Y1[KAL]=V1[BOAT4]+E1[NOISE]
Y2[KAL]=V2[BOAT4]+E2[NOISE]
Y3[KAL]=RM[BOAT4]+E3[NOISE]
Y4[KAL]=PSIM[BOAT4]+E4[NOISE]
U[KAL]=Y[DELAY]/CRG

Z1[REG]=X1[KAL]*CMK
Z2[REG]=X2[KAL]*CRG
Z3[REG]=X3[KAL]*CRG
Z4[REG]=X4[KAL]*CMK*100
Z5[REG]=X5[KAL]*CRG*100
Z6[REG]=PSIM[BOAT4]+E4[NOISE]
PSIRF[REG]=PREF

US[DELAY]=US[REG]
DELTS[BOAT4]=US[REG]
UTSIG=US[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]


C1[OFILE]=S1*V1[BOAT4]+PL1              " TVÄRSHASTIGHET UTAN BRUS
C2[OFILE]=S2*V2[BOAT4]+PL2              " TVÄRSHASTIGHET UTAN BRUS
C3[OFILE]=S3*VM[BOAT4]+PL3              " TVÄRSHASTIGHET
C4[OFILE]=S4*RM[BOAT4]+PL4              " GIRVINKELHASTIGHET UTAN BRUS
C5[OFILE]=S5*PSIM[BOAT4]+PL5            " KURS UTAN BRUS
C6[OFILE]=S6*DELM[BOAT4]+PL6            " RODERVINKEL

C7[OFILE]=S1*(V1[BOAT4]+E1[NOISE])+PL1+2      " TVÄRSHAST. MED BRUS
C8[OFILE]=S2*(V2[BOAT4]+E2[NOISE])+PL2+2      " TVÄRSHAST. MED BRUS
C9[OFILE]=S4*(RM[BOAT4]+E3[NOISE])+PL4+3      " GIRVINKELHAST. MED BRUS
C10[OFILE]=S5*(PSIM[BOAT4]+E4[NOISE])+PL5+3   " KURS MED BRUS

C11[OFILE]=S6*UTSIG+PL6                 " RODERSIGNAL


C12[OFILE]=X16[REG]         " FORLUSTFUNKTION
C13[OFILE]=T
C14[OFILE]=THU1[REG]
C15[OFILE]=THU2[REG]
C16[OFILE]=THU3[REG]
C17[OFILE]=THU4[REG]*50
C18[OFILE]=THU5[REG]*50
C19[OFILE]=THU6[REG]
```

```
C20[OFILE]=THU7[REG]
C21[OFILE]=THU8[REG]
C22[OFILE]=THU9[REG]

C23[OFILE]=S3*CMK*X1[KAL]+PL23
C24[OFILE]=S4*CRG*X2[KAL]+PL24
C25[OFILE]=S5*CRG*X3[KAL]+PL25
C26[OFILE]=S29*CMK*X4[KAL]
C27[OFILE]=S30*CRG*X5[KAL]

C28[OFILE]=T/60

C29[OFILE]=S29*CMK*(XO[LPF|1]-1.1901E-03)
C30[OFILE]=S30*CRG*(XO[LPF|2]+3.25177E-07)


PREF:0.
S1:2.5
PL1:3.
S2:2.5
PL2:-1.
S3:5.
PL3:-3.
S4:10.
PL4:0.
S5:1.5
PL5:0.
S6:0.15
PL6:-4.5
PL23:-5.
PL24:-3.
PL25:-3.
PL26:-2.3134
PL27:1.86313E-02
S29:1.E03
PL29:0.
S30:1.E03
PL30:0.
CMK:1.943844
CRG:57.2958

END
```

```
CONTINUOUS SYSTEM BOAT4

STATE DELTA V R PSI
" DELTA=RODERVINKEL              [RAD]
" V    =TRANSVERSELL HASTIGHET[M/S]
" R    =GIRVINKELHASTIGHET       [RAD/(S*100)]
" PSI  =KURS                     [RAD]

DER DDELT DV DR DPSI

INPUT DELTS  W1 W2
" DELTS=RODERVINKEL;ONSKAD       [GRAD]
" W1   =FILTRERAT BRUS
" W2   =FILTRERAT BRUS

OUTPUT DELM V1 V2 VM RM PSIM
" DELM=RODERVINKEL                                   [GRAD]
" V1  =TRANSVERSELL HASTIGHET;FOR                    [KNOP]
" V2  =TRANSVERSELL HASTIGHET;AKTER                  [KNOP]
" VM  =TRANSVERSELL HASTIGHET;MASSCENTRUM            [KNOP]
" RM  =GIRVINKELHASTIGHET                            [GRAD/S]
" PSIM=KURS                                          [GRAD]

INITIAL
DELTA:0
V    :0
R    :0
PSI  :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(N)
N2=N*N
U2=U*U
TPH=G1S*U2+G2*U*N+G3S*NSIGN*N2
CCA=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
SINAL=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

DYNAMICS
SINP=SIN(PSI)
COSP=COS(PSI)
RR=R/100.
DDEL1=-TS1*DELTA+TS2*DELTS
DDELT=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+NNNP*N2+CSIN*KSIN+W2
DV=DET1*(B1*A22-B2*A12)
DR=DET1*(B2*A11-B1*A21)*100.
DPSI=RR
U:8.202         "FRAMMAT HASTIGHET   (M/S)
N:1.262         "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
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
```

```
DISCRETE SYSTEM KAL

TIME T
INPUT Y1 Y2 Y3 Y4 U
STATE X1 X2 X3 X4 X5
NEW NX1 NX2 NX3 NX4 NX5
TSAMP TS

INITIAL
X1:0
X2:0
X3:0
X4:-1.1901E-03
X5:3.25177E-07

DYNAMICS
H1=A11*X1+A12*X2+A14*X4+A15*X5+B1*U
H2=A21*X1+A22*X2+A24*X4+A25*X5+B2*U
H3=A31*X1+A32*X2+X3+A34*X4+A35*X5+B3*U
H4=X4
H5=X5

EPS1=Y1-C11*H1-C12*H2
EPS2=Y2-C21*H1-C22*H2
EPS3=Y3-C32*H2
EPS4=Y4-C43*H3

NX1=H1+K11*EPS1+K12*EPS2+K13*EPS3+K14*EPS4
NX2=H2+K21*EPS1+K22*EPS2+K23*EPS3+K24*EPS4
NX3=H3+K31*EPS1+K32*EPS2+K33*EPS3+K34*EPS4
NX4=H4+K41*EPS1+K42*EPS2+K43*EPS3+K44*EPS4
NX5=H5+K51*EPS1+K52*EPS2+K53*EPS3+K54*EPS4

TS=T+DT
DT:1
A11:0.9903
A12:-1.810
A14:0.4003
A15:-46.87
A21:-1.4564E-04
A22:0.9689
A24:-3.2999E-04
A25:6.186
A31:-7.3324E-05
A32:0.9843
A34:-1.6091E-04
A35:3.109
K11:7.7668E-04
K12:1.3864E-02
K13:-8.6189E-03
K14:-4.7886E-03
K21:6.4842E-04
K22:-6.5972E-04
K23:8.6149E-04
K24:2.2765E-04
K31:9.8572E-04
K32:-1.1748E-03
K33:1.4228E-03
K34:2.1612E-03
K41:4.3472E-04
K42:4.4547E-04
K43:-7.0783E-06
K44:3.8565E-05
```

```
K51:3.2366E-05
K52:-3.1357E-05
K53:4.1965E-05
K54:2.3513E-06
B1:1.4756E-02
B2:-2.8782E-04
B3:-1.4449E-04
C11:1.944
C12:289.0
C21:1.944
C22:-254.8
C32:57.30
C43:57.30

END
```

```
DISCRETE SYSTEM DELAY

INPUT US
STATE Y
NEW NY
TIME T
TSAMP TS

INITIAL
Y:0

DYNAMICS
NY=US
TS=T+DT
DT:1.
END
```

```
      SUBROUTINE REG
C
      REAL LAMB
      DIMENSION DAT(70),TH(9),THU(9),P(45),DUM(12)
      DIMENSION X(16),U(8),H(14)
      DIMENSION Z(6)
      COMMON /TIME/ T
      COMMON /DESTIN/ IDUM, IPART
      COMMON /XUHL/ X,U,H,LAMB
      GOTO(1,2,3,4,5,6,7,8),IPART
C
 1    CALL IDENT('DISCR','REG')
      RETURN
C
 2    CALL INPUTV(U,8,'U')
      CALL OUTPUV(X,16,'X')
      CALL INPUTV(Z,6,'Z')
      CALL INPUT(PSIRF,'PSIRF')
      CALL OUTPUT(US,'US')
      CALL TSAMP(TS,'TS')
      CALL PAR(DT,'DT')
      CALL PAR(USL,'USL')
      CALL PAR(LAMB,'LAMB')
      CALL PAR(ANA,'NA')
      CALL PAR(ANB,'NB')
      CALL PAR(ANC,'NC')
      CALL PAR(AK,'K')
      CALL PAR(RL,'RL')
      CALL PAR(B0,'B0')
      CALL PARV(P,45,'P')
      CALL OUTPUV(THU,9,'THU')
      CALL PARV(TH,9,'TH')
      CALL PAR(SW,'SW')
C
 3    DT=15.
      LAMB=1./8.
      USL=20.
      ANA=3.
      ANB=2.
      ANC=4.
      AK=5.
      RL=0.99
      B0=-1.
      SW=0.
      DO 302 I=1,9
 302  TH(I)=0.
      DO 304 I=1,45
 304  P(I)=0.
      DO 306 I=1,9
      L=I*(I-1)/2+I
 306  P(L)=100.
      RETURN
C
 4    TS=T
      AN=0.
      USOLD=0.
      US=0.
      Z1OLD=0.
      Z2OLD=0.
      Z4OLD=0.
      Z5OLD=0.
      DO 401 I=1,14
 401  H(I)=0.
```

```
      DO 402 I=1,16
  402 X(I)=0.
      NA=ANA+0.1
      NB=ANB+0.1
      NC=ANC+0.1
      ISW=SW+0.1
      K=AK+0.1
      DO 403 I=1,70
  403 DAT(I)=0.
      NAB=NA+NB
      NP=NAB+NC
      K11=K+1
      NDAT=NAB+(K11+1)*(NC+2)-2
      NDAT1=NDAT+1
      NU1=NA+K+2
      N1=NU1+K
      NN1=NAB+2*K+3
      NN2=NAB+(2+K)*3-1
      NN3=NAB+(2+K)*4-1
      NN4=NAB+(2+K)*5-1
      RETURN
C
 5    AN=AN+1.
      IF(ISW)501,501,502
  501 DAT(1)=Z(6)-PSIRF
      GOTO 503
  502 DAT(1)=Z(3)-PSIRF
  503 DAT(NN1)=Z(1)-Z10LD
      DAT(NN2)=Z(2)-Z20LD
      DAT(NN3)=Z(4)-Z40LD
      DAT(NN4)=Z(5)-Z50LD
      Z10LD=Z(1)
      Z20LD=Z(2)
      Z40LD=Z(4)
      Z50LD=Z(5)
      CALL STURA(DAT,TH,P,DUM,RL,NA,NAB,NP,K11,NDAT,NDAT1,NU1,N1)
      US1=DAT(NU1)/B0+US
      USOLD=US
      IF(ABS(US1)-USL)570,570,569
  569 US1=SIGN(1.,US1)*USL
      DAT(NU1)=(US1-USOLD)*B0
  570 US=US1
      DO 580 I=1,9
  580 THU(I)=TH(I)
      CALL LOSS(AN)
      RETURN
C
 6    TS=T+DT
      RETURN
C
 7    CONTINUE
      RETURN
C
 8    CONTINUE
      RETURN
C
      END
```

```
      SUBROUTINE STURA(DAT,TH,P,DUM,RL,NA,NAB,NP,K1,NDAT,NDAT1,NU1,N1)
C
C     SELFTUNING REGULATOR BASED ON LEAST SQUARES IDENTIFICATION
C     AND MINIMUM VARIANCE CONTROL, ADMITS FEEDFORWARD AND
C     EXPLOITS SYMMETRY OF P,
C
C     AUTHOR, C.KALLSTROM 1974-11-19.
C
C     THE ALGORITHM IS BASED ON THE MODEL
C
C     Y(T)+A(1)*Y(T-K-1)+...+A(NA)*Y(T-K-NA)=
C          B0*(U(T-K-1)+B(1)*U(T-K-2)+...+B(NB)*U(T-K-NB-1))+
C          C(1)*V1(T-K-1)+C(2)*V2(T-K-1)+...+C(NC)*VNC(T-K-1)+EPS(T)
C
C     AT EACH STEP THE LEAST SQUARES ESTIMATES OF THE PARAMETERS
C     OF THE MODEL ARE COMPUTED, THE CONTROL VARIABLE U(T) TO
C     BE APPLIED AT TIME T IS THEN COMPUTED FROM
C
C     US(T)= AE(1)*Y(T)+...+AE(NA)*Y(T-NA+1)
C             -BE(1)*US(T-1)-...-BE(NB)*US(T-NB)
C             -CE(1)*V1(T)-...-CE(NC)*VNC(T)
C
C     WHERE AE,BE AND CE ARE THE PARAMETER ESTIMATES
C     AND US THE SCALED CONTROL SIGNAL I.E. US=B0*U
C
C     WHEN USING THE ALGORITHM THE PROCESS OUTPUT Y(T) AND THE
C     FEEDFORWARD SIGNALS V(T) ARE READ AT TIME T AND THE CONTROL
C     SIGNAL U(T) TO BE APPLIED AT TIME T IS THEN COMPUTED
C
C     DAT- VECTOR OF DIMENSION NA+NB+(K+2)*(NC+2)-2 CONTAINING
C          PROCESS OUTPUTS Y, SCALED CONTROL VARIABLES U
C          AND FEED FORWARD SIGNALS V ORGANIZED AS FOLLOWS
C     DAT(1)=Y(T)                               RETURNED AS Y(T)
C     DAT(2)=Y(T-1)                             RETURNED AS Y(T)
C     DAT(3)=Y(T-2)                             RETURNED AS Y(T-1)
C     .
C     DAT(NA+K+1)=Y(T-K-NA)                     RETURNED AS Y(T-K-NA+1)
C     DAT(NA+K+2)=US(T-1)                       RETURNED AS US(T)
C     DAT(NA+K+3)=US(T-2)                       RETURNED AS US(T-1)
C     .
C     DAT(NA+NB+2*K+2)=US(T-K-NB-1)             RETURNED AS US(T-K-NB)
C     DAT(NA+NB+2*K+3)=V1(T)                    RETURNED AS US(T-K-NB-1)
C     DAT(NA+NB+2*K+4)=V1(T-1)                  RETURNED AS V1(T)
C     .
C     DAT(NA+NB+3*K+4)=V1(T-K-1)                RETURNED AS V1(T-K)
C     .
C     DAT(NA+NB+(K+2)*(NC+1)-1)=VNC(T)          RETURNED AS V(NC-1)(T-K-1)
C     .
C     DAT(NA+NB+(K+2)*(NC+2)-2)=VNC(T-K-1)      RETURNED AS VNC(T-K)
C
C
C     TH- VECTOR OF DIMENSION NP=NA+NB+NC CONTAINING THE PARAMETER
C         ESTIMATES ORGANIZED AS FOLLOWS
C     TH(1)=-AE(1)
C     TH(2)=-AE(2)
C     .
C     TH(NA)=-AE(NA)
C     TH(NA+1)=BE(1)
C     TH(NA+2)=BE(2)
C     .
C     TH(NA+NB)=BE(NB)
C     TH(NA+NB+1)=CE(1)
C     TH(NA+NB+2)=CE(2)
```

```
C            *
C        TH(NA+NB+NC)=CE(NC)
C
C
C        P- COVARIANCE MATRIX STORED AS FOLLOWS
C        P(1)=P(1,1)
C        P(2)=P(2,1)
C        P(3)=P(2,2)
C        .
C        P(I*(I-1)/2+J)=P(I,J)
C        .
C        P(NP*(NP+1)/2)=P(NP,NP)
C
C
C        DUM- DUMMY VECTOR OF DIMENSION NP
C        RL- BASE OF EXPONENTIAL WEIGHTING FACTOR
C        NA- NUMBER OF A-PARAMETERS  (NO MAX, MIN 0)
C        NB- NUMBER OF B-PARAMETERS  (NO MAX, MIN 0)
C        NC- NUMBER OF C-PARAMETERS  (NO MAX, MIN 0)
C        K -NUMBER OF TIME DELAYS IN THE MODEL  (NO MAX, MIN 0)
C        NAB- NA+NB
C        NP- NA+NB+NC (NO MAX, MIN 1)
C        K1- K+1
C        NDAT- NAB+(K1+1)*(NC+2)-2
C        NDAT1- NDAT+1
C        NU1- NA+K+2
C        N1- NU1+K
C
C        SUBROUTINE REQUIRED
C             NONE
C
         DIMENSION DAT(1),TH(1),P(1),DUM(1)
C
         RES=DAT(1)-DAT(N1)
         DENOM=1.
         DO 12 I=1,NP
         R=0.
         DO 10 J=1,NP
         L=I*(I-1)/2+J
         IF (J.GT.I) L=J*(J-1)/2+I
         M=K1+J
         IF (J.GT.NA) M=M+K1
         IF (J.GT.NAB) M=2*K1+(J-NAB)*(K1+1)+NAB
10       R=R+P(L)*DAT(M)
         DUM(I)=R
         M=K1+I
         IF (I.GT.NA) M=M+K1
         IF (I.GT.NAB) M=2*K1+(I-NAB)*(K1+1)+NAB
         DENOM=DENOM+R*DAT(M)
12       RES=RES-DAT(M)*TH(I)
C
         DO 20 I=1,NP
         R=DUM(I)/DENOM
         TH(I)=TH(I)+R*RES
         DO 20 J=1,I
         L=I*(I-1)/2+J
20       P(L)=(P(L)-R*DUM(J))/RL
C
         R=0.
         DO 30 I=1,NP
         L=I
         IF (I.GT.NA) L=L+K1
         IF (I.GT.NAB) L=NAB+K1+(K1+1)*(I-NAB)
30       R=R-TH(I)*DAT(L)
```