

REGLERMODELL FÖR UBÅTSRÄDDNINGSFARKOST

HENRY TERNRUD
LJUBOMIR GRGIC

RE-178 June 1976
Department of Automatic Control
Lund Institute of Technology

REGLERMODELL FÖR UBÅTSRÄDDNINGSFARKOST

Ljubomir Grgic

Henry Ternrud

Examensarbete utfört vid Institutionen för
Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola

VT 1976

HANDLEDARE

Karl Johan Åström , LTH

Kenneth Bengtsson , KOCKUMS

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

ABSTRACT	1
INLEDNING	2
MODELLEN	4
Rörelseekvationer	6
Val av koordinatsystem	6
Newtons rörelselagar	7
Metacenteravståndet	10
Strömningen	11
Hydrodynamiska krafter	12
Lyftkrafter	12
Friktionskrafter	18
Propellerekvationer	23
Propellerkaraktistik	23
Moment från thrusters	29
Tvärströmning	29
Definition av FI	30
Tvärströmningens inverkan på krafter och moment	31
Motorekvationer	35
Frekvensomformare med motor	36
Moment Q från vattnet	36
Bestämning av I	36
Ekvationer	38
Sammanfattning	39
Kommentarer	41
PROGRAMMET	44
SIMULERINGARNA	51
Simuleringar	51
Känslighetsanalys	53
SLUTORD	66
BETECKNINGAR	67
LITTERATUR, REFERENSER	69

ABSTRACT

Kockums Mekaniska Verkstad, Malmö, is building a submarine rescue vehicle (URF) for military and civilian purposes. The theoretical and experimental background for the dynamics of the submarine is incomplete. One missis for example a total model for the submarine, that is, what happens when you pull the control lever. We have costructed such a model suitable for simulations on a computer in the simulation language SIMNON. In the equations of motion are included hydrodynamic forces, propellerforces and motor equations. Controlling the ship is possible by setting wanted values of the propellers rotating speed. As outputs we have position, velocities and the rotating speed of the propellers.

SAMMANFATTNING

Kockums Mekaniska Verkstad, Malmö, bygger för militära och civila ändamål en ubåtsräddningsfarkost (URF). Det teoretiska och experimentella underlaget för ubåtens dynamik är dock ofullständigt. Bl.a. saknar man en modell för ubåten som helhet, dvs. vad händer när man drar i spakarna? Vi har därför konstruerat en sådan modell, lämpad för simuleringer på datamaskin i simuleringsspråket SIMNON. I rörelseekvationerna finns medtaget hydrodynamiska krafter, propellerkrafter, och motorekvationer. Styrning sker med börvärden för propellervarvtalen och som utsignaler har vi lägen, hastigheter samt propellervarvtal.

INLEDNING

Detta examensarbete har tillkommit genom samarbete mellan Marinkontoret på Kockums Mekaniska Verkstad och Institutionen för Reglerteknik på LTH.

Marinkontoret konstruerar för försvarets räkning en räddningsubåt avsedd att användas för räddningsaktioner i svenska farvatten. Vid konstruktionen har man dragit nytta av den erfarenhet man skaffat sig vid konstruktion av vanliga ubåtar. För teoretiska detaljstudier har man vänt sig till SSPA.

Då en räddningsubåt är ganska speciell, både vad gäller formgivning och operationsbetingelser, är det av stort intresse att skaffa sig en teoretisk modell av räddningsubåten som helhet. Då det teoretiska och experimentella underlaget i stort sett saknades hos Kockums, beslöt man att låta detta bli ett examensarbete. Den fråga man ville ha besvarad var: Vad händer då man drar i spakarna?

Det framgick redan från början att det skulle bli svårt att skapa en modell för ubåten som skulle ge bra kvantitativa resultat. Vi fick i stället inrikta oss på det kvalitativa uppförandet, och sedan anpassa detta så gott det gick till de uppgifter på t.ex. maxhastigheter, vattenmotstånd m.m. som redan fanns.

Den största delen av examensarbetet har gått åt till att ställa upp en någorlunda rimlig modell av ubåten. Modellen skulle kunna simuleras på datamaskin, och vi använde oss därför av simuleringspråket SIMNON.

Simuleringarna hade två syften:

- 1/ Studera båtens uppförande i vattnet.
- 2/ Göra känslighetsanalyser, d.v.s. se hur förändringar i olika parametrar påverkar båtens uppförande.

Den modell vi skapat lämpar sig för båda dessa syften.

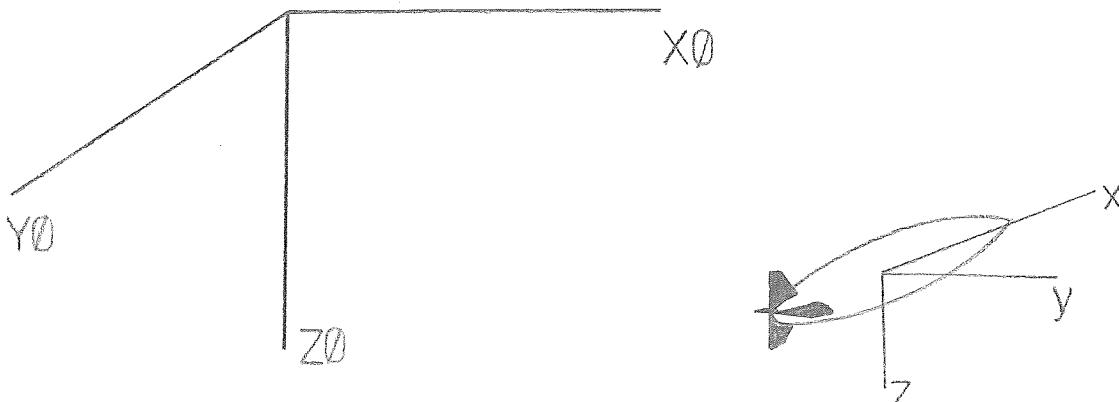
Redogörelsen inleds med en beskrivning av modellen. Sedan följer en beskrivning av programmet, och sist en presentation av simuleringarna.

MODELLEN

Som nämnts i inledningen är det teoretiska och experimentella underlaget för bestämning av ubåtens dynamik mycket dåligt. Hydrodynamiska derivator saknas och likaså propellerkaraktistika för alla propellrar. Modellen blir därför av nödvändighet ganska grov.

Först definieras våra koordinatsystem. Ett fast koordinatsystem lägger vi fast på havsbotten. I detta definieras båtens läge samt eventuella strömningar.

Det andra koordinatsystemet lägges fast relativt båten. I detta definieras båtens absoluta hastighet relativt det fasta koordinatsystemet. Det är viktigt att skilja på båtens absoluta hastighet och den hastighet med vilken båten rör sig relativt vattnet.

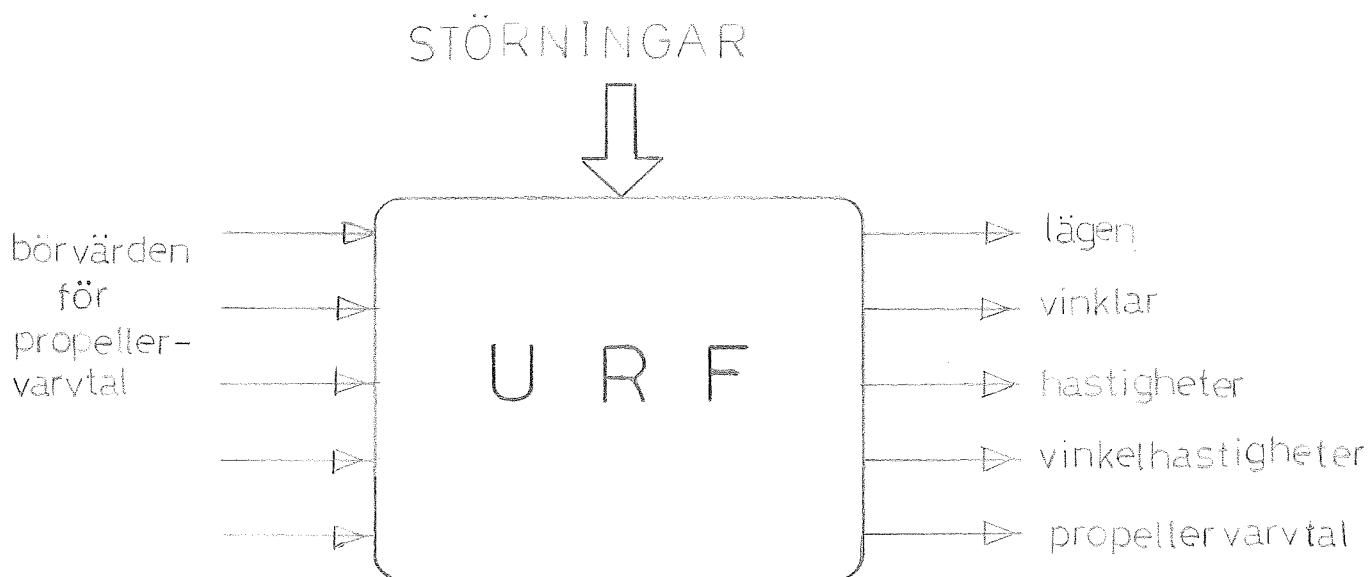


Då vi definierat våra koordinatsystem, ställer vi upp Newtons rörelseekvationer (i det rörliga systemet). Som vänsterled i rörelseekvationerna har vi samtliga de krafter som påverkar ubåten. Dessa är:

- 1/ Lyftkrafter
- 2/ Friktionskrafter
- 3/ Propellerkrafter

Samtliga ekvationer återfinns i programlistningen längre fram

Vår modell ser alltså ut på följande vis:



Som insignaler har vi börvärden för propellervarvtal och som utsignaler har vi lägen, vinklar, hastigheter, vinkelhastigheter och propellervarvtal. Störningarna utgörs av vattenströmmar.

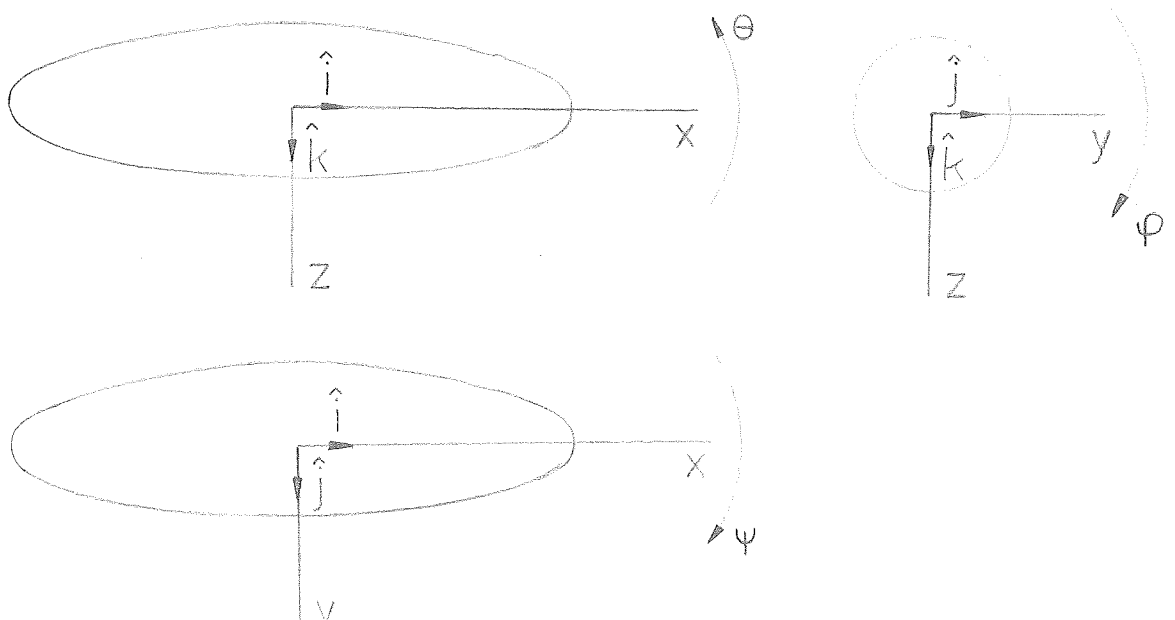
RÖRELSEEKVATIONER

Val av koordinatsystem i båten

Ett fartyg till sjöss eller en kropp i en vätska har sex frihetsgrader i sin rörelse: translationer utmed tre ortogonala axlar samt rotationerna kring var och en av dem.

I praktiken är det så, att alla kroppar såsom båtar, ubåtar, raketer o.dy. har ett symmetriplan, vänsterhöger symmetri. Vi kommer att utnyttja denna egenskap när vi väljer vårt koordinatsystem. Två av axlarna placeras vi i detta symmetriplan medan den tredje blir vinkelrät mot planet. Då vi antar att ubåten är helt symmetrisk med jämn massfördelning och masscentrum i origo, kommer ett sådant val av koordinatsystem automatiskt att medföra att axlarna även är huvudtröghetsaxlar.

Vi bestämmer oss också för att vid tiden $t=0$ låta det i båten fasta koordinatsystemet sammanfalla med det relativt havsbotten fasta koordinatsystemet.



Newtons rörelselagar

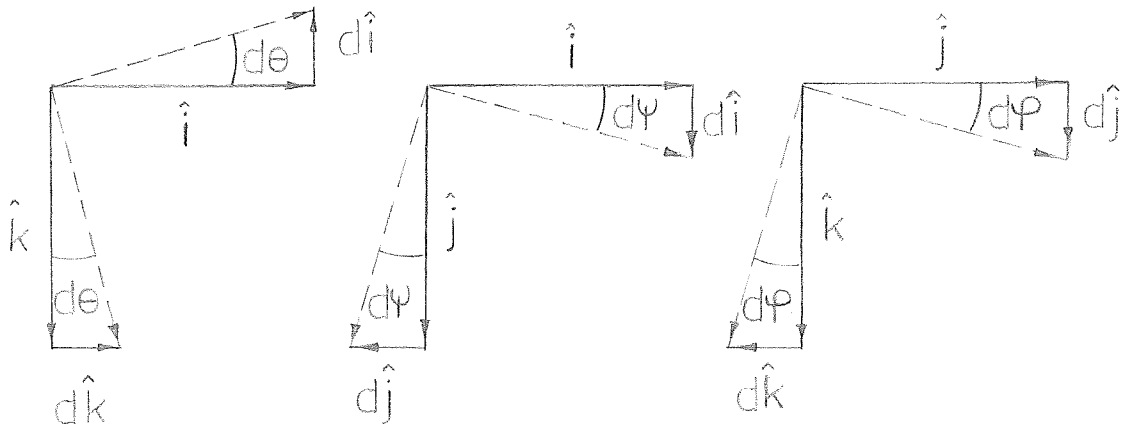
Som alltid när det gäller fasta kroppars dynamik börjar vi med Newtons rörelselagar:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (\overrightarrow{\text{rörelsemängden}}) = \hat{i}X + \hat{j}Y + \hat{k}Z$$

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} (\overrightarrow{\text{rörelsemängdsmomentet}}) = \hat{i}K + \hat{j}M + \hat{k}N$$

$$\overrightarrow{\text{rörelsemängden}} = m\vec{U} = m (\hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w)$$

Enhetsvektorerna $\hat{i}\hat{j}\hat{k}$ i det rörliga kordinatsystemet är fixerade utmed de tre koordinataxlarna, vilket resulterar i att deras riktning relativt det fasta koordinatsystemet ändrar sig då ubåten roterar kring någon av axlarna xyz. Enhetsvektorernas riktning förblir oförändrad vid rena translationsrörelser.



För en liten rotation kring de tre axlarna gäller:

$$d\hat{i} = \hat{j}d\psi - \hat{k}d\theta$$

$$d\hat{j} = -\hat{i}d\psi + \hat{k}d\phi$$

$$d\hat{k} = \hat{i}d\theta - \hat{j}d\phi$$

Eller

$$\frac{\hat{d}i}{\hat{d}t} = \hat{j} \frac{d\psi}{\hat{d}t} - \hat{k} \frac{d\theta}{\hat{d}t} = \hat{j}r - \hat{k}q$$

$$\frac{\hat{d}j}{\hat{d}t} = -\hat{i} \frac{d\psi}{\hat{d}t} + \hat{k} \frac{d\phi}{\hat{d}t} = -\hat{i}r + \hat{k}p$$

$$\frac{\hat{d}k}{\hat{d}t} = \hat{i} \frac{d\theta}{\hat{d}t} - \hat{j} \frac{d\phi}{\hat{d}t} = \hat{i}q - \hat{j}p$$

Låt oss nu gå tillbaka till kraftekvationen och se vad vi får:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m \frac{d\vec{U}}{\hat{d}t} = m \frac{d}{\hat{d}t} (\hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w) = \\ &= m \left(\hat{i} \frac{du}{\hat{d}t} + \frac{d\hat{i}}{\hat{d}t}u + \hat{j} \frac{dv}{\hat{d}t} + \frac{d\hat{j}}{\hat{d}t}v + \hat{k} \frac{dw}{\hat{d}t} + \frac{d\hat{k}}{\hat{d}t}w \right) \end{aligned}$$

Genom att nu sätta in ovanstående uttryck på enhetsvektorernas tidsderivator erhålles:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m \left[\hat{i} (\dot{u} - rv + qw) + \hat{j} (\dot{v} + ru - pw) + \hat{k} (\dot{w} + pv - qu) \right] \\ &= \hat{i}X + \hat{j}Y + \hat{k}Z \end{aligned}$$

Eftersom vi i vår modell inte behöver behandla rullning sätter vi genomgående $p=0$ och kraftekvationerna får följande utseende:

$$X = m (\dot{u} - rv + qw)$$

$$Y = m (\dot{v} + ru)$$

$$Z = m (\dot{w} - qu)$$

Ett känt begrepp inom hydrodynamiken är s.k. added masses. För att en kropp skall kunna accelereras genom exempelvis vatten, måste även en del av vattnet i kroppens väg accelereras. Detta ger en skenbar ökning av kroppens massa. Lamb (ref.2) har räknat ut denna massökning för en rotationsellipsoid med varierande förhållande mellan stor- och lillaxel.

a/b	k_1	k_2	k'
1	0.5	0.5	0
1.50	0.305	0.621	0.094
2.00	0.209	0.702	0.240
2.51	0.156	0.763	0.367
2.99	0.122	0.803	0.465
3.99	0.082	0.860	0.608
4.99	0.059	0.895	0.701
6.01	0.045	0.918	0.764
6.97	0.036	0.933	0.805
8.01	0.029	0.945	0.840
9.02	0.024	0.954	0.865
9.97	0.021	0.960	0.883
∞	0	1	1

De slutliga kraftekvationerna blir: (Jmf. ref. 1)

$$\begin{aligned} X &= m (1 + k_1) (\dot{u} - rv + qw) \\ Y &= m (1 + k_2) (\dot{v} + ru) \\ Z &= m (1 + k_2) (\dot{w} - qu) \end{aligned}$$

För rörelse-mängdsmomentet, då koordinataxlarna samtidigt är huvudtröghetsaxlar, gäller:

$$\begin{aligned} (\text{rörelsemängdsmomentet}) &= \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \\ &= iI_x p + jI_y q + kI_z r \end{aligned}$$

På samma sätt som innan, med $p=\dot{p}=0$, och med hänsyn tagen till Lambs koefficienter erhålles:

$$\begin{aligned} M &= (1 + k') I_y \dot{q} \\ N &= (1 + k') I_z \dot{r} \end{aligned}$$

Där $I_y = I_z =$ Tröghetsmomentet för en homogen ellipsoid =

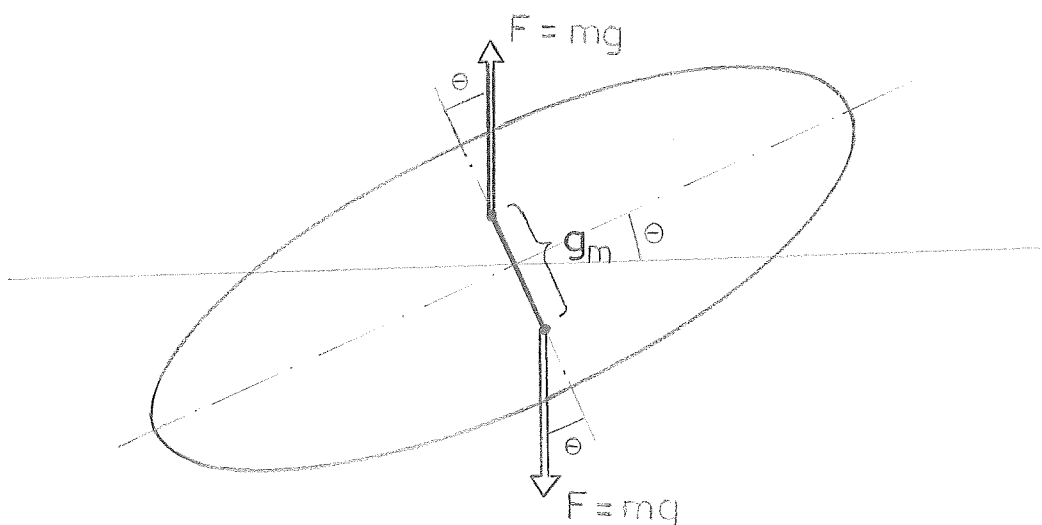
$$m(L^2+b^2)/20 = \dots = 500000\text{kgm}^2$$

METACENTERAVSTÅNDET

Hittills har vi betraktat rotationer i horisontalplanet och vertikalplanet som ekvivalenta. Detta stämmer ej med verkligheten. Vid rotation i vertikalplanet får vi nämligen inverkan av det s.k. metacenteravståndet. På en kropp nedsänkt i en vätska verkar två krafter. Dels båtens egen tyngd och dels en kraft från vattnet som är lika stor som tyngdkraften men motsatt riktad. Dessa angriper ej i samma punkt (se fig.) vilket har en stabiliserande inverkan på ubåtens rörelse i vertikalplanet och håller båten horisontell i vattnet. Storleken på det på detta sätt uppkomna momentet blir:

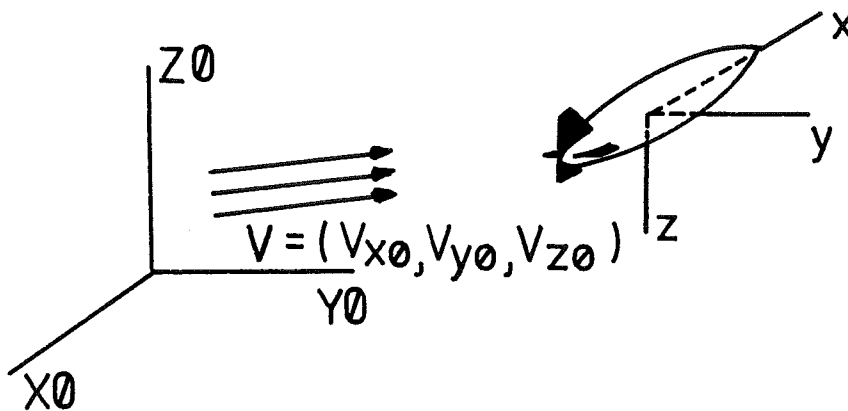
$$M = -mg_m \sin(\theta) \cdot 9.81 \quad g_m = \text{metacenteravståndet} = 8\text{cm}$$

Detta infogas direkt i rörelseekvationerna.



STRÖMNINGEN

För att göra modellen mera verklighetstrogen vill vi även kunna studera inverkan av en vattenström på båtens styregenskaper. Först kommer vi att definiera strömningens hastighetskomponenter i det fasta koordinatsystemet, och sedan projicera dessa på axlarna i båtens koordinatsystem.



Hastighetskomponenterna i xyz-systemet blir:

$$U_{\text{ström}} = V_{x0} \cos\theta \cos\psi + V_{y0} \sin\psi - V_{z0} \sin\theta \cos\psi$$

$$V_{\text{ström}} = -V_{x0} \cos\theta \sin\psi + V_{y0} \cos\psi + V_{z0} \sin\theta \sin\psi$$

$$W_{\text{ström}} = V_{x0} \sin\theta + V_{z0} \cos\theta$$

När nu båten rör sig med hastigheten $U = (u, v, w)$, och strömningens hastighet $U_{\text{ström}} = (U_{\text{ström}}, V_{\text{ström}}, W_{\text{ström}})$ kommer båten att känna en hastighet relativt vattnet som är:

$$u_l = u - U_{\text{ström}}$$

$$v_l = v - V_{\text{ström}}$$

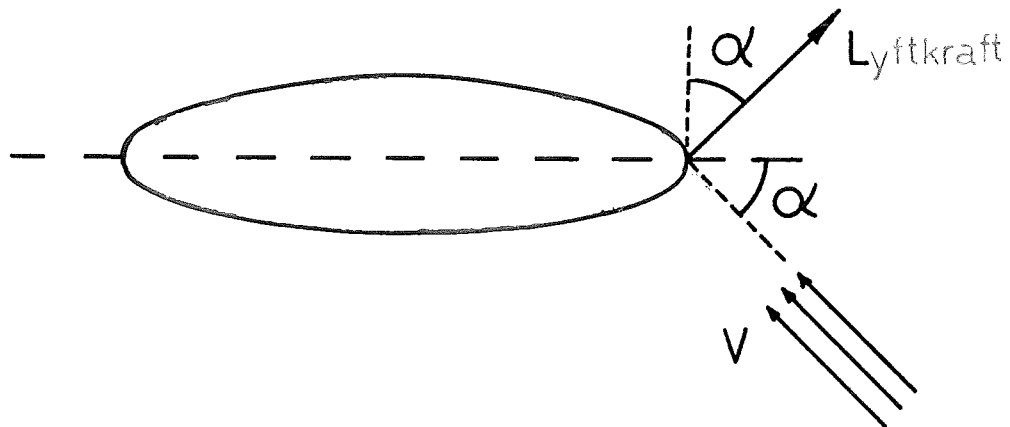
$$w_l = w - W_{\text{ström}}$$

DE HYDRODYNAMISKA KRAFTERNA

Ett vanligt antagande inom hydrodynamiken är att krafter som beror på en vätskas ideella egenskaper och krafter som beror på vätskans viskösa egenskaper inte beror av varandra. I vår modell kommer vi också att göra detta antagande och följaktligen kommer vi, till att börja med, att redogöra för lyftkrafterna (ideell vätska) och friktionskrafterna (viskös vätska) var för sig. Sedan kommer vi att låta dessa, tillsammans med propellerkrafterna, få utgöra vänsterledet i de tidigare framtagna rörelseekvationerna.

Lyftkrafter

För att studera lyftkrafterna betraktar vi ubåten som en kort vinge med aspect ratio $a=b/L$, där $b=4\text{m}$ och $L=13.5\text{m}$. (L är båtens längd och b dess bredd). En vinge som är i vila i en ström med hastigheten V kommer enligt Kutta och Joukowskis teorem, att påverkas av en lyftkraft vinkelrät mot strömmen (se ref.3). Speciellt för en mycket kort vinge kan man approximativt säga att lyftkraften verkar i vingspetsen.



Vi definierar nu den dimensionslösa storheten lyftkoefficienten

$$C_L = \frac{2L}{\rho AV^2} \quad A = \text{Effektiva arean}$$

och vi skall nu göra en kort utredning om hur denna beror av anfallsvinkeln α .

C_L är en kontinuerlig funktion av α ända tills en viss kritisk vinkel $\alpha = \alpha_{\text{stall}}$ uppnås. Vid denna vinkel uppkommer ett hydrodynamiskt fenomen som kallas stallning. Stallning definieras som en större eller mindre diskontinuitet i kurvan $C_L = C_L(\alpha)$. Den fysikaliska effekten av stallning är att lyftkraften nästan momentant minskar till ett mycket lägre värde.

För mycket långa vingar gäller det (se ref.4) att:

$$\begin{cases} C_L = 2\pi \sin\alpha & \alpha < \alpha_{\text{stall}} \\ C_L = \frac{2\pi \sin\alpha \cos\alpha}{4 + \pi \sin\alpha} & \alpha \geq \alpha_{\text{stall}} \end{cases}$$

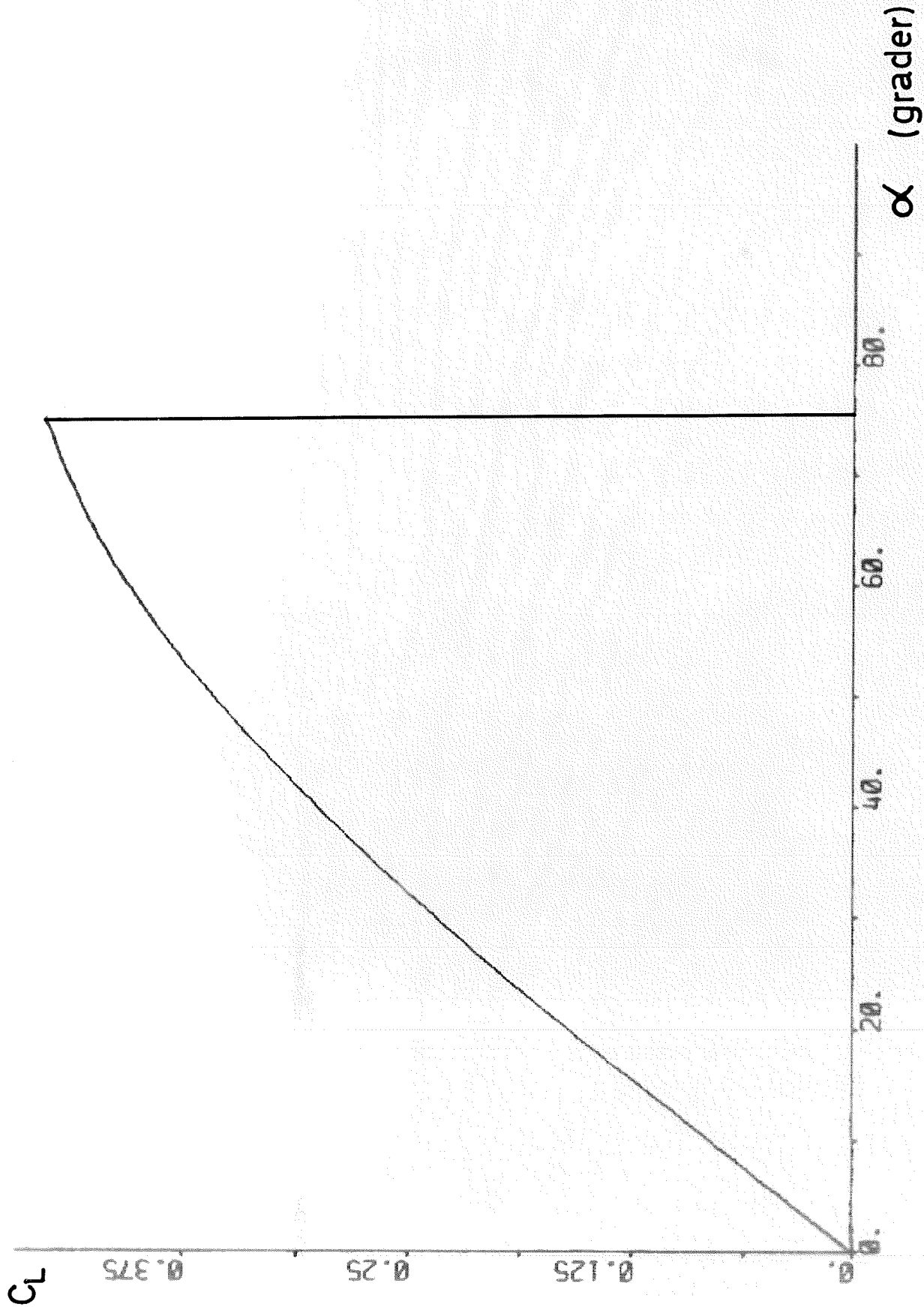
Enligt referens 5 gäller för små anfallsvinklar att

$$C_L = \frac{\pi}{2} a \alpha \quad (\text{Jones formel})$$

Med utgångspunkt från dessa två uppgifter gör vi följande ansats för lyftkoefficienten:

$$\begin{cases} C_L = \frac{\pi}{2} a \sin\alpha & \alpha < \alpha_{\text{stall}} \\ C_L = 0 & \alpha \geq \alpha_{\text{stall}} \end{cases}$$

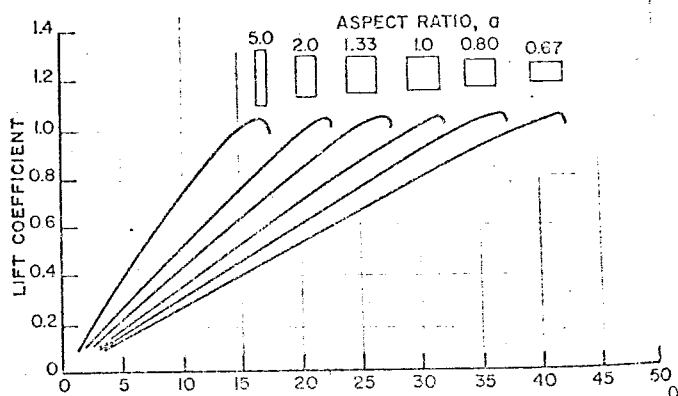
PLOT CL "LYFTKOEFFICIENT"



Vi måste också ha stallvinkeln för ubåten. Enligt ref. 5 gäller följande enkla uttryck för anfallsvinkeln som funktion av aspect ratio och lyftkoefficienten:

$$\alpha' = \alpha + \frac{C_L}{\pi} \left(\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \right)$$

där α motsvarar aspect ratio a och lyftkoefficienten C_L vid en viss referenspunkt. Följande kurvskara erhålles, där maxpunkten på varje kurva motsvarar stallvinkeln:



Om vi extrapolerar i detta diagram eller räknar ut direkt med formeln, får vi för aspect ratio 0.3 en stallvinkel

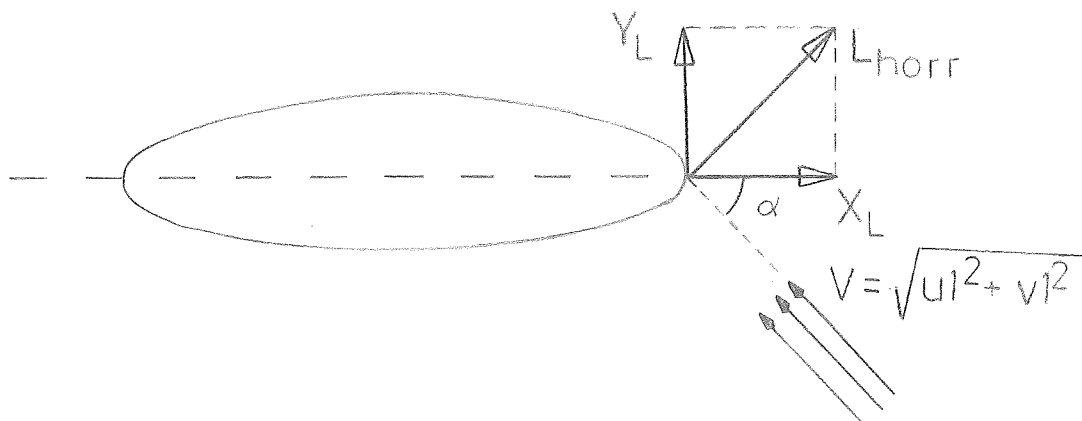
$$\alpha_{\text{stall}} = 75^\circ$$

Lyftkraften blir alltså

$$L = \frac{\rho}{2} AV^2 C_L(\alpha)$$

Där C_L fås enligt ovan. Vi kan nu övergå till att studera lyftkraftens bidrag i de tre axlarnas riktning i båtens koordinatsystem.

För enkelhetens skull skall vi först titta enbart på lyftkraften för en rörelse i horisontalplanet.



$$X_L = L_{\text{horr}} \sin \alpha = \frac{\rho}{2} AV^2 C_L(\alpha) \sin \alpha$$

$$\text{där } \sin \alpha = \frac{v_1}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2}}$$

$$Y_L = -L_{\text{horr}} \cos \alpha = -\frac{\rho}{2} AV^2 C_L(\alpha) \cos \alpha$$

$$\text{där } \cos \alpha = \frac{u_1}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2}}$$

Om vi nu låter ubåten rotera med en vinkelhastighet r kommer nosen att uppfatta en anfallsvinkel γ sådan att

$$\tan \gamma = \frac{v_1 + rL/2}{u_1}$$

Denna rotationen kommer enligt Abkowitz att ge ett mycket litet bidrag till lyftkraften men ett ganska stort bidrag till momentet. Därför låter vi anfallsvinkelns beroende av rotationen inverka endast på momentet genom att skriva:

$$N = \frac{1}{2} LY'_L$$

$$\text{där } Y'_L = \frac{\rho}{2} A (u_1^2 + (v_1 + rL/2)^2) C_L(\gamma) \sin \gamma$$

För rörelsen i vertikalplanet blir uttrycken helt analoga. Om vi även tar hänsyn till att alla hastigheter kan växla tecken och superponerar bidragen från horisontal och vertikalkplanet, får vi följande krafter och moment:

$$\begin{aligned}
 X_L &= \frac{\rho}{2} A (C_L (\alpha) (u_1^2 + v_1^2) \sin \alpha + C_L (\beta) (u_1^2 + w_1^2) \sin \beta) \operatorname{sign}(u_1) = \\
 &= \frac{\rho}{4} A \bar{\pi} a (v_1^2 + w_1^2) \operatorname{sign}(u_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_L &= -\frac{\rho}{2} A C_L (\alpha) (u_1^2 + v_1^2) \cos \alpha \operatorname{sign}(u_1) = \\
 &= -\frac{\rho}{4} A \bar{\pi} a u_1 v_1 \operatorname{sign}(u_1)
 \end{aligned}$$

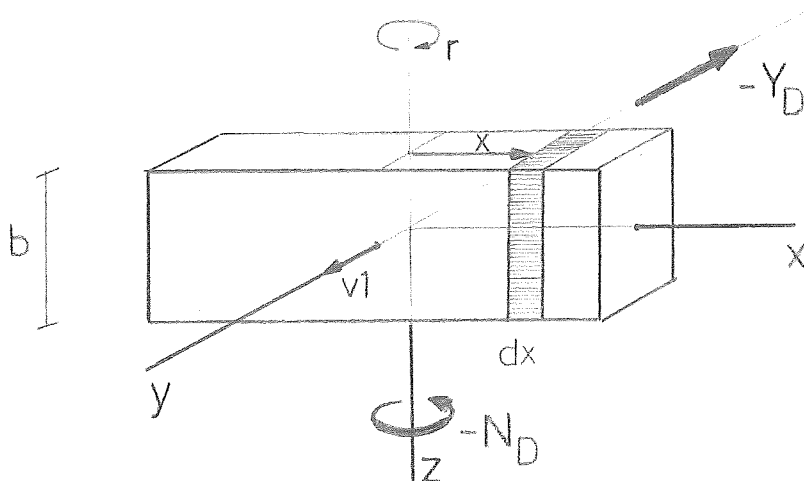
$$\begin{aligned}
 Z_L &= -\frac{\rho}{2} A C_L (\beta) (u_1^2 + w_1^2) \cos \beta \operatorname{sign}(u_1) = \\
 &= -\frac{\rho}{4} A \bar{\pi} a u_1 w_1 \operatorname{sign}(u_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_L &= \frac{\rho}{2} A C_L (\delta) (u_1^2 + (w_1 - qL/2)^2) \cos \delta L/2 = \\
 &= \frac{\rho}{4} A \bar{\pi} a u_1 (w_1 - qL/2) L/2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_L &= -\frac{\rho}{2} A C_L (\gamma) (u_1^2 + (v_1 + rL/2)^2) \cos \gamma L/2 = \\
 &= -\frac{\rho}{4} A \bar{\pi} a u_1 (v_1 + rL/2) L/2
 \end{aligned}$$

där β och δ är motsvarande anfallsvinklar i vertikalplanet

Friktionskrafterna



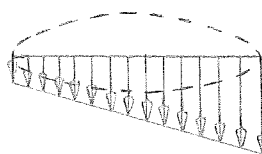
För en kropp enl. fig. med konstant hastighet v_1 och en vinkelhastighet r i en viskös vätska, gäller följande uttryck för krafter och moment:

$$-dY_D = \frac{1}{2}\rho b(v_1 + rx)^2 dx$$

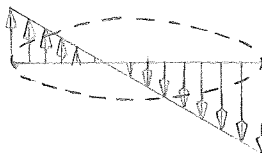
$$-dN_D = \frac{1}{2}\rho bx(v_1 + rx)^2 dx$$

När vi skall integrera måste vi skilja på två möjliga hastighetsfördelningar.

Fall 1. $|v_1| \geq \frac{1}{2}L|r|$



Fall 2. $|v_1| < \frac{1}{2}L|r|$



Vi måste också ta hänsyn till att ubåten är strömlinjeformad. Detta gör vi genom att införa en korrektionsfaktor i ovanstående formler. Vi får då följande:

Fall 1.

$$-Y_D = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2} \rho b k_v (v_1 + rx)^2 dx = \dots = D_{rv} (v_1^2 + \frac{1}{12} L^2 r^2)$$

$$-N_D = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2} \rho b k_v x (v_1 + rx)^2 dx = \dots = \frac{1}{6} D_{rv} L^2 r v_1$$

Fall 2.

$$\begin{aligned} -Y_D &= - \int_{-L/2}^{x_0} \frac{1}{2} \rho b k_v (v_1 + rx)^2 dx + \int_{x_0}^{L/2} \frac{1}{2} \rho b k_v (v_1 + rx)^2 dx = \\ &= \dots = D_{rv} (\frac{1}{2} L r v_1 + \frac{2}{3} L v_1^3 / r) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -N_D &= - \int_{-L/2}^{x_0} \frac{1}{2} \rho b k_v x (v_1 + rx)^2 dx + \int_{x_0}^{L/2} \frac{1}{2} \rho b k_v x (v_1 + rx)^2 dx = \\ &= \dots = D_{rv} (\frac{1}{4} L^2 v_1^2 + \frac{1}{32} L^3 r^2 - \frac{1}{6} L v_1^4 / r^2) \end{aligned}$$

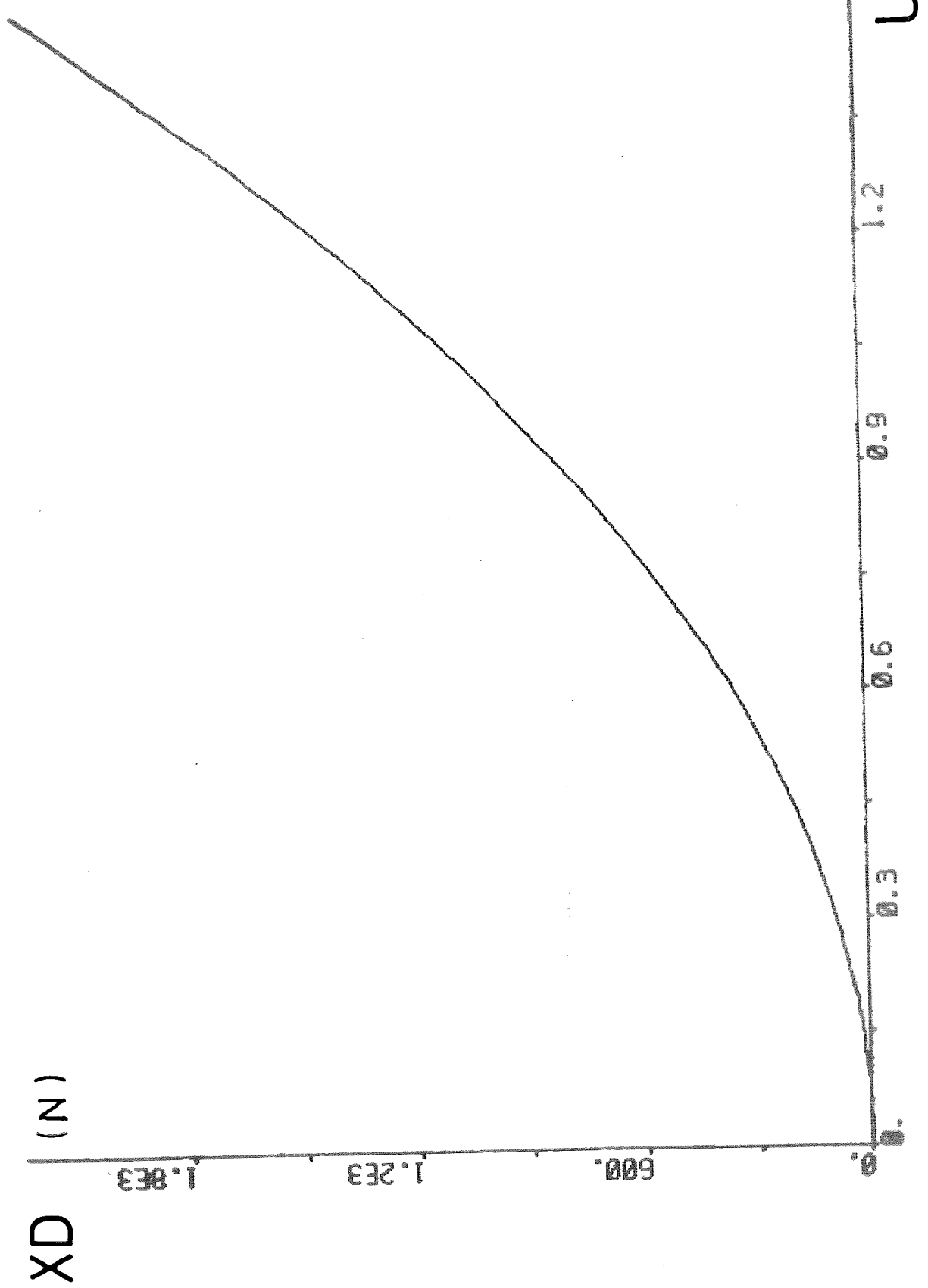
där $x_0 = -v_1/r$

k_v = korrektionsfaktor p.g.a. strömlinjeform

$$D_{rv} = \frac{1}{2} \rho b L k_v$$

Vid rörelse enbart i sidled får vi alltså en friktionskraft $Y_D = -D_{rv} v_1^2$. Vi kan nu bestämma D_{rv} med hjälp av de kurvor på friktionsmotstånd vi fått från Kockums. (Se diagram).

PLOT XD FRIKTIONSMOTSTÅND FRAMÅT



PLOT YD "FRIKTIONSHOTSTÄND I SID- OCH HÖJDLÄD"

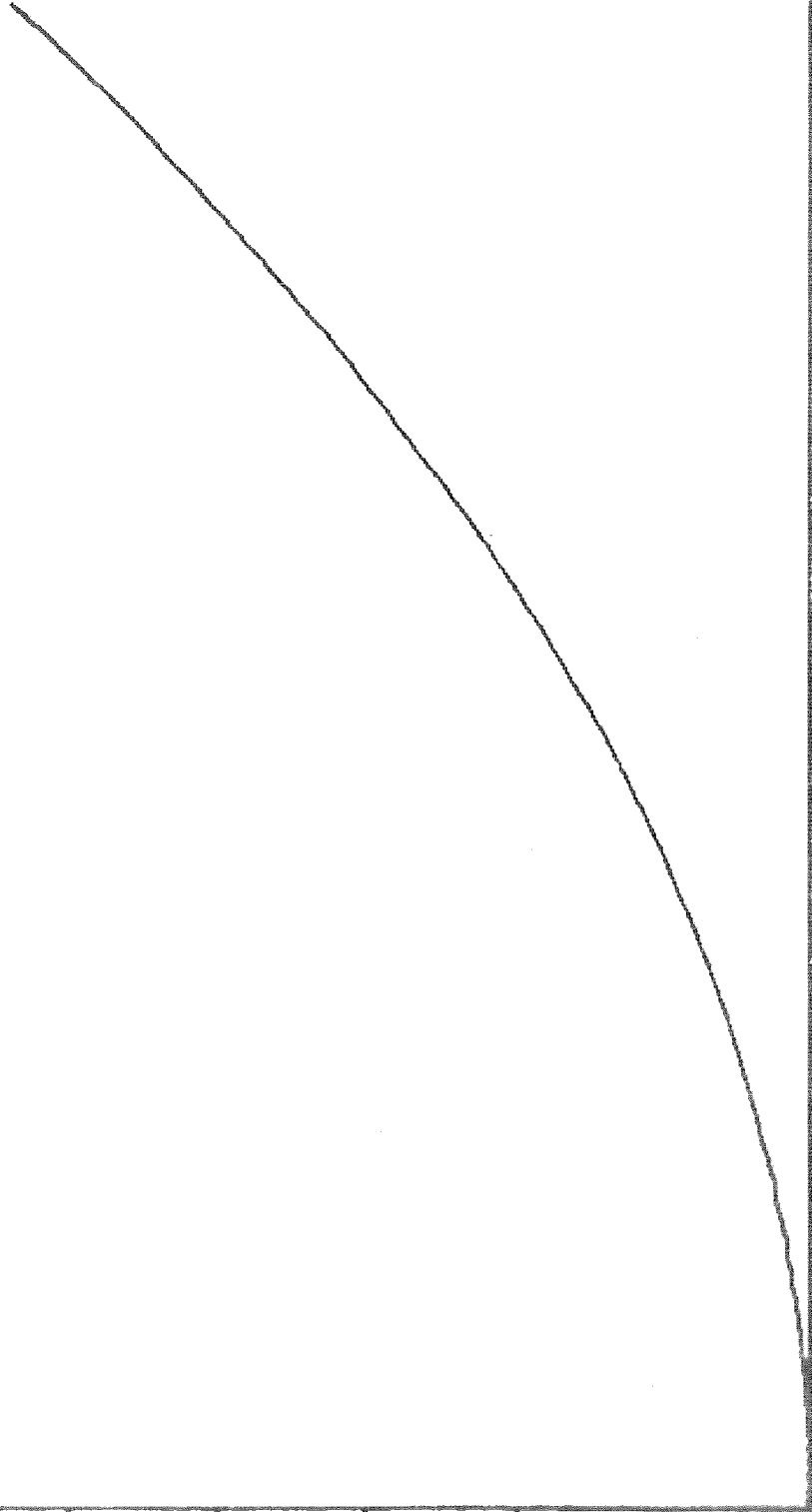
Q,ZD (N)

1.5E3

1.E3

500.

0.



0.24

0.18

0.12

0.06

För rörelse framåt blir bidragen från rotationerna försumbara. Krafter och moment vid rörelse i vertikalled fås på samma sätt som ovan.

Om vi nu tar hänsyn till att krafternas riktning ändras då hastigheterna växlar tecken, erhålles följande uttryck för krafter och moment p.g.a. friktionskrafter:

$$X_D = -D_{ru} u_1^2 \text{sign}(u_1)$$

$$Y_D = \begin{cases} -D_{rv} (v_1^2 + L^2 r^2 / 12) \text{sign}(v_1) & |v_1| \geq \frac{1}{2} L |r| \\ -D_{rv} (2v_1^3 / 3Lr + Lv_1 r / 2) \text{sign}(r) & |v_1| < \frac{1}{2} L |r| \end{cases}$$

$$Z_D = \begin{cases} -D_{rw} (w_1^2 + L^2 q^2 / 12) \text{sign}(w_1) & |w_1| \geq \frac{1}{2} L |q| \\ -D_{rw} (2w_1^3 / 3Lq + Lw_1 q / 2) \text{sign}(q) & |w_1| < \frac{1}{2} L |q| \end{cases}$$

$$M_D = \begin{cases} -\frac{1}{6} D_{rv} L^2 w_1 q \text{sign}(w_1) & |w_1| \geq \frac{1}{2} L |q| \\ D_{rv} (w_1^4 / 6Lq^2 - Lw_1^2 / 4 - L^3 q^2 / 32) \text{sign}(q) & |w_1| < \frac{1}{2} L |q| \end{cases}$$

$$N_D = \begin{cases} -\frac{1}{6} D_{rv} L^2 v_1 r \text{sign}(v_1) & |v_1| \geq \frac{1}{2} L |r| \\ D_{rv} (v_1^4 / 6Lr^2 - Lv_1^2 / 4 - L^3 r^2 / 32) \text{sign}(r) & |v_1| < \frac{1}{2} L |r| \end{cases}$$

Konstanterna D_{ru} , D_{rv} , D_{rw} bestämdes ur erhållna kurvor till ungefär:

$$D_{ru} = 1000 \quad [\text{Ns}^2/\text{m}^2]$$

$$D_{rv} = D_{rw} = 15000 \quad [\text{Ns}^2/\text{m}^2]$$

PROPELLEREKVATIONER

Propellerekvationerna beskriver vilka krafter T som propellrarna ger ubåten, samt vilka moment Q som påverkar propellrarna från vattnet. Dessa krafter och moment beror förutom av varvtalet även av båtens och propellrarnas rörelse relativt vattnet.

Vi behandlar här thrusters för sig och dyspropellrar för sig samt antar att alla thrusters är inbördes identiska. Även dyspropellrarna antas vara identiska.

Först behandlar vi propellerkrafter och moment vid rörelse i propellrarnas dragriktning (propellerkaraktistik), och sedan inverkan av rörelse tvärs dragriktningen (tvärströmning).

Propellerkaraktistik

Dyspropellrar.

För dyspropellrarna har vi karaktistik för rörelse framåt (Se ref. 6 samt diagram). Genom anpassning till erhållna kurvor erhålles följande ekvationer:

$$\begin{aligned} k_T &= 0.29 - 0.41J - 0.11J^2 \\ k_Q &= 0.023 - 0.025J - 0.0083J^2 \end{aligned}$$

Där $J = \frac{u_1}{n \times D}$

$D =$ diametern för dyspropellern $= 0.36\text{m}$

$$T = k_T \rho n x^2 D^4$$

$$Q = k_Q \rho n x^2 D^5$$

Vi antar nu att dyspropellrarna har precis samma karakteristik bakåt, och multiplicerar med 2 eftersom vi har två propellrar. När vi tagit hänsyn till tecknet på T för negativa n_x resp u_1 får vi fram följande totala kraft XPR resp. moment Q_x :

$$XPR = 2(4.87n_x - 19.1u_1) \text{abs}(n_x) - 14.26u_1 \text{abs}(u_1)$$

$$Q_x = (0.139n_x - 0.42u_1) \text{abs}(n_x) - 0.39u_1 \text{abs}(u_1)$$

Thrusters.

För thrusters saknar vi propellerkaraktistik. Vi måste därför försöka få fram det ungefärliga utseendet på k_T och k_Q med utgångspunkt från de fakta vi har. Problemet är att vi endast har fullständig information om k_T och k_Q i en enda punkt nämligen vid maxhastighet. Där vet vi:

$$T = 730 \text{ N} \quad (\text{Dragkraft vid } 0.6 \text{ knop})$$

$$Q = 37.4 \text{ Nm}$$

$$n = 19.167 \text{ s}^{-1}$$

$$v = 0.312 \text{ m/s} \quad (v = \text{hastighet relativt vattnet i dragrikt.})$$

Vid stillastående är informationen ofullständig:

$$T = 1137 \text{ N}$$

$$Q = 37.4 \text{ Nm}$$

$$n = ?$$

$$v = 0$$

Vi är alltså tvugna att göra vissa antaganden. Det första antagandet vi gör, är att vi säger att lutningen på k_Q som funktion av J är densamma för dyspropellrar och thrusters. Vidare antar vi att den i J kvadratiska termen både i k_T och k_Q är densamma för thrusters och dyspropellrar.

Detta betyder att k_Q får utseendet:

$$k_Q = a - 0.025J - 0.0083J^2$$

vilket medför att Q blir:

$$Q = 10.24an^2 - 0.64nv - 0.531v^2$$

För att bestämma a utnyttjar vi data för maxhastighet, och får då $a=0.011$. Det slutliga uttrycket på Q blir:

$$Q = 0.112n^2 - 0.64nv - 0.531v^2$$

Vi kan nu bestämma n vid stillastående till $18.24s^{-1}$. Därmed vet vi också tillräckligt för att bestämma k_T . Vi antar att k_T har utseendet:

$$k_T = a - bJ - 0.11J^2$$

d.v.s.

$$T = a'n^2 + b'nv - 17.6v^2$$

Vi utnyttjar nu data för stillastående och maxhastigheter för att bestämma a' och b' :

$$a' = 3.42$$

$$b' = 87.7$$

Det slutliga uttrycket på T blir då:

$$T = 3.42n^2 - 87.7nv - 17.6v^2$$

Detta betyder att vi får följande propellerkaraktistik för thrusters:

$$Q = 0.112n^2 - 0.64nv - 0.53v^2$$

$$T = 3.42n^2 - 87.7nv - 17.6v^2$$

där $Q = Qy1, Qy2, Qz1, Qz2$

$T = YPR1, YPR2, ZPR1, ZPR2$

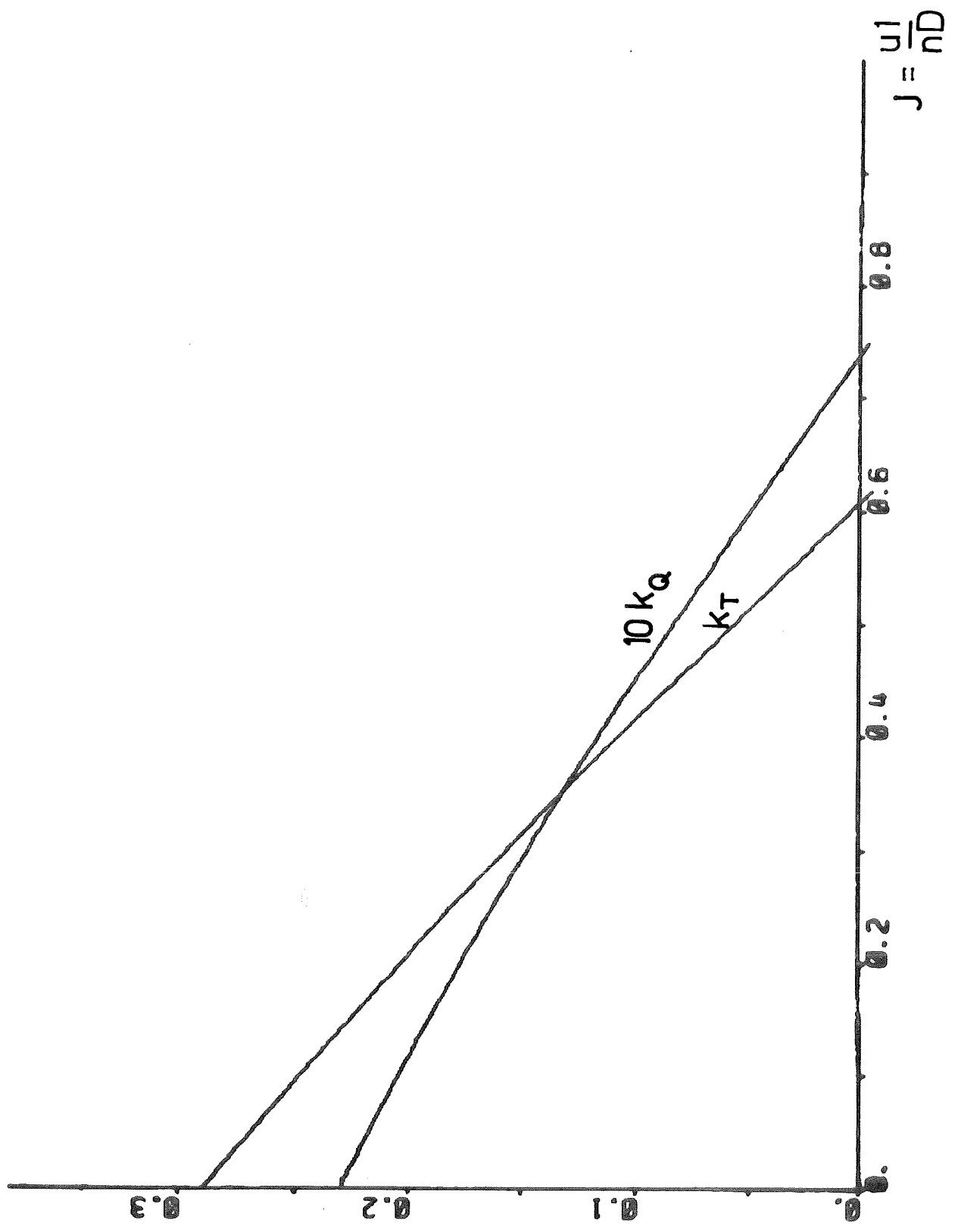
$n = ny1, ny2, nz1, nz2$

$v = v3, v4, w4, w3$

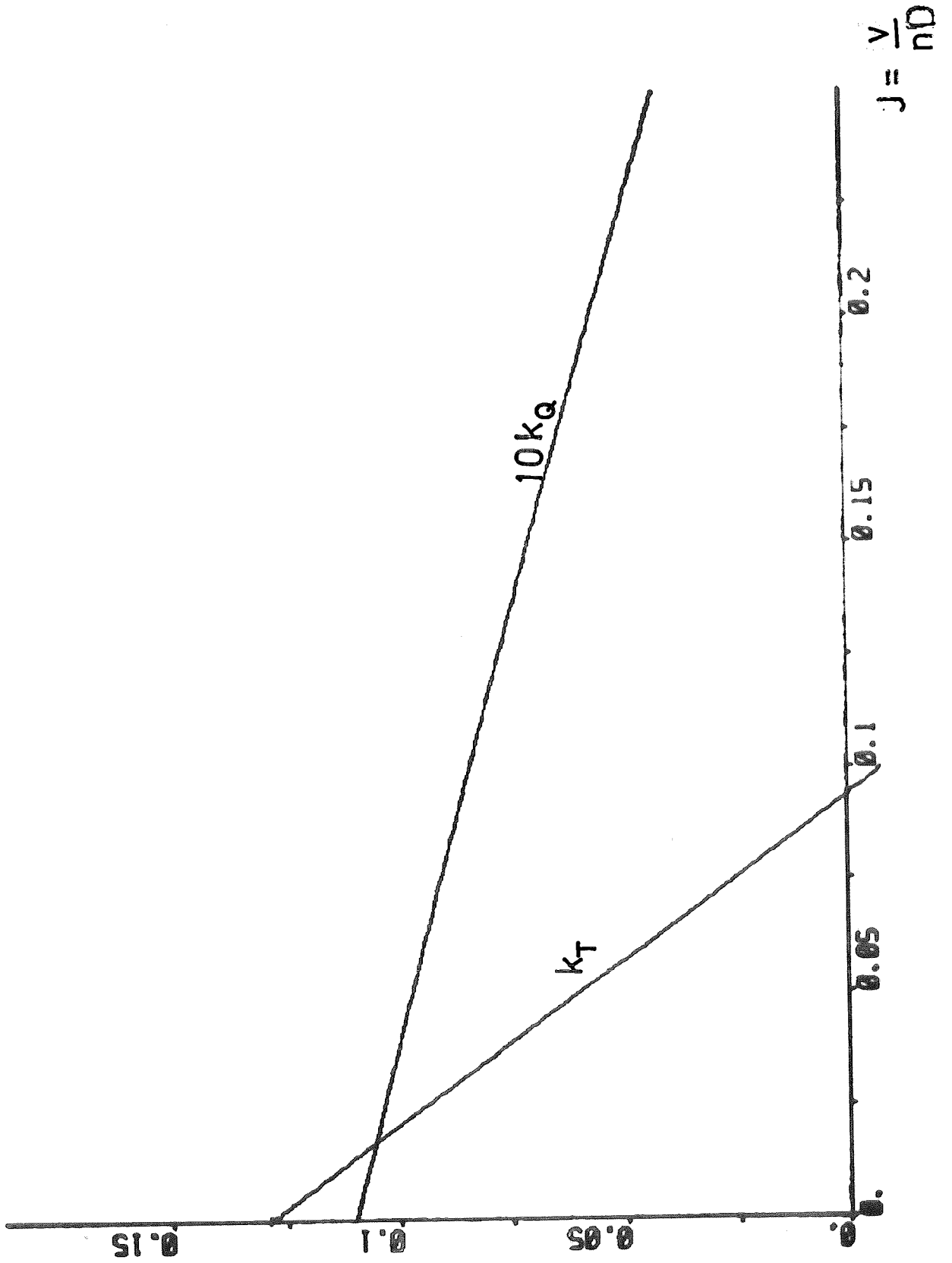
Ovanstående gäller också under följande antagande:

- 1/ Kvadratiska termer i k_T och k_Q lika stora för dyspropellrar och thrusters. Det visar sig att dessa termer är så små, att de i praktiken är försumbara. Deras exakta storlek är därför av mindre betydelse.
- 2/ Lutningen på k_Q är lika för dyspropellrar och thrusters. Om detta antagande är rimligt kan vi ej bedöma.
- 3/ Ubåtens maxhastighet är 0.6 knop horisontellt och vertikalt. Om detta antagande ej är rätt, påverkas utseendet av k_Q och k_T ganska mycket. Utseendet på k_T och k_Q återfinns nedan:

PLOT K "DYSPROPPELLER-KARAKTERISTIK"



PLOT K "THRUSTER-KARAKTERISTIK"



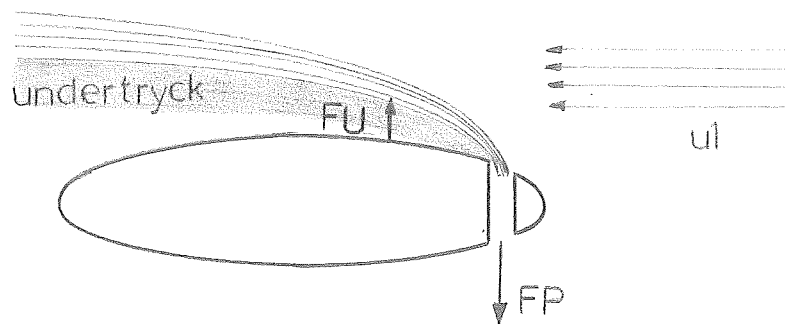
Moment från thrusters

Vridning av båten sker genom reversering av den ena thrusterpropellern. Vid studium av ritningarna märker man att förliga och akterliga thrusters är placerade olika långt från båtens mittpunkt, vilket ger olika moment. På båten kan man justera detta, men för att vår modell skall bli realistisk, antar vi samma avstånd för de thrusters som verkar i samma plan. Sålunda har vi bestämt avståndet för thrusters verkande i sidled till 4.69 m och för thrusters verkande i höjded till 4.05 m. Detta ger följande ekvationer:

$$NPR = (YPR1 - YPR2) 4.69$$

$$MPR = -(ZPR1 - ZPR2) 4.05$$

Tvärströmning



Det visar sig att den kraft som en thruster kan utveckla beror kritiskt på vattenströmningen tvärs thrustern. Fenomenet beror på att vattenströmmen från thrustern böjs av mot båtens skrov och skapar en zon av undertryck mellan vattenströmmen och båten. Detta resulterar i en sugkraft FU motriktad propellerns dragkraft FP. Vid kraftig tvärströmning blir zonen med undertryck åter liten, och sugkraften blir försumbar.

Kraftminskningen beror på kvoten mellan tvärströmning och vattenström från thrustern. Denna kvot kallar vi FI.

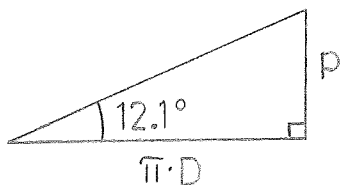
Tre saker bör observeras. För det första är effekten liten för dyspropellrar. Den försummas därför i vår modell. För det andra är effekten störst på den thruster som möter strömmen, d.v.s. den förliga om vi rör oss framåt. Vi försummar effekten för den akterliga thrustern i detta fall.

För det tredje angriper inte FP och FU i samma punkt. Detta medför att den resulterande kraftens angreppspunkt kommer att flytta sig. Momentet kommer därför att ändra sig dels av kraftminskningen och dels av att hävarmen förändras.

Definition av FI

FI definieras som kvoten mellan tvärströmningen och strömningen från thrustern. Då effekten av tvärströmning framifrån är betydligt större än effekten av tvärströmning underifrån resp. från sidan, förenklar vi problemet genom att anta att strömningen tvärs alla thrusters alltid är lika med u_1 .

Hur stor är då vattenströmmen ut från thrustern? För att bestämma detta kan man göra sig en enkel modell. Man föreställer sig propellern som en skruv. Den sträcka som propellern skruvar sig fram genom vattnet på ett varv kallas pitch. Vecklar man ut ett varv på denna skruv, får man nedanstående triangel. Höjden på denna triangel kallas pitch.



Den sträcka som propellern verkligen rör sig på ett varv kallas den effektiva pitchen. Den effektiva pitchen är ungefär 0.75 ggr pitchen. För thrusterpropellrarna vet vi att vi har en konstant stigningsvinkel på 12.1° och en diameter på 0.4 m varför pitchen blir 0.27 och den effektiva pitchen blir 0.20.

Multiplicerar man nu den effektiva pitchen med varvtalet får man vattnets hastighet ut genom propellern.

Följaktligen fås:

$$FI = \frac{u_1}{p_e n} \quad \text{där } p_e = \text{den effektiva pitchen}$$

$$n = \text{varvtalet för propellern}$$

Tvärströmmens inverkan på kraften och momentet

När det gäller att bestämma tvärströmmens inverkan på kraften och momentet, är fakta hämtade från artiklar av Beveridge (se ref. 7). De kurvor vi använt är de som uppmätts vid modellförsök med den amerikanska DSRV:n. Funktionssambanden kan ses som dimensionslösa koefficienter framför kraft resp. moment. En anpassning till kurvorna ger följande resultat:

$$TS = e^{-8.91FI^2} + 0.1FI$$

$$MTS = 0.47e^{-10.3FI^2} + 0.03FI + 0.6$$

där $TS = TSY1, TSY2, TSZ1, TSZ2$

$MTS = MTSY1, MTSY2, MTSZ1, MTSZ2$

$FI = FIY1, FIY2, FIZ1, FIZ2$

De fullständiga kraft och momentekvationerna för thrusters blir därför:

$$YPR = YPR1TSY1 + YPR2TSY2$$

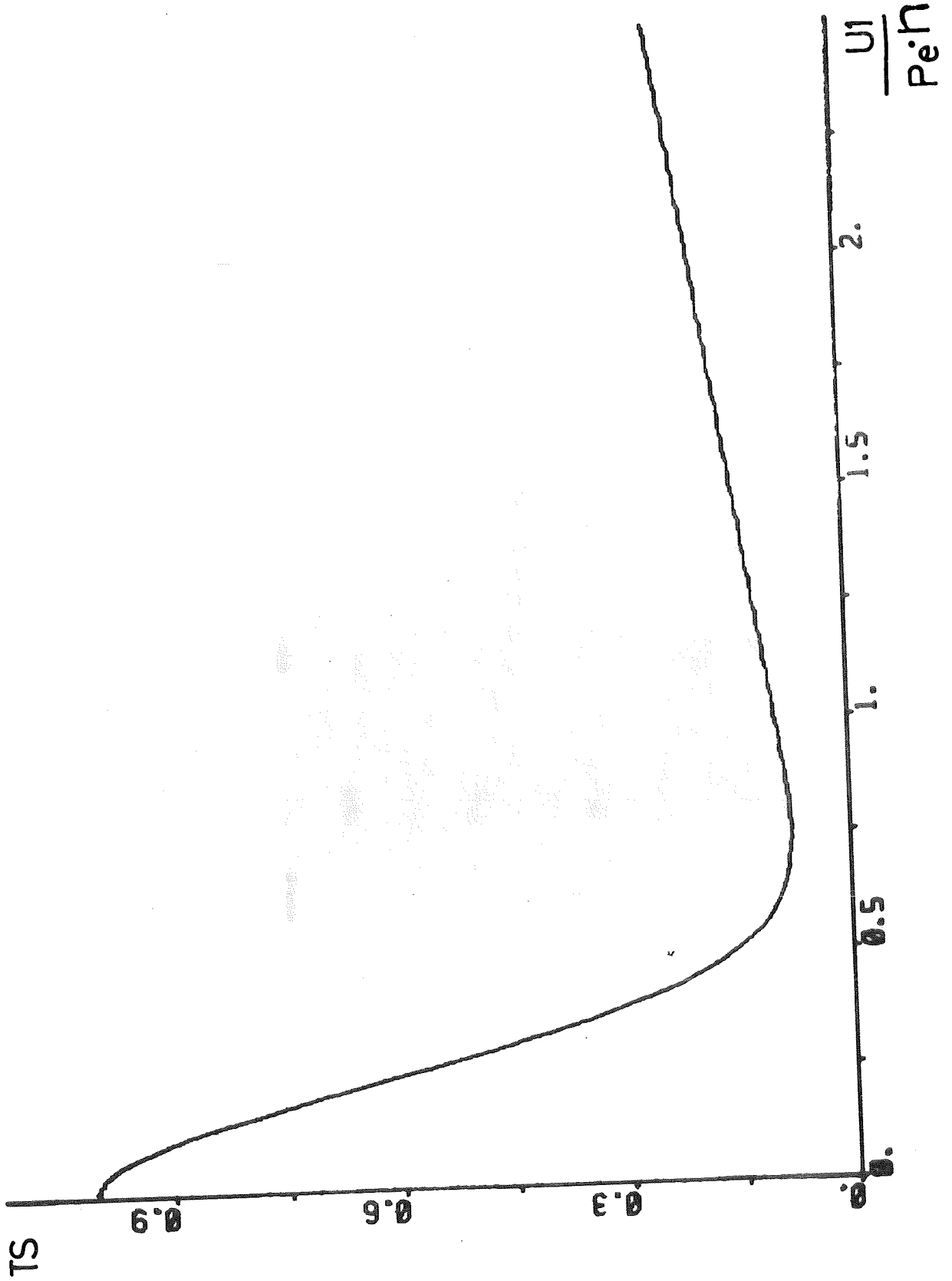
$$ZPR = ZPR1TSZ1 + ZPR2TSZ2$$

$$NPR = (YPR1MTSY1 - YPR2MTSY2) 4.69$$

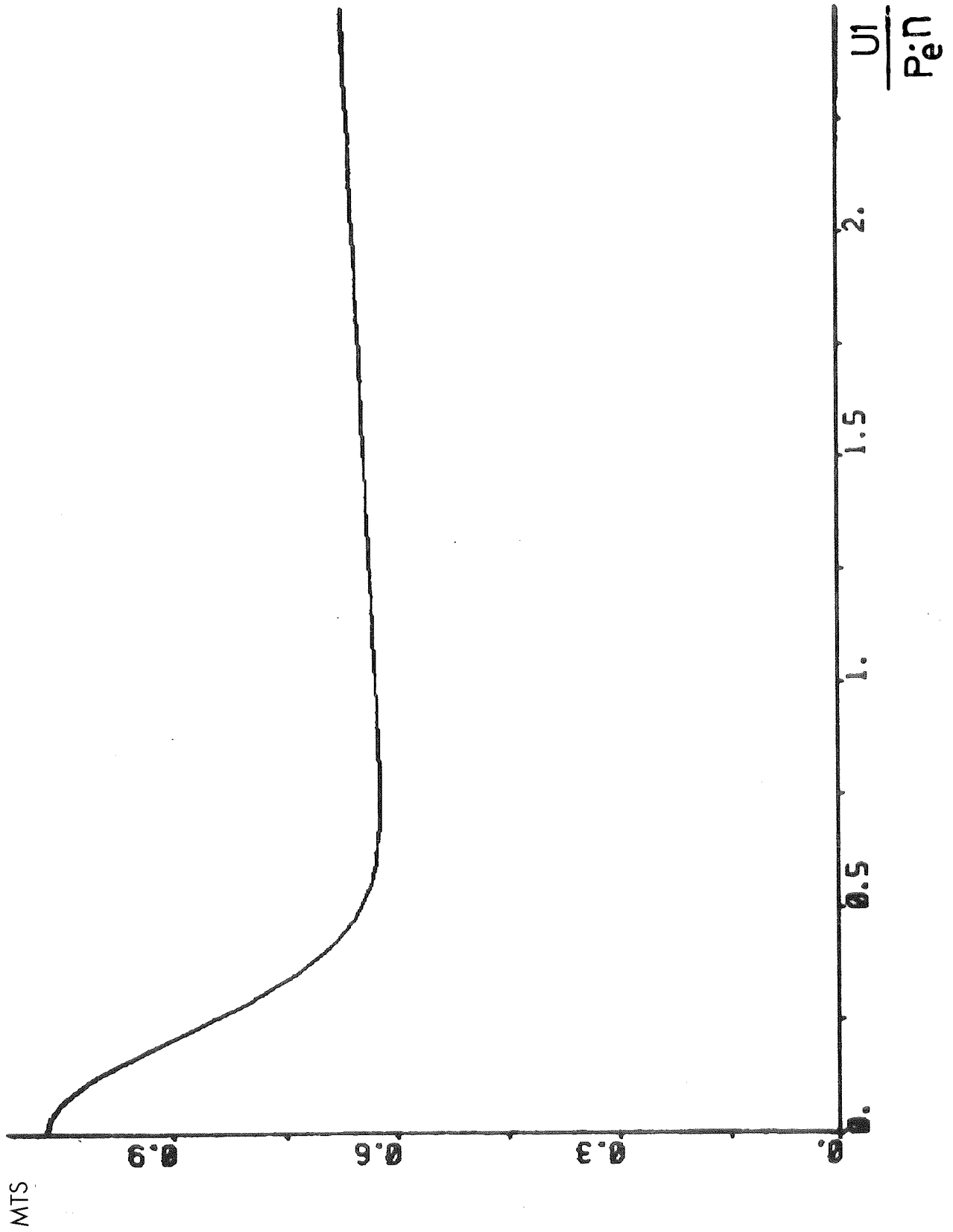
$$MPR = (ZPR2MTSZ2 - ZPR1MTSZ1) 4.05$$

Dyspropellrarna påverkas ej av tvärströmningen.

PLOT TS "KRAFT-TVÄRSTRÖMNINGSKOEFFICIENT

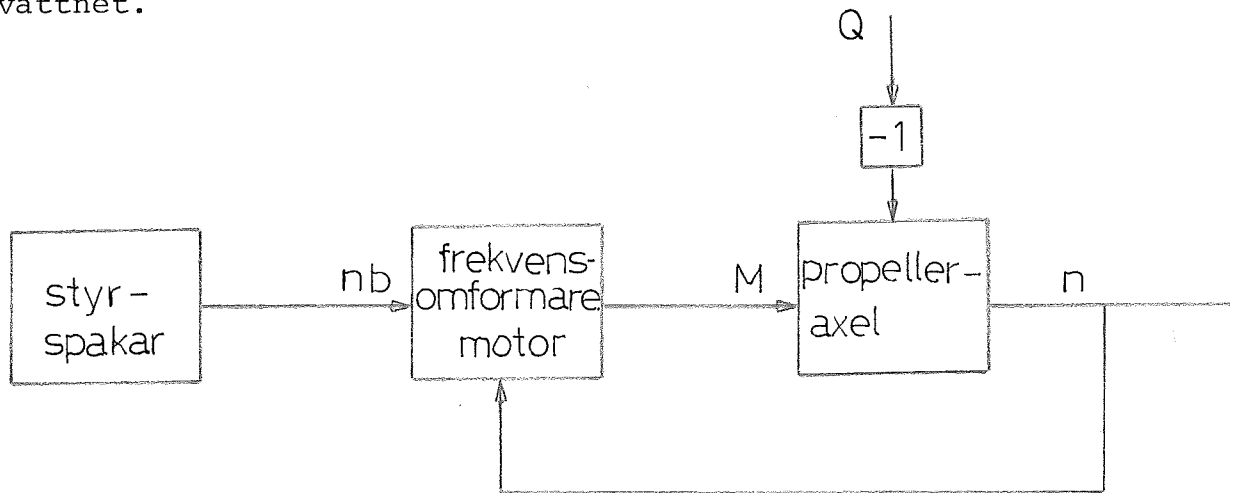


PLOT MS "MOMENT - TVÄRSTRÖMNINGSKOEFFICIENT



MOTOREKVATIONER

Motorekvationerna beskriver vad som händer mellan styrspakarna och propelleraxlarna. Från styrspakarna utgår en signal som utgör börvärde för propellerns rotationsriktning och varvtal. Detta börvärde går till en motor med frekvensomformare, som lägger på ett moment M på propelleraxeln. På propelleraxeln verkar också ett moment Q från vattnet.



Vi får då differentialekvationen för en propelleraxel:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M - Q$$

I = Tröghetsmoment för propelleraxel och rotor.

Det vi vill ha är varvtalet, varför vi får ekvationen:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Q)$$

Denna differentialekvation gäller allmänt för alla propellerarna. Q och I är dock ej samma för dyspropellrar och thrusters, däremot är M samma för dessa.

Frekvensomformare med motor

Det moment M som motorn lägger på propelleraxeln är beroende av varvtalet n på propelleraxeln samt av börvärdet från styrspakarna. Detta beroende hämtar vi från diagram erhållet av Kockums (Ref. 9). Anpassning till dessa kurvor gav följande ekvationer:

$$M = \left\{ \begin{array}{ll} 0.082n^2 + 3.11n + 37.4 & n < 0 \\ 37.4 & n > 0 \end{array} \right\} \quad n < n_b$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} -0.082n^2 + 3.11n - 37.4 & n > 0 \\ -37.4 & n < 0 \end{array} \right\} \quad n > n_b$$

Moment Q från vattnet

Bestämning av detta moment görs i samband med framtagning av propellerkaraktistik.

Bestämning av I

Värden för rotor och axel erhöles från Kockums. Dessa är gemensamma för dyspropellrar och thrusters:

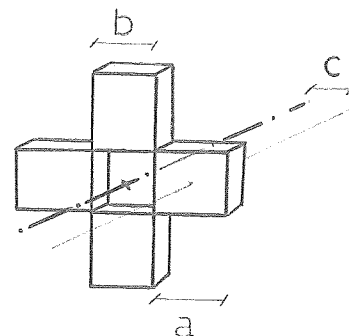
$$I_{\text{rotor+axel}} = 0.0404 \text{kgm}^2$$

För propellrarna antar vi ett mycket förenklat utseende (se fig.). Propellerbladen antas ha en massa $m = \text{propellermassan}/2$. På detta sätt tar vi även hänsyn till den medsvängande vattenmassan. Formel:

$$I = 4m((a^2 + b^2)/12 + c^2)$$

$$\text{För thrusters: } I_t = 0.19 \text{kgm}^2$$

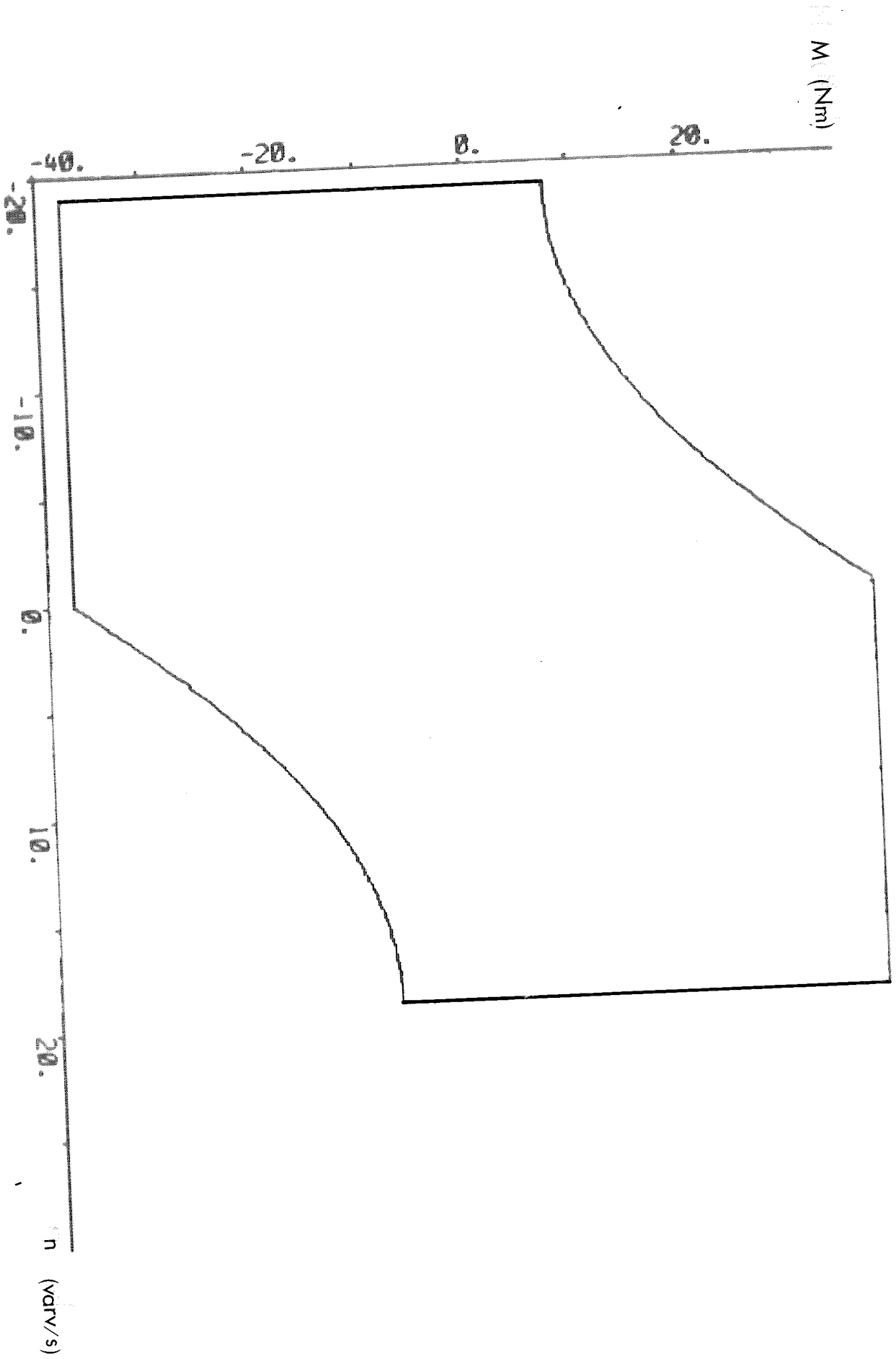
$$\text{För dysprop. : } I_d = 0.16 \text{kgm}^2$$



$$I_{\text{thruster}} = I_t + I_{\text{axel+rotor}} = 0.23 \text{kgm}^2$$

$$I_{\text{dysprop}} = I_d + I_{\text{axel+rotor}} = 0.20 \text{kgm}^2$$

"MOTOR-KARAKTERISTIK"



Ekvationer

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{dnx}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qx) & \text{Dyspropellrar} \\ \frac{dny1}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qy1) & \text{Främre thruster horisontellt} \\ \frac{dny2}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qy2) & \text{Bakre thruster horisontellt} \\ \frac{dnz1}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qz1) & \text{Främre thruster vertikalt} \\ \frac{dnz2}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qz2) & \text{Bakre thruster vertikalt} \end{array} \right.$$

$$M = \left\{ \begin{array}{ll} \left. \begin{array}{l} 0.082n + 3.11n + 37.4 \\ 37.4 \end{array} \right\} & \begin{array}{l} n < 0 \\ n > 0 \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} -0.082n + 3.11n - 37.4 \\ -37.4 \end{array} \right\} & \begin{array}{l} n > 0 \\ n < 0 \end{array} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} n < nb \\ n > nb \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Qx = (0.139nx - 0.42u1) \text{abs}(nx) - 0.39u \text{abs}(u1) \\ Qy1 = (0.112ny - 0.64v3) \text{abs}(ny1) - 0.53v3 \text{abs}(v3) \\ Qy2 = (0.112ny2 - 0.64v4) \text{abs}(ny2) - 0.53v4 \text{abs}(v4) \\ Qz1 = (0.112nz - 0.64w4) \text{abs}(nz1) - 0.53w4 \text{abs}(w4) \\ Qz2 = (0.112nz2 - 0.64w3) \text{abs}(nz2) - 0.53w3 \text{abs}(w3) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} v3 = v1 + 4.69r & \text{Hävarm för horisont. thruster}=4.69m \\ v4 = v1 - 4.69r & \\ w3 = w1 + 4.05q & \text{Hävarm för vertikal thruster}=4.05m \\ w4 = w1 - 4.05q & \end{array} \right.$$

SAMMANFATTNING

Vi har nu härlett alla de krafter som vi kan tänka oss påverkar ubåten i vattnet. Dessa krafter skall utgöra vänsterledet i de tidigare härledda rörelseekvationerna.

För att kunna studera ubåtens rörelser relativt det jordfasta koordinatsystemet inför vi nu också ubåtens lägeskoordinater och vinklar i detta koordinatsystem som tillstånd i vår modell. Samtliga beteckningar finns förklarade under rubriken beteckningar längst bak i redogörelsen, samt även i programlistningen.

Vi får alltså till slut följande rörelseekvationer:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{m(1+k1)} (X_D + X_L + XPR - m(qw - rv))$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m(1+k2)} (Y_D + Y_L + YPR - mru)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{m(1+k2)} (Z_D + Z_L + ZPR - mqu)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{I_Y(1+k3)} (M_D + M_L + MPR - mg_m \sin(\theta) \cdot 9.81)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{I_Z(1+k3)} (N_D + N_L + NPR)$$

$$\frac{dx_0}{dt} = u \cos(\theta) \cos(\psi) - v \sin(\psi) + w \sin(\theta) \cos(\psi)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = u \cos(\theta) \sin(\psi) + v \cos(\psi) + w \sin(\theta) \sin(\psi)$$

$$\frac{dz_0}{dt} = -u \sin(\theta) + w \cos(\theta)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = q$$

$$\frac{d\psi}{dt} = r$$

$$\frac{dnx}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qx)$$

$$\frac{dny1}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qy1)$$

$$\frac{dny2}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qy2)$$

$$\frac{dnz1}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qz1)$$

$$\frac{dnz2}{dt} = \frac{1}{2\pi I} (M - Qz2)$$

KOMMENTARER

Hur pass bra modellen som helhet är, är svårt att bedöma för oss. Vissa delar har vi gott grepp om, medan vi är betydligt osäkrare på andra delar. Vi skall här kort kommentera de olika delarna av modellen vad gäller tillförlitlighet. I samband med simuleringarna gör vi också vissa känslighetsanalyser.

Rörelseekvationerna

Rörelseekvationerna är uppställda för en homogen ellipsoid med masscentrum orörligt placerad i ellipsoidens mitt. Två saker gör här modellen osäker. För det första har vi räknat ut tröghetsmomenten för en homogen ellipsoid. Därmed faller till exempel tröghetsprodukterna bort. Detta kan tyckas vara en grov förenkling, men det är det bästa vi kan göra. Mer än en faktor 2 tror vi ej att vårt värde skiljer sig från det rätta när det gäller tröghetsmomenten. Det som påverkas är tidskonstanten vid rotation.

För det andra kan ju naturligtvis masscentrum röra sig något i båten. Det kan dock knappast vara frågan om några större förflyttningar. Att ta hänsyn till detta i modellen skapar stora svårigheter. Vår bedömning är att felet vi gör då vi försummar masscentrums rörelser är litet.

Hydrodynamiska krafter

Ett vanligt antagande är att dela upp de hydrodynamiska krafterna i krafter som beror på viskösa effekter, dvs. friktionskrafter, samt effekter i ideell vätska (lyftkrafter).

Detta är ej helt korrekt, men ger en ganska god beskrivning av verkligheten.

Det är nästan helt omöjligt för oss att göra en rimlig bedömning av riktigheten i lyftkrafternas storlek. Endast modellförsök kan ge svar på denna fråga. Å andra sidan ville vi gärna ha med lyftkrafterna, eftersom en sådan effekt som stallning eventuellt kan förorsaka en del problem, speciellt vid styrning i strömmar. Det är möjligt att lyftkrafternas inverkan i vår modell är något överdriven (se dock känslighetsanalys), men vi vill på detta sätt endast peka på ett potentiellt problem. Även den exakta storleken på stallningsvinkeln är osäker.

Friktionskrafterna har vi ganska gott grepp om. I den mån de kurvor på friktionsmotstånd vid translationsrörelse som vi erhållit från Kockums är riktiga, är felet här försumbart. Möjligtvis kan ett litet fel uppträda vid rotation, beroende på de förenklade antaganden vi gjort angående skrovets form (rektangel).

Propellerkrafter

Se diskussion vid härledning av propellerkaraktistik för thrusters. k_T är ganska känslig för den verkliga storleken på maxhastigheten i sidled. Om vi härledningen av k_T för thrusters antar att maxhastigheten i sidled är 0.7 knop i stället för det angivna 0.6 knop erhålles följande utseende på k_T :

$$k_T = 0.13 - 0.78J - 0.11J^2$$

vilket kan jämföras med det k_T vi tidigare erhållit:

$$k_T = 0.13 - 1.37J - 0.11J^2$$

Det vill säga lutningen på k_T har minskat till hälften.

Tvärströmning

När det gäller orsaken till och storleken av tvärströmningseffekterna, har vi inga andra källor än ref. 7 och 8. De modellförsök vi hänvisar till är gjorda för en amerikansk räddningsubåt som uppvisar en del skillnader mot URF:en. Att effekten uppträder är helt klart, däremot har vi svårt att bedöma om effekten blir större eller mindre för URF:en än för DSRV:n. Vi har därför valt att direkt använda resultaten från modellförsöken. En feluppskattning har vi svårt att göra, men det principiella beteendet bör stämma ganska bra.

Motorekvationer

När det gäller momentkaraktistik för motor med frekvensomvandlare förlitar vi oss helt på de kurvor vi erhållit från Kockums. Däremot är utseendet på Q , som nämnts i samband med propellerkaraktistiken, något osäkrare. Det är dock så, att tröghetsmomentet för de roterande delarna är så litet, att alla tidskonstanter i samband med motorn är mycket små. Tidskonstanterna är av storleksordningen någon sekund vilket är mycket litet i förhållande till övriga tidskonstanter i systemet. Fel i motorekvationerna kommer därför inte att inverka särskilt mycket på modellen som helhet.

PROGRAMMET

Programmet är skrivet i SIMNON. För att bättre kunna utnyttja utrymmet i kärnminnet har vi använt oss av en del omskrivningar av storheter. T.ex. $UV = U12 + V12 = U1 \cdot U1 + V1 \cdot V1$. Dessa omskrivningar finns under rubriken RÄKNE-VARIABLER i programmet.

I övrigt återfinnes samtliga ekvationer under respektive rubriker i den ordning vi härlett dem här.

Under rubriken SKALADE VARIABLER definierar vi en del variabler som är lämpliga för plottning. T.ex. menar vi med UP samma sak som med U normaliserat med konstanterna AU och BU. Detta ger oss en möjlighet att plotta alla variabler i samma diagram. På samma sätt har alla övriga tillståndsvariabler normaliserats. Under rubriken KONSTANTER har vi från början tilldelat $AU = 1$ och $BU = 0$. Om inget annat görs kommer därför U att vara lika med UP. Under körningens gång kan vi ändra AU och BU samt även alla andra konstanter genom att skriva:

```
PAR AU:1.5
```

AU får då värdet 1.5 .

Styrningen av ubåten sker i programmet genom att ändra börvärdena NXB...NZ2B för propellervarvtalet. Dessa ändrar vi på samma sätt som alla övriga konstanter genom följande kommando:

```
PAR NY1B:19
```

d.v.s. främre sidothruster får varvtalsbörvärdet 19 varv/sek.

Andra viktiga parametrar som sättes med kommandot PAR är strömningens hastighetskomponenter VX0, VY0 och VZ0. På så sätt kan vi definiera en strömning i godtycklig riktning.

Innan man startar en simulering måste man bestämma vissa saker:

- 1/ Vilken variabel skall plottas (skalning ?)
- 2/ Vilka kordinataxlar skall jag ha?
- 3/ Hur lång tid skall jag simulera?
- 4/ Vilka initialvärden skall jag ha på tillståndsvariablerna?
- 5/ Vilka propellervarvtals-börvärden skall jag ha?
- 6/ Skall jag lägga på någon strömning?

Som ett exempel kan vi ta en simulering under 200 sek där vi vill titta på hastigheten framåt U som funktion av tiden T. Vi vill ha en initialhastighet $U = 1$ m/s och vill komma upp i max hastighet framåt d.v.s. maximalt propellervarvtal på dyspropellrarna. På tidsaxeln vill vi ha en gradering från 0 till 200 och på hastighetsaxeln från 1 till 2. Vi skriver då:

```
PAR NXB:19
INIT U:1
AXES H 0 200 V 1 2
PLOT U
SIMU 0 200
```

Från början är alla initialvärden noll, och alla parametrar har de värden som står angivna under rubriken KONSTANTER i programmet. Vill vi i stället ha initialvärdet $U = 0$, behöver vi alltså inte skriva något alls. Har vi en gång angivit ett parameter- eller initialvärde bibehålls emellertid detta under hela körningen tills vi ändrar det igen eller kompilerar om programmet.

I SIMNON finns även möjlighet att plotta valfria variabler mot varandra, t.ex. X0 mot Y0 vilket ger oss en bild av horisontalplanet. Man kan även avbryta en simulering för att t.ex. börvärdena för propellervarvtalen skall kunna ändras under en simulering.

För närmare beskrivning av SIMNON hänvisas till SIMNON-rapporten (ref. 10)

CONTINUOUS SYSTEM URF1

" SIMULATION OF RESCUE SUBMARINE
" AUTHORS GRGIC/TERNRUD

" T I L L S T A N D S V A R I A B L E R

" U,V,W HASTIGHETER I BATENS KOORDINATSYSTEM
" Q,R VINKELHASTIGHETER LANGS BATENS Y OCH Z RIKTNINGAR
" X0,Y0,Z0 LAGESKOORDINATER I ETT JORDFAST SYSTEM
" TH,PSI VRIDNINGSVINKLAR KRING Y0 OCH Z0 AXLARNARNA
" NX DYSPROPELLERVARVTAL
" NY1,NZ1 VARVTAL FOR THRUSTERS I FOREN
" NY2,NZ2 VARVTAL FOR THRUSTERS I AKTERN

" O V R I G A V A R I A B L E R

" VX0,VY0,VZ0 VATTENSTROM I JORDFAST KOORDINATSYSTEM
" UST,VST,WST VATTENSTROM I BATENS KOORDINATSYSTEM
" U1,V1,W1 VATTNETS HASTIGHET RELATIVT BATEN
" ALFA,BETA,GAM,DEL ANFALLSVINKLAR
" SALFA,.....,SDEL SINUS FOR ANFALLSVINKLAR
" XL,YL,ZL LYFTKRAFTER
" ML,NL MOMENT P.G.A. LYFTKRAFTER
" XD,YD,ZD FRIKTIONSKRAFTER
" MD,ND MOMENT P.G.A. FRIKTIONSKRAFTER
" FIY1,.....,FIZ2 FORHALLANDET MELLAN VATTENSTROMMARNARNA TVARS
" OCH LANGS PROPELLERAXLARNARNA (THRUSTERS)
" TSY1,.....,TSZ2 KRAFT-TVARSTROMNINGSKOEFFICIENTER
" MTSY1,..,MTSZ2 MOMENT-TVARSTROMNINGSKOEFFICIENTER
" XPR,YPR,ZPR PROPELLERKRAFTER
" MPR,NPR MOMENT P.G.A. PROPELLERKRAFTER
" MX11,..,MZ22 MOTORKARAKTERISTIK
" MX1,.....,MZ2 MOMENT PA PROPELLERAXLARNARNA FRAN MOTORN
" QX,.....,QZ2 MOMENT PA PROPELLERAXLARNARNA FRAN VATTNET

" K O N S T A N T E R

" L BATENS LANGD
" ART ASPECT RATIO
" RHO VATTNETS DENSITET
" A SKROVETS EFFEKTIVA AREA SETT FRAN SIDAN
" DRU,DRV,DRW FRIKTIONSKONSTANTER
" M BATENS DEPLACEMENT
" K1,K2,K3 MASSOKNINGSKOEFFICIENTER (LAMB)
" IB BATENS TROGHETSMOMENT KRING Y OCH Z AXLARNARNA
" PE EFFEKTIV PITCH FOR THRUSTERS
" I TROGHETSMOMENT FOR ROTOR,AXEL OCH PROPELLER
" NXB,..,NZ2B BORVARDEN FOR PROPELLERVARVTAL

TIME T

STATE U V W Q R X0 Y0 Z0 TH PSI NX NY1 NY2 NZ1 NZ2

DER DU DV DW DQ DR DX0 DY0 DZ0 DTH DPSI DNX DNY1 DNY2 DNZ1 DNZ2

DNV1,NZ2

"S T R O M N I N G S E K V A T I O N E R

```

CTH=COS(TH)
STH=SIN(TH)
CPSI=COS(PSI)
SPSI=SIN(PSI)
UST=VX0*CTH*CPSI+VY0*SPSI-VZ0*STH*CPSI
VST=-VX0*CTH*SPSI+VY0*CPSI+VZ0*STH*SPSI
WST=VX0*STH+VZ0*CTH
U1=U-UST
V1=V-VST
W1=W-WST

```

"R A K N E V A R I A B L E R

```

LH=L/2
V2=V1+R*LH
W2=W1-Q*LH
U12=U1*U1
V12=V1*V1
W12=W1*W1
V22=V2*V2
W22=W2*W2
R2=R*R
Q2=Q*Q
L2=L*L
UV=U12+V12
UW=U12+W12
UV2=U12+V22
UW2=U12+W22
K=PI*RHO*ART*A/4

```

"L Y F T K R A F T E R

```

SALFA=IF UV<EPS THEN 0 ELSE V1/SQRT(UV)
SBETA=IF UW<EPS THEN 0 ELSE W1/SQRT(UW)
SGAM=IF UV2<EPS THEN 0 ELSE V2/SQRT(UV2)
SDEL=IF UW2<EPS THEN 0 ELSE W2/SQRT(UW2)
TKA=IF ABS(SALFA)>0.96 THEN 0 ELSE 1
TKB=IF ABS(SBETA)>0.96 THEN 0 ELSE 1
XL1=TKA*K*V12*SIGN(U1)
XL2=TKB*K*W12*SIGN(U1)
XL=XL1+XL2
YL=-TKA*K*U1*V1*SIGN(U1)
ZL=-TKB*K*U1*W1*SIGN(U1)
ML=IF ABS(SDEL)>0.96 THEN 0 ELSE K*U1*W2*LH
NL=IF ABS(SGAM)>0.96 THEN 0 ELSE -K*U1*V2*LH

```

"F R I K T I O N S K R A F T E R

```

XD=-DRU*U12*SIGN(U1)
YD1=-DRV*(V12+R2*L2/12)*SIGN(V1)
YD2=-DRV*V1*(2*V12/3/R/L+R*LH)*SIGN(R)
YD=IF ABS(V1)<ABS(R*LH) THEN YD2 ELSE YD1
ZD1=-DRW*(W12+Q2*L2/12)*SIGN(W1)
ZD2=-DRW*W1*(2*W12/3/Q/L+Q*LH)*SIGN(Q)
ZD=IF ABS(W1)<ABS(Q*LH) THEN ZD2 ELSE ZD1
MD1=-DRW/6*L2*W1*Q*SIGN(W1)
MD2=DRW*(W12*W12/6/Q2/L-W12*L/4-Q2*L2*L/32)*SIGN(Q)
MD=IF ABS(W1)<ABS(Q*LH) THEN MD2 ELSE MD1
ND1=-DRV/6*L2*V1*R*SIGN(V1)
ND2=DRV*(V12*V12/6/R2/L-V12*L/4-R2*L2*L/32)*SIGN(R)

```

"P R O P E L L E R E K V A T I O N E R

```

V3=V1+R*4.69
V4=V1-R*4.69
W3=W1+Q*4.05
W4=W1-Q*4.05
UTV=U1/PE
FIY1=IF NY1<1 THEN UTV ELSE UTV/ABS(NY1)
FIY2=IF NY2<1 THEN UTV ELSE UTV/ABS(NY2)
FIZ1=IF NZ1<1 THEN UTV ELSE UTV/ABS(NZ1)
FIZ2=IF NZ2<1 THEN UTV ELSE UTV/ABS(NZ2)
TK1=IF U1>0 THEN 1 ELSE 0
TK2=IF U1>0 THEN 0 ELSE 1
TSY1=TK2+TK1*(EXP(-8.91*FIY1*FIY1)+0.1*FIY1)
TSY2=TK1+TK2*(EXP(-8.91*FIY2*FIY2)-0.1*FIY2)
TSZ1=TK2+TK1*(EXP(-8.91*FIZ1*FIZ1)+0.1*FIZ1)
TSZ2=TK1+TK2*(EXP(-8.91*FIZ2*FIZ2)-0.1*FIZ2)
XPR=2*(4.87*NX-19.1*U1)*ABS(NX)-14.26*U1*ABS(U1)
YPR1=(3.42*NY1-87.7*V3)*ABS(NY1)-17.6*V3*ABS(V3)
YPR2=(3.42*NY2-87.7*V4)*ABS(NY2)-17.6*V4*ABS(V4)
YPR=YPR1*TSY1+YPR2*TSY2
ZPR1=(3.42*NZ1-87.7*W4)*ABS(NZ1)-17.6*W4*ABS(W4)
ZPR2=(3.42*NZ2-87.7*W3)*ABS(NZ2)-17.6*W3*ABS(W3)
ZPR=ZPR1*TSZ1+ZPR2*TSZ2
MTSY1=TK2*1.07+TK1*(0.47*EXP(-10.3*FIY1*FIY1)+0.03*FIY1+0.6)
MTSY2=TK1*1.07+TK2*(0.47*EXP(-10.3*FIY2*FIY2)-0.03*FIY2+0.6)
MTSZ1=TK2*1.07+TK1*(0.47*EXP(-10.3*FIZ1*FIZ1)+0.03*FIZ1+0.6)
MTSZ2=TK1*1.07+TK2*(0.47*EXP(-10.3*FIZ2*FIZ2)-0.03*FIZ2+0.6)
NPR=(YPR1*MTSY1-YPR2*MTSY2)*4.69
MPR=(ZPR2*MTSZ2-ZPR1*MTSZ1)*4.05

```

"M O T O R E K V A T I O N E R

```

MX11=(-0.082*NX*NX-37.4)*SIGN(NX-NXB)+3.11*NX
MY11=(-0.082*NY1*NY1-37.4)*SIGN(NY1-NY1B)+3.11*NY1
MY22=(-0.082*NY2*NY2-37.4)*SIGN(NY2-NY2B)+3.11*NY2
MZ11=(-0.082*NZ1*NZ1-37.4)*SIGN(NZ1-NZ1B)+3.11*NZ1
MZ22=(-0.082*NZ2*NZ2-37.4)*SIGN(NZ2-NZ2B)+3.11*NZ2
MX0=IF (NX-NXB)*NX<0 THEN 37.4*SIGN(NXB-NX) ELSE MX11
MY10=IF (NY1-NY1B)*NY1<0 THEN 37.4*SIGN(NY1B-NY1) ELSE MY11
MY20=IF (NY2-NY2B)*NY2<0 THEN 37.4*SIGN(NY2B-NY2) ELSE MY22
MZ10=IF (NZ1-NZ1B)*NZ1<0 THEN 37.4*SIGN(NZ1B-NZ1) ELSE MZ11
MZ20=IF (NZ2-NZ2B)*NZ2<0 THEN 37.4*SIGN(NZ2B-NZ2) ELSE MZ22
QX=(0.139*NX-0.42*U1)*ABS(NX)-0.387*U1*ABS(U1)
QY1=(0.112*NY1-0.64*V3)*ABS(NY1)-0.53*V3*ABS(V3)
QY2=(0.112*NY2-0.64*V4)*ABS(NY2)-0.53*V4*ABS(V4)
QZ1=(0.112*NZ1-0.64*W4)*ABS(NZ1)-0.53*W4*ABS(W4)
QZ2=(0.112*NZ2-0.64*W3)*ABS(NZ2)-0.53*W3*ABS(W3)
MX=IF ABS(NX-NXB)<EPS1 THEN MIN(QX,37.4) ELSE MX0
MY1=IF ABS(NY1-NY1B)<EPS1 THEN MIN(QY1,37.4) ELSE MY10
MY2=IF ABS(NY2-NY2B)<EPS1 THEN MIN(QY2,37.4) ELSE MY20
MZ1=IF ABS(NZ1-NZ1B)<EPS1 THEN MIN(QZ1,37.4) ELSE MZ10
MZ2=IF ABS(NZ2-NZ2B)<EPS1 THEN MIN(QZ2,37.4) ELSE MZ20
K10=1/2/PI/I

```

"R O R E L S E E K V A T I O N E R

$DU=1/M/(1+K1)*(XD+XL+XPR-M*(Q*W-R*V))$
 $DV=1/M/(1+K2)*(YD+YL+YPR-M*R*U)$
 $DW=1/M/(1+K2)*(ZD+ZL+ZPR-M*Q*U)$
 $DQ=1/(1+K3)/IB*(MD+ML+MPR-M*GM*STH)$ *9.81
 $DR=1/(1+K3)/IB*(ND+NL+NPR)$
 $DX0=U*CTH*CPSI-V*SPSI+W*STH*CPSI$
 $DY0=U*CTH*SPSI+V*CPSI+W*STH*SPSI$
 $BZ0=-U*STH+W*CTH$
 $DTH=Q$
 $DPSI=R$
 $DNX=K10*(MX-QX)$
 $DNY1=K10*(MY1-QY1)$
 $DNY2=K10*(MY2-QY2)$
 $DNZ1=K10*(MZ1-QZ1)$
 $DNZ2=K10*(MZ2-QZ2)$

"S K A L A D E V A R I A B L E R

$UP=U/AU+BU$
 $VP=V/AV+BV$
 $WP=W/AW+BW$
 $QP=Q/AQ+BQ$
 $RP=R/AR+BR$
 $X0P=X0/AX0+BX0$
 $Y0P=Y0/AY0+BY0$
 $Z0P=Z0/AZ0+BZ0$
 $THP=TH/ATH+BTH$
 $PSIP=PSI/APSI+BPSI$
 $NXP=NX/ANX+BNX$
 $NY1P=NY1/ANY1+BNY1$
 $NY2P=NY2/ANY2+BNY2$
 $NZ1P=NZ1/ANZ1+BNZ1$
 $NZ2P=NZ2/ANZ2+BNZ2$

"K O N S T A N T E R

$VX0:0$
 $VY0:0$
 $VZ0:0$
 $L:13.5$
 $PI:3.142$
 $ART:0.3$
 $RHO:1000$
 $A:30$
 $DRU:1000$
 $DRV:15000$
 $DRW:15000$
 $M:80000$
 $K1:0.1$
 $K2:0.8$
 $K3:0.5$
 $IB:500000$
 $EPS:1E-12$
 $EPS1:0.1$
 $PE:0.20$
 $I:0.23$
 $GM:0.08$
 $NXB:0$
 $NY1B:0$
 $NY2B:0$

AU:1
AV:1
AW:1
AQ:1
AR:1
AX0:1
AY0:1
AZ0:1
ATH:1
APSI:1
ANX:1
ANY1:1
ANY2:1
ANZ1:1
ANZ2:1
BU:0
BV:0
BW:0
BQ:0
BR:0
BX0:0
BY0:0
BZ0:0
BTH:0
BPSI:0
BNX:0
BNY1:0
BNY2:0
BNZ1:0
BNZ2:0
END

SIMULERINGARNA

Syftet med simuleringarna är två:

- 1/ Studera båtens uppförande i vattnet.
- 2/ Göra känslighetsanalyser, dvs. se hur förändringar i olika parametrar påverkar båtens uppförande.

Simuleringar

När det gäller båtens uppförande i vattnet har vi gjort följande serie simuleringar, föreslagna av Kockums.

A Rätlinjig rörelse

- | | |
|---|--|
| 1/ Stegsvär framåt | Vi startar från stillastående och lägger på fullt varvtal framåt på dyspropellrarna. Efter 150 s har vi nått hastigheten 1.54 m/s, och vi har då förflyttat oss 174 m. Sedan lägger vi på fullt varvtal bakåt på dyspropellrarna. Efter 42 s ligger vi stilla och har då förflyttat oss ytterligare 28 m. Obs att X0 skalad. |
| 2/ Stegsvär åt sidan (=uppåt) | P.s.s. som ovan, fast här använder vi thrusters i stället för dysprop. |
| 3/ Stegsvär rotation i horisontalplanet | Fullt moment med hjälp av thrusters. Obs skalning av R till grader och och PSI till grader/20. |
| 4/ Stegsvär tippning | Fullt moment på båten med hjälp av vertikalthrusters. Vinkel och vinkelhastighet plottas. Att vi ej når 90 ⁰ beror på metacenteravståndet. Obs att vi får så kraftiga svängningar vid så stort pådrag. |

B Kroklinjig rörelse

- 1/ Svängradie horisontalplanet
Här har vi för olika ingångshastigheter lagt på fullt moment på båten med hjälp av horisontalthrusters, för att så snabbt som möjligt svänga båten. Dyspropellervarvtalet har hållits konstant under rörelsen. Båtens läge i förhållande till ban-
kurvan finns utritat i vissa punkter. Ingångshastigheter 0.5, 1, 1.5 m/s.
- 2/ Svängradie ytläge
Samma sak som ovan fast här är den främre thrustern avstängd. Att skillnaden ej blir större mellan denna simulering och den förra beror på att i den förra simuleringen den främre thrustern hade dålig effekt p.g.a. tvärströmning.
- 3/ Svängradie tippning
Fullt moment på båten från vertikal-
thrusters vid olika ingångshastigheter. Motsvarar ett försök att styra över ett hastigt uppdykande hinder. Konstant dyspropellervarvtal under hela rörelsen. Obs olika skalor på axlarna
- 4/ Undanmanöver
(horisontalplanet)
Ett försök till realistisk undanmanöver. Ett snabbt uppdykande hinder får piloten att slå full back på dyspropellrar-
na samtidigt som han med horisontal-
thrusters lägger på fullt moment på båten. Manövern gjord för initialhastighet 0.5, 1, 1.5 m/s. Olika initialvärde på Y0 för att åtskilja kurvorna.

C Bogsering

- | | |
|---------------------------|---|
| 1/ Utlöpning från 10 knop | Dyspropellrarna stilla. Initialhastighet 5m/s. |
| 2/ Bromsning från 10 knop | dyspropellrarna fullt back. Initialhastighet 5m/s. |
| 3/ Undanmanöver | Fullt back på dyspropellrarna samt fullt moment på båten från horisontaltrusters vid utgångshastighet 5 m/s. Båtens läge och hastighet utritade vid vissa tidpunkter. |

Känslighetsanalys

Med enkla medel kan man också göra känslighetsanalyser utan att ändra i själva programmet. Med kommando av typen

PAR ART:0

kan vi lätt ändra på samtliga parametrar i programmet. Vi har valt att studera lyftkrafternas inverkan på svängradien vid en ingångshastighet på 1.5 m/s. Det enklaste är då att ändra aspect ratio (ART) eftersom denna ingår som en konstant i lyftkrafterna. Normalt har vi ART=0.3.

Som synes påverkas svängradien mycket då vi ökar ART 3 ggr. vilket motsvarar en ökning av lyftkrafterna 3 ggr. Då vi minskar lyftkrafterna till noll händer emellertid ej så mycket. Då vi tror att vi snarare överskattat än underskattat storleken på lyftkrafterna, visar det alltså sig att lyftkrafterna ej spelar så stor roll, ivarje fall inte under denna manöver.

PLOT U XØP "STEGSVAR FRAMAT"

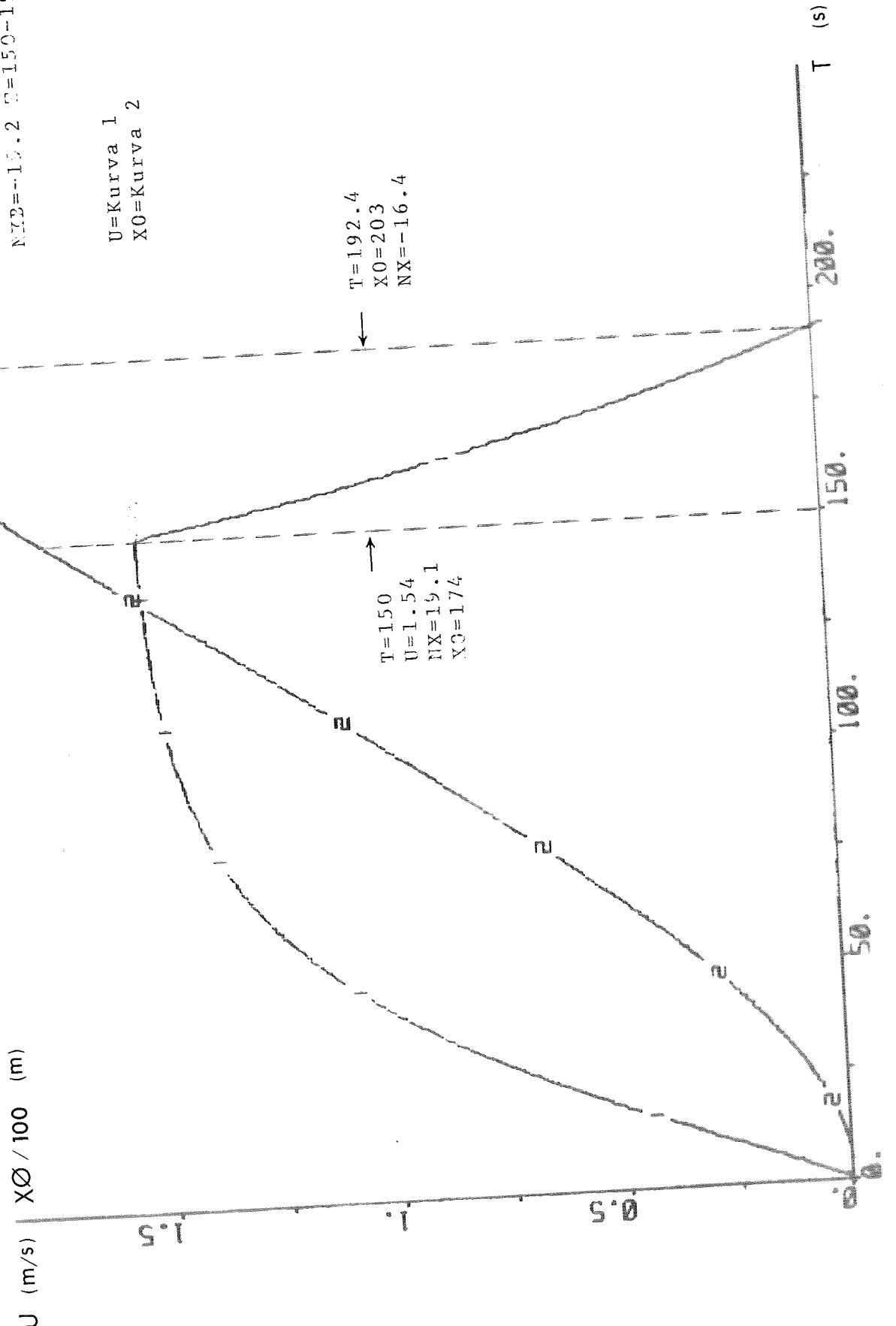
BÖRVÄRDEN

NXB=19.2 T=0-150
 NXB=-16.2 E=150-192.4

U=Kurva 1
 X0=Kurva 2

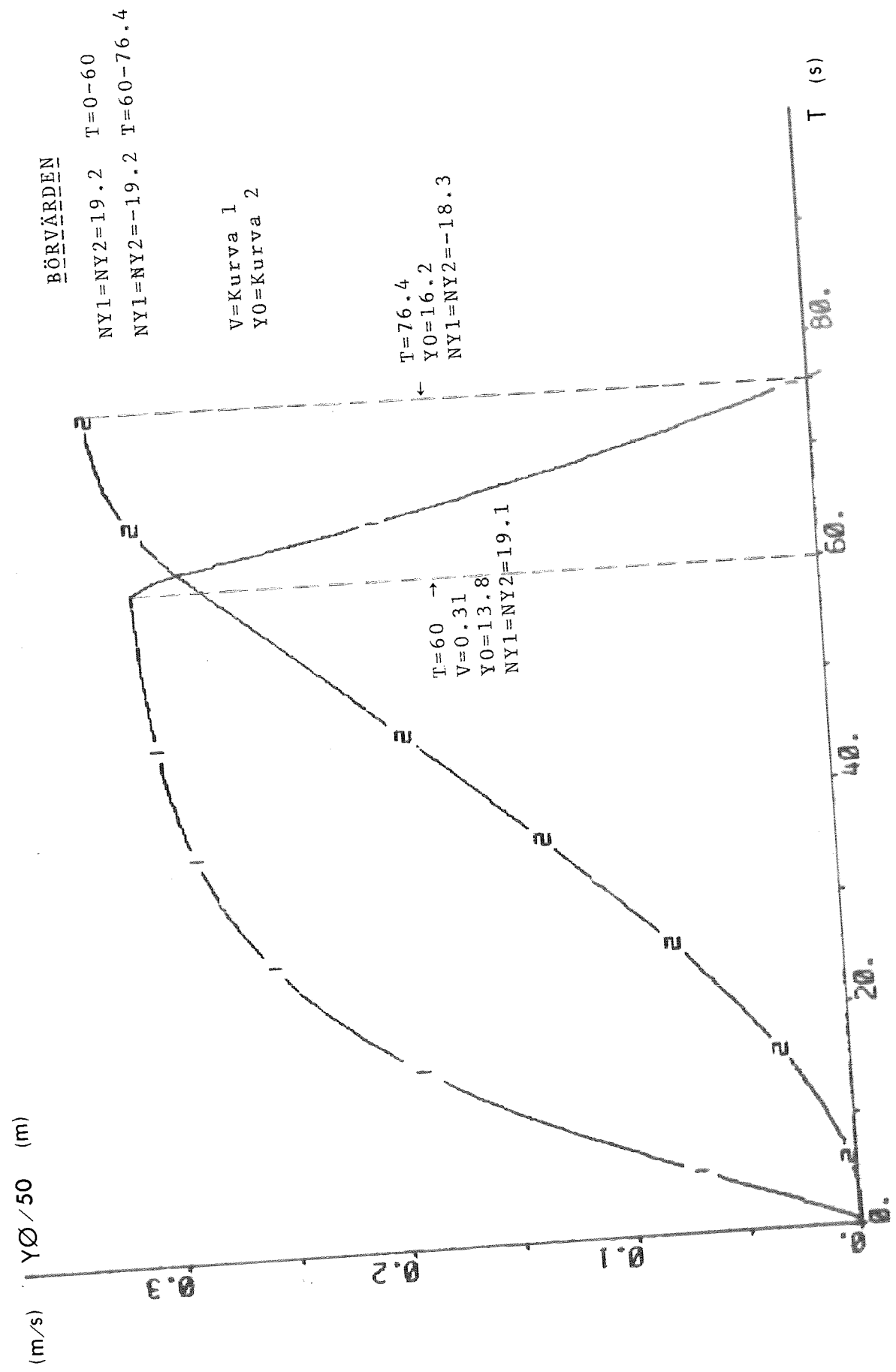
T=192.4
 X0=203
 NX=-16.4

T=150
 U=1.54
 NX=19.1
 X0=174



"STEGSVAR AT SIDAN"

PLOT V YØP



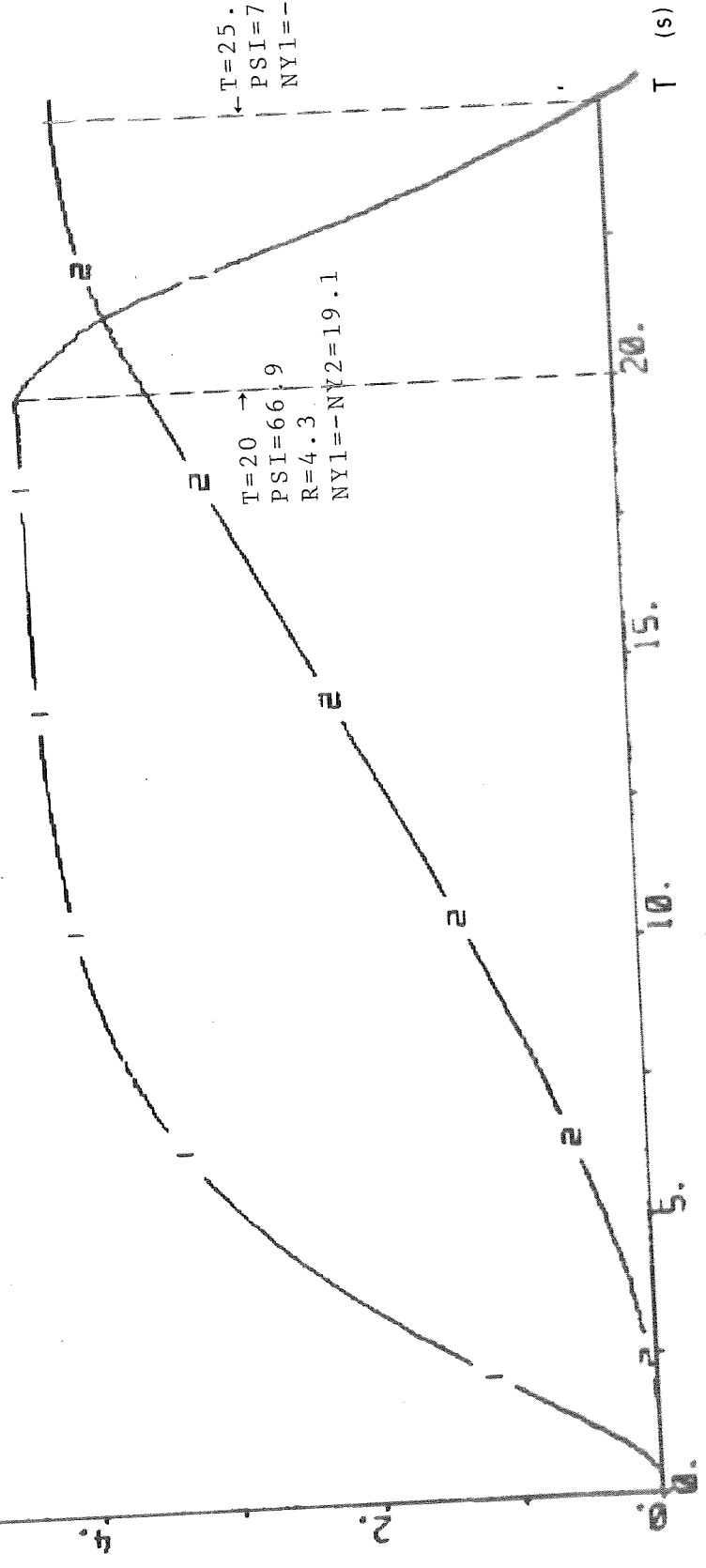
PLOT RP PSIP "STEGSVAR ROTATION"

grader/s) PSI /20 (grader)

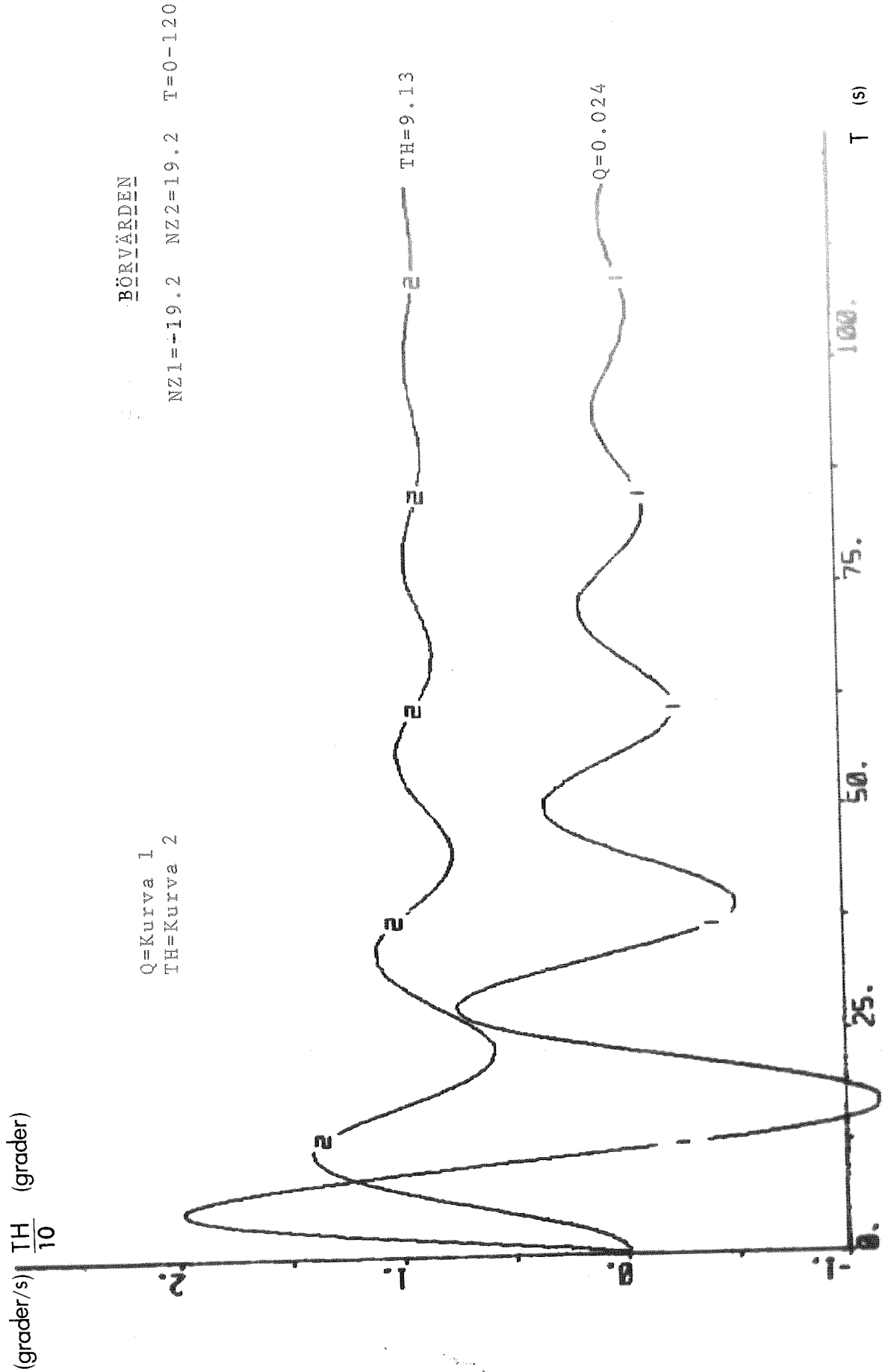
BÖRVÄRDEN

R=Kurva 1.
PSI=Kurva 2

NY1=19.2 NY2=-19.2 T=0-20
NY1=-19.2 NY2=19.2 T=20-25.4



PLOT OF THP "STEGSVAR TIPPING"



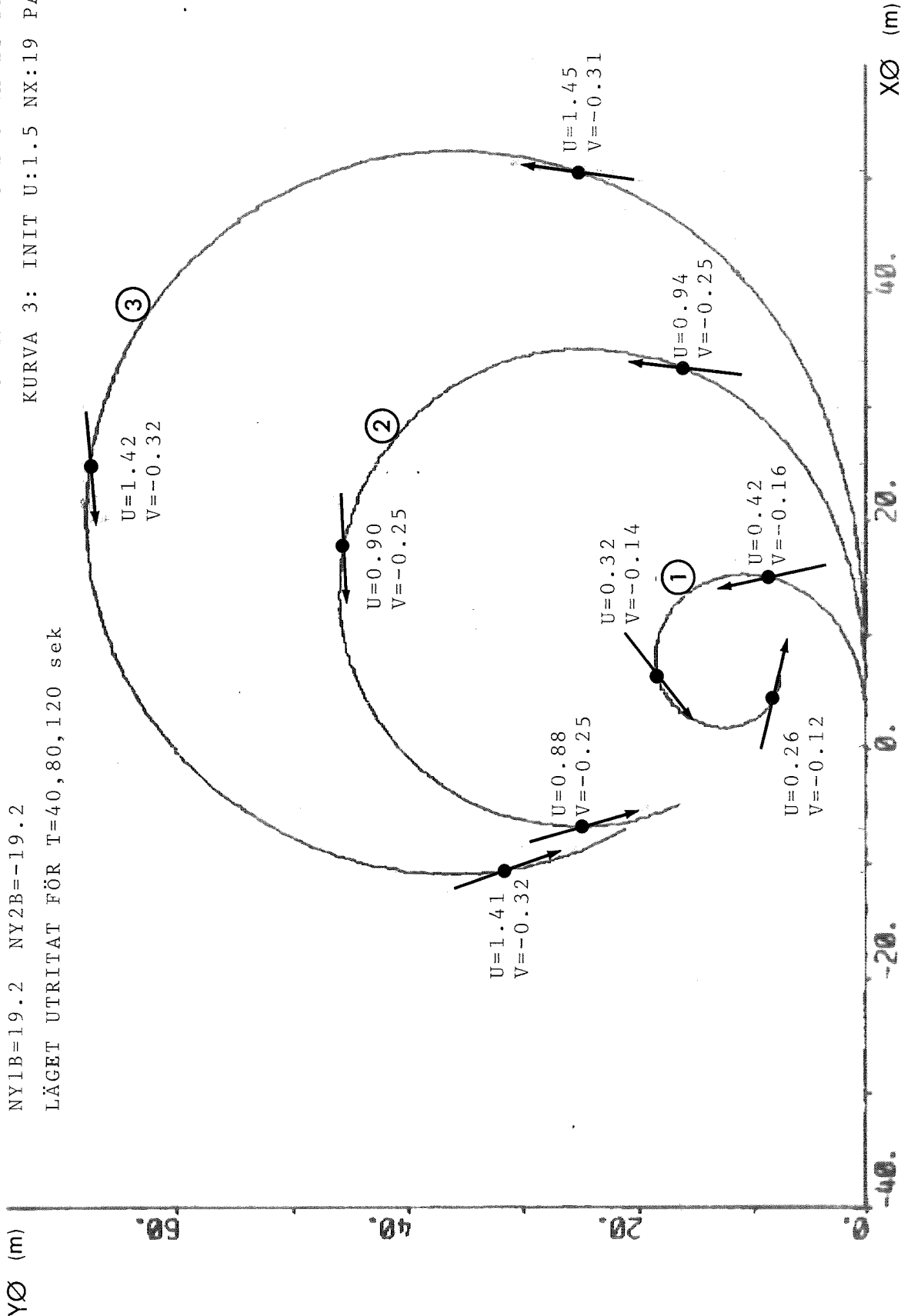
PLOT YØ (XØ) "SVANGRADIE"

KURVA 1: INIT U:0.5 NX:7 PAR NXB:7
 KURVA 2: INIT U:1.0 NX:13 PAR NXB:13
 KURVA 3: INIT U:1.5 NX:19 PAR NXB:19

FÖR SAMTLIGA KURVOR GÄLLER:

NY1B=19.2 NY2B=-19.2

LÄGET UTRITAT FÖR T=40,80,120 sek



KURVA 1: INIT U:0.5 NX:7
 PAR NXB:7

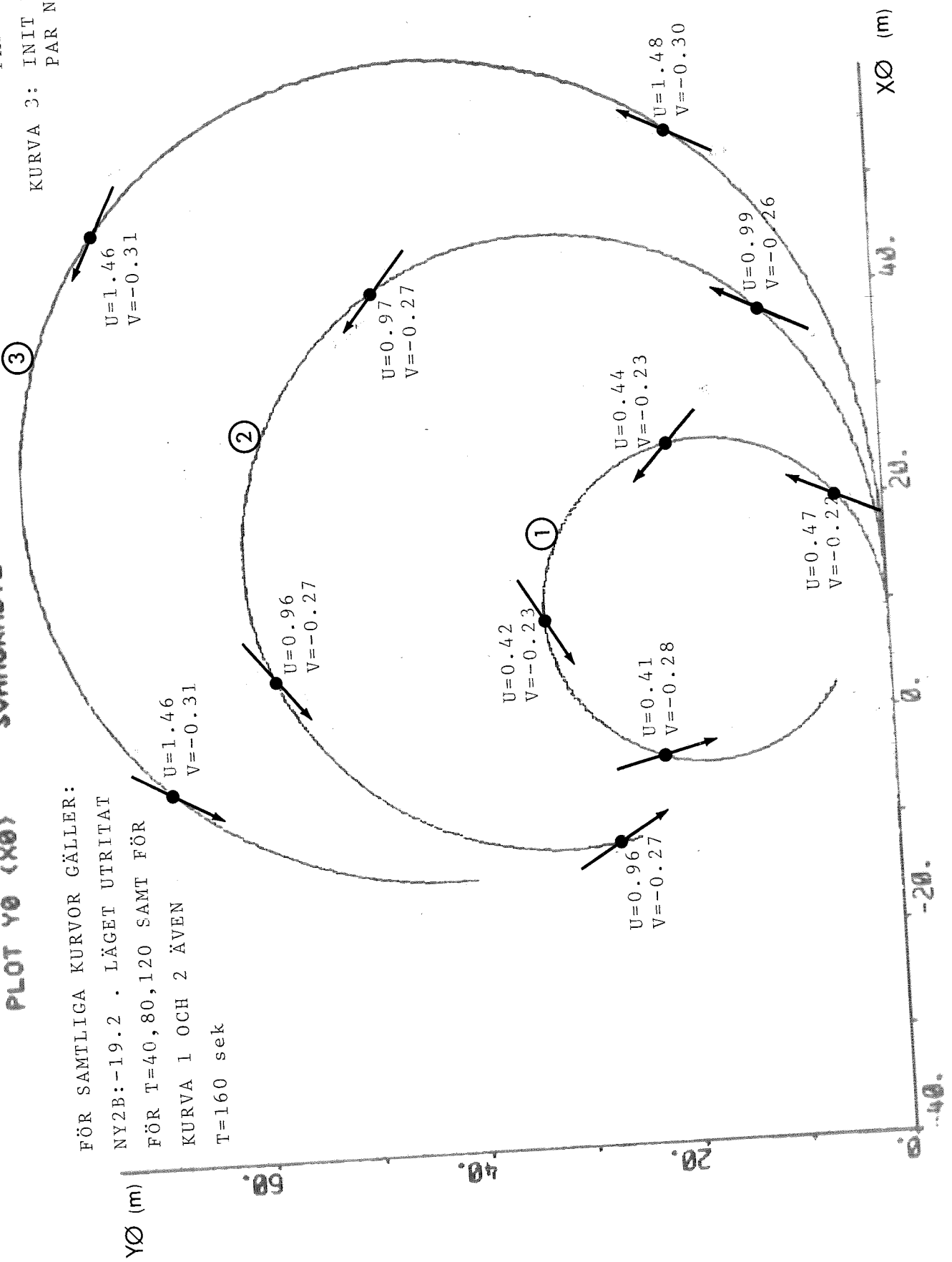
KURVA 2: INIT U:1.0 NX:13
 PAR NXB:13

KURVA 3: INIT U:1.5 NX:19
 PAR NXB:19

"SVANGRADIE YTLAGE"

PLOT YØ (XØ)

FÖR SAMTLIGA KURVOR GÄLLER:
 NY2B: -19.2 . LÄGET UTRITAT
 FÖR T=40, 80, 120 SAMT FÖR
 KURVA 1 OCH 2 ÄVEN
 T=160 sek



PLOT Z0 (X0) "SVANGRADIE VERTIKALPLANET"

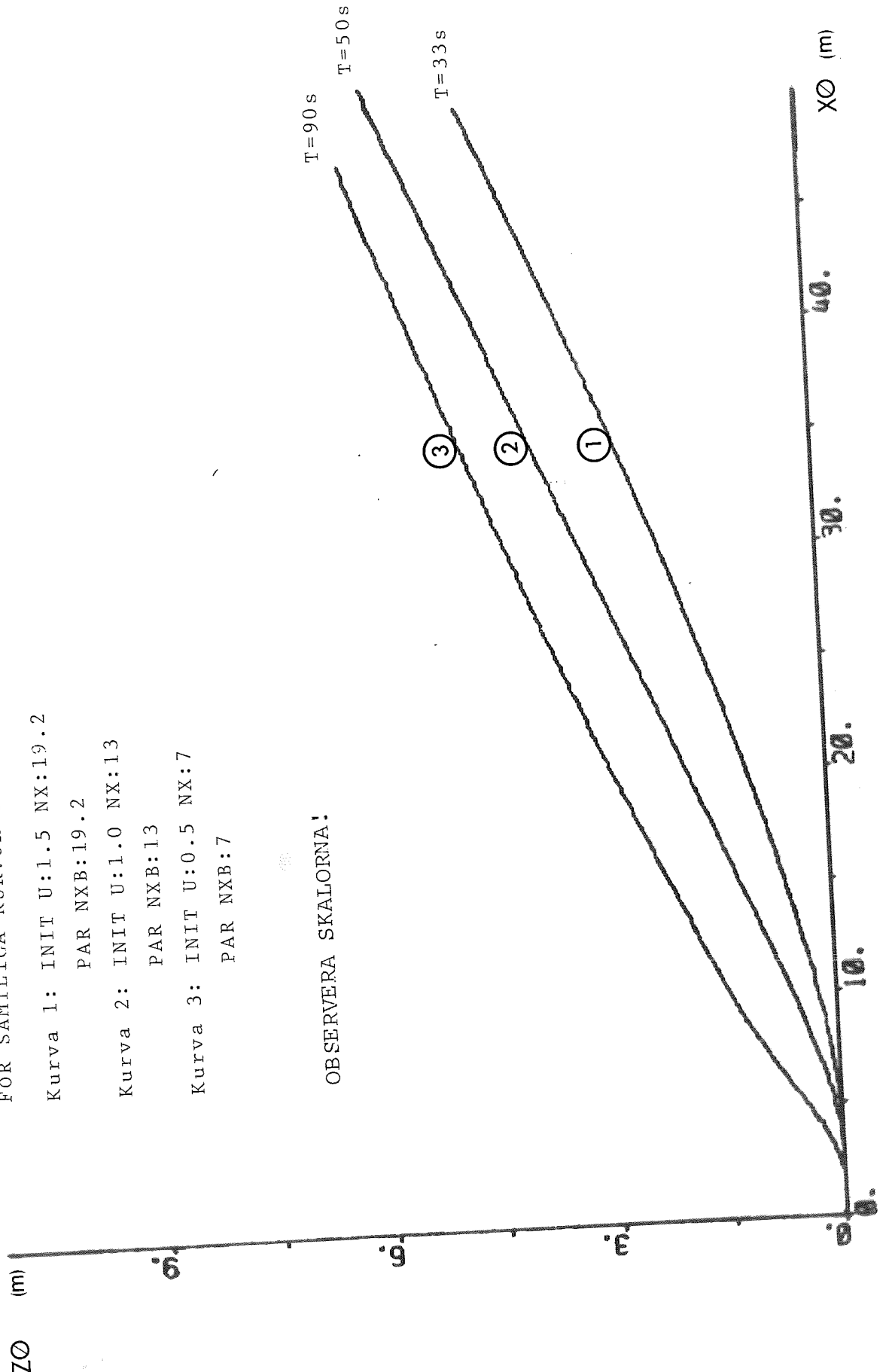
FÖR SAMTLICA KURVOR GÄLLER: NZ1B:19.2 NZ2B:-19.2

Kurva 1: INIT U:1.5 NX:19.2
PAR NXB:19.2

Kurva 2: INIT U:1.0 NX:13
PAR NXB:13

Kurva 3: INIT U:0.5 NX:7
PAR NXB:7

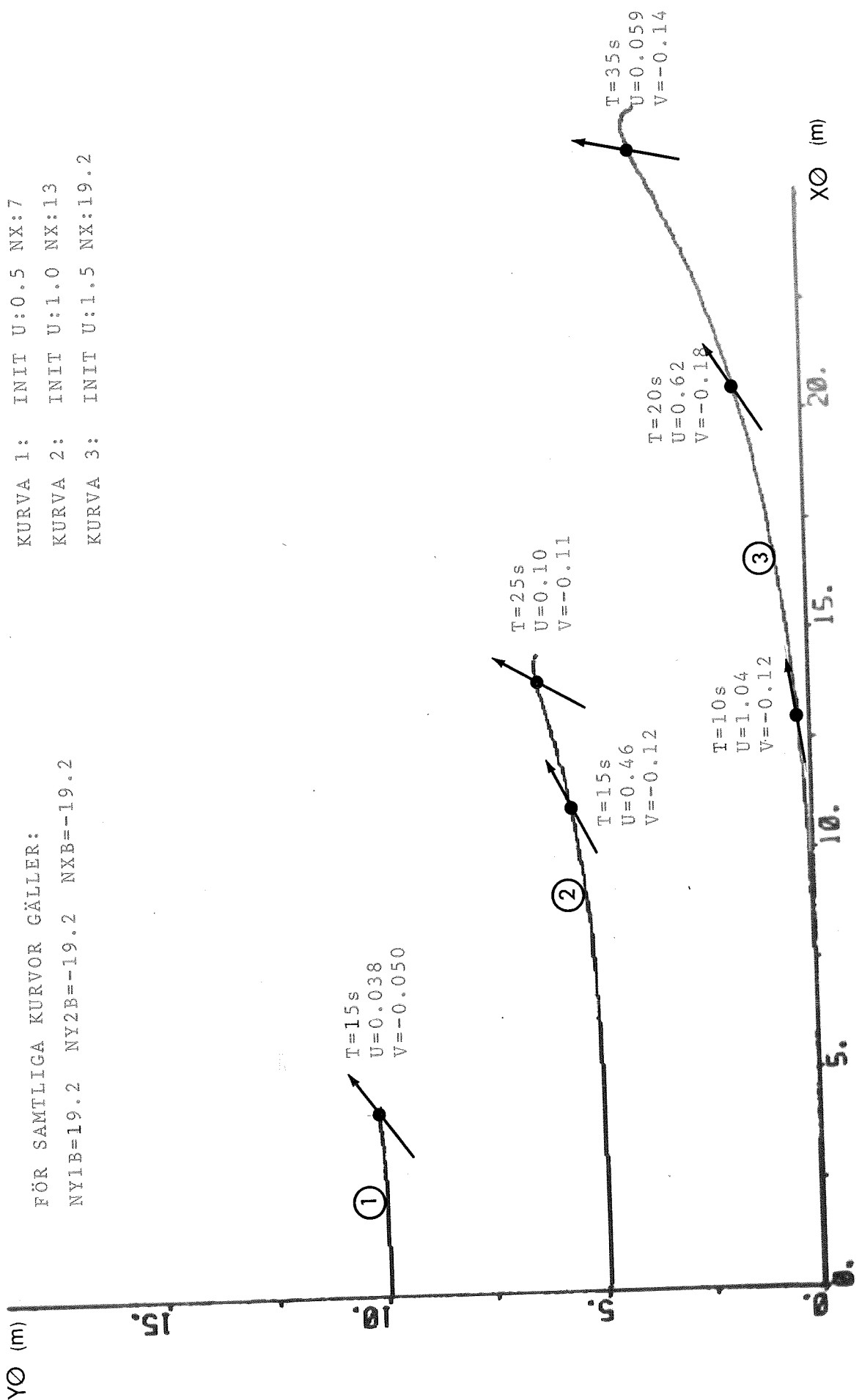
OBSERVERA SKALORNA!



PLOT Y0 (X0) "UNDANMANOEVER"

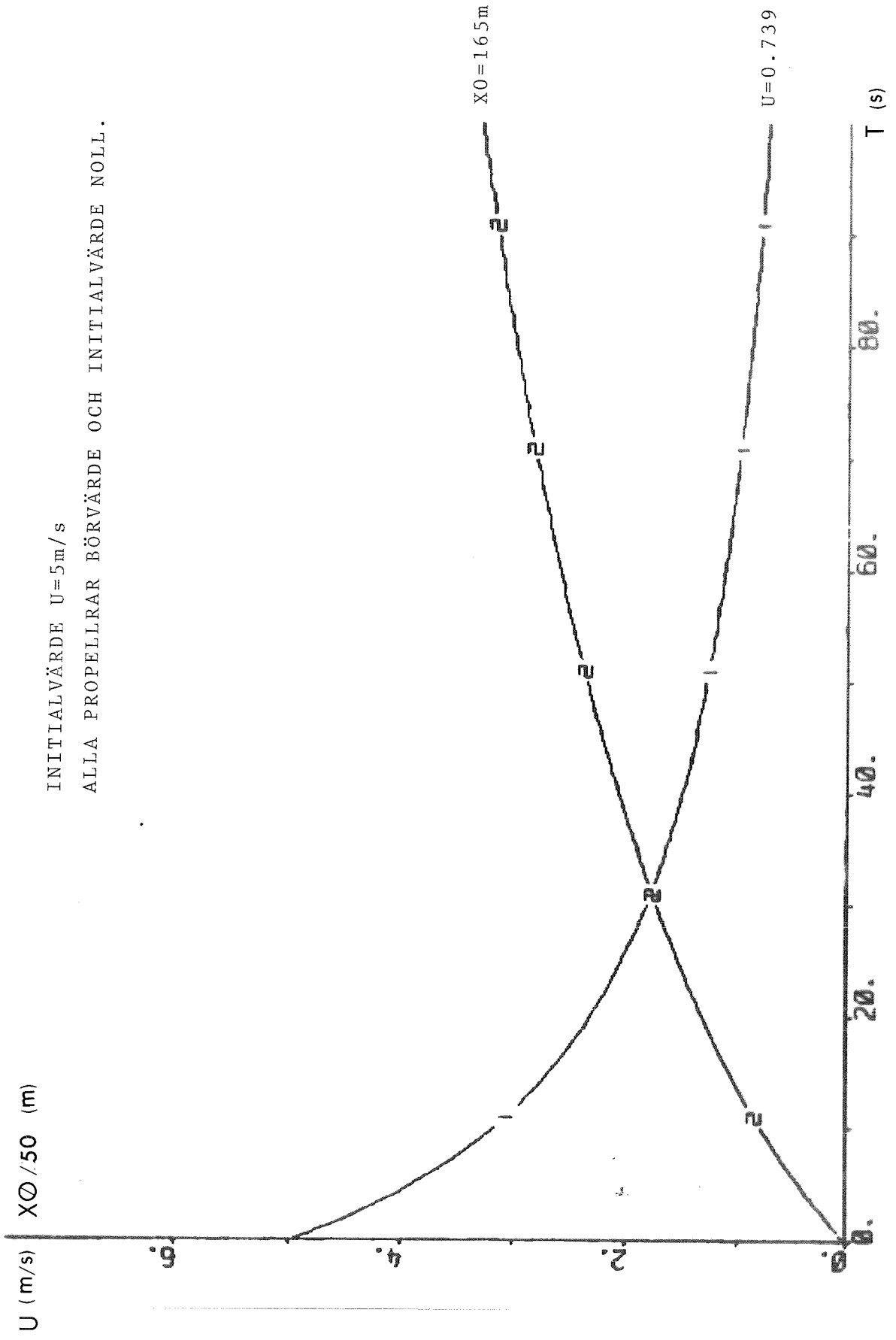
FÖR SAMTLIGA KURVOR GÄLLER:
 NY1B=19.2 NY2B=-19.2 NXB=-19.2

KURVA 1: INIT U:0.5 NX:7
 KURVA 2: INIT U:1.0 NX:13
 KURVA 3: INIT U:1.5 NX:19.2

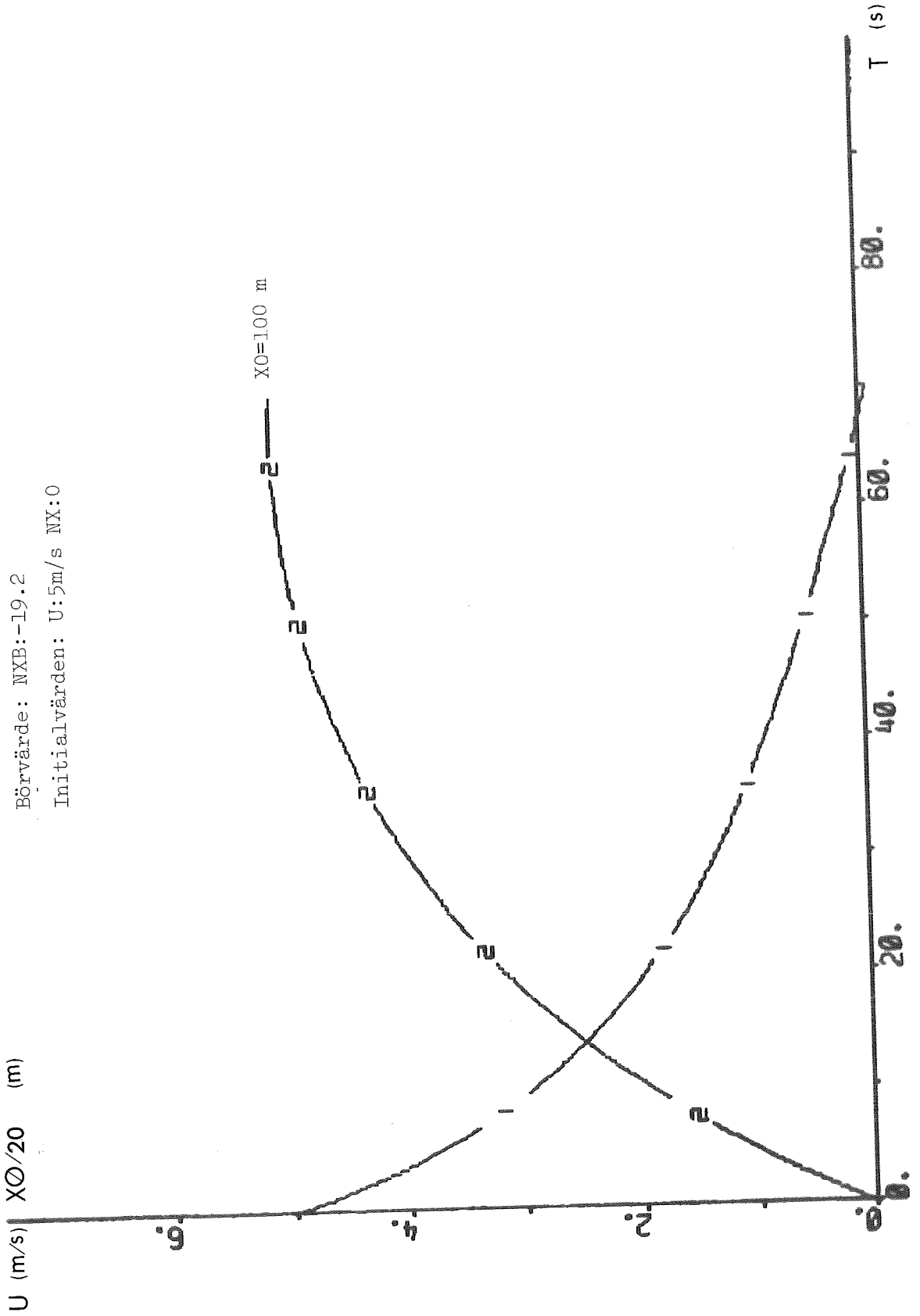


PLOT U XOP

"UTLOPNING 10 KNOP"

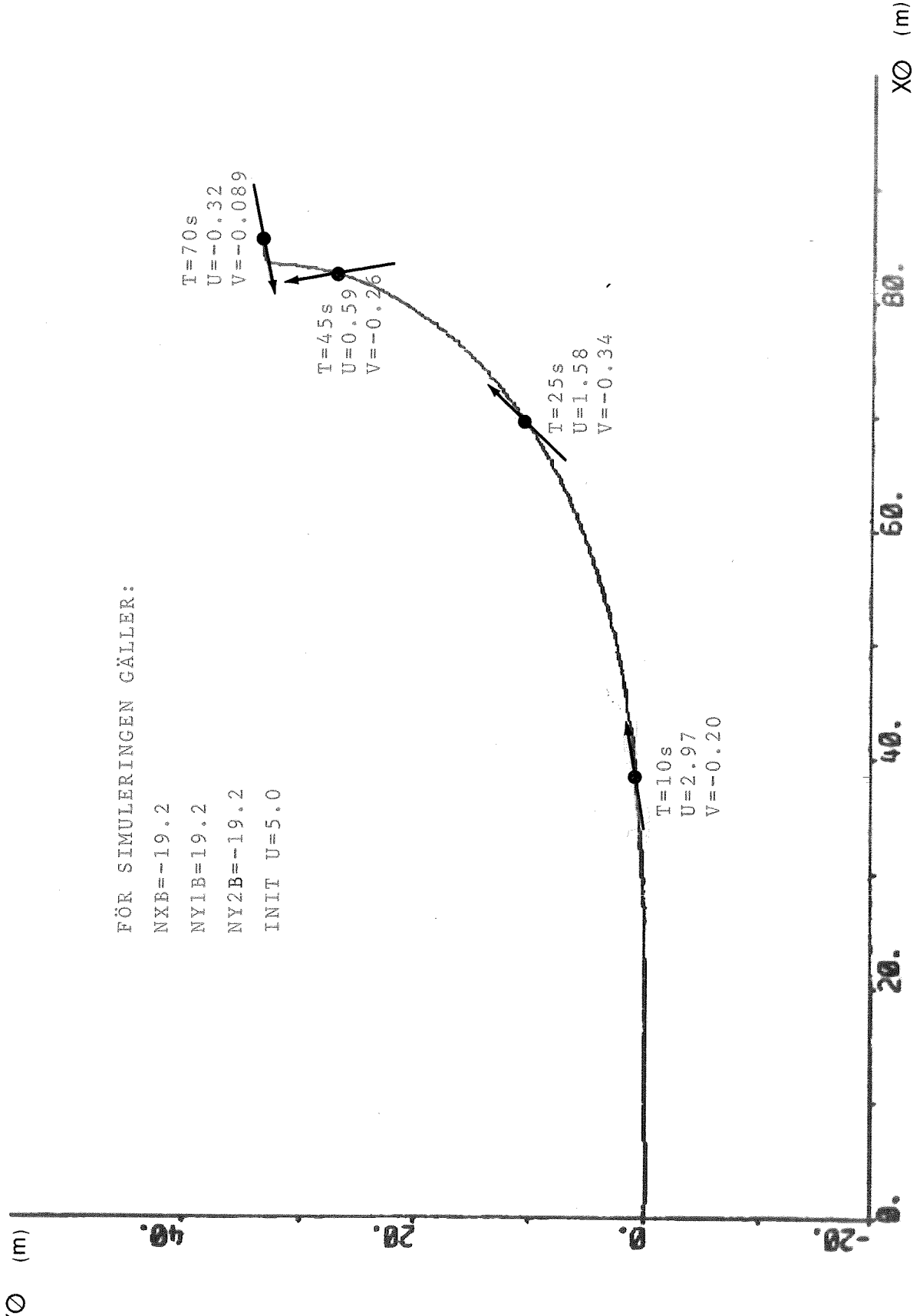


PLOT U XOP "BROMSNING 10 KNOP"



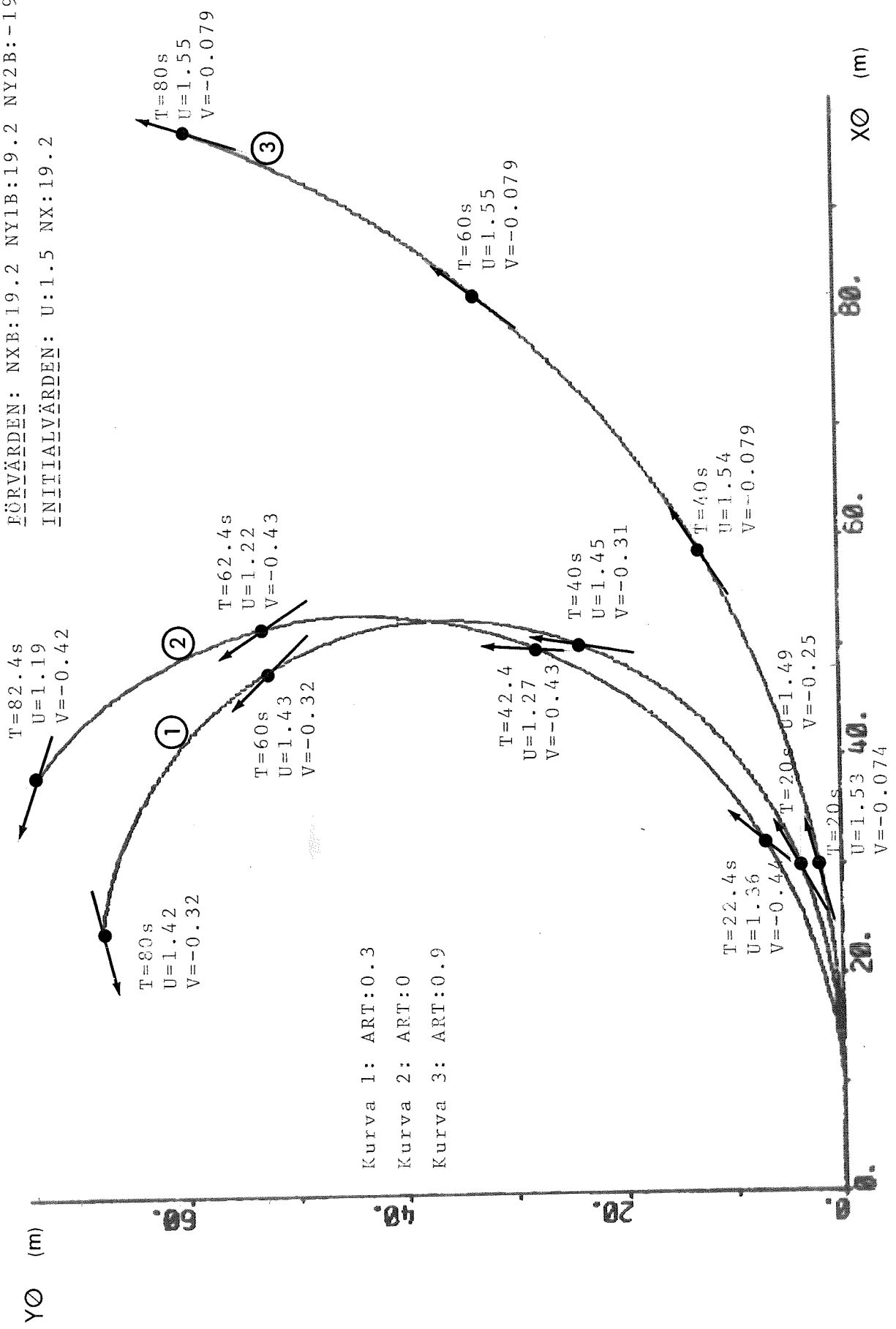
PLOT Y0 (X0)

"UNDANMANOVER 10 KNOP"



PLOT YØ (XØ) "KANSLIGHETSANALYS LYFTKRAFTER"

FÖRVÄRDEN: NXB:19.2 NY1B:19.2 NY2B:-19.2
 INITIALVÄRDEN: U:1.5 NX:19.2



Kurva 1: ART:0.3
 Kurva 2: ART:0
 Kurva 3: ART:0.9

SLUTORD

Den modell vi skapat bygger dels på litteraturstudier, och dels på information från Kockums. I de fall då modellens rimlighet kan bedömas, stämmer egenskaperna ganska bra med verkligheten. Trots detta är modellen ganska grov, och vid mera komplicerade rörelser kan modellens eventuella svagheter framträda tydligare. Vårt arbete kan ses som det första i en rad, där man förfinar modellen allt mer, delvis med hjälp av praktiska erfarenheter.

En intressant vidareutveckling vore att köra programmet i reell tid, och låta insignalerna komma direkt ifrån ett par styrspakar. En sådan simulator bör kunna konstrueras utan alltför stora kostnader, och skulle kunna användas i utbildnings och undervisningssyfte.

BETECKNINGAR

u, v, w	U, V, W	Hastigheter i båtens koordinat-system
q, r	Q, R	Vinkelhastigheter längs båtens y- och z-riktningar
V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}	$VX0, VY0, VZ0$	Vattenström i jordfast koordinat-system
$U_{str}, V_{str}, W_{str}$	UST, VST, WST	Vattenström i båtens koordinat-system
$u1, v1, w1$	$U1, V1, W1$	Vattnets hastighet relativt båten
$v3, v4$	$V3, V4$	$v3=v1+4.69r$ $v4=v1-4.69r$
$w3, w4$	$W3, W4$	$w3=w1+4.05q$ $w4=w1-4.05q$
$v2, w2$	$V2, W2$	$v2=v1+rL/2$ $w2=w1-qL/2$
$X0, Y0, Z0$	$X0, Y0, Z0$	Lägeskoordinater i ett jordfast koordinatsystem
θ, ψ	TH, PSI	Vridningsvinklar kring $Y0$ och $Z0$ axlarna
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	$ALFA, BETA, GAM, DEL$	Anfallsvinklar
X_L, Y_L, Z_L	XL, YL, ZL	Lyftkrafter
X_D, Y_D, Z_D	XD, YD, ZD	Friktionskrafter
$XPR, YPR1, \dots, ZPR2$	$XPR, \dots, ZPR2$	Propellerkrafter
M_L, N_L	ML, NL	Moment p.g.a. lyftkrafter
M_D, N_D	MD, ND	Moment p.g.a. friktionskrafter
MPR, NPR	MPR, NPR	Moment p.g.a. propellerkrafter
M	$MX, \dots, MZ2$	Moment på propelleraxlarna från motorn
$Q_x, Q_{y1}, \dots, Q_{z2}$	$QX, QY1, \dots, QZ2$	Moment på propelleraxlarna från vattnet
FI	$FIY1, \dots, FIZ2$	Förhållandet mellan vattenströmmarna tvärs och längs propelleraxlarna (thrusters)
TS	$TSY1, \dots, TSZ2$	Kraft-tvärströmningskoefficient
MTS	$MTSY1, \dots, MTSY2$	Moment-tvärströmningskoefficient
$nx, ny1, \dots, nz2$	$NX, NY1, \dots, NZ2$	Varvtal

L	L	Båtens längd
a	ART	Aspect ratio
ρ	RHO	Vattnets densitet
A	A	Skrovets effektiva area sett från sidan
D_{ru}, D_{rv}, D_{rw}	DRU, DRV, DRW	Friktionskonstanter
m	M	Båtens displacement
k_1, k_2, k_3	K1, K2, K3	Massökningskoefficienter (Lamb)
I_z, I_y	IB	Båtens tröghetsmoment kring y- och z-axlarna
p_e	PE	Effektiv pitch för thrusters
I	I	Tröghetsmoment för rotor axel och propeller
n_{xb}, \dots, n_{z2b}	NXB, \dots, NZ2B	Börvärden för propellervarvtal
g_m	GM	Metacenteravståndet

LITTERATUR , REFERENSER

- 1/ Martin A. Abkowitz: Stability and motion control
of ocean vehicles
- 2/ Sir Horace Lamb: Hydrodynamics
- 3/ L.M. Milne-Thomson: Theoretical Hydrodynamics
- 4/ G. Temple: Fluid Dynamics
- 5/ Principals Of Naval Architecture
- 6/ SSPA-rapport
- 7/ John L. Beveridge: Bow-Thruster Jet Flow, Journal Of
Ship Research, September 1971
- 8/ Chislett, Björheden: Influence Of Ship Speed On The
Effectiveness Of A Lateral-Thrust
Unit, Hya Report Hy-8, April 1966.
- 9/ Motorkarakteristik, Danfoss,
Mars 1976.
- 10/ H. Elmqvist SIMNON, Report 7502 April 1975
Department of Automatic Control
Lund Institute of Technology.